

EPM/RT-97/03

*Écoulement non saturé à travers les couvertures avec effets de barrière
capillaire (CEBC) : modélisation physique et numérique avec
application au drainage minier acide*

Bruno Bussière⁽¹⁾ Michel Aubertin⁽²⁾ Robert P. Chapuis⁽²⁾

⁽¹⁾ Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM)
445, boul. De l'Université, Rouyn-Noranda (Qué) J9X 5E4

⁽²⁾ École Polytechnique, Département génie minéral, section génie des mines

École Polytechnique de Montréal

Février 1997

gratuit

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite des auteurs.

Dépôt légal, Février, 1997
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

Écoulement non saturé à travers les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) : modélisation physique et numérique avec application au drainage minier acide (EPM/RT-97/03)

Bruno Bussière, Michel Aubertin et Robert P. Chapuis (génie minéral)

Pour se procurer une copie de ce document, s'adresser aux :

Éditions de l'École Polytechnique de Montréal
École Polytechnique de Montréal
Case postale 6079, succursale Centre-Ville
Montréal (Québec) H3C 3A7
Téléphone : (514) 340-4473
Télécopie : (514) 340-3734

Compter 0,10\$ par page et ajouter 3,00\$ pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Régler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'École Polytechnique de Montréal.

Nous n'honorons que les commandes accompagnées d'un paiement, sauf s'il y a entente préalable dans le cas d'établissement d'enseignement, de société ou d'organismes canadiens.

AVANT-PROPOS

Le présent document est un ouvrage rédigé à la suite d'une recherche bibliographique et de travaux de modélisation numérique des écoulements dans les couvertures multicouches. Ce document a été réalisé dans le but de faire le point sur l'état des connaissances relatives à certains aspects particuliers, notamment sur les facteurs hydriques influant sur l'efficacité d'un système de recouvrement pour limiter la production d'eau de drainage minier acide. Compte tenu de l'abondante littérature sur le sujet, les auteurs ont jugé qu'il serait profitable à la collectivité d'éditer une telle revue.

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des ressources naturelles (MRNQ), le CANMET et la compagnie ITEC Minéral Inc. pour le support financier fourni par le biais du programme NEDEM/MEND. Les auteurs remercient également les professeurs Yves Comeau et Denis Marcotte qui ont revu ce document.

RÉSUMÉ

Les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) sont de plus en plus utilisées pour isoler des déchets ayant un potentiel de contamination environnemental. C'est le cas notamment des résidus miniers générateurs de drainage minier acide (DMA). Un effet de barrière capillaire est présent lorsqu'un matériau grossier est placé sous ou sur un matériau fin. Si le contraste en terme de caractéristiques de rétention d'eau est suffisamment important, les couches grossières aident à limiter l'écoulement dans le matériau fin, favorisant ainsi le maintien d'un haut degré de saturation dans celui-ci. Des études en laboratoire ainsi que des analyses numériques ont permis d'identifier les principaux paramètres qui influencent le comportement hydrogéologique de telles couvertures. Parmi ceux-ci, on retrouve les caractéristiques de rétention d'eau des matériaux et l'épaisseur des différentes couches. Un autre facteur qui influence le comportement des CEBC, et qui a souvent été négligé, est la géométrie globale de la couverture. En effet, l'angle et la longueur de la pente influencent la quantité d'eau déviée par une couverture.

Dans ce rapport, on revoit les principes qui sous-tendent le comportement hydrique des CEBC, en insistant plus particulièrement sur les travaux de modélisation physique et numérique retrouvés dans la littérature ou réalisés récemment par les auteurs. L'emphasis est surtout mise sur les situations associées au contrôle de la production de DMA.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	V
RÉSUMÉ	VI
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XVI
LISTE DES SYMBOLES	XVII
CHAPITRE I - INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II - ÉCOULEMENTS NON SATURÉS.....	5
2.1 Écoulement de l'eau en milieu non saturé	5
2.2 Caractéristiques des matériaux poreux en milieu non saturé	8
2.2.1 Courbes caractéristiques de succion.....	8
2.2.2 Fonctions de perméabilité	14
CHAPITRE III - LES MÉTHODES NUMÉRIQUES	22
3.1 Équations d'écoulement utilisées.....	22
3.2 Approche générale.....	25
3.3 Méthode par différences finies.....	26

3.4 Méthode des éléments finis	27
3.5 Différents modèles numériques pour l'écoulement en milieu non saturé	30
CHAPITRE IV - EFFETS DE BARRIÈRE CAPILLAIRE : DESCRIPTION ET MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES 1D	33
4.1 Effets de barrière capillaire	33
4.2 Schématisation du phénomène en une seule dimension	36
4.3 Modélisations numériques de CEBC	37
4.3.1 Modélisations numériques tirées de la littérature.....	38
4.3.2 Autres modélisations numériques	52
4.3.3 Analyse des résultats	64
CHAPITRE V - ÉCOULEMENT DANS LES COUVERTURES INCLINÉES	86
5.1 Équations d'écoulement	86
5.1.1 Régime permanent	87
5.1.2 Régime transitoire	89
5.2 Comportement hydrogéologique d'un système non uniforme incliné.....	91
5.3 Effets de la pente sur l'efficacité des CEBC	92
5.4 Études de cas tirées de la littérature	103
5.4.1 Travaux de laboratoire et de terrain	104
5.4.2 Simulations à l'aide de solutions analytiques	107
5.4.3 Simulations numériques.....	113
5.5. Autres considérations.....	121

5.6 Conclusions sur l'écoulement dans les systèmes inclinés.....	124
CHAPITRE VI - TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX EN COURS : OUTILS DE LABORATOIRE ET DE TERRAIN	143
6.1 Cellules expérimentales du site Manitou	145
6.1.1 Configuration des cellules.....	145
6.1.2 Propriétés des matériaux utilisés dans les cellules.....	146
6.1.3 État en place des matériaux dans les cellules.....	151
6.1.4 Instrumentation	152
6.2 Site LTA.....	160
6.2.1 Design du recouvrement et caractéristiques des matériaux.....	160
6.2.2 Instrumentation du site	163
6.3 Essais sur systèmes inclinés au laboratoire.....	164
6.3.1 Dispositif expérimental	164
6.3.2 Configurations et caractéristiques des essais	165
6.4 Colonnes de drainage (cas 1D).....	166
6.5 Résultats préliminaires et anticipés.....	167
CHAPITRE VII - CONCLUSION.....	183
RÉFÉRENCES.....	185

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Volume élémentaire de sol avec le bilan des débits (tirée de Hillel, 1980a).	20
Figure 2.2 : Courbes caractéristiques de succion schématisées pour un sable et un silt (tirée d'Aubertin et al., 1995b).....	21
Figure 2.3 : Fonctions de perméabilité schématisée pour un sable et un silt (tirée d'Aubertin et al., 1995b).	21
Figure 4.1 : Schématisation du mouvement de l'eau dans une barrière capillaire (tirée de Shakelford et al., 1994).	66
Figure 4.2 : Courbes caractéristiques de succion schématisées pour un sable et un silt, présentées dans le plan ψ - θ_n (tirée d'Aubertin et al., 1995b).	67
Figure 4.3 : Comparaison, en terme de teneur en eau volumique et de succion, du comportement de systèmes avec ou sans effet de barrière capillaire (tirée de Miller (1969)	68
Figure 4.4 : Profils de pression dans le temps pour différents cas : a) Silt par dessus un sable, b) Silt Touchet par dessus un sable medium et c) Silt Touchet par dessus un sable grossier (tirée d'Akindunni et al., 1991).	69
Figure 4.5 : Profils de saturation dans le temps pour différents cas : a) Silt par dessus un sable, b) Silt Touchet par dessus un sable medium et c) Silt Touchet par dessus un sable grossier (tirée d'Akindunni et al., 1991).	70
Figure 4.6 : Représentation schématique de l'essai en colonne (tirée de Sydor, 1992).....	71

Figure 4.7 : Exemple de résultats des simulations numériques en terme de succion et saturation versus l'élévation (tirée de Sydor, 1992).	72
Figure 4.8 : Comparaison entre les résultats de l'essais en colonne et les simulations numériques (tirée de Sydor, 1992).	73
Figure 4.9 : Configuration des lysimètres et du modèle conceptuel utilisé pour les simulations numériques (tirée de Fayer et al., 1992).	74
Figure 4.10 : Comparaison entre les résultats mesurés sur le terrains et ceux simulés numériquement pour le cas des précipitations ambiantes (tirée de Fayer et al., 1992).	75
Figure 4.11 : Comparaison, en terme de stockage, entre les valeurs mesurées et celles simulées (tirée de Fayer et al., 1992).	75
Figure 4.12 : Résultats des modélisations réalisées avec le logiciel HELP (tirée de Woyshner et Yanful, 1995).	76
Figure 4.13 : Résultats de l'analyse de sensibilité des modélisations réalisées à l'aide de HELP pour les données météorologiques provenant de Normandin, Québec (tirée de Woyshner et Yanful, 1995).	76
Figure 4.14 : Résultats de l'analyse numérique d'une couverture multicouche réalisée à l'aide de SEEP/W (tirée de Woyshner et Yanful, 1995).	77
Figure 4.15 : Teneurs en eau massique réalisées à l'été 1993 (tirée de Woyshner et Yanful, 1995).	78
Figure 4.16 : Courbes caractéristiques de succion des matériaux étudiés	79
Figure 4.17 : Fonctions de perméabilité des matériaux étudiés	79
Figure 4.18 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 1	80
Figure 4.19 : Profil de succion pour la modélisation 1	80
Figure 4.20 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 2	81
Figure 4.21 : Profil de succion pour la modélisation 2	81

Figure 4.22 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 3	82
Figure 4.23 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 4	82
Figure 4.24 : Profil de la succion pour la modélisation 4	83
Figure 4.25 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 5	83
Figure 4.26 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 6	84
Figure 4.28 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 7	85
Figure 4.29 : Profil de la succion pour la modélisation 7	85
Figure 5.1 : Systèmes de coordonnées utilisés dans ce document (tirée de Zaslavsky et Sinai, 1981b).....	126
Figure 5.2 : Paramètres impliqués dans l'écoulement d'un système bi- couche incliné (tirée de Zaslavsky et Sinai, 1981b).	126
Figure 5.3 : Distribution du flux latéral avec la profondeur pour différents taux de précipitation (tirée de Wallach et Zaslavsky, 1991).....	127
Figure 5.4 : Schématisation d'une barrière capillaire inclinée avec une couche fine anisotrope (tirée de Stormont, 1995a).	127
Figure 5.5 : Évolution du front de mouillage mesuré au laboratoire pour un système incliné (tirée de Miyazaki, 1988).	128
Figure 5.6 : Mesures de l'accumulation du drainage pour un système uniforme et non uniforme incliné à différents angles avec différents taux de précipitation (lignes continues pour 100 mm h ⁻¹ et lignes pointillées pour 10 mm h ⁻¹) (tirée de Miyazaki, 1988).	128
Figure 5.7 : Configurations géométriques des cellules expérimentales (tirée de Larson et al., 1988).....	129
Figure 5.8 : Degré de saturation dans les couches de la cellule 2 (tirée de Larson et al., 1988).	130
Figure 5.9 : Vue en section du montage pour les tests sur les barrières capillaires (tirée de Stormont, 1995b).....	130

Figure 5.10 : Configuration géométriques des recouvrements étudiés (tirée de Stormont, 1995b).	131
Figure 5.11 : Résultats des simulations en terme de coefficient d'anisotropie versus le taux de précipitation relatif (tirée de Zaslavski et Sinai, 1981b).	131
Figure 5.12 : Graphique de la longueur effective du bris capillaire versus le rapport d'anisotropie pour deux niveau de précipitation (tirée de Stormont, 1995a).	132
Figure 5.13 : Résultats des simulations pour les différentes solutions analytiques dans le plan longueur effective du bris capillaire en fonction de l'anisotropie.	132
Figure 5.14 : Modèle simulé par Frind et al. (1976) avec les conditions frontières.	133
Figure 5.15 : Relation entre la pression critique à l'interface en fonction de la pente (tirée de Frind et al., 1976).	134
Figure 5.16 : Pression à l'interface pour différents points de l'interface (tirée de Frind et al., 1976).	135
Figure 5.17 : Relation entre la pression critique et l'épaisseur de la couche fine pour des systèmes conçus avec du sable (tirée de Frind et al., 1976).	135
Figure 5.18 : Relation entre la pression critique et l'épaisseur de la couche fine pour des systèmes conçus avec du silt (tirée de Frind et al., 1976).	136
Figure 5.19 : Transmissivité latérale versus le temps de début de pluie pour différentes intensités de pluie (tirée de Wallach et Zaslavsky, 1991).	136
Figure 5.20 : Modèle de barrière capillaire simulé (tirée de Oldenburg et Pruess, 1993).	137

Figure 5.21 : Comparaison entre les résultats des simulations numériques et ceux de la solution numérique de Ross (tirée de Oldenburg et Pruess, 1993).....	137
Figure 5.22 : Profil de succion des simulations d'un système de recouvrement incliné pour différents temps (tirée de Yeh et al., 1994).	138
Figure 5.23 : Profil de teneur en eau des simulations d'un système de recouvrement incliné pour différents temps (tirée de Yeh et al., 1994).	139
Figure 5.24 : Évolution du profil de saturation d'une section pris dans le haut de la pente (pente de 50 m de longueur) après une sécheresse de 60 jours, pour une pente 4 % (tirée d'Aubertin et al., 1997).	140
Figure 5.24 : Évolution du profil de saturation d'une section pris dans le haut de la pente (pente de 50 m de longueur) après une sécheresse de 60 jours, pour une pente 2 % (tirée d'Aubertin et al., 1997).	140
Figure 5.26 : Exemple d'infiltration avec (c, d, e) ou sans (a, b) phénomènes d'instabilité du front de mouillage (tirée de Baker et Hillel, 1990)	141
Figure 5.27 : Variation de l'anisotropie en fonction de la succion (tirée de McCord et al., 1991)	142
Figure 6.1 : Plan de la cellule 1.....	169
Figure 6.2 : Plan de la cellule 2.....	169
Figure 6.3 : Plan de la cellule 3.....	170
Figure 6.4 : Plan de la cellule 4.....	170
Figure 6.5 : Plan de la cellule 5.....	171
Figure 6.6 : Plan de la cellule 6.....	171

Figure 6.7 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés dans la construction des cellules sur le site Manitou.	172
Figure 6.8 : Emplacement des instruments dans les 5 cellules avec CEBC.	173
Figure 6.9 : Vue en plan du site LTA (tirée de Golder et associés, 1996)	174
Figure 6.10 : Vue en section de la barrière multicouche LTA avec l'emplacement approximatif des instruments (tirée de Ricard et al., 1997).	175
Figure 6.11 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés pour la construction de la barrière de recouvrement sur le site LTA (tirée de Golder et associés, 1996).	176
Figure 6.12 : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur les matériaux utilisés pour la construction de la CEBC sur LTA (tirée de Golder et associés, 1996).	177
Figure 6.13 : Courbes caractéristiques de succion typiques pour les différents matériaux de construction utilisés sur le site LTA (tirée de Ricard et al., 1997).	178
Figure 6.14 : Dispositif expérimental proposé pour la réalisation des essais inclinés.	179
Figure 6.15 : Courbes granulométriques du sable qui sera utilisé dans les essais en laboratoire.	180
Figure 6.16 : Représentation schématique du montage pour les essais en colonne (tirée d'Aachib et al., 1993).	181
Figure 6.17 : Premiers résultats provenant des cellules expérimentales sur le site Manitou.	182

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Résumé des caractéristiques des principaux modèles numériques existants.....	31
Tableau 4.1 : Principales caractéristiques du logiciel SEEP/W	54
Tableau 4.2 : Résumé des paramètres hydrauliques des matériaux étudiés.....	55
Tableau 6.1 : Principaux résultats des analyses minéralogiques (Bernier, 1996)	146
Tableau 6.2 : Résultats des essais de densité relative	147
Tableau 6.3 : Résultats des essais de perméabilité.....	148
Tableau 6.4 : Principaux résultats des essais de succion.....	149
Tableau 6.5 : Résumé du contrôle de qualité du compactage	151
Tableau 6.6 : Principaux résultats des analyses granulométriques, des essais de densité relative, de compactage et de limites de consistance (tirés de Golder et associés, 1996)	161
Tableau 6.7 : Principales caractéristiques géotechniques du sable	164

LISTE DES SYMBOLES

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_s	Paramètre du sol (appelé " <i>Sorptive number</i> ") pour les modèles de Gardner (1958) et Rijtema (1965)
AE	Taux réel d'évaporation [LT^{-1}]
AEV	Pression d'entrée d'air (" <i>Air Entry Value</i> ") (aussi ψ_a) [$ML^{-1}T^{-2}$]
A,B,C	Constantes d'ajustement de la relation Steinhart-Hart
dA	Surface unitaire parallèle à la surface du sol [L^2]
b	Épaisseur de la couche fine du système bicouche incliné étudié par Ross (1990), Steenhuis et <i>al.</i> (1991) et Stormont (1995a) [L]
b_F	Épaisseur maximale de la couche fine [L]
b_k	Paramètre du modèle Kovacs modifié
[B]	Matrice des dérivées des coordonnées de surface
$c(\psi)$	Fonction de correction du modèle de Fredlund et Xing (1994)
c_1, c_2, c_3, c_4	Constantes d'intégration proposées par Ross (1990)
$C(\psi)$	Capacité de stockage défini par $d\theta/d\psi$ où θ est la teneur en eau volumique
C_c	Coefficient de concavité
C-G	Modèle de Childs et Collis-George (1950)
C_u	Coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10}
$D(\theta)$	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_h	Taille effective des grains [L]
D_i	Épaisseur des deux couches du système étudié par Zaslavsky et Sinai (1981b) où $i = 1$ et 2 [L]
D_r	Densité relative des grains solides
[D]	Matrice caractéristique élémentaire qui peut s'écrire $[B]^T [k][B]A$
e	Indice des vides
[E]	Matrice massique (stockage)
[F]	Vecteurs flux qui représentent les conditions frontières, i.e. $\int_S [L]^T \bar{v}_w dS$
$\bar{F}_n$	Force moyenne qui dirige l'écoulement selon l'axe n [MLT ⁻²]
$\bar{F}_s$	Force moyenne qui dirige l'écoulement selon l'axe s [MLT ⁻²]
g	Accélération gravitationnelle [LT ⁻²]
h	Charge hydraulique (ψ + élévation) [L]
h_{co}	Montée capillaire moyenne [L]
$\{h\}$	Matrice des charges hydrauliques aux noeuds où la charge est la gravité plus la pression interstitielle
$\{h_{wn}\}$	Matrice des dérivées par rapport au temps des charges hydrauliques au noeuds $\frac{\partial \{h\}}{\partial t}$
i	Point utilisé par la méthode MDF
i_{cc}	Nombre d'intervalles qui augmente avec la diminution de la teneur en eau volumique (modèle Childs et Collis-George, 1950)
I_p	Indice de plasticité
$k(\theta_i)$	Conductivité hydraulique calculée pour une certaine teneur en eau volumique θ_i , correspondant au $i^{ème}$ intervalle (modèle Childs et Collis-George, 1950) [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}]
$[k]$	Tenseur de la conductivité hydraulique pour un élément
ℓ	Paramètre du modèle de Mualem (1976) qui dépend des propriétés du sol et du fluide
L	Longueur effective du bris capillaire [L]
$[L]$	Matrice des coordonnées des éléments
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)
M	Nombre total d'intervalles entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau volumique la plus faible sur la courbe caractéristique de succion (modèle Childs et Collis-George, 1950)
MDF	Méthode des différences finies
MEF	Méthode des éléments finis
n	Porosité
n_{cc}	Nombre total d'intervalles calculé entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau zéro (i.e. $\theta = 0$) (modèle Childs et Collis-George, 1950)
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)
N	Coefficient de calcul du modèle de Rijtema (1965)
P	Taux de précipitation à la surface [LT^{-1}]
$P(t)$	Fonction de précipitation par rapport au temps
P_{cc}	Constante qui tient compte des interactions entre les pores de différentes dimensions (modèle Childs et Collis-George, 1950)
PE	Potentiel d'évaporation [LT^{-1}]
P^r	Intensité de précipitation relative qui est le rapport entre l'intensité de précipitation P et la conductivité hydraulique saturée du matériau 1 (k_{sat1})
P_t	Taux de précipitation où l'anisotropie des débits est de 1 [LT^{-1}]
q	débit spécifique [LT^{-1}]
$\bar{q}_x$	Débit spécifique horizontal moyen [LT^{-1}]
$\bar{q}_z$	Débit spécifique vertical moyen [LT^{-1}]
Δq	Variation du débit spécifique dans un volume élémentaire [LT^{-1}]
q_n et q_s	Débits selon les axes n et s [LT^{-1}]
$q_{s\ net}$	Débit net le long de l'axe s [LT^{-1}]
q_x, q_y, q_z	Débits selon les axes x, y et z [LT^{-1}]
Q_{max} et $Q_{s\ net}$	Capacité de diversion d'une barrière capillaire [LT^{-1}]
R	Résistance de la thermistance
s et n	Nouveau système de coordonnées incliné
S	Périmètre de l'élément [L]
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}]
u_a	Pression de l'air dans les pores [$ML^{-1}T^{-2}$]
u_w	Pression de l'eau interstitielle [$ML^{-1}T^{-2}$]
U	Coefficient d'anisotropie des débits moyens
$\bar{v}_w$	Vitesse de Darcy externe dans la direction perpendiculaire à la frontière de l'élément [LT^{-1}]
V-G	Modèle RETC de van Genuchten et al. (1991)
$V_{s\ net}$	Volume latéral net d'eau [L^3]
w_L	Limite de liquidité
w_{opt}	Teneur en eau à l'optimum Proctor
w_p	Limite de plasticité
$\Delta x, \Delta y$ et Δz	Dimension de l'arête d'un volume élémentaire cubique [L]
α	Angle que fait le système de coordonnée n, s par rapport au système x, y
ξ	Déflexion de l'infiltration par rapport à la verticale en raison de l'anisotropie
λ	Équivaut à $C(\psi)$ dans l'équation d'éléments finis
η	Paramètre du modèle de Mualem (1976) qui dépend des propriétés du sol et du fluide
θ	Teneur en eau volumique [L^3L^{-3}]
$(\theta_n)_1$	Teneur en eau volumique normalisée au point 1 [L^3L^{-3}]
$(\theta_n)_{1'}$	Teneur en eau volumique normalisée au point 1' [L^3L^{-3}]
$(\theta_n)_{2'}$	Teneur en eau volumique normalisée au point 2' [L^3L^{-3}]
$(\theta_n)_3$	Teneur en eau volumique normalisée au point 3 [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}]
2θ	Angle pour la détermination de la minéralogie à l'aide de la diffraction au rayons-X
ψ	Pression négative ou succion [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ^*_0	Pression limite à l'entrée d'eau du matériau grossier [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_1	Succion au point 1 d'une courbe caractéristique de succion schématisée [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_2	Succion au point 2 d'une courbe caractéristique de succion schématisée [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_3	Succion au point 3 d'une courbe caractéristique de succion schématisée [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_{90}	Pression exercée pour une saturation de 90 % [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_a	Pression d'entrée d'air (" <i>Air Entry Value</i> ") [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_x	Succion au point x d'une courbe caractéristique de succion schématisée [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_{aF}	Pression à l'entrée d'air du matériau fin [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_{int}	Succion à l'interface sol grossier - sol fin [$ML^{-1}T^{-2}$]
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 [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_{rG}	Succion résiduelle pour le matériau grossier [$ML^{-1}T^{-2}$]
β_1, β_2	Exposants du modèle de Kovacs (1981)
σ	Contrainte totale [$ML^{-1}T^{-2}$]
λ_{BC}	Paramètre de lissage de courbe du modèle de Brooks et Corey (1964) relié à l'agencement des pores
α_k	Coefficient de forme du modèle de Kovacs (1981)
α_v	Constante du modèle de van Genuchten (1980) qui représente l'inverse de ψ_a

CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'industrie minière contribue de façon importante à l'activité économique du Québec. Les principales statistiques de l'année 1995 du secteur minéral sont les suivantes (Anon., 1995) : 17 521 emplois directs sont reliés au secteur minier ; la masse salariale est évaluée à 889 M \$; le salaire annuel moyen d'un employé de ce secteur est de 51 000\$; l'investissement engendré est de 943 M \$, dont près de 50% proviennent du secteur des métaux précieux qui sont surtout concentrés dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue. En outre, les exportations de substances minérales et de produits de première transformation représentent 18% des exportations totales du Québec. D'après les données fournies par le Bureau de la statistique du Québec pour 1994, la part de l'activité minière dans le produit intérieur brut du Québec est d'environ 1%.

Malgré toutes les retombées positives de l'industrie minière sur l'économie québécoise, cette activité peut avoir des effets très significatifs sur l'environnement, comme par exemple (Aubertin, 1991) : la modification de la qualité du milieu aquatique, l'altération des sols, la modification de la faune et de la flore, les nuisances pour les humains et l'altération esthétique des lieux. Ces problèmes environnementaux sont particulièrement présents lorsque les aires d'entreposages de résidus miniers (parcs à résidus et haldes à stériles par exemple) contiennent des sulfures de fer. Si ces sulfures de fer sont en présence d'eau et d'oxygène, il y aura génération de drainage minier acide DMA qui peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes environnants. Plus de détails concernant la problématique du DMA peuvent être trouvés dans Ritcey (1989), SRK (1991) et Aachib *et al.* (1993).

Pour contrôler la production de DMA, on doit exclure un ou plusieurs des éléments constitutifs des réactions produisant l'acide, soit l'eau, l'oxygène et les sulfures. Une façon efficace pour y parvenir est de construire des recouvrements (Aubertin et *al.*, 1996f). Certains de ces recouvrements visent à consommer l'oxygène à l'aide de matières organiques (résidus forestiers, compost, etc.) alors que d'autres visent à limiter son infiltration. Ce dernier type de recouvrement que l'on utilise régulièrement pour des applications industrielles (e.g. Larson et *al.*, 1988 ; Montgomery et Parsons, 1990 ; Nyhan et *al.*, 1990 ; Yanful et *al.*, 1993a, b ; Khire et *al.*, 1995 ; Melchoir et *al.*, 1994 ; Wing et Gee, 1994), vise à empêcher l'eau de percoler jusqu'à la source potentielle de contamination et les gaz de s'infiltrer vers les rejets du site. Pour cela, on utilise le concept de barrière capillaire. Ce concept implique la théorie des écoulements non saturés dans des matériaux de texture (ou granulométrie) différente. Les principes sous-jacents à l'effet de barrière capillaire ont été décrits (avec plus ou moins de détails) dans de nombreuses publications ; mentionnons : Frind et *al.* (1976), Rasmuson et Erikson (1986), Nicholson et *al.* (1989), Akindunni et *al.* (1991), Morel-Seytoux (1992), Chiu et Shakelford (1994), Aubertin et *al.* (1995b), Bussière et *al.* (1995).

Malgré l'engouement pour les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC), plusieurs aspects du fonctionnement de ces recouvrements ne sont pas encore bien compris. Par exemple, très peu de travaux prennent en compte l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique des couvertures multicouches. Toutefois, dans le cas de recouvrements placés sur des résidus miniers générateurs de drainage minier acide, on doit tenir compte de cet effet puisque, dans la plupart des cas, il faudra placer ces recouvrements sur les pentes des digues servant à contenir les résidus. Habituellement, l'angle de la pente de ces digues est de l'ordre de 12 à 22°. De plus, sur le dessus du parc, il faudra incliner légèrement la couverture afin d'épouser les rejets et de favoriser le drainage latéral. Malgré que l'on ne saisisse pas encore complètement l'effet de la pente, on sait que celle-ci pourrait avoir un effet négatif sur l'efficacité d'un

recouvrement visant à limiter l'infiltration de l'oxygène. L'objectif principal de ce document est donc de présenter les différents aspects liés à l'écoulement dans des couvertures inclinées avec de barrières capillaires.

Dans ce rapport technique, on présente tout d'abord les principales équations de l'écoulement non saturé de l'eau en milieu poreux. On poursuit ensuite avec la représentation des caractéristiques des matériaux meubles en milieu non saturé. Les principales méthodes qui permettent de déduire les courbes caractéristiques de succion (ou courbes de rétention d'eau) et les fonctions de perméabilité sont aussi présentées dans cette section du document.

Comme les méthodes numériques sont fréquemment utilisées pour évaluer le comportement hydrogéologique des CEBC, on présente au chapitre 3 différents aspects liés aux méthodes numériques. Dans un premier temps, certaines équations différentielles représentant l'écoulement de l'eau en milieu non saturé sont reprises. Les principales méthodes de résolution numériques sont par la suite décrites. Finalement, on retrouve une brève description des principaux modèles qui permettent la simulation numérique de l'écoulement non saturé en régime transitoire et stationnaire.

Le chapitre 4 explique plus en détails le phénomène des effets de barrière capillaire et présente une schématisation du phénomène. Parce que les équations qui régissent l'écoulement non saturé sont fortement non linéaires, la modélisation numérique devient un outil de travail très intéressant. Ainsi, des modélisations numériques tirées de la littérature et des modélisations réalisées spécifiquement pour ce travail sont présentées dans une section de ce chapitre. L'analyse de ces résultats permet de mieux comprendre le comportement hydrogéologique des CEBC et d'identifier les paramètres qui ont un impact sur les résultats obtenus.

Dans le cinquième chapitre, le cas particulier de l'écoulement dans des couvertures inclinées est analysé. Les équations pour les régimes permanent et transitoire sont alors présentées. On enchaîne avec le comportement hydrogéologique de systèmes non uniformes inclinés. On s'attarde par la suite aux effets des caractéristiques de la pente (angle et longueur) sur l'efficacité des CEBC. Des solutions analytiques pour des cas particuliers sont présentées dans cette section. Afin de bien comprendre les phénomènes physiques impliqués dans l'écoulement à l'intérieur de systèmes formés de couches inclinées, des cas tirés de la littérature sont par la suite décrits. Enfin, on définit brièvement les autres éléments à considérer lorsque l'on veut étudier de façon spécifique le comportement hydrogéologique de recouvrements inclinés avec effets de barrière capillaire.

Le dernier chapitre porte sur les différents outils de recherche disponibles pour la poursuite des travaux de recherche sur le comportement hydrogéologique des barrières capillaires. L'approche expérimentale utilisée incorpore des outils de terrain et de laboratoire, qui sont présentés ici en détails. Parmi ces outils, on retrouve des cellules expérimentales à échelle intermédiaire construites sur le terrain et un site à grande échelle avec une CEBC instrumentée. De plus, on décrit les essais en colonne et en systèmes inclinés qui seront réalisés au laboratoire. Enfin, les résultats anticipés sont brièvement discutés.

CHAPITRE II

ÉCOULEMENTS NON SATURÉS

Lorsqu'il y a écoulement de l'eau dans la zone située au-dessus de la surface de la nappe phréatique, communément appelée zone vadose, la saturation partielle des matériaux poreux engendre la création d'une pression négative (ou succion) dans le milieu, principalement due aux effets de tension de surface qui existent à l'interface eau-gaz. Parce que les recouvrements avec effet de barrière capillaire placés sur des déchets sont toujours installés au-dessus de la nappe phréatique, l'écoulement à travers ces barrières est en condition non saturée.

Dans ce chapitre, on présente les principales équations qui régissent l'écoulement de l'eau en milieu non saturé. Comme les caractéristiques hydriques des matériaux ont une influence importante sur leur comportement en milieu non saturé, les principales méthodes pour représenter ces caractéristiques sont par la suite présentées.

2.1 Écoulement de l'eau en milieu non saturé

Pour débiter, il est bon de se rappeler les équations de base qui régissent l'écoulement de l'eau. L'équation de continuité peut être déduite à partir de la démonstration suivante (Hillel, 1980a). On prend un volume élémentaire de sol de la forme d'un parallélépipède rectangulaire dans un domaine cartésien x, y, z , tel que montré à la figure 2.1. Les côtés du volume élémentaire sont $\Delta x, \Delta y$ et Δz ; le volume est donc de $\Delta x \Delta y \Delta z$. Si l'on considère seulement le débit spécifique q (q est le volume d'eau qui passe à travers une surface unitaire par unité de temps) dans la direction x , la différence entre le débit qui entre et celui qui sort de l'élément peut être défini comme suit:

$$\Delta q = q\Delta y\Delta z - \left[q + \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right) \Delta x \right] \Delta y\Delta z \quad (2.1)$$

La différence entre le débit qui entre et qui sort, que l'on appellera ici la recharge, doit être égale au taux du gain d'eau dans le volume élémentaire par unité de temps, qui peut être écrit comme suit:

$$\Delta q = -\left(\frac{\partial q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

La recharge peut également être définie comme étant le changement de la teneur en eau volumique θ (volume d'eau / volume total) dans le temps multiplié par le volume.

$$\Delta q = \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

En égalisant les équations 2.2 et 2.3, on obtient:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = -\left(\frac{\partial q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y \Delta z$$

ou $\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}$ (2.4)

Si l'on généralise l'équation 2.4, en ajoutant les composantes y et z, on obtient l'équation de continuité en trois dimensions.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

où q_x , q_y , q_z représentent les débits en x, y et z respectivement.

D'autre part, la loi de Darcy, conçue originellement pour un milieu saturé, permet de calculer le débit (Hillel, 1980a):

$$q = -\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} + k_y \frac{\partial h}{\partial y} + k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

où h est la charge hydraulique et k la conductivité hydraulique. Richards (1931) a étendu cette loi pour les milieux non saturés en ajoutant que la valeur de la conductivité hydraulique k est dépendante de la succion ψ (i.e., $k = k(\psi)$).

$$q = -\left(k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} + k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} + k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

Puisqu'il existe une relation entre la teneur en eau volumique θ d'un sol et la succion ψ à l'intérieur de celui-ci, on peut aussi écrire l'équation 2.7 comme suit (noter que les phénomènes d'hystérésis ne sont pas tenus en compte dans cette section):

$$q = -\left(k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} + k_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} + k_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Afin d'obtenir une équation d'écoulement de l'eau valide autant pour un écoulement transitoire que pour un écoulement permanent, il est nécessaire d'introduire le principe de continuité (équation 2.6). En remplaçant q de l'équation 2.5 par l'équation 2.7, on obtient ceci:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.9)$$

On sait que, en négligeant la pression hydrodynamique de l'équation de Bernouilli, la charge hydraulique est définie comme étant la somme de la pression (ou succion) ψ en m de d'eau et de la charge gravitationnelle (ou l'élévation) z ($h = \psi + z$). On peut donc réécrire l'équation 2.9 comme suit:

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.10)$$

Puisque les dérivées partielles $\partial z/\partial x$ et $\partial z/\partial y$ sont égales à zéro et $\partial z/\partial z$ égal à un en raison du système de repère utilisé (repère cartésien), l'équation 2.10 devient:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \quad (2.11)$$

L'équation 2.11 définit l'écoulement non saturé de l'eau en milieu poreux.

2.2 Caractéristiques des matériaux poreux en milieu non saturé

Quand un matériau poreux (sol, résidus miniers, etc.) est en condition non saturée, l'eau qu'il contient est soumise à une pression négative par rapport à la pression atmosphérique (c'est-à-dire en succion). Cette pression négative est attribuable à la tension superficielle qui existe entre l'air et l'eau, en contact avec la matrice du sol. Les forces capillaires associées à cette pression vont restreindre le mouvement de l'eau, et peuvent même limiter le drainage d'un sol saturé se situant par dessus un sol non saturé (effet de barrière capillaire). Afin de représenter le comportement d'un sol en milieu non saturé, on utilise habituellement les courbes caractéristiques de succion et les fonctions de perméabilité.

2.2.1 Courbes caractéristiques de succion

Les courbes caractéristiques de succion, aussi appelées courbes de rétention d'eau, représentent la relation entre la teneur en eau volumique et la succion. Cette relation est particulière pour chaque matériau. On présente, à la figure 2.2, des courbes caractéristiques de succion schématisées pour un silt et un sable. Sur ces courbes, on définit deux valeurs particulières, soit ψ_a qui représente la pression d'entrée d'air (ou AEV, "Air Entry Value") correspondant au début de la désaturation et ψ_r qui est la

pression résiduelle exercée à la teneur en eau résiduelle θ_r . En général, plus la granulométrie d'un sol est fine, plus la pression à exercer pour débiter le drainage doit être grande (valeur de ψ_a grande).

Il existe différentes méthodes au laboratoire pour évaluer la courbe caractéristique de succion, soit la cellule de pression ("*Tempe Cell*"), la plaque drainante, la cellule triaxiale, le papier filtre, les tensiomètres, les psychromètres. Les avantages et inconvénients des ces différentes méthodes peuvent être trouvés dans Fredlund et Rahardjo (1993) et Ricard (1994).

Une fois que l'on a réalisé un essai au laboratoire qui permet d'obtenir plusieurs points dans le plan θ - ψ , on utilise habituellement des modèles descriptifs qui permettent de décrire la courbe caractéristique de succion sur l'ensemble du domaine. Les modèles les plus connus sont Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980), Fredlund et *al.* (1994). Ces modèles sont basés sur l'étude de la forme du profil de rétention d'eau. Les points expérimentaux sont utilisés pour évaluer une équation (souvent de forme exponentielle ou loi de puissance) qui comprend des constantes, propres aux différents types de matériaux, qui accentuent ou adoucissent la forme de la courbe (Ricard, 1994). Un autre modèle intéressant disponible est celui de Kovacs modifié (Aubertin et *al.*, 1996e). Ce modèle, contrairement aux autres, est basé sur les propriétés physiques du sol.

Modèle Brooks et Corey

Le modèle de Brooks et Corey (1964) a été le précurseur des modèles de type lissage de courbes. L'équation du modèle est la suivante :

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda_{BC}} \quad (2.12)$$

où :

θ_e = teneur en eau réduite ou effective ;

θ = teneur en eau volumique ;

θ_s = teneur en eau volumique à saturation ;

θ_r = teneur en eau volumique résiduelle ;

λ_{BC} = paramètre de lissage de courbe relié à l'agencement des pores ;

ψ_a = pression d'entrée d'air ;

ψ = pression de succion.

Modèle de van Genuchten

Le modèle le plus fréquemment utilisé dans le domaine pour décrire la courbe de succion à partir de points expérimentaux (e.g. Paniconi et *al.*, 1991 ; Yeh et *al.*, 1994 ; Shouse et *al.*, 1995) est celui de van Genuchten (1980). L'équation du modèle de van Genuchten peut être écrite de la façon suivante :

$$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}} \right]^{m_v} \quad (2.13)$$

où :

α_v = constante qui représente l'inverse de ψ_a ;

m_v, n_v = constantes d'ajustement du modèle.

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

Modèle de Fredlund et Xing (1994)

Le modèle de Fredlund et Xing (1994) est une variante du modèle de Brooks et Corey (1964). Il se base sur une vaste étude statistique de la distribution de la taille des pores dans le sol. Le modèle contient des paramètres de lissage de courbes et nécessite par conséquent une calibration qui est obtenue par un programme de régression non-linéaire utilisant la méthode des moindres carrés. L'équation du modèle est la suivante (Fredlund et Xing, 1994) :

$$\theta(\psi, a_f, n_f, m_f) = c(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\psi / a_f \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \quad (2.14)$$

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

$$c(\psi) = \frac{\ln[1 + (\psi / \psi_r)]}{\ln[1 + (1000000 / \psi_r)]} \quad (2.15)$$

où :

e = nombre népérien (2.71828) ;

a_f = valeur approximative de ψ_a ;

n_f = paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe caractéristique de succion ;

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

Ce modèle a donné de bons résultats pour décrire la courbe caractéristique de succion de divers types de sols, incluant des résidus miniers (e.g. Kissiova, 1996).

Modèle de Kovacs modifié

Un des seuls modèles connus qui permette de décrire la courbe caractéristique de succion tout en étant basé sur les propriétés physiques du sol est celui proposé par Kovacs (1981). Ce modèle de prédiction (plutôt que de description comme les modèles précédent) fait la distinction entre la succion capillaire et la succion d'adhésion. La succion capillaire est la succion causée par la tension de surface qui existe à l'interface eau-air tandis que la succion d'adhésion est la succion causée par la surface de contact et la force d'attraction électrique. L'équation du modèle de Kovacs (1981) peut être écrite de la façon suivante :

$$S_r = S_c + S_a (1 - S_c) \quad (2.16)$$

avec

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right] \exp \left[- \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

$$S_a = a_1 \left(\frac{1-n}{n} \right) \psi^{-\beta_1} \left(\frac{\alpha_k}{D_h} \right)^{\beta_2} \quad (2.18)$$

$$h_{co} = a_2 \left(\frac{1-n}{n} \right) \left(\frac{\alpha_k}{D_h} \right) \quad (2.19)$$

où :

- S_r = degré de saturation ;
- h_{co} = montée capillaire moyenne ;
- n = porosité ;
- S_c = degré de saturation due aux forces capillaires ;
- S_a = degré de saturation due aux forces d'adhésion ;
- α_k = coefficient de forme ;
- D_h = taille effective des grains ;

a_1, a_2 = coefficients (Kovacs (1981) a proposé $a_1 = 2,5 \times 10^{-3}$ et $a_2 = 7,5 \times 10^{-2}$) ;

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

L'équation 1.16 est considérée valide pour (Kovacs, 1981) :

$$50 < \frac{\alpha_k}{D_h} < 25 \times 10^3$$

Aubertin et *al.* (1996e) ont proposé une version modifiée de l'équation de Kovacs (1981) qui permet d'obtenir une meilleur concordance avec les résultats de laboratoire. L'équation Kovacs modifiée est similaire à l'équation 1.16 sauf que les paramètres S_c et S_a sont maintenant décrits par les équations suivantes (Aubertin et *al.*, 1995a ; 1996e) :

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{\psi_{90}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^{m_k} \exp \left[-m_k \left(\frac{\psi_{90}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

et

$$S_a = c(\psi) \frac{a_k}{e^{1/3} \psi^{1/6}} \psi_{90}^{2/3} \quad (2.21)$$

où :

$c(\psi)$ = fonction de correction de Fredlund et Xing (1994) (voir équation 2.15) ;

m_k, a_k = coefficients ouverts (pour estimer une courbe sans valeurs expérimentales,

Aubertin et *al.* (1996) proposent $a = 0,006$ et $m = 0,05$) ;

e = indice des vides ;

ψ_{90} = pression exercée pour une saturation de 90 % qui peut être estimée par l'équation suivante (Aubertin et *al.*, 1996e) :

$$\psi_a \approx \psi_{90} = \frac{b_k}{e D_{10}} \quad (2.21)$$

avec :

b_k = $4,0 \text{ mm}^2$;

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

Le principal avantage de la version modifiée de Kovacs 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} .

2.2.2 Fonctions de perméabilité

Comme on peut le constater avec l'équation 2.11, pour simuler l'écoulement de l'eau en milieu non saturé, il est essentiel de connaître le comportement de la conductivité hydraulique par rapport à la succion, représenté par la fonction $k(\psi)$. On présente à la figure 2.3 deux exemples de fonctions de perméabilité pour un silt et un sable. Parce qu'il est difficile de déterminer en laboratoire la fonction de perméabilité, on déduit habituellement cette fonction à partir de la courbe de succion. Il existe dans la littérature plusieurs modèles qui permettent de déduire la relation $k(\psi)$ (on retrouve souvent $k(\theta)$ parce que c'est la teneur en eau qui contrôle la conductivité hydraulique) à partir de la fonction $\theta(\psi)$. Certains de ces modèles sont empiriques alors que d'autres sont d'origine statistique. Dans le cadre de ce travail, on présente les modèles les plus utilisés dans la littérature, soit ceux de Gardner (1958), de Rijtema (1965), de Childs et Collis-George (1950) modifié par Kunze et *al.* (1968) et celui de Mualem (1976). Plus de détails concernant les autres modèles peuvent être trouvés dans Mualem (1986) et Fredlund et *al.* (1994).

Modèle de Gardner (1958)

Le modèle de Gardner (1958) est un modèle empirique qui permet de déterminer la conductivité hydraulique pour une succion donnée. L'équation s'écrit de la façon suivante Mualem, 1986) :

$$k = k_{sat} \exp(a_s \psi) \quad (2.22)$$

où :

k = conductivité hydraulique ;

k_{sat} = conductivité hydraulique à saturation ;

$\exp$ = nombre népérien ;

a_s = paramètre du sol (appelé "*Sorptive number*") ;

Cette fonction de perméabilité est fréquemment utilisée lorsque l'on veut résoudre des situations à l'aide de solutions analytiques ou semi-analytiques (e.g. Ross, 1990 ; Stormont, 1995a)

Modèle de Rijtema (1965)

L'équation de Gardner (1958) suppose une valeur constante du paramètre a_s . Cependant, lorsque l'on se situe près de la saturation, cette condition devient souvent irréaliste. Pour contrer ce problème, Rijtema (1965) a proposé de modifier l'équation 2.22 de la façon suivante :

$$\begin{aligned} k &= k_{sat} & \psi &\leq \psi_a \\ k &= k_{sat} \exp[a_s(\psi + \psi_a)] & \text{pour } \psi_a &\leq \psi \leq \psi_r \\ k &= k_{\psi_r} \left(\frac{\psi}{\psi_r} \right)^N & \psi &> \psi_r \end{aligned} \quad (2.23)$$

où :

ψ_r = succion résiduelle ;

$k_{\psi r}$ = conductivité hydraulique à la succion résiduelle ;

N = coefficient de calcul.

Ce modèle est considéré comme étant plus près de la réalité que celui proposé par Gardner (1958).

Modèle Childs et Collis-George (1950) modifié par Kunze et *al.* (1968)

Les modèles empiriques (tels ceux de Gardner (1958) et Rijtema (1965)) permettent une approximation de la fonction de perméabilité. Lorsque l'on veut connaître avec plus de précision cette fonction, il devient alors nécessaire d'utiliser des modèles statistiques. Ces modèles se basent principalement sur la fonction de distribution de la porosité en utilisant la courbe caractéristique de succion. Les hypothèses de base de ce type de modèles sont que le milieu poreux est un ensemble de pores distribués et interconnectés de façon aléatoire, que la courbe de succion est analogue à la fonction de distribution du rayon des pores et que la conductivité hydraulique peut être déterminée par intégration sur tous les pores remplis d'eau (Bouchentouf, 1996).

En ce qui concerne le modèle Childs et Collis-George (1950) modifié par Kunze et *al.* (1968) (appelé modèle Childs et Collis-George dans ce document), les calculs permettant de déduire la fonction de perméabilité sont faits en divisant la courbe caractéristique de succion en n incréments de la teneur en eau. L'équation qui représente la méthode de Childs et Collis-George est la suivante (Fredlund et *al.*, 1994) :

$$k(\theta)_{i_{cc}} = \frac{k_s}{k_{sc}} \cdot \frac{T_s^2 \rho_w g}{2\mu_w} \cdot \frac{\theta_s^{P_{cc}}}{n_{cc}^2} \cdot \sum_{j_{cc}=i_{cc}}^M \left[(2j_{cc} + 1 - 2i_{cc}) \psi_{j_{cc}}^{-2} \right] \quad (2.24)$$

$$i_{cc} = 1, 2, \dots, M$$

où :

$k(\theta)_{i_{cc}}$ = conductivité hydraulique calculée pour une certaine teneur en eau volumique $\theta_{i_{cc}}$, correspondant à la i_{cc} ème intervalle ;

i_{cc} = nombre d'intervalles qui augmente avec la diminution de la teneur en eau volumique ;

j_{cc} = variable pour un compteur de i_{cc} à M ;

k_{sc} = conductivité hydraulique saturée calculée ;

T_s = tension de surface de l'eau ;

ρ_w = masse volumique de l'eau ;

g = accélération gravitationnelle ;

μ_w = viscosité absolue de l'eau ;

P_{cc} = constante qui tient compte des interactions entre les pores de différentes dimensions ;

M = nombre total d'intervalles entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau volumique la plus faible sur la courbe caractéristique de succion ;

n_{cc} = nombre total d'intervalles calculé entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau zéro (i.e. $\theta = 0$) ;

$\psi_{j_{cc}}$ = succion correspondant au point milieu de l'intervalle j_{cc} .

Des résultats obtenus par Elzeftawy et Cartwright (1981) leur ont permis de conclure que la relation de Childs et Collis-George (1950) était suffisamment précise pour la plupart des applications de terrain. Yanful et Aubé (1993), quant à eux, ont utilisé dans leurs simulations cette même méthode et ont déduit, en comparant les valeurs calculées à celles mesurées, que la méthode est valable pour prédire k en milieu non saturé dans la

plupart des conditions. Cependant, ils ont constaté que le modèle n'est pas adéquat dans la prédiction de k pour leur sable lorsque celui-ci est à un faible degré de saturation.

Modèle de Mualem (1976)

Le modèle de Mualem (1976) analyse le milieu poreux d'une façon similaire à celle de Childs et Collis-George (1950). 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). L'équation de Mualem (1976) s'écrit comme suit :

$$k(\theta) = S_e^\eta \left[\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi}} \right]^2 \quad (2.25)$$

où :

S_e = degré de saturation effectif ($S_e = (\theta_e - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$);

η = paramètre qui dépend des propriétés du sol et du fluide ;

En substituant l'équation proposée par van Genuchten (1980), soit l'équation 2.13, dans le modèle statistique de Mualem (1976) présenté à l'équation 2.25, on obtient l'équation suivante :

$$k(\theta) = k_{sat} \left\{ 1 - \left[1 - \theta_e^{(1/m_v)} \right]^{m_v} \right\}^2 \theta_e^\eta \quad (2.26)$$

où :

k_{sat} = est la conductivité hydraulique saturée ;

θ_e = est la teneur en eau réduite ;

m_v = est un paramètre de lissage de courbes.

L'équation du modèle de Mualem (1976), telle que présentée à l'équation 2.26, est celle que l'on retrouve dans le logiciel RETC de van Genuchten (1991) qui est fréquemment utilisé pour décrire la fonction de perméabilité à partir de la courbe de succion.

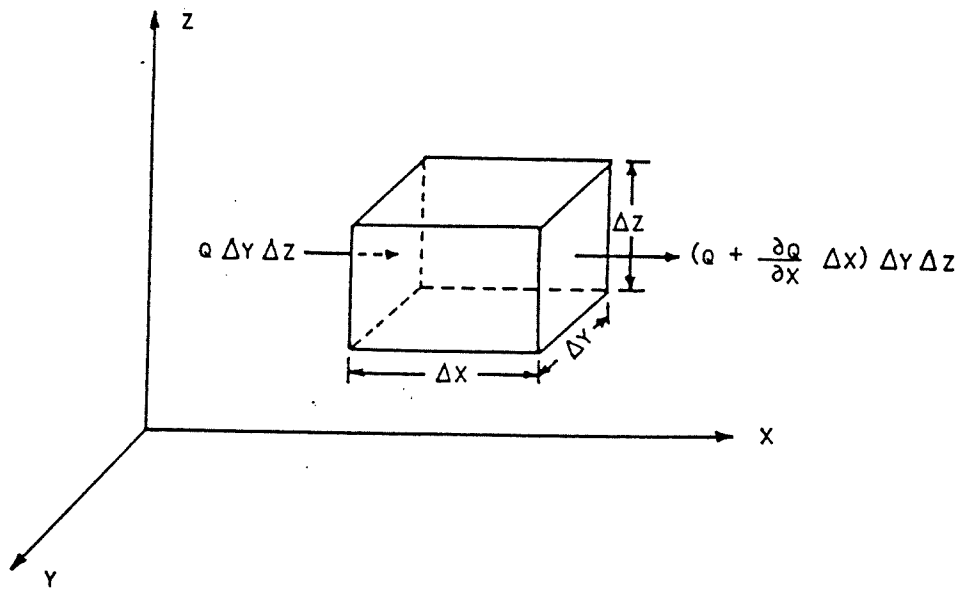


Figure 2.1 : Volume élémentaire de sol avec le bilan des débits (tirée de Hillel, 1980a).

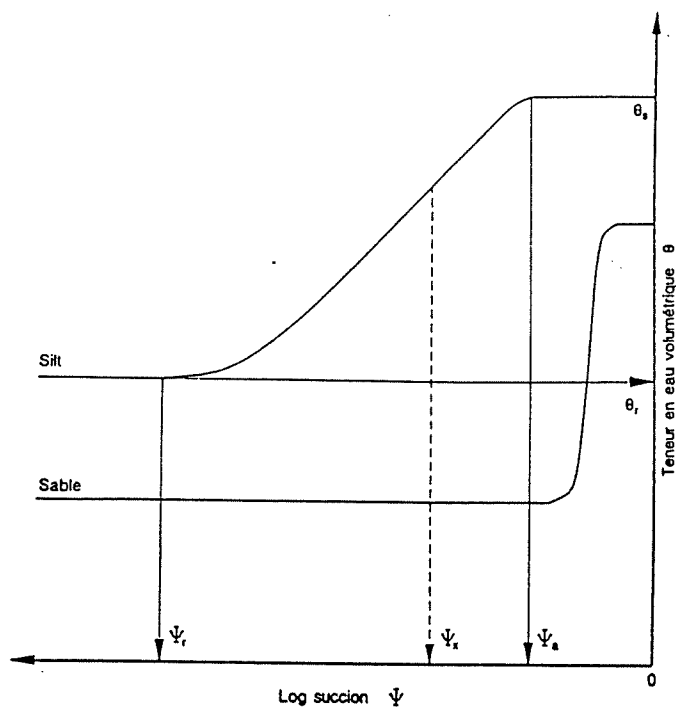


Figure 2.2 : Courbes caractéristiques de succion schématisées pour un sable et un silt (tirée d'Aubertin et al., 1995b).

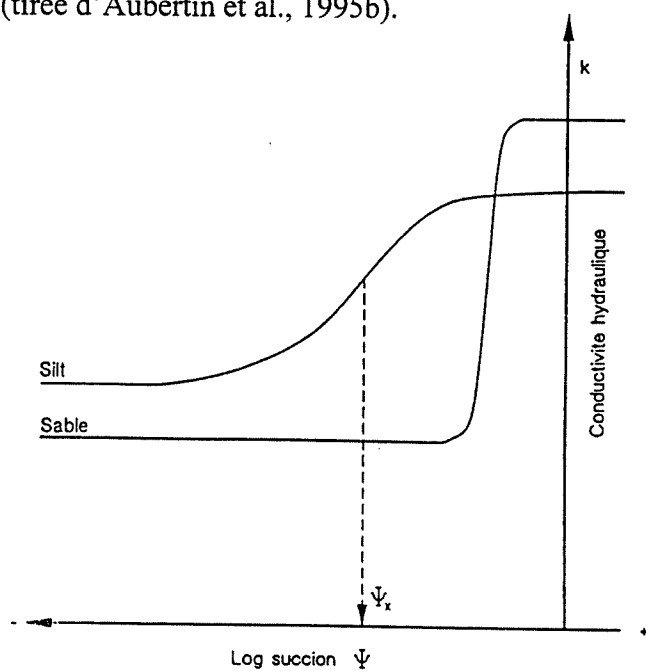


Figure 2.3 : Fonctions de perméabilité schématisée pour un sable et un silt (tirée d'Aubertin et al., 1995b).

CHAPITRE III

LES MÉTHODES NUMÉRIQUES

Les méthodes numériques sont fréquemment utilisées pour prédire l'écoulement de l'eau en milieu non saturé à partir des équations présentées dans le chapitre précédent. Comme les barrières capillaires impliquent des écoulements non saturés, un bref rappel sur les méthodes numériques est utile. Les méthodes discutées ici sont basées sur la résolution d'équations mathématiques qui décrivent les processus physiques impliqués. Elles permettent surtout de résoudre des problèmes pour lesquels il n'y a pas de solutions analytiques disponibles, ce qui est souvent le cas en pratique. Pour bien utiliser la modélisation numérique, il est cependant important de comprendre la méthode de résolution utilisée, les équations mathématiques impliquées ainsi que les paramètres et fonctions nécessaires à la résolution du problème.

Dans cette section du document, on présente, dans un premier temps, les équations différentielles qui doivent être résolues pour modéliser l'écoulement en milieu non saturé, en régime transitoire. On présente par la suite le fonctionnement général des méthodes numériques. On poursuit avec la description des deux méthodes les plus couramment utilisées en hydrogéologie, soit la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Enfin, les principaux codes disponibles, ayant servis dans le passé à modéliser en milieu non saturé, sont présentés brièvement.

3.1 Équations d'écoulement utilisées

L'équation qui permet de résoudre les problèmes d'écoulement en milieu saturé et non saturé est appelée l'équation de Richards (1931) (ou équation générale de l'écoulement)

et est habituellement exprimée (en deux dimensions) de la façon suivante (Yeh et al., 1994) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right] \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3.1)$$

où :

$C(\psi)$ = capacité de stockage défini par $d\theta/d\psi$ où θ est la teneur en eau volumique ;

$k(\psi)$ = conductivité hydraulique ;

x et z = coordonnées horizontales et verticales ;

ψ = succion matricielle.

On retrouve également souvent l'équation 3.1 sous la forme d'une équation qui est fonction de la charge hydraulique h (Fredlund et Rahardjo, 1993) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.2)$$

où le terme h est la charge hydraulique qui est définie par $h = \psi + z$, z étant l'élévation.

Le principal avantage de cette équation, qui est fonction de ψ (ou de h), est qu'elle est valide autant en milieu saturé que non saturé et qu'elle permet de simuler des sols stratifiés. Cependant, la très grande non-linéarité (c'est-à-dire que la relation entre k , θ et ψ est de nature fortement non-linéaire) de l'équation 3.1 rend difficile la convergence, spécialement lors du mouillage d'un sol grossier initialement sec (Pan et Wierenga, 1995). D'ailleurs, le bilan de masse des modélisations de ce cas particulier réalisées à partir de l'équation 3.1 a souvent été déficient (Hills et al., 1989 ; Huyakorn et Pinder, 1983 ; Fedors, 1996).

Afin d'éviter une très fine discrétisation, aussi bien dans le domaine de l'espace que du temps, pour le problème de l'écoulement non saturé dans des sols secs, Huyakorn et Pinder (1983) suggèrent d'utiliser l'équation d'écoulement de Richards mais sous une

forme où la variable dépendante est la teneur en eau volumique θ (Hillel, 1980a ; Huyakorn et Pinder, 1983, Hills et al., 1989) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.3)$$

où $D(\theta)$ est la diffusivité définie par $k(\theta) d\psi/d\theta$. On peut également définir la diffusivité comme étant le rapport entre la conductivité hydraulique k et la capacité de stockage $C(\psi)$. Les avantages d'utiliser cette formulation sont d'obtenir des solutions avec conservation de masse et de permettre une discrétisation plus grossière (Hills et al., 1989). La principale raison qui permet de réduire la discrétisation est que la teneur en eau varie moins près du front de mouillage que la succion rendant ainsi plus facile la convergence. Les désavantages d'utiliser la formulation avec θ comme variable dépendante sont que l'on ne peut simuler les conditions saturées et que cette équation ne permet pas de simuler directement l'écoulement de l'eau dans des milieux stratifiés (Hills et al., 1989).

Afin d'éviter les problèmes de conservation de masse pour la résolution des problèmes de l'écoulement non saturé dans des sols grossiers sec avec l'équation ayant comme variable dépendante ψ , certains auteurs ont proposé au cours des dernières années une modification du terme $C(\psi)$ de l'équation 3.1 qui assure la conservation de masse (Milly, 1985 ; Allen et Murphy, 1986 ; Celia et al., 1989, Clement et al., 1994). La stratégie utilisée par Celia et al. (1989) consiste à évaluer le changement de la teneur en eau pour chaque pas de temps à partir du changement de la pression (dernière partie du membre de droite de l'équation 3.4). L'équation 3.1 modifiée par Celia et al. (1990) s'écrit en 2D de la façon suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(S_s \frac{\theta}{\theta_s} \right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.4)$$

où S_s est appelé coefficient élastique de stockage et θ_s est la teneur en eau volumique de saturation. Les résultats obtenus par ces auteurs pour l'écoulement dans des sols secs ont

permis d'améliorer grandement la conservation de la masse. Cependant, la convergence demeure difficile (Kirkland et al., 1992).

D'autres méthodes permettant la simulation de l'écoulement en milieu non saturé peuvent être trouvées dans la littérature, comme la transformation par l'intégrale de Kirchhoff (Haverkamp et al., 1977), la transformation par l'intégrale de Kirchhoff modifiée par Ross (1992) et l'équation mixte θ - ψ de Kirkland et al. (1992). Cependant, aucune de ces techniques n'est implantée dans un modèle numérique disponible sur le marché.

3.2 Approche générale

Tel que mentionné précédemment, la très grande non linéarité des équations d'écoulement de l'eau en milieu non saturé est l'une des principales raisons qui favorisent l'utilisation de méthodes numériques pour résoudre les modèles physiques. Le principal avantage des méthodes numériques est qu'elles permettent la résolution de modèles ayant une géométrie plus complexe, se rapprochant des situations réelles. La résolution de problèmes à l'aide de modèles numériques (autant par la méthode des éléments finis MEF que par la méthode des différences finies MDF) nécessite, dans le cas de modélisations transitoires, une discrétisation dans l'espace et dans le temps. L'étape subséquente consiste à transformer les équations différentielles partielles représentant l'écoulement en équations algébriques pouvant être résolues à l'aide de méthodes numériques. Si les équations différentielles partielles initiales sont non-linéaires (comme dans le cas de l'écoulement en milieu non saturé) les équations algébriques obtenues seront également non-linéaires. La dernière étape consiste donc à résoudre les équations algébriques non-linéaires. On utilise habituellement des méthodes itératives pour accomplir cette tâche, dont les plus utilisées sont les méthodes itératives de Picard, de Newton-Raphson et de Chord Slope (Huyakorn et Pinder, 1983 ; Paniconi

et al., 1991). Il existe également d'autres méthodes qui utilisent les principes de discrétisation linéaire et procédure de linéarisation pour résoudre les équations algébriques non-linéaires. Parmi celles-ci, on retrouve la méthode implicite de factorisation, la méthode de Newton linéarisé, le procédé Picard, le procédé de factorisation implicite et le procédé trois niveaux de Lees (Paniconi et al., 1991). Parce que la plupart des modèles numériques utilisent les méthodes itératives, et que ces méthodes sont très bien documentées dans la littérature (e.g. Reddy, 1993 ; Paniconi et al., 1991, Huyakorn et Pinder, 1983), cet aspect de résolution d'équations algébriques non-linéaires ne sera pas poussé plus loin dans ce travail.

3.3 Méthode par différences finies

Il existe différentes méthodes numériques qui permettent de résoudre des problèmes d'écoulement non saturé en régime transitoire. L'une des méthodes utilisées est la méthode par différences finies MDF. Les principaux avantages de la MDF sont (Clement et al., 1994 ; Anderson et Woessner, 1992) : facilité de programmation, données de départ facile à implanter, méthode validée et très utilisée. La principale caractéristique de la méthode MDF est qu'elle permet d'obtenir des solutions aux noeuds (méthode nodale) alors que la méthode des éléments finis permet d'obtenir des solutions pour chaque élément (méthode par élément). Cependant, très peu de chercheurs ont utilisé la technique MDF pour modéliser des écoulements non saturés en deux et trois dimensions. À la connaissance de l'auteur, les seules méthodes numériques touchant la modélisation à l'aide de la méthode MDF d'écoulement non saturé en deux dimensions sont celles proposées par Kirkland et al. (1992) et par Clement et al. (1994).

La technique MDF utilise les approximations par différences centrales pour la première et la seconde dérivée de la fonction $\psi(z)$ (cas 1D dans le sens z) au point i pour résoudre

les équations différentielles (Fredlund et Rahardjo, 1993). La première dérivée de la fonction s'écrit :

$$\left(\frac{d\psi}{dz} \right)_i = \frac{\psi_{i+1} - \psi_{i-1}}{2\Delta z} \quad (3.3)$$

alors que la deuxième dérivée de la fonction au point i s'écrit :

$$\left(\frac{d^2\psi}{dz^2} \right)_i = \frac{\psi_{i+1} + \psi_{i-1} - 2\psi_i}{\Delta z^2} \quad (3.4)$$

En remplaçant la dérivée première et seconde dans l'équation d'écoulement en régime permanent (équation 3.1 en 1D), on obtient l'équation suivante :

$$k_{y(i)} \left\{ \frac{\psi_{(i+1)} + \psi_{(i-1)} - 2\psi_{(i)}}{(\Delta y)^2} \right\} + \left\{ \frac{k(\psi)_{(i+1)} - k(\psi)_{(i-1)}}{2\Delta y} \right\} \left\{ \frac{\psi_{(i+1)} - \psi_{(i-1)}}{2\Delta y} \right\} = 0 \quad (3.5)$$

Avec l'addition des conditions frontières, on peut résoudre le système à l'aide de matrices. Comme les équations sont non-linéaires, on doit utiliser des méthodes itératives pour évaluer la solution. À chaque itération, on considère les équations comme étant linéaires en fixant à k une valeur constante. Les équations présentées ici sont valides en régime permanent. En régime transitoire, on doit incorporer dans les équations le facteur temps. Les équations détaillées pour l'écoulement non saturé en régime transitoire peuvent être trouvées dans Huyakorn et Pinder (1983) et Clement et al. (1994). Plus de détails concernant la méthode des différences finies peuvent également être trouvés dans Mitchell et Griffiths (1980), Huyakorn et Pinder (1983) et Clement et al. (1994).

3.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis MEF est une méthode numérique qui vise à résoudre des équations différentielles en faisant des approximations par sous-région (appelées éléments finis). En terme mathématique, la MEF consiste à utiliser une approximation

simple de variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques (Dhatt et Touzot, 1981). Les premières applications de la méthode des éléments finis ont été formulées à l'aide de l'approche variationnelle. Cependant, au cours des dernières années, l'approche des résidus pondérés de Galerkin a augmenté en popularité (Huyakorn et Pinder, 1983), spécialement dans le cas de l'écoulement de l'eau en milieu non saturé. L'objectif de cette section n'est pas de présenter la méthode des éléments finis, qui est d'ailleurs bien documentée dans la littérature (e.g. Reddy, 1993; Zienkiewicz et Taylor, 1991; Segerlind, 1984; Bath, 1982), mais plutôt d'expliquer la théorie de base de la méthode MEF afin de garantir une application rigoureuse des logiciels utilisant cette technique.

Si l'on veut réaliser une analyse par éléments finis d'un problème physique, les étapes suivantes doivent être suivies (Huyakorn et Pinder, 1983) :

1. Le système physique doit être subdivisé en une série d'éléments finis qui sont connectés en différents points appelés noeuds. Cette étape est appelée **discrétisation** ;
2. Une expression matricielle qui représente la valeur des variables nodales de chaque élément doit être déterminée. Cette matrice résultante est habituellement appelée **matrice des éléments**;
3. La matrice des éléments est par la suite combinée ou assemblée pour former une série d'équations algébriques qui décrivent le système physique de façon globale. La matrice des coefficients de cette série d'équations est appelée **matrice globale**. La procédure d'assemblage est réalisée de façon à satisfaire certaines conditions de compatibilité pour chaque noeud partagé entre différents éléments.
4. Les conditions frontières sont incorporées par la suite dans la matrice globale.
5. Le système d'équations algébriques qui décrivent le processus physique est ensuite résolu. Différents algorithmes de résolution peuvent être utilisés pour résoudre le système dont les plus connus sont l'élimination de Gauss et la décomposition LU.

Pour ce qui concerne le cas particulier de l'écoulement de l'eau en milieu non saturé et en régime transitoire, la même séquence doit être appliquée. Dans un premier temps, on discrétise l'espace pour laquelle l'étude sera réalisée. Cette discrétisation se fait en séparant le domaine de l'espace en sous-régions appelées éléments. Différents types d'éléments peuvent être utilisés (Huyakorn et Pinder, 1983), soit des éléments triangulaires ou des éléments quadrilatères qui peuvent être de type Lagrangien, Serendipity (linéaire, quadratique ou cubique) et Hermite.

L'équation différentielle en 2D qui représente l'écoulement de l'eau en milieu non saturé pour un régime transitoire (équation 3.2) s'écrit sous sa formulation d'éléments finis (en utilisant la méthode des résidus pondérés de Galerkin) (Fredlund et Rahardjo, 1993) :

$$\int_A [B]^T [k] [B] dA \{h\} + \int_A [L]^T \lambda [L] dA \frac{\partial \{h\}}{\partial t} - \int_S [L]^T \bar{v}_w dS = 0 \quad (3.6)$$

où

[B] = matrice des dérivées des coordonnées de surface ;

[k] = tenseur de la conductivité hydraulique pour un élément ;

{h} = matrice des charges hydrauliques aux noeuds où la charge est la gravité plus la pression interstitielle ;

[L] = matrice des coordonnées des éléments ;

λ = $C(\psi)$;

$\bar{v}_w$ = vitesse de Darcy externe dans la direction perpendiculaire à la frontière de l'élément ;

S = périmètre de l'élément

La formulation abrégée de l'équation 3.6 est :

$$[D]\{h_{wn}\} + [E]\{h_{wn}\} = [F] \quad (3.7)$$

où

- [D] = matrice caractéristique élémentaire qui peut s'écrire $[B]^T [k] [B] A$;
- [E] = matrice massique (stockage) ;
- $\{h_{wn}\}$ = matrice des dérivées par rapport au temps des charges hydrauliques au noeuds $\frac{\partial \{h\}}{\partial t}$;
- [F] = vecteurs flux qui représentent les conditions frontières, i.e. $\int_S [L]^T \bar{v}_w dS$;

Les dérivées par rapport au temps de l'équation 3.7 peuvent être évaluées à l'aide de la méthode des éléments finis ou des différences finies. La plupart des modèles numériques utilisent cependant les MDF.

L'équation 3.7 peut être écrite pour chaque élément et assemblée pour former un système d'équations algébriques global qui représente l'écoulement. Ceci doit être fait en respectant la compatibilité des noeuds qui oblige qu'un noeud partagé entre plusieurs éléments doit avoir la même charge hydraulique. De plus, parce que l'équation 3.7 est non linéaire, une méthode itérative est habituellement utilisée pour résoudre la matrice et obtenir la charge hydraulique pour chaque noeud. Une fois ce résultat obtenu, on peut calculer tous les autres paramètres liés à la charge hydraulique, soit la vitesse, les débits et la pression interstitielle.

3.5 Différents modèles numériques pour l'écoulement en milieu non saturé

On retrouve, dans différentes publications, des références à des logiciels qui permettent de modéliser l'écoulement en milieu non saturé pour des conditions permanentes et transitoires. On retrouve au tableau 3.1 certains de ces modèles avec leurs caractéristiques en ce qui concerne la procédure de résolution.

Certains logiciels, que l'on retrouve au tableau 3.1, ont permis à certains chercheurs de modéliser l'écoulement dans des barrières capillaires. UNSAT2 par exemple a été utilisé par Smith (1996) pour modéliser le comportement de barrière capillaire en 2D. Une version modifiée de UNSAT (UNSAT-H, ver.2), qui tient compte du transfert de chaleur, a été utilisé par Fayer et al. (1992) pour simuler de façon unidimensionnelle des barrières de recouvrement multicouches avec effet de barrière capillaire. VSAFT2, quant à lui, a permis la simulation de l'écoulement à travers des barrières capillaires inclinées (Yeh et al., 1994). Enfin, le logiciel SEEP/W a permis de modéliser l'écoulement à travers des recouvrements multicouches avec effet de barrière capillaire dans plusieurs cas (Yanful et Aubé, 1993 ; Woysner et Yanful, 1995, Bussière et al., 1995 ; Aubertin et al., 1997a, Ricard et al., 1997). Une version non commerciale d'un logiciel utilisant l'équation mixte de Richards (proposée par Celia et al., 1992) a été utilisée par Sydor (1992) pour simuler différents types de recouvrements avec effet de barrière capillaire.

Certaines de ces études (Sydor, 1992 ; Fayer et al., 1992 ; Yanful et Aubé, 1993 ; Woysner et Yanful, 1995) ont comparé les résultats mesurés dans des conditions contrôlées (essais en colonne ou en lysimètre) avec ceux simulés numériquement. Dans tous ces cas, les résultats simulés se sont situés près des valeurs mesurées permettant ainsi de conclure que les modèles numériques peuvent prédire avec succès le comportement non saturé des sols stratifiés avec effet de barrière capillaire. Fedors (1995) a, quant à lui, comparé l'efficacité des différentes équations (Richards avec ψ et θ comme variable dépendante et l'équation mixte de Richards) pour simuler des conditions non saturées en 1D. La conclusion de l'auteur est que la forme mixte de l'équation de Richards est préférable à l'équation de Richards avec ψ ou θ comme variable dépendante. La vitesse d'itération est plus grande et la conservation de masse est presque parfaite avec l'équation mixte.

Tableau 3.1 : Résumé des caractéristiques des principaux modèles numériques existants

Modèle	Équation	Méthode de résolution	Référence
UNSAT2	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF*, élimination de Gauss	Neumann (1973)
FEMWATER	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF, élimination de Gauss	Yeh et Ward (1981)
3-D FEMWATER	Richards 3D avec ψ comme variable	MEF, élimination de Gauss	Yeh (1992)
SATURN	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF, décomposition LU	Huyakorn et al. (1984)
FLAMINCO	Richards 3D avec ψ comme variable	MEF, décomposition LU	Huyakorn et al. (1986)
VS2DT	Richards 2D avec ψ comme variable	MDF**, procédure implicite	Healy (1990)
RMA42	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF	Fleenor et King (1995)
VSAFT2	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF	Yeh et Srivastava (1990)
SEEP/W	Richards 2D avec ψ comme variable	MEF, élimination de Gauss	GEOSLOPE International (1994)

* : MEF pour Méthode des Éléments Finis

** : MDF pour Méthode par Différences finies

CHAPITRE IV

EFFETS DE BARRIÈRE CAPILLAIRE : DESCRIPTION ET MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES 1D

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principes physiques reliés aux effets de barrière capillaire et d'évaluer l'importance de différents paramètres sur le comportement des CEBC. Parce que le phénomène implique un écoulement en milieu non saturé, les équations à résoudre ont un caractère fortement non linéaire. On retrouve dans la littérature quelques solutions quasi-analytiques pour des cas simples avec conditions spécifiques (e.g. Philip, 1957 ; Bear, 1972 ; Parlange, 1972 ; Parlange et al., 1982 ; Ross et al., 1995 ; Lockington et Parlange, 1995) qui, souvent, ne représentent pas la réalité de terrain. C'est pourquoi, lorsque vient le temps de prédire le comportement hydrogéologique d'une couverture avec effets de barrière capillaire, l'utilisation de modèles numériques devient pratiquement inévitable.

Dans ce chapitre, on présente une explication physique des effets de barrière capillaire suivie d'une schématisation du phénomène. On poursuit avec des résultats d'analyses numériques tirées de la littérature et d'autres modélisations unidimensionnelles réalisées dans le cadre de cette étude qui permettent de mieux comprendre les principes qui sous-tendent les CEBC.

4.1 Effets de barrière capillaire

Tel que mentionné précédemment, on utilise de plus en plus de recouvrements avec effets de barrière capillaire pour isoler une source potentielle de contamination de l'environnement. Les effets de barrière capillaire apparaissent lorsqu'un écoulement non

saturé est présent dans un matériau fin situé par dessus un matériau grossier. En raison du contraste de granulométrie des matériaux et, par conséquent, du contraste dans les caractéristiques de rétention d'eau, seulement une partie du débit d'eau qui atteint l'interface est transmise au matériau grossier. Les principes sous-jacents à ce concept ont été décrits (avec plus ou moins de détails) dans de nombreuses publications; mentionnons : Frind et al. (1976), Gillham (1984), Rasmuson et Erikson (1986), André-Jehan et al. (1988), Nicholson et al. (1989, 1990, 1991), Collin et Rasmuson (1990), SRK (1991), Akindunni et al. (1991), Morel-Seytoux (1992, 1993), Aachib et al. (1993), Melchoir et al. (1993), Wing et Gee (1993), Barrès et Bonin (1994), Chiu et Shackelford (1994), Shackelford et al. (1994), Aubertin et al. (1995b).

Un système de recouvrement bicouche typique utilisant le principe de barrière capillaire est présenté à la figure 4.1. On retrouve sur cette figure une schématisation du mouvement de l'eau dans les deux couches d'un système sol fin sur sol grossier. L'eau qui s'infiltre de la surface ne pourra s'écouler à travers la couche de matériau grossier (initialement non saturée) que lorsque la tension capillaire dans le matériau de la couche fine sera proche de zéro (i.e. le matériau est complètement saturé). L'assèchement de la couche grossière (formées de matériaux grossiers à faible valeur de AEV) permet ainsi d'empêcher le mouvement de l'eau vers le bas, ce qui favorise le maintien d'un haut degré de saturation dans la couche fine.

Tel qu'on vient de le mentionner, l'effet de barrière capillaire implique l'écoulement de l'eau en milieu non saturé. La relation ψ - θ d'un matériau meuble, souvent appelée courbe caractéristique de succion (ou courbe de rétention d'eau), peut être utilisée pour estimer les conditions d'écoulement non saturées. 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). Les principaux modèles

mathématiques permettent de décrire ou même de prédire ces courbes à partir de propriétés de base du matériau ont été présentées au chapitre 2 de ce document.

Lorsque $\psi < \psi_a$, on a $\theta < n$ (ou un degré de saturation $S_r < 100\%$); cela entraîne que $k \leq k_{sat}$ (où k_{sat} est la valeur de la conductivité hydraulique à l'état saturé; k est la conductivité hydraulique pour une succion donnée). L'application de la loi de Darcy pour les écoulements non saturés, présentée au chapitre 2 et 3, nécessite la connaissance de la fonction de perméabilité. Deux exemples, pour un silt et un sable, d'une telle relation entre k et ψ ont été présentés au chapitre 2 (voir figure 2.3). Pour connaître la relation entre la conductivité hydraulique k et la pression interstitielle ψ , il est possible de réaliser au laboratoire des essais de perméabilité en milieu non saturé qui permettront de définir cette relation (Kissiova, 1996). Cependant, la réalisation de tels essais est complexe. Pour contourner ce problème, on déduit habituellement la relation k - ψ à partir de la courbe caractéristique de succion. Puisque θ varie en fonction de ψ et que k est fonction de θ , il est possible de déduire la fonction k - ψ à partir de θ - ψ . Les principaux modèles permettant de prédire la fonction de perméabilité pour un sol à partir de la courbe de succion ont d'ailleurs été présentés au chapitre 2.

Il y a une certaine similitude entre la forme de la relation ψ - θ et celle de la relation ψ - k , tel que l'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. Lorsque l'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 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.

4.2 Schématisation du phénomène en une seule dimension

Morel-Seytoux (1992) a schématisé l'effet de barrière capillaire pour un système bicouche de la façon suivante. Lors du mouillage du système, dont les matériaux ont des caractéristiques de rétention d'eau représentées par les courbes de succion de la figure 4.2, les pores les plus petits vont d'abord capter l'eau, puis progressivement les pores plus gros vont se remplir et ce jusqu'à ce que la pression capillaire exercée dans les pores devienne égale à la pression de l'eau ajoutée. À une succion donnée, la teneur en eau volumique θ dans le silt est plus grande que celle dans le sable. À l'interface entre les deux matériaux, en raison des obligations de continuité, la pression et le débit d'eau doivent être les mêmes. Posons que la succion est égale à ψ_x (voir figure 2.2). Compte tenu des courbes caractéristiques de succion de ces deux matériaux, il faut donc nécessairement que la teneur en eau θ soit plus grande dans le silt que dans le sable, ce qui entraîne que la teneur en eau θ est discontinue à l'interface.

Pour illustrer cela, regardons le cas fictif d'une faible venue d'eau sur un système bicouche (silt sur sable). Dans une telle barrière, la couche de matériau fin peut se recharger très facilement, même suite à une venue d'eau peu abondante. À la figure 4.2, la condition ψ_1 représente la pression dans le matériau fin près de l'interface avec le matériau grossier, à un temps donné suite à une venue d'eau en provenance de la surface. La teneur en eau volumique correspondante est moindre que la valeur de saturation (θ_s) pour le silt ($(\theta_n)_1 < 1$). La condition de continuité implique que la même pression ψ_1 agit aussi dans le sable près de l'interface. Mais comme on doit aussi satisfaire la condition de continuité du débit à l'interface, la teneur en eau volumique normalisée dans le sable ne peut pas être $(\theta_n)_1$, correspondant à ψ_1 sur la figure 4.2. Posons que la valeur pour

satisfaire cette dernière condition est de $(\theta_n)_2$, dans le sable ($(\theta_n)_2 > (\theta_n)_1$). On a alors que ψ_2 dans le sable n'égale pas la valeur de ψ_1 dans le silt, ce qui viole la première condition. Pour satisfaire ces deux conditions simultanément, la pression dans la couche de sable doit être réduite de ψ_2 à ψ_3 et celle dans le silt doit être augmentée de ψ_1 à ψ_3 . Pour sa part, la teneur en eau doit baisser de $(\theta_n)_2$ à $(\theta_n)_3$, dans le sable et augmenter de $(\theta_n)_1$ à $(\theta_n)_3$ dans le silt. Ce phénomène implique qu'une partie de l'eau qui migre vers le bas sera repoussée à l'interface silt-sable, de sorte que seule une fraction de l'eau qui migre à travers la couche fine passera à travers la couche grossière, et ce tant que la couche de silt ne sera pas saturée (ou presque).

L'exemple qui précède a été analysé en détail par Morel-Seytoux (1992) qui a proposé une solution analytique en condition transitoire. À partir des caractéristiques de rétention d'eau des deux sols et de d'autres caractéristiques du modèle, on peut connaître, à l'aide de cette solution analytique, le débit transmis du matériau fin au matériau grossier. La principale conclusion de ces travaux est que plus les contrastes de la relation $\psi - \theta$ sont marqués entre les deux matériaux, plus faible sera la proportion d'eau qui passera de la couche fine vers la couche grossière. Toutefois, le débit dans la couche inférieure augmente à mesure que l'on se rapproche d'un état stationnaire où la couche de silt devient pratiquement saturée.

4.3 Modélisations numériques de CEBC

La modélisation numérique a été fréquemment utilisée au cours des dernières années pour bien visualiser et comprendre l'influence des différents paramètres sur l'efficacité d'une barrière capillaire. On retrouve dans cette partie du travail des résultats de modélisations numériques tirés de la littérature ainsi que d'autres réalisées spécifiquement pour ce travail.

4.3.1 Modélisations numériques tirées de la littérature

Miller (1969)

L'effet de barrière capillaire a été simulé, à l'aide de modèles physiques et numériques, par Miller (1969). L'objectif principal de ses travaux était de mieux comprendre l'effet de la stratification des sols sur la quantité d'eau contenue dans ceux-ci. En effet, des études antérieures (Eagleman et Jamison, 1962, Robins, 1959) ont démontré que le fait de placer une couche de matériau grossier sous une couche de matériau fin a pour conséquence d'augmenter la quantité d'eau dans la couche du dessus. Cette caractéristique des sols stratifiés peut avoir un impact important en agriculture puisque la quantité d'eau disponible pour les plantes pourrait être plus grande dans le cas des sols stratifiés.

Afin d'étudier ce phénomène, 6 profils (ou cellules) de 2,4 m par 3 m et de 1,5 m de profondeur ont été construits. Certains de ces profils sont uniformes (matériau silteux seulement) tandis que d'autres sont stratifiés (couche fine par dessus couche grossière). La couche fine des profils stratifiés est constituée du même matériau silteux que pour le profil uniforme, tandis que deux matériaux grossiers ont été utilisés pour la couche grossière, soit un sable et un gravier. Chaque profil est instrumenté de tensiomètres et de sondes à neutron afin d'évaluer la succion et la teneur en eau. Après avoir saturé les différents profils, le drainage au bas a été permis.

Les résultats mesurés montrent que le profil uniforme contient moins d'eau après drainage que les profils stratifiés (voir figure 4.3). De plus, on observe que plus le matériau de la couche du bas est grossier, plus le matériau fin contient de l'eau. L'auteur explique le phénomène par le fait qu'un matériau grossier se draine à une succion plus

faible. En se drainant, le matériau grossier devient de plus en plus résistant à l'écoulement de l'eau permettant ainsi de garder plus d'eau dans la couche supérieure. Les mesures de succion montrent également que celle-ci est moins grande dans la couche fine lorsque l'on est en milieu stratifié.

Afin de vérifier sa compréhension des phénomènes impliqués, l'auteur a comparé les résultats mesurés avec ceux estimés à l'aide de la méthode suivante. En prenant la fonction de perméabilité du matériau grossier, on estime dans un premier temps la valeur de succion pour laquelle le drainage à travers la couche grossière devient négligeable. Dans ce travail, l'auteur considère qu'à une valeur de conductivité hydraulique 0,1 à 0,01 cm/j (environ 10^{-6} à 10^{-7} cm/s) la quantité d'eau qui s'infiltre est négligeable. Si on considère que la succion à l'interface est la même dans les deux matériaux et que l'augmentation de la succion dans le matériau fin est de 1 mb par centimètre d'élévation, il est possible de retrouver à partir de la courbe caractéristique de succion du matériau fin le profil de teneur en eau. La comparaison de l'auteur entre les valeurs mesurées et celles estimées montre une assez bonne corrélation. Cette technique semble intéressante comme première estimation du profil de teneur en eau de la couche fine.

Dans un troisième temps, l'auteur a réalisé des simulations à l'aide de la méthode numérique développée par Hanks et Bowers (1962). Les principaux objectifs des simulations étaient de comparer les valeurs mesurées à celles modélisées et d'évaluer l'impact de granulométrie de la couche grossière sur la quantité d'eau retenue dans la couche fine. En ce qui concerne la relation entre les valeurs mesurées et simulées, elle est excellente puisque la différence entre les deux se situe à près 1 % de teneur en eau volumique. Pour l'effet de la granulométrie sur la rétention d'eau des sols stratifiés, tel qu'observé par les mesures de terrain, les résultats des analyses numériques montrent que plus la granulométrie de la couche du bas est grossière, plus la couche fine contient de l'eau.

Akindunni et al. (1991)

Les travaux réalisés par Akindunni et al. (1991) visent à démontrer, à l'aide d'un modèle numérique, l'effet de barrière capillaire lorsque l'on place un matériau grossier sous un matériau fin. Les courbes caractéristiques de succion et les fonctions de perméabilité des matériaux incorporés dans leurs modèles numériques ont été évaluées respectivement à l'aide du modèle de van Genuchten (1980) et de Mualem (1976). Les matériaux qui ont été étudiés sont des sables et des matériaux silteux. La stratigraphie des profils simulés est une couche grossière de 2,5 m d'épaisseur sous une couche fine de 1 m. Trois combinaisons différentes de sol fin sur sol grossier ont été analysées. Le logiciel utilisé par les auteurs utilise la méthode des éléments finis et a été développé pour résoudre des cas unidimensionnel en milieu saturé et non saturé à travers des sols bicouches. Pour les simulations, la nappe phréatique a été placée initialement au haut du profil pour ensuite être descendue (en 3600 secondes) à la base du profil.

Les résultats obtenus ont montré que la succion que l'on retrouve dans les matériaux dépend de la capacité de rétention d'eau de la couche grossière. Plus le matériau est grossier, moins il retient l'eau et plus rapidement il se draine. Ceci entraîne que la succion dans le matériau est plus faible puisque le bris capillaire s'effectue dans le matériau grossier à une succion plus faible. Les modélisations numériques avec un grand contraste entre les deux matériaux montrent que même après 56 jours de drainage, la succion maximale dans la couche fine ne dépasse pas -125 cm d'eau (cas C de la figure 4.4). Lorsque le contraste est moins prononcé, la succion maximale après 56 jours de drainage est de -170 cm d'eau (cas A de la figure 4.4).

En ce qui concerne les profils de teneur en eau, on remarque, à la figure 4.5, que pour la plupart des combinaisons, le sable se draine rapidement. Quant à la teneur en eau du matériau fin, elle dépend de la capacité de rétention d'eau de celui-ci. Si le matériau fin a

une bonne capacité de rétention d'eau, son degré de saturation demeure près de 100 % (cas B et C de la figure 4.5). Par contre, dans le cas où le matériau fin ressemble au grossier en terme de capacité de rétention d'eau (cas A de la figure 4.5), le degré de saturation descend à des valeurs près du degré de saturation résiduelle.

Les principales conclusions que l'on peut tirer des travaux réalisés par Akindunni et al. (1991) sont qu'il y a deux caractéristiques fondamentales des matériaux qui influencent l'effet de barrière capillaire. Tout d'abord, la succion qu'il faut exercer pour drainer la couche grossière du bas. Plus cette pression est faible, plus l'effet de barrière capillaire se produit rapidement entraînant une succion plus faible et ainsi un degré de saturation élevé dans la couche située au-dessus. Un autre aspect important est le AEV du matériau fin (couche du dessus). Plus le AEV est grand, plus il faut exercer une grande succion pour débiter le drainage. Si on veut conserver un haut degré de saturation dans la couche du haut (comme dans les recouvrements sur des parcs à résidus miniers générateurs de drainage minier acide), il faut s'assurer que la succion qui s'exerce dans le matériau fin soit inférieure au AEV de celui-ci.

Sydor (1992)

Les travaux réalisés par Sydor (1992) avaient pour but d'évaluer le comportement en drainage de recouvrements placés sur des résidus miniers. Afin d'atteindre cet objectif, un essai en colonne a été réalisé. Une figure schématique représentant la colonne ainsi que l'instrumentation installée dans celle-ci est présentée à la figure 4.6. La colonne utilisée est faite d'un Plexiglas de 1 m de long ayant un diamètre interne de 10,8 cm. On remarque que la colonne est instrumentée à l'aide de sonde RDT et de tensiomètres visant à évaluer respectivement la teneur en eau volumique et la succion. Les sondes RDT et les tensiomètres sont espacés de 10 cm sur toute la hauteur de la colonne. Un système d'acquisition de données permet la prise de mesure en continu. De plus, on

retrouve au bas de la colonne une pierre céramique ayant un AEV de 0,5 bar servant à simuler une nappe phréatique sous la colonne. L'épaisseur des couches dans la colonne est de 20 cm pour la couche fine et de 80 cm pour la couche grossière. Cependant, aucun renseignement sur l'état en place des matériaux n'est présenté.

Trois simulations physiques ont été réalisées où seules les conditions initiales étaient différentes. À la figure 4.7, on présente les résultats de la première simulation. En ce qui concerne la pression (ou succion) dans le système de recouvrement, on remarque qu'il s'établit un équilibre après environ 5 heures et que, par la suite, il y a très peu de changement. Le profil de pression est à peu près vertical à une valeur de succion d'environ 20 cm d'eau. Ceci montre l'effet de barrière capillaire qui empêche la succion d'augmenter avec l'élévation dans la couche grossière. La succion dans la couche fine augmente, à partir de la valeur à l'interface (environ -20 cm d'eau), de façon linéaire avec une pente à peu près équivalente à celle de l'équilibre statique. Pour ce qui est du degré de saturation, il chute rapidement dans la couche de sable (couche du bas) jusqu'à sa valeur résiduelle (environ 10 %). Quant à la couche fine, le degré de saturation demeure à des valeurs supérieures à 75 % et ce, même après 15 jours de drainage, démontrant bien l'effet de barrière capillaire.

Afin de vérifier si les modèles numériques peuvent bien prédire le comportement de recouvrement, une comparaison entre les valeurs prédites et mesurées a été réalisée. Le modèle numérique utilisé est un modèle unidimensionnel utilisant l'équation mixte de Richards pouvant travailler en mode transitoire pour des conditions saturées et non saturées (Celia et al., 1990). La courbe caractéristique de succion, nécessaire pour la modélisation, a été déterminée au laboratoire à l'aide de la méthode de Haines modifiée. La technique de lissage de courbe proposée par van Genuchten (1980) a ensuite été utilisée sur les résultats obtenus au laboratoire. La relation de Mualem (1976) a, quant à elle, servi à la prédiction des fonctions de perméabilité.

Les résultats obtenus ont démontré que le modèle numérique utilisé permet de prédire de façon assez précise le comportement hydrogéologique d'une barrière capillaire. On montre à la figure 4.8 un exemple de résultats obtenus par modélisation versus ceux mesurés expérimentalement. Cependant, en général, les modélisations numériques prédisent des teneurs en eau supérieures dans la couche fine par rapport à celle mesurées. Une des raisons proposées par l'auteur est la faible corrélation entre la valeur de la courbe caractéristique de succion mesurée au laboratoire avec l'appareil de Haines et celle mesurée dans la colonne à partir des tensiomètres et des sondes RDT. Cette faible corrélation serait due en partie à la présence de gaz emprisonnés dans les pores du matériau fin qui ne peuvent être simulés par le logiciel.

Parce qu'il a montré qu'il pouvait prédire de façon assez précise le comportement hydrogéologique de recouvrements à l'aide d'un modèle numérique, l'auteur a décidé d'étudier le comportement hydrogéologique de différents recouvrements à partir du même modèle. Plusieurs modélisations différentes (36) ont été réalisées. L'objectif de ces simulations est d'étudier les principaux paramètres qui influencent les recouvrements, soit :

1. le contraste granulométrique entre les couches ;
2. le nombre de couches ;
3. l'épaisseur des couches ;
4. la position de la nappe phréatique ;
5. le coefficient d'emmagasinement ;
6. le drainage ;
7. l'infiltration ;
8. l'évaporation.

Les principales conclusions tirées par l'auteur de ces simulations sont les suivantes. L'effet de la nappe phréatique est négligeable en terme de pression dans le matériau de la couche fine ; l'effet de la nappe sur l'efficacité du bris capillaire est donc faible.

Comme on pouvait s'y attendre, les modélisations numériques ont démontré que le contraste granulométrique a un impact direct sur le comportement hydrogéologique du recouvrement. Plus le contraste est grand, plus le degré de saturation du matériau fin reste élevé et, par le fait même, plus l'effet de barrière capillaire est grand. De plus, des analyses ont démontré qu'un phénomène de barrière capillaire est également présent lorsque l'on place une troisième couche sur le dessus. Un aspect intéressant de ces simulations est que, tout comme pour le drainage, plus le contraste est grand, plus le système est efficace pour limiter l'évaporation.

Pour ce qui concerne les épaisseurs des couches, les résultats des modélisations numériques réalisées par l'auteur l'amènent à conclure que l'épaisseur de la couche grossière du bas n'a pas d'impact sur le profil de teneur en eau de la couche fine. À noter cependant que l'épaisseur de la couche grossière a toujours été dans les modélisations d'une épaisseur plus grande ou égale au AEV. Toutefois, l'auteur considère que l'épaisseur de la couche fine est importante pour deux raisons. Tout d'abord, pour une épaisseur plus grande, il y a une quantité d'eau plus grande (emmagasinement plus grand). Ceci a pour effet de retarder dans le temps l'augmentation de la succion à l'interface. Deuxièmement, l'évaporation calculée a été moins grande lorsque la couche fine était plus épaisse.

À partir des modélisations réalisées, l'auteur conclut que le nombre de couches dépend des matériaux en place. Si l'on est en présence d'un matériau grossier à couvrir, l'ajout d'un matériau fin sur le dessus ayant un grand contraste granulométrique avec celui du bas pourrait être suffisant pour créer l'effet de barrière capillaire et ainsi maintenir un

haut degré de saturation dans la couche fine. Cependant, dans l'éventualité où le contraste entre les deux matériaux n'est pas assez grand, l'ajout d'une couche intermédiaire grossière pourrait s'avérer nécessaire.

Enfin, comme conclusion générale, l'auteur indique que le paramètre le plus important pour un système de recouvrement utilisant l'effet de barrière capillaire est la succion à l'interface ψ_{int} . En effet, la succion dans le matériau fin augmente, à partir de l'interface, selon une pente unitaire ayant comme abscisse à l'origine ψ_{int} . Plus la valeur de ψ_{int} sera faible, moins grande sera la succion dans le matériau fin et plus grand sera le degré de saturation dans ce matériau. Pour avoir une valeur de ψ_{int} la plus basse possible, on doit avoir un matériau grossier qui se draine à des succions faibles. Puisque ψ_{int} après drainage est à peu près équivalent à la succion qui entraîne la teneur en eau résiduelle dans le matériau grossier ψ_r , l'auteur propose une équation qui permet d'évaluer l'épaisseur maximale de la couche fine qui sera complètement saturée :

$$b_F = \psi_{rG} - \psi_{aF} \quad (4.1)$$

où b_F est l'épaisseur maximale de la couche fine qui peut être saturée, ψ_{rG} est la succion qui permet d'atteindre la teneur en eau résiduelle de la couche grossière et ψ_{aF} est la AEV du matériau fin. D'autres études expérimentales ont permis de vérifier l'exactitude de cette formule (e.g. Miller et Bunger, 1963 ; Clothier et al., 1977).

Fayer et al. (1992)

À partir des parcelles expérimentales du site Hanford situé dans l'état de Washington, les auteurs ont calculé le bilan hydrique des parcelles expérimentales et ont par la suite tenté de simuler ce bilan à partir d'un logiciel servant à modéliser l'écoulement de l'eau en milieu non saturé (UNSAT-H Version 2).

Six des huit lysimètres installés dans les parcelles sont des cylindres avec un fond étanche munis d'un drain. Deux lysimètres par conditions de précipitation ont été préparés. Les conditions de précipitation simulées sont les précipitations naturelles, deux fois les précipitations moyennes mesurées entre 1955 et 1980 et les précipitations maximales (e.i. ajout d'eau jusqu'à ce qu'il y ait drainage au bas du lysimètre). Pour ce qui est des deux derniers lysimètres, ce sont des parallélépipèdes de 152 cm de côtés et de 170 cm de hauteur. Le fond est étanche avec, encore une fois, un drain. Ces derniers lysimètres contiennent un recouvrement multicouche. L'instrumentation installée dans les lysimètres est constituée de sondes à neutron servant à évaluer la teneur en eau et de drains servant à mesurer le drainage. On présente à la figure 4.9 une représentation schématique des lysimètres ainsi que du modèle conceptuel utilisé pour les simulations numériques.

En ce qui concerne les courbes caractéristiques de succion du silt (Silt loam) mis en place dans les lysimètres, elles ont été évaluées à l'aide de trois techniques, soit la colonne d'eau retenue ("*hanging water column*"), la plaque de pression ("*pressure plate*") et la méthode d'adsorption de la vapeur ("*vapor adsorption method*"). Les données ont par la suite été entrées dans un logiciel de lissage de courbe utilisé spécifiquement pour les courbes caractéristiques de succion (van Genuchten, 1980). Quant à la fonction de perméabilité du silt, elle a été déterminée à partir de la courbe caractéristique de succion. Dans ce projet, le modèle de Mualem (1976) a été utilisé. Les données prédites ont été validées à partir de mesures effectuées à l'aide de la méthode du débit en régime permanent ("*steady-state flux control method*") (Klute et Dirksen, 1986). Pour le sable et le gravier présents dans les lysimètres, étant donné que des simulations préliminaires ont démontré que le modèle était peu sensible à un changement des caractéristiques de succion de ces matériaux, des données tirées de la littérature pour des sols semblables ont été utilisées.

Deux conditions frontières ont été déterminées afin de bien simuler les lysimètres, soit les conditions au-dessus et en dessous du lysimètre. Pour les lysimètres en forme de cylindre (appelé lysimètre de drainage), étant donné la profondeur du drain, un gradient unitaire a été imposé au bas. Pour les lysimètres rectangulaires (appelé lysimètres à balance), la distance entre le dessus et la base n'étant pas suffisante pour imposer une condition de gradient unitaire, une condition flux-zéro a été imposée. Quant aux conditions frontières du dessus, elles ont été évaluées à partir des données d'une station météorologique installée sur le site. Ces données ont permis de connaître les précipitations ainsi que le potentiel d'évaporation PE.

Les résultats obtenus pour les conditions ambiantes montrent que, dans l'ensemble, le logiciel prédit bien les tendances en terme de teneur en eau (voir figure 4.10). En terme d'eau contenu (emmagasinement) dans le lysimètre, les valeurs mesurées ont été quelque peu supérieures à celles prédites en hiver alors qu'elles ont été inférieures en été. L'auteur explique le phénomène par un problème d'évaluation de l'évaporation. Des résultats similaires ont été obtenus pour le cas où on a doublé les conditions de précipitation. Ces résultats confirment, selon les auteurs, que l'évaporation est surestimée durant l'hiver alors qu'elle est sous-estimée durant l'été.

Les auteurs estiment qu'il y a principalement trois paramètres qui peuvent expliquer la différence entre les valeurs mesurées et celles prédites par le logiciel UNSAT-H, soit les paramètres k_{sat} et ℓ (ou encore η de l'équation 2.26) de l'équation de Mualem (1976) incorporée dans le logiciel RETC de van Genuchten (1991), la présence d'une couverture de neige et une réduction du PE.

Le logiciel de van Genuchten (1991) s'assure que la valeur de k_{sat} se situe dans un intervalle de confiance de 95 %. Cela veut dire que k_{sat} se situe dans l'intervalle $0,54 k_{sat}$ et $1,43 k_{sat}$. D'utiliser une valeur $0,54 k_{sat}$ dans les simulations a pour effet de réduire

l'évaporation (ou augmenter l'emmagasinement) tandis que d'utiliser $1,43 k_{\text{sat}}$ produit l'effet contraire. En ce qui concerne le paramètre ℓ , qui a pour but de représenter l'interaction entre les pores (Mualem, 1976), la valeur utilisée dans les simulations est de 0,5 tel que proposé par Mualem (1976). Cependant, lorsque l'on examine les travaux de Mualem, on se rend compte qu'une valeur de 0 pour le paramètre ℓ semble tout aussi valide que 0,5. Cependant, lorsque l'on utilise 0 comme valeur de ℓ dans les simulations numériques, l'évaporation augmente sensiblement pour la période du printemps à l'automne tandis qu'elle est très peu affectée durant l'hiver.

L'effet d'une couverture de neige et du gel sur les lysimètres a un impact important sur les problèmes à simuler les conditions hivernales. En effet, la couverture de neige a un albédo élevé qui diminue de façon significative le potentiel d'évaporation. De plus, un sol gelé empêche l'évaporation en réduisant l'écoulement de l'eau du bas vers la surface et réduit la densité de la vapeur à la surface réduisant ainsi le gradient qui gère l'évaporation. À partir de ces nouvelles considérations, les auteurs ont décidé d'imposer un PE nul pour les périodes où il y a un recouvrement de neige. Les nouvelles simulations pour ces périodes ont permis d'obtenir des résultats très près des valeurs observées. Parce que le taux d'évaporation simulé durant les périodes chaudes est toujours supérieur à celui mesuré, les auteurs suggèrent une réduction de 30 % du PE.

Maintenant que les paramètres qui expliquent la différence entre les valeurs de PE prédites et mesurées ont été identifiés, il reste la calibration des paramètres. En ajustant les paramètres, les auteurs ont réussi à obtenir des résultats pratiquement identiques entre les valeurs prédites et mesurées (voir figure 4.11).

Des modélisations physiques et numériques dans le cas où l'on arrose jusqu'à ce que l'on observe un drainage au bas de la colonne ont permis d'identifier l'influence de certains paramètres, dont l'influence d'être en mouillage ou en séchage (effet

d'hystéresis) sur les résultats des modélisations. Les résultats ont démontré qu'il y a une différence significative entre le profil de teneur en eau en mouillage et en séchage.

Les principales conclusions que l'on peut tirer des travaux réalisés par Fayer et al. (1992) sont les suivantes. Premièrement, il est possible de prédire de façon assez précise le comportement de recouvrements multicouches à l'aide d'un modèle mathématique. Cependant, certains points doivent être améliorés afin de mieux prédire le comportement hydrogéologique par modélisations numériques. Ces points sont la conductivité hydraulique en milieu non saturé à des suctions supérieures à 200 cm d'eau, l'effet d'hystéresis, l'effet de la neige sur le PE, l'effet du gel sur le PE, le calcul du PE et l'effet des variations de température sur l'écoulement de l'eau.

Woysner et Yanful (1995)

Quatre cellules expérimentales ont été construites sur le site Waite-Amulet près de Rouyn-Noranda. Deux de ces cellules ont pour objectif d'évaluer l'efficacité de barrières multicouches utilisant le principe de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide provenant de résidus miniers. Les cellules sont d'une dimension de 20 m par 20 m et sont constituées d'une couche fine d'argile de 60 cm placée entre deux couches de sable de 30 cm. Une couche de gravier grossier a été placée sur le dessus afin d'éviter l'érosion. Sous chacune des cellules, on retrouve un lysimètre de surface de collection 2,2 m² et de volume d'environ 2 m³ servant à la collecte de l'eau de percolation. Chaque cellule est instrumentée afin de connaître la teneur en eau, la température dans le sol et la succion dans le sol. De plus, des tubes d'échantillonnage de gaz et des piézomètres ont été installés dans les cellules. Plus de renseignements sur le design et l'instrumentation des cellules expérimentales peuvent être trouvés dans la littérature (Yanful et St-Arnaud, 1991 et Yanful, 1993). L'objectif de Woysner et Yanful (1995) est de comparer la percolation mesurée dans les lysimètres avec celles prédites par des modèles

numériques. De plus, les niveaux de saturation mesurés dans les recouvrements sont comparés à ceux prédits.

Les premières modélisations ont été réalisées à l'aide d'un modèle déterministe appelé HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance). Le logiciel a été conçu pour réaliser des bilans hydrologiques de sites d'enfouissement à partir de données climatiques, des caractéristiques des sols et du design du recouvrement (Schroeder et al., 1984). À partir de ces renseignements, le logiciel prédit le ruissellement, l'infiltration, le drainage latéral et l'évaporation. Les autres composantes du bilan sont déduites à partir de ces résultats. Les données climatiques utilisées dans les modélisations proviennent de quatre stations météorologiques situées à l'intérieur d'un rayon de 500 km.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 4.12. De façon générale, ceux-ci montrent qu'environ 4 % des précipitations s'infilte à travers le recouvrement. Selon les auteurs, cette quantité devrait être suffisante pour garantir un apport d'eau à la couche d'argile et ainsi maintenir un haut degré de saturation.

Puisque les auteurs considèrent que la conductivité hydraulique de la couche fine est le principal paramètre qui gère l'infiltration à travers la couverture, ils ont réalisé une analyse de sensibilité sur ce paramètre. On peut voir à la figure 4.13 que les paramètres les plus sensibles sont la percolation à travers le recouvrement et l'évaporation. En effet, la percolation à travers la couverture chute de 425 mm à moins de 50 mm lorsque la conductivité hydraulique de l'argile varie de 10^{-5} à 10^{-7} cm/s. Quant à l'évaporation, elle augmente lorsque la conductivité hydraulique k diminue tout simplement parce que plus d'eau devient disponible pour l'évaporation dans la couche de sable du dessus lorsque k de l'argile est faible.

D'autres modélisations ont par la suite été réalisées à l'aide du logiciel SEEP/W (les détails de ce logiciel seront présentés plus tard). Les cellules ont été simulées en deux dimensions pour des conditions en régime permanent. Les courbes caractéristiques de succion des différents matériaux ont été évaluées au laboratoire. Quant aux fonctions de perméabilité, elles ont été déduites, à partir de la courbe de succion, à l'aide du modèle de Childs et Collis-George (1950) modifié par Kunze et al. (1968). Les conditions frontières du dessus ont été obtenues à partir des résultats de simulations réalisées avec HELP, soit un flux positif constant de 303,6 mm/a. Les conditions frontières du côté du recouvrement ont été fixées aux valeurs mesurées par les piézomètres. Le fond quant à lui a été représenté comme étant une limite imperméable, ce qui ne semble pas très représentatifs de la réalité. Il est important de noter que les conditions de régime permanent simulent un système où l'évaporation et les précipitations sont constantes tout au long de l'année. Ceci est très loin de la réalité. Il faut donc bien comprendre que les résultats représentent des conditions moyennes d'écoulement.

Les résultats obtenus montrent que dans la couche de sable du dessus, un écoulement latéral est présent (ce qui corrobore les résultats obtenus avec HELP). De plus, les résultats obtenus, qui sont présentés à la figure 4.14, montrent une concentration de la charge dans la couche de sable du bas illustrant qu'il faut un plus grand gradient pour provoquer un écoulement. Afin de respecter la loi de continuité, le flux à l'interface doit être le même de chaque côté. Pour que cette condition soit respectée, il faut que la conductivité hydraulique du sable soit plus faible que celle de l'argile. L'effet de barrière capillaire est donc observé entre la couche grossière du bas et l'argile. Enfin, la percolation calculée à l'aide de SEEP/W est similaire à celle évaluée à l'aide de HELP, soit 34,3 mm.

Tel que mentionnée précédemment, les cellules ont été instrumentées de différents équipements qui permettent de comparer les résultats prédits avec ceux observés. Les

mesures prises dans les lysimètres ont permis d'évaluer à 4 % la proportion des précipitations qui s'infiltre à travers le recouvrement. Des mesures de l'évaporation ont également été prises à l'aide d'une cuvette à évaporation ("*pan evaporation*"). Ces mesures montrent que l'évaporation prédite à l'aide de HELP correspond à peu près à 59 % de celle mesurée dans la cuvette. Cette valeur correspond bien avec celle mesurée sur d'autres sites miniers (Woyshner et St-Arnaud, 1994). Des sondes RDT installées dans les couvertures ont permis de mesurer les teneurs en eau volumiques. De plus, des mesures de teneur en eau massique ont été réalisées. Les résultats ont montré que la teneur en eau de l'argile est demeurée à des valeurs près de la saturation complète tandis que la teneur en eau du sable du bas se situe près de la valeur résiduelle (voir figure 4.15). Les résultats de teneur en eau dans le parc à résidus montrent des teneurs en eau élevées tandis que les teneurs en eau des résidus dans le lysimètre sont plus faibles. On peut penser qu'un effet de barrière capillaire pourrait être présent dans le lysimètre et ainsi fausser les données d'infiltration obtenues.

En conclusion, ce papier présente des modélisations réalisées à l'aide de deux modèles, l'objectif étant d'évaluer le comportement hydrogéologique de recouvrements multicouches utilisant l'effet de barrière capillaire. Les modélisations ont été réalisées en régime permanent permettant donc d'évaluer de façon moyenne le comportement hydrogéologique des recouvrements. Les résultats obtenus corroborent assez bien les résultats mesurés sur le terrain.

4.3.2 Autres modélisations numériques

Afin de compléter les données tirées de la littérature, le comportement hydrogéologique de barrières capillaires (bicouches et multicouches) placées dans des colonnes a été simulé à l'aide du logiciel SEEP/W. D'autres travaux ont également démontré une bonne corrélation entre les valeurs calculées et mesurées pour des essais en colonne (Yanful et

Aubé, 1993; Barbour et Yanful, 1994; Aubertin et al., 1995b). Les colonnes simulées dans ce travail ont un diamètre de 25 cm et une hauteur qui dépend du recouvrement appliqué. La nappe phréatique est placée initialement au haut de la colonne pour ensuite descendre linéairement dans le temps (3600 secondes) jusqu'au bas de la colonne. Le but de cette fonction est de favoriser la convergence du schéma numérique en évitant les changements brusques des conditions frontières du modèle. Des conditions de drainage libre sont présentes au bas de la colonne. Aucune évaporation n'est tenue en compte lors des simulations. Le maillage a été construit avec des éléments quadrilatères quadratiques incomplets de haute précision (type Lagrange 8 noeuds) de hauteur de 2,5 et 5 cm. Le pourcentage de changement pour conclure à la convergence (tolérance) est de 0,01 %. Quant aux paramètres DK, soit Max change, Min change et Rate of change, les valeurs fixées sont de 5, 0,0001 et 1 respectivement. Ces valeurs représentent le maximum, le minimum et le taux de changement de $\log_{10}$ de la conductivité hydraulique.

a) Le logiciel SEEP/W

Le logiciel utilisé pour simuler l'écoulement unidimensionnel de l'eau dans des barrières capillaires est SEEP/W de la compagnie GEOSLOPE International. Ce logiciel, comme la plupart des autres logiciels, a été formulé en faisant l'hypothèse que l'écoulement de l'eau, autant en milieu saturé que non saturé, suit la loi de Darcy. L'équation différentielle fondamentale qui est utilisée dans SEEP/W est l'équation de continuité en deux dimensions communément appelée équation de Richards. La variable dépendante de l'équation de Richards résolue dans le logiciel est la charge hydraulique (équation 3.2). La méthode numérique utilisée est celle des éléments finis MEF. Pour résoudre les dérivées par rapport au temps lors de modélisations en régime transitoire, le logiciel utilise la méthode d'approximation des différences arrières ("*Backward Difference*") (e.g. Reddy, 1993 ; Fredlund et Rahardjo, 1993).

Pour l'écoulement en régime transitoire, la variation de la teneur en eau volumique dépend de la variation de l'état de contrainte et des propriétés du sol. L'état de contrainte, autant en milieu saturé que non saturé, peut être défini par des variables d'états qui sont $(\sigma - u_a)$ et $(u_a - u_w)$, où σ est la contrainte totale, u_a est la pression de l'air dans les pores et u_w est la pression de l'eau interstitielle. Le logiciel a été formulé pour des conditions de contraintes totales, donc pas de chargement ou de déchargement de la masse du sol. Une autre hypothèse du logiciel est que la pression interstitielle de l'air est égale à la pression atmosphérique pendant le processus transitoire.

Afin de simuler des conditions s'approchant de la réalité de terrain, on doit incorporer au modèle des conditions frontières. SEEP/W permet plusieurs types de conditions frontières (GEOSLOPE International, 1994):

- charge totale (h) versus temps;
- charge totale (h) versus temps avec comme condition que $Q=0.0$ si la fonction de la charge est inférieure à l'élévation (y-coordonnée) du noeud;
- charge totale (h) versus volume;
- charge totale (h) versus volume avec comme condition que $q=0.0$ si la fonction de la charge est inférieure à l'élévation (y-coordonnée) du noeud;
- flux nodal (q) versus temps;
- flux unitaire (q) versus temps;
- flux unitaire (q) versus temps avec comme condition que la frontière est placée à $h = \text{élévation (y-coordonnée) du noeud}$ si le flux unitaire est plus grand que la conductivité hydraulique saturée.

Pour résoudre un problème à l'aide de la MEF, il est nécessaire d'utiliser des fonctions pour la distribution de la variable h à l'intérieur de l'élément. Les fonctions d'interpolation utilisées dans le logiciel SEEP/W sont celles présentées par Bathe

(1982). Ces fonctions sont valables pour les éléments ayant aucun, quelques et uniquement des noeuds secondaires. Pour les éléments n'ayant pas de noeuds secondaires, les fonctions supposent une distribution linéaire de la charge. Lorsqu'il y a présence de noeuds secondaires, les fonctions représentent une équation quadratique (non linéaire).

SEEP/W permet également le calcul de débits à travers des sections définies préalablement. La technique utilisée est d'additionner les écoulements des noeuds d'un côté de la section vers les noeuds de l'autre côté de la section. Le débit peut être estimé à partir des charges nodales et des coefficients de l'équation globale d'éléments finis (GEOSLOPE International, 1994). Le logiciel permet également d'incorporer l'effet d'anisotropie. L'anisotropie est le rapport des valeurs de conductivité hydraulique selon les axes x et y . Une anisotropie de 5 par exemple signifie que la conductivité hydraulique est cinq fois supérieure en x qu'en y . Les principales caractéristiques du logiciel sont présentées au tableau 4.1. Pour plus de détails sur SEEP/W, on peut consulter GEOSLOPE International (1994) et Crespo (1994).

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques du logiciel SEEP/W

Type d'éléments	• Quadrilatère avec ou sans noeuds secondaires (intégration d'ordre 9 ou 4) • Triangulaire avec ou sans noeuds secondaires (intégration d'ordre 3 ou 1)
Fonctions d'interpolation	• Fonctions d'interpolation de Bathe (1982)
Équation d'éléments finis	• Équation des résidus pondérés de Galerkin
Intégration du temps	• Méthode des différences arrières
Intégration numérique	• Intégration numérique de Gauss
Méthode de résolution matricielle	• Technique d'élimination Gaussienne
Convergence	• Norme Euclidienne du vecteur charge

b) Caractéristiques des matériaux étudiés

Pour prédire le comportement d'un modèle en milieu non saturé, il est essentiel de définir les courbes caractéristiques de succion (relation ψ - θ) et les fonctions de perméabilité (relation ψ - k) des différents matériaux.

Courbes caractéristiques de succion

Les courbes caractéristiques de succion des matériaux étudiés ici sont présentées à la figure 4.16. Les matériaux 1 et 2 sont un sable (Crab Creek) et un silt (Touchet silt) dont les caractéristiques ont été présentées par Akindunni et al. (1991). Les matériaux 3 et 4 sont des résidus miniers dont les caractéristiques ont été évaluées au laboratoire d'Hydrogéologie et environnement minier de l'École Polytechnique (voir Bussière et al., 1994). Les principaux paramètres hydrauliques pour ces matériaux sont résumés au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Résumé des paramètres hydrauliques des matériaux étudiés

Matériaux	ψ_a (cm)	θ_r	θ_s	k_{sat} (cm/s)	α_v (cm ⁻¹)	n_v
Sable Crab Creek	24,0	0,141	0,448	$7,18 \times 10^{-3}$	0,029	10,21
silt Touchet	165,0	0,180	0,485	$5,83 \times 10^{-4}$	0,004	7,05
Résidus miniers grossiers	50,0	0,010	0,460	$3,00 \times 10^{-3}$	0,012	2,91
Résidus miniers fins	140,0	0,054	0,430	$3,15 \times 10^{-4}$	0,0036	2,88

Les courbes caractéristiques de succion ont été évaluées à l'aide du modèle le plus fréquemment utilisé dans le domaine (e.g. Paniconi et al., 1991 ; Yeh et al., 1994 ; Shouse et al., 1995), soit celui de van Genuchten (1980) dont les détails ont été présentés au chapitre 2.

Fonctions de perméabilité

Pour réaliser des modélisations numériques en milieu non saturé, il est essentiel de connaître le comportement de la conductivité hydraulique par rapport à la succion. Dans le cadre de ce travail, les fonctions de perméabilité ont été déduites à partir des courbes caractéristiques de succion. Les deux méthodes utilisées pour déduire les fonctions de perméabilité à partir des courbes caractéristiques de succion sont celles de Mualem (1976) et de Childs et Collis-George (1950) modifiée par Kunze et al. (1968) qui ont d'ailleurs été présentées au chapitre 2.

La méthode de Childs et Collis-George (1950) modifiée par Kunze et al. (1968) est similaire à celle utilisée à l'intérieur du logiciel SEEP/W pour déduire la fonction de perméabilité à partir de la courbe caractéristique de succion. Cette méthode détermine le coefficient de perméabilité en se basant sur la variation aléatoire de la dimension des pores. Les calculs sont faits en divisant la courbe caractéristique de succion en n incréments de la teneur en eau.

L'autre modèle utilisé pour déterminer les fonctions de perméabilité dans ce travail est celui de Mualem (1976). Celui-ci 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). Le logiciel utilisé qui permet d'obtenir la fonction de perméabilité par l'équation de Mualem (1976) est le RETC de van Genuchten (1991).

On présente à la figure 4.17 les fonctions de perméabilité obtenues à l'aide des deux équations pour les différents sols étudiés. Les valeurs obtenues à l'aide du logiciel RETC de van Genuchten (qui utilise la relation de Mualem, 1976) sont identifiées par les lettres V-G tandis que celles obtenues à l'aide du modèle Childs et Collis George modifié par

Kunze et al. (1968) sont identifiés par C-G. On remarque sur la figure 4.17 que l'équation de Child et Collis George modifiée par Kunze et al. (1968) donne, pour le silt Touchet, des valeurs de k supérieures, pour une même pression, à celles obtenues à l'aide de la relation de Mualem (1976). En ce qui concerne le sable (Crab Creek), la grande différence se situe au niveau de la conductivité hydraulique correspondant à la teneur en eau résiduelle (k_r). Pour le modèle C-G, le k_r du sable équivaut à environ 1×10^{-6} cm/s tandis que pour le modèle de Mualem (1976), k_r correspond à environ 6×10^{-9} cm/s, soit une différence de plus de deux ordres de grandeur. À noter que pour les résidus miniers, seule la méthode de Mualem (1976) a été utilisée pour déduire la relation ψ - k .

c) Modélisation de barrières capillaires bicouches

Les résultats des sept modélisations présentées plus bas (figures 4.18 à 4.29) sont présentés sous la forme de profils de saturation et de succion dans la colonne. Rappelons que la saturation S_r (ou le degré de saturation) représente la proportion du volume des vides occupée par l'eau ($S_r = \theta/n$).

Modélisation 1

La première modélisation réalisée est identique à celle réalisée par Akindunni et al. (1991). Elle consiste en une couche de silt de 1 m d'épaisseur par dessus une couche de sable de 2.5 m. Le modèle de van Genuchten (1980) a été utilisé pour déduire les courbes caractéristiques de succion tandis que celui de Mualem (1976) a permis de déduire les fonctions de perméabilité. L'objectif principal de cette modélisation est de valider notre modèle numérique.

On remarque, à la figure 4.18, que le degré de saturation baisse rapidement dans la couche de sable du bas et atteint un équilibre à environ 14 jours à un degré de saturation de 35 %. La couche du haut, quant à elle, demeure saturée malgré une période de sécheresse de 56 jours. La figure 4.19 présente l'évolution des profils de pression dans le temps. Au départ de la simulation, la nappe phréatique est placée au haut de la colonne, soit à l'élévation 3,5 m. Le profil de pression initial est donc une droite de pente négative 1 : 1 (pression = masse volumique de l'eau x profondeur) dont la valeur initiale est de 0 à l'élévation 3,5 m. Afin de ne pas modifier l'échelle en x, la condition initiale n'apparaît pas sur les figures. On peut constater sur la figure 4.19 qu'un état d'équilibre s'établit au niveau des pressions après environ 14 jours de drainage. Il est cependant important de noter que cet équilibre est différent de l'équilibre hydraulique (communément appelé équilibre hydrostatique) qui a une pente négative de 1 : 1. En effet, une cassure est observée dans le profil de pression de la couche grossière du bas. Cette cassure, représentée par un segment vertical à une succion d'à peu près -2,5 kPa, 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. Les résultats obtenus dans cette simulation sont à peu près identiques à ceux obtenus par Akindunni et al. (1991).

Modélisation 2

La deuxième modélisation a pour but d'évaluer l'impact d'une modification des fonctions hydriques (courbes caractéristiques de succion et fonctions de perméabilité) sur les profils de teneur en eau et de succion. Le modèle numérique est donc le même que celui de la première modélisation à l'exception des fonctions hydriques. C'est-à-dire que la courbe de succion du sable placée dans le logiciel est celle identifiée par Sable

Crab Creek modifié que l'on retrouve à la figure 4.16 tandis que la fonction de perméabilité utilisée est le Sable Crab Creek (CC) de la figure 4.17.

On peut observer à la figure 4.20 que le profil de saturation est différent de celui obtenu lors de la première modélisation. Le degré de saturation continue de diminuer dans la couche grossière jusqu'à une valeur de 17 % (dans le haut de la couche) comparativement à une valeur d'équilibre d'environ 35 % lors de la modélisation 1. Ceci est imputable à la teneur en eau résiduelle de la courbe caractéristique de succion du sable qui est inférieure pour cette simulation. On remarque également que le haut de la couche fine commence à se désaturer après 14 jours. Cependant, le degré de saturation ne diminue pas à des valeurs inférieures à 95 %. À la figure 4.21, on peut voir qu'il n'y a pas d'équilibre qui s'établit au niveau des pressions. On retrouve, après 56 jours, des pressions dans le haut de la couche fine de l'ordre de -20 kPa comparativement à des pressions d'environ -14 kPa dans la modélisation 1. Les résultats obtenus montrent toute l'importance des relations fonctionnelles employées pour caractériser les propriétés hydriques des matériaux (courbes caractéristiques de succion et fonctions de perméabilité).

Modélisation 3

L'objectif de cette modélisation est d'évaluer l'impact d'une réduction de l'épaisseur de la couche grossière de 2.5 m à 1 m sur le comportement hydrogéologique de la barrière. Les fonctions de perméabilité utilisées dans cette modélisation sont celles calculées avec la relation de Mualem (1976). L'épaisseur de la couche fine est similaire à celle des deux modélisations précédentes soit 1 m.

Comme dans le cas de la modélisation 1, la couche de sable se draine rapidement pour atteindre un équilibre après 14 jours (à un degré de saturation de 35 %) tandis que la

couche fine constituée de silt demeure saturée pour toute la durée de la modélisation (voir figure 4.22). En terme de pression, le profil ainsi que les valeurs observées dans la couche fine sont similaires à celles observées à la modélisation 1.

À partir des résultats obtenus pour cette modélisation, on peut dire que l'épaisseur de la couche de sable peut être réduite à 1 m sans réduire le degré de saturation de la couche fine.

Modélisation 4

Comme on l'a mentionné précédemment, l'épaisseur de la couche grossière peut être réduite à 1 m sans affecter le degré de saturation de la couche fine. Pour cette quatrième modélisation, l'épaisseur de la couche de sable a été réduite jusqu'à 0.3 m ; cette valeur n'est pas beaucoup supérieure au AEV du sable. Tous les autres paramètres sont similaires à ceux de la modélisation 3.

On remarque, à la figure 4.23, que le degré de saturation de la couche fine demeure à 100 % pour toute la durée de la modélisation. Cependant, le profil de pression que l'on peut observer à la figure 4.24 ne montre pas le bris vertical dans la relation profondeur-pression (on observe plutôt un profil près de l'équilibre statique) que l'on pouvait observer dans les figures 4.19 et 4.23. On peut donc supposer que de réduire l'épaisseur de la couche de sable à une valeur inférieure à 30 cm ne permettrait pas d'observer un bris capillaire.

Modélisation 5

Pour toutes les modélisations présentées précédemment, on a simulé un drainage libre au bas de la colonne après une heure, ce qui signifie que l'on considère la nappe phréatique

à l'élévation zéro après une heure. Dans cette cinquième modélisation, on applique au bas de la colonne une pression négative qui simule une position de la nappe phréatique sous le bas de la colonne. Tous les autres paramètres de la modélisation sont identiques à ceux de la modélisation 4.

La principale différence entre les résultats obtenus pour cette simulation et la précédente est le degré de saturation de la couche de sable qui atteint rapidement une valeur constante de 35 % et ce, pour toute l'épaisseur de la couche (voir figure 4.25). On remarque également sur cette figure que le degré de saturation de la couche fine demeure à 100 %. Comparativement aux résultats obtenus pour cette modélisation, ceux de la modélisation 4 montrent un degré de saturation de 100 % pour le premier 15 cm de la couche de sable.

d) Modélisation de barrières capillaires multicouches

Modélisation 6

L'objectif de cette modélisation est d'évaluer le comportement hydrogéologique d'une barrière capillaire constituée de trois couches de matériaux. La couche grossière du bas est une couche de résidus miniers grossiers d'une épaisseur de 1 m dont les relations ψ - θ et ψ - k sont présentées aux figures 4.16 et 4.17. La couche fine est constituée de résidus miniers fins d'une épaisseur de 0.6 m. Enfin, la couche grossière du haut est constituée du même matériau que la couche grossière de bas mais est d'une épaisseur de 0.4 m. Encore une fois, le modèle de Mualem (1976) a été utilisé pour déduire les relations ψ - k des deux matériaux.

On peut observer à la figure 4.26 que le degré de saturation des différentes couches atteint un équilibre à environ 14 jours. Le degré de saturation de la couche grossière du haut descend jusqu'à environ 20 % celui de la couche fine jusqu'à environ 90 % tandis que celui de la couche grossière du bas descend jusqu'à environ 55 % dans le haut de la couche. La couche grossière du haut semble réaliser son travail, soit d'empêcher le transfert de l'eau par capillarité de la couche fine vers la couche du haut. Pour empêcher la diffusion de l'oxygène, on considère habituellement que le degré de saturation de la couche fine doit se situer au-dessus de 90 % (Aubertin et al., 1993). Dans le cas de la modélisation 6, on atteint cet objectif de peu.

Pour ce qui concerne les pressions dans les différentes couches de sols, on observe à la figure 4.27 qu'il s'établit un équilibre après environ 14 jours et que cet équilibre est très près de l'équilibre statique.

Modélisation 7

Afin d'améliorer l'efficacité de la barrière capillaire multicouche présentée à la modélisation 6, le contraste en terme de succion a été augmenté entre le matériau grossier et le matériau fin. Pour ce faire, le matériau grossier de la modélisation 6 (résidus miniers grossiers) a été remplacé par le sable Crab Creek tout en gardant les résidus miniers fins comme composante de la couche fine. Le modèle utilisé pour décrire la relation ψ - k est celui de Mualem (1976).

À la figure 4.28, on voit que le degré de saturation des deux couches grossières se situe à environ 35 % tandis que celui de la couche fine se situe à plus de 95 %. On peut déduire, à partir de cette simulation, que l'augmentation du contraste de succion entre le matériau grossier et le matériau fin a permis d'augmenter l'efficacité de la barrière capillaire. Ceci

confirme les conclusions des travaux de Miller (1969), d'Akindunni et al. (1991), de Sydor (1992) et de Morel-Seytoux (1992).

De plus, on remarque à la figure 4.29 que la pression dans la couche fine est moins grande dans cette simulation que dans la modélisation 6. On peut également observer sur cette figure que le profil de pression est loin de ressembler à l'équilibre statique. Il y a plutôt une droite verticale de pressions dans le sable du bas qui empêche l'augmentation de la pression avec l'augmentation de l'élévation. Toutes ces observations indiquent que la barrière capillaire est plus efficace dans la modélisation 7.

4.3.3 Analyse des résultats

Les principales constatations que l'on peut tirer des modélisations réalisées pour ce travail et celles retrouvées dans la littérature sont les suivantes :

1. Lorsque l'on place un matériau grossier sous un matériau fin, le matériau grossier se draine rapidement pour par la suite devenir une barrière à l'écoulement vers le bas. C'est ce qu'on appelle l'effet de barrière capillaire.
2. Il est possible de prédire de façon assez précise le comportement d'une barrière capillaire, en situation unidimensionnelle, à l'aide de modèles numériques.
3. Le contraste de succion entre le matériau grossier et le matériau fin est un paramètre important pour l'efficacité d'une barrière capillaire. Plus le contraste est grand, plus l'effet de barrière capillaire est prononcé.
4. Les paramètres ψ_r (succion pour obtenir la teneur en eau résiduelle) du matériau grossier et ψ_a ou AEV (pression pour débiter le drainage du plus gros pore du sol) du matériau fin sont les principaux paramètres à connaître pour une barrière capillaire. Pour obtenir un effet de barrière capillaire efficace, ψ_r du matériau grossier ne doit pas être plus grand que ψ_a du matériau fin.

5. La position de la nappe phréatique n'est pas un paramètre critique en ce qui concerne l'efficacité de la barrière capillaire si le bris capillaire est bien développé.
6. La détermination la plus exacte possible des conditions frontières (spécialement de l'évaporation et du ruissellement) est essentielle lorsque l'on veut simuler les conditions *in situ*.
7. Des résultats tirés de la littérature ont montré que l'effet d'hystérésis sur les courbes caractéristiques de succion peut influencer de façon significative les résultats.
8. Le choix du modèle utilisé pour déterminer les fonctions de perméabilité peut avoir un impact important sur les résultats obtenus des modélisations numériques. Dans cette perspective, le comportement, en terme de fonctions de perméabilité, des matériaux soumis à de grandes pressions négatives devrait être investigué davantage.
9. L'épaisseur de la couche grossière du bas est un important paramètre lors du design d'une barrière capillaire. L'optimisation de l'épaisseur de cette couche dépendant des caractéristiques de succion et de la fonction de perméabilité du matériau.

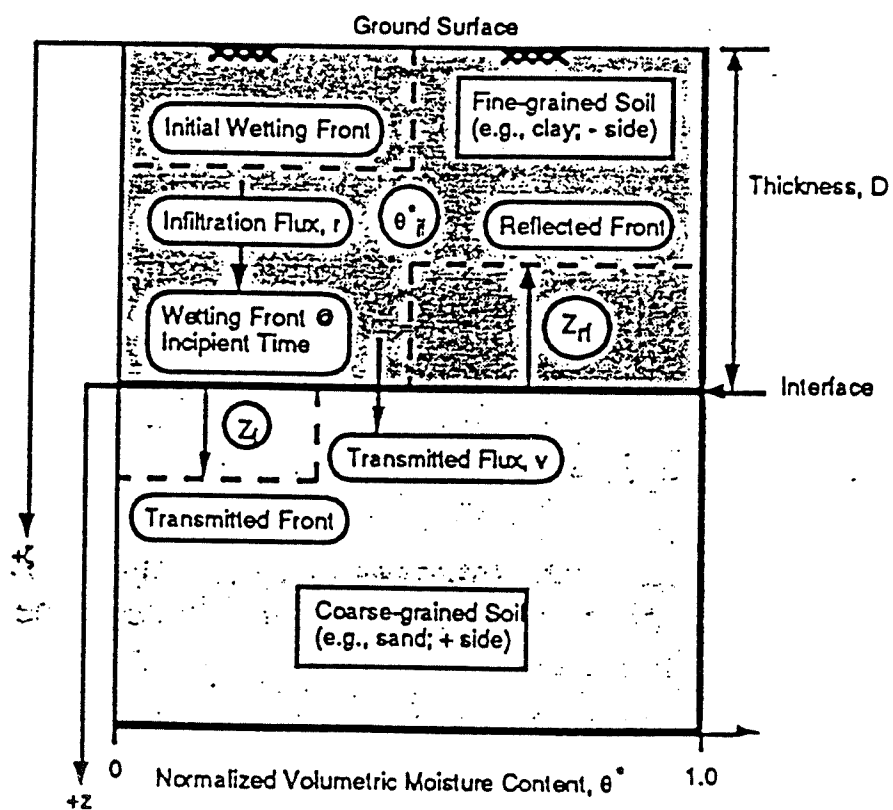


Figure 4.1 : Schématisation du mouvement de l'eau dans une barrière capillaire (tirée de Shakelford et al., 1994).

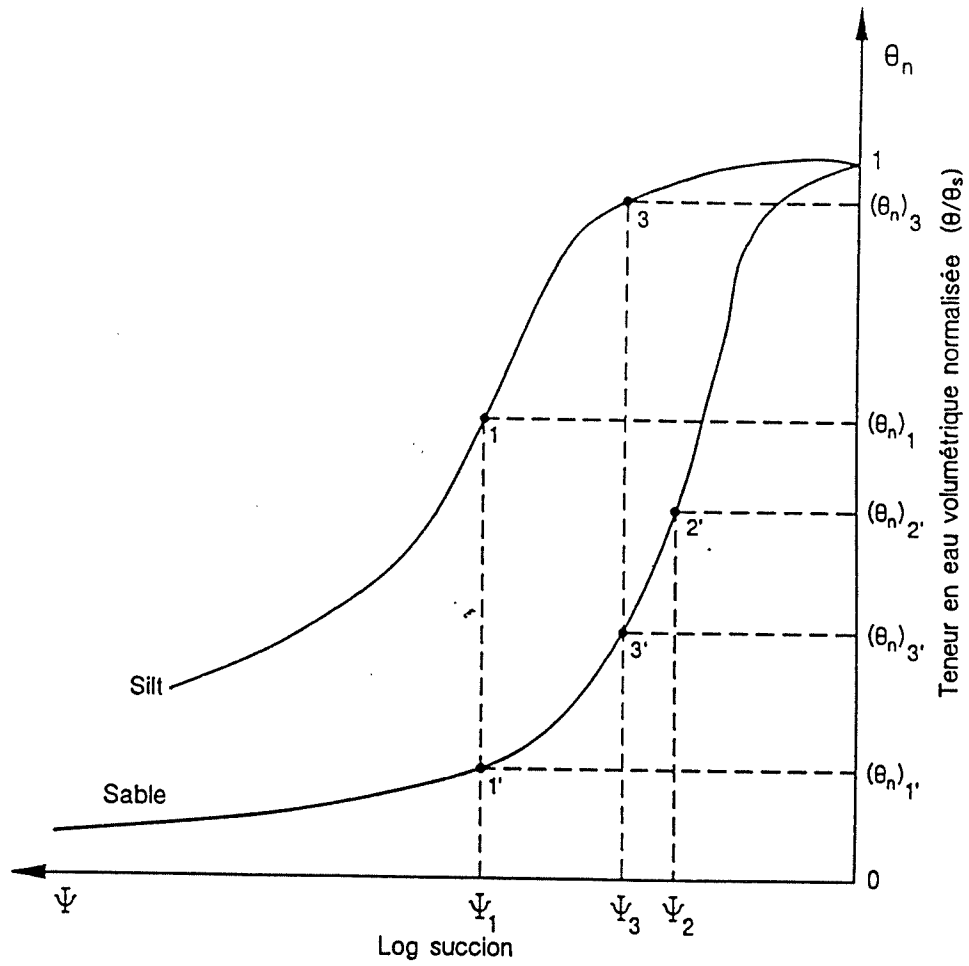


Figure 4.2 : Courbes caractéristiques de succion schématisées pour un sable et un silt, présentées dans le plan ψ - θ_n (tirée d'Aubertin et al., 1995b).

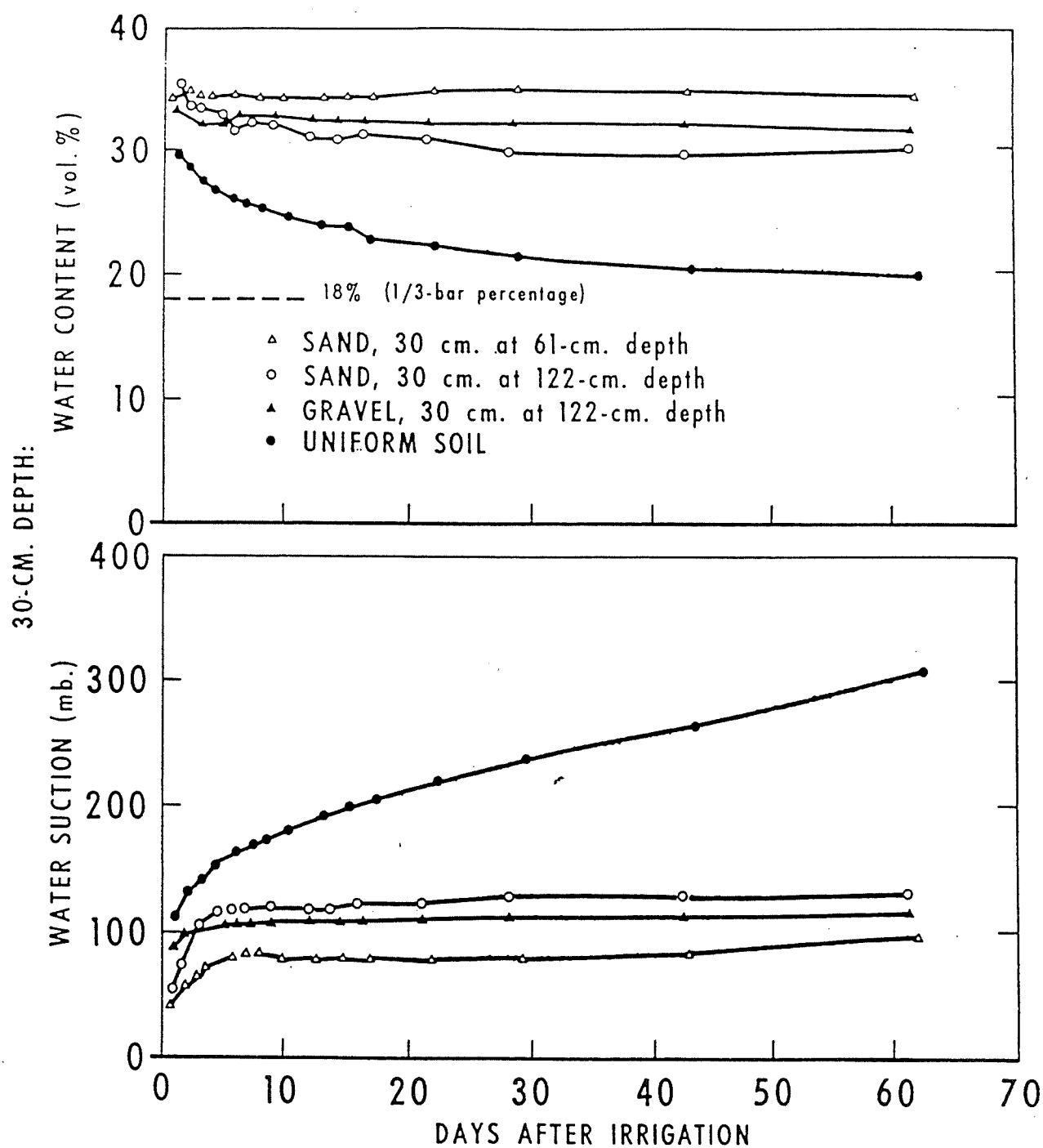


Figure 4.3 : Comparaison, en terme de teneur en eau volumique et de succion, du comportement de systèmes avec ou sans effet de barrière capillaire (tirée de Miller (1969))

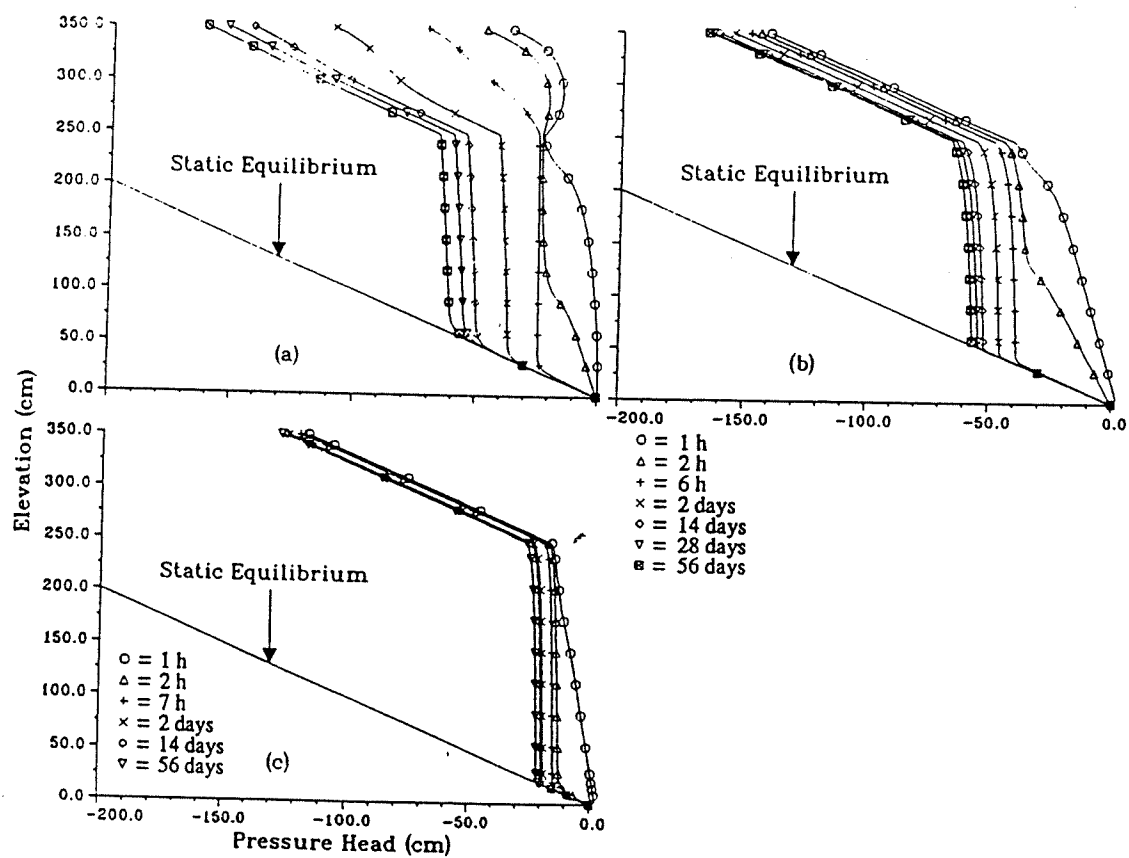


Figure 4.4 : Profils de pression dans le temps pour différents cas : a) Silt par dessus un sable, b) Silt Touchet par dessus un sable medium et c) Silt Touchet par dessus un sable grossier (tirée d'Akindunni et al., 1991).

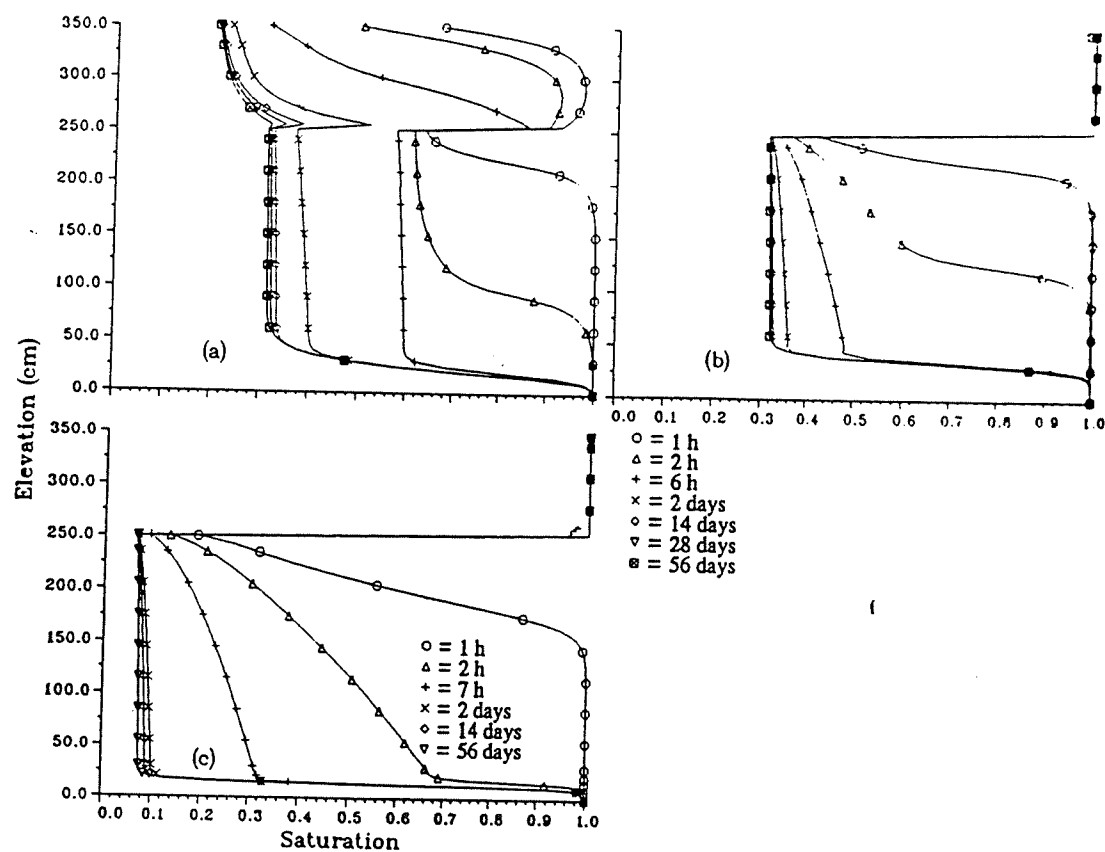


Figure 4.5 : Profils de saturation dans le temps pour différents cas : a) Silt par dessus un sable. b) Silt Touchet par dessus un sable medium et c) Silt Touchet par dessus un sable grossier (tirée d'Akindunni et al., 1991).

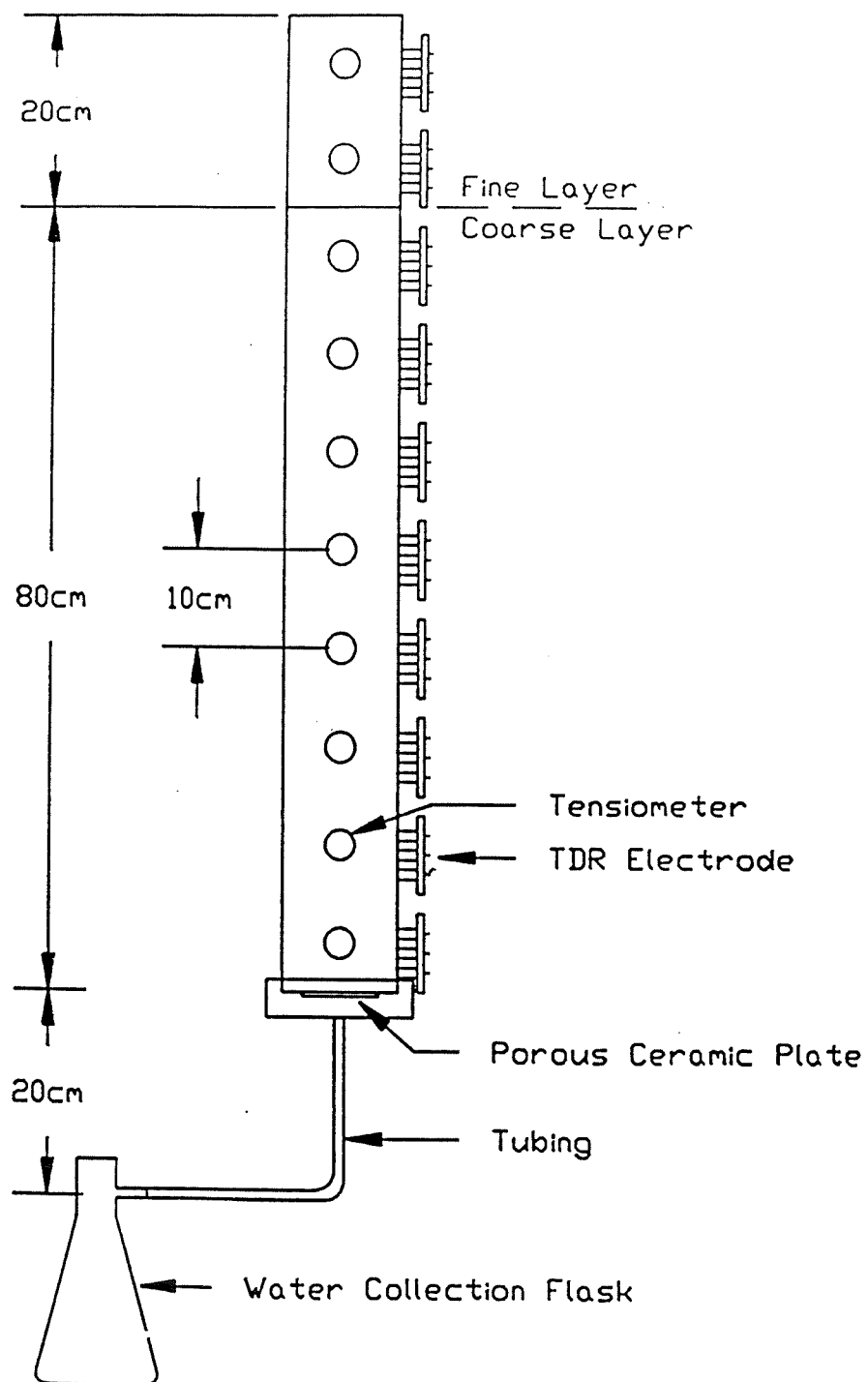


Figure 4.6 : Représentation schématique de l'essai en colonne (tirée de Sydor, 1992).

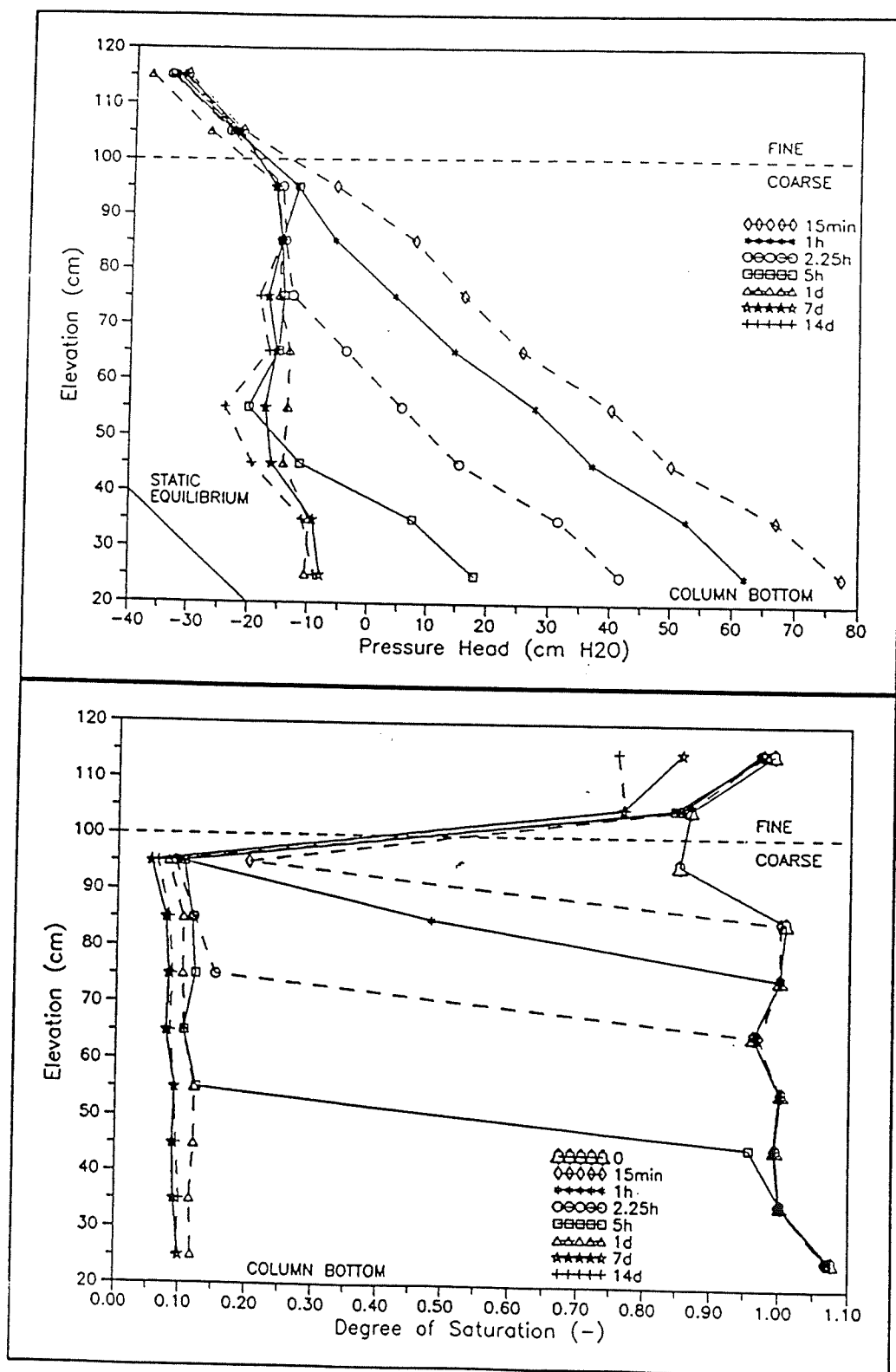


Figure 4.7 : Exemple de résultats des simulations numériques en terme de succion et saturation versus l'élévation (tirée de Sydor, 1992).

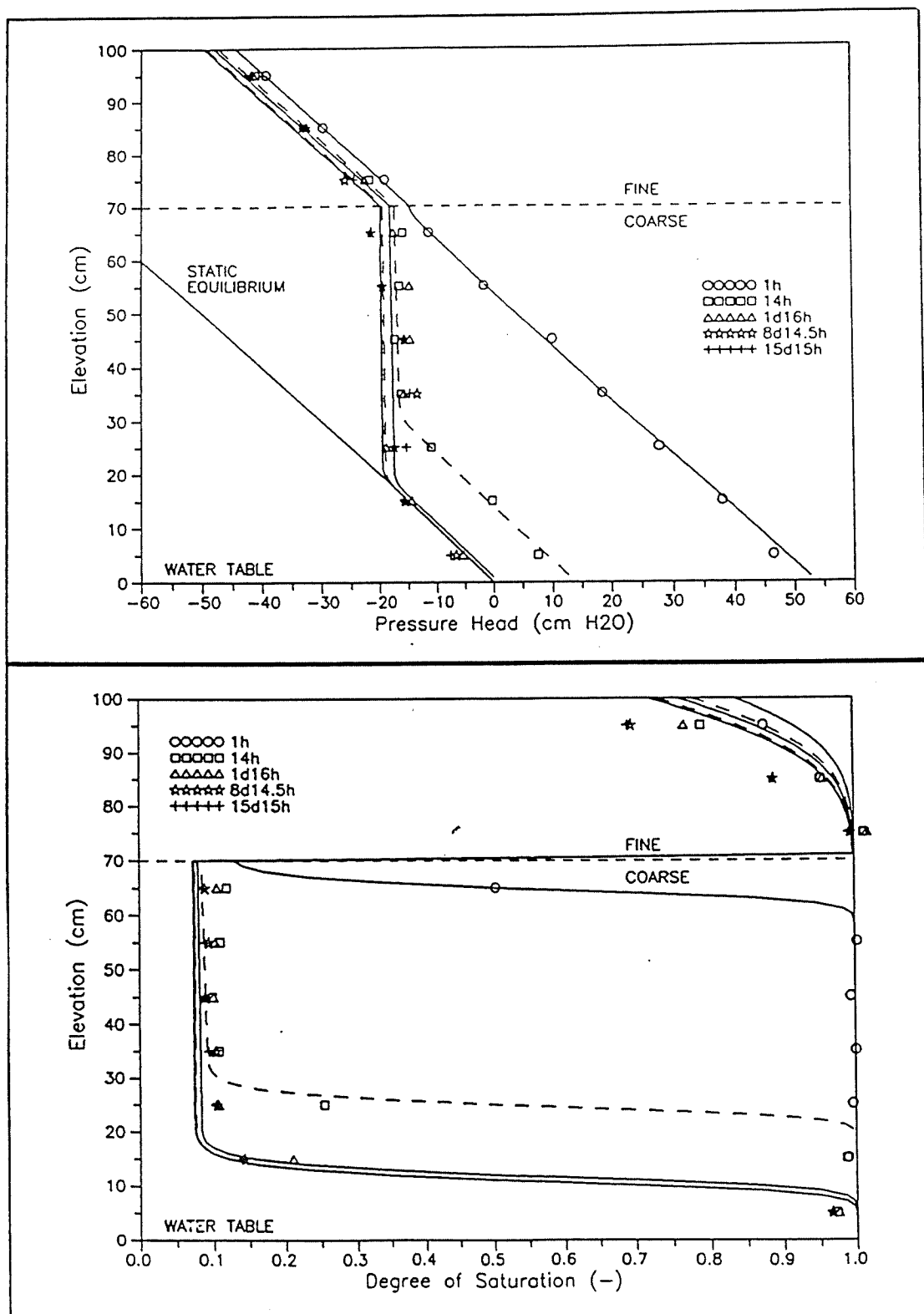


Figure 4.8 : Comparaison entre les résultats de l'essai en colonne et les simulations numériques (tirée de Sydor, 1992).

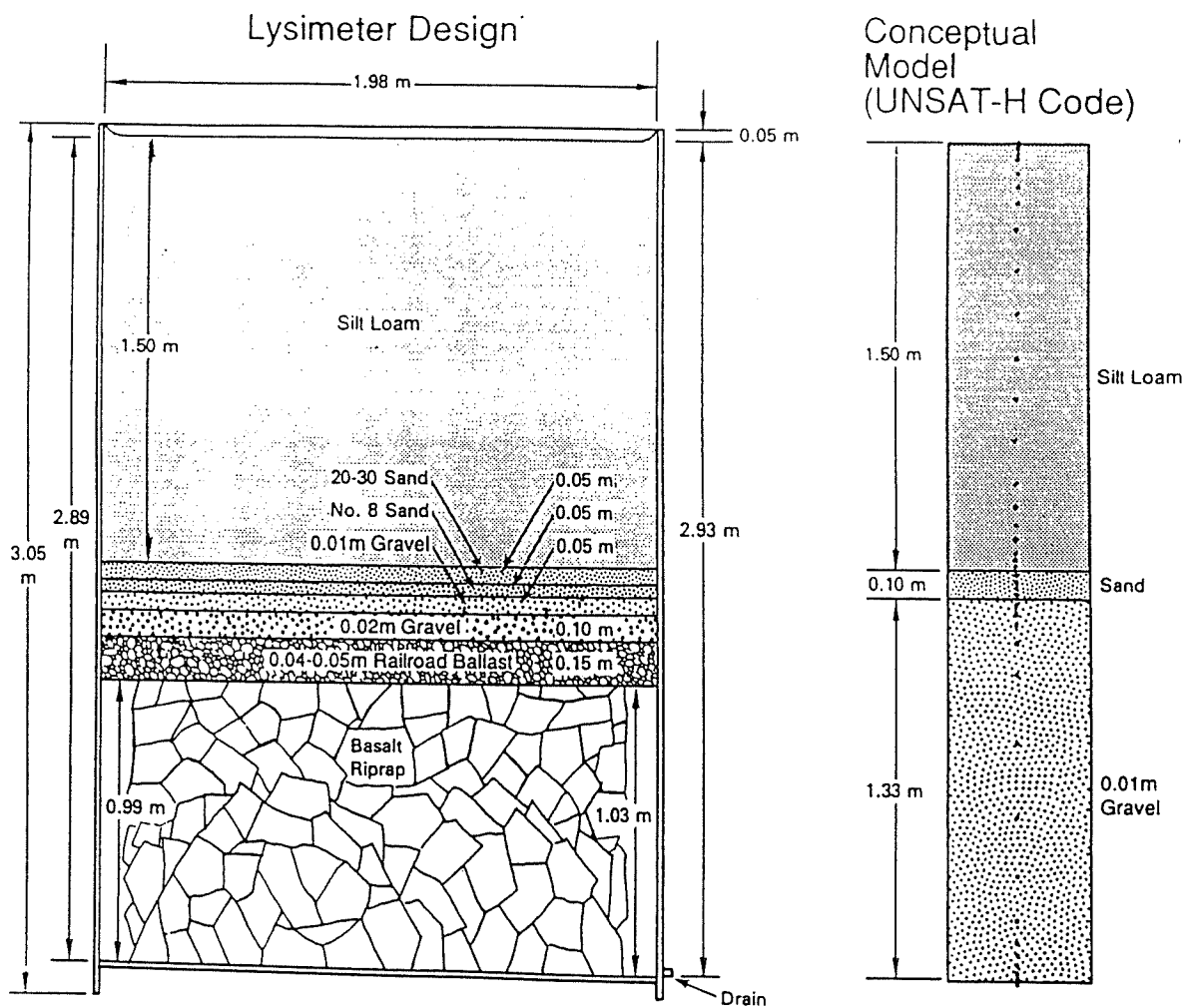


Figure 4.9 : Configuration des lysimètres et du modèle conceptuel utilisé pour les simulations numériques (tirée de Fayer et al., 1992).

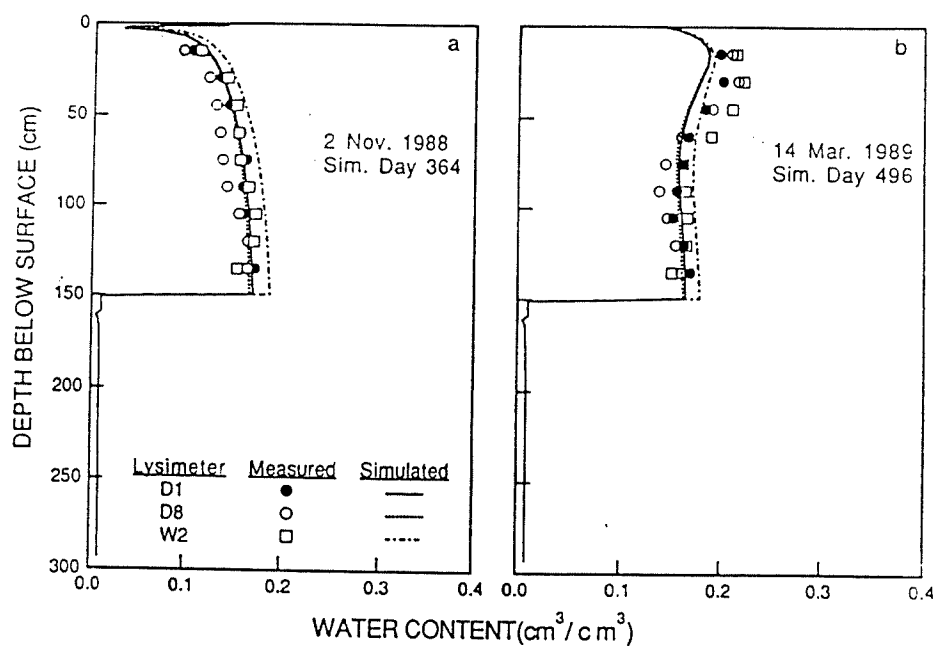


Figure 4.10 : Comparaison entre les résultats mesurés sur le terrain et ceux simulés numériquement pour le cas des précipitations ambiantes (tirée de Fayer et al., 1992).

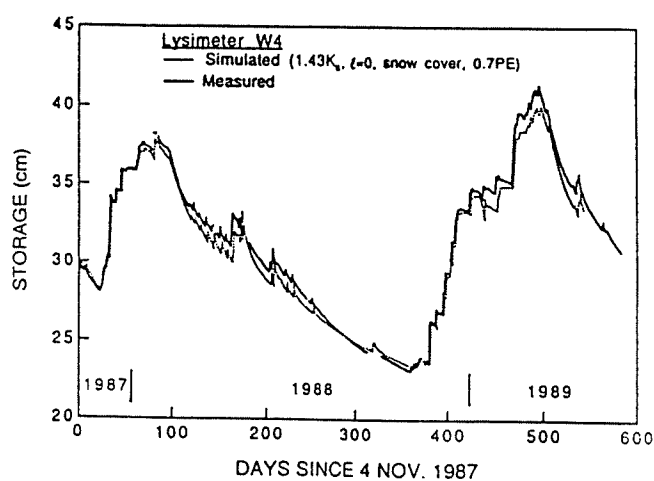


Figure 4.11 : Comparaison, en terme de stockage, entre les valeurs mesurées et celles simulées (tirée de Fayer et al., 1992).

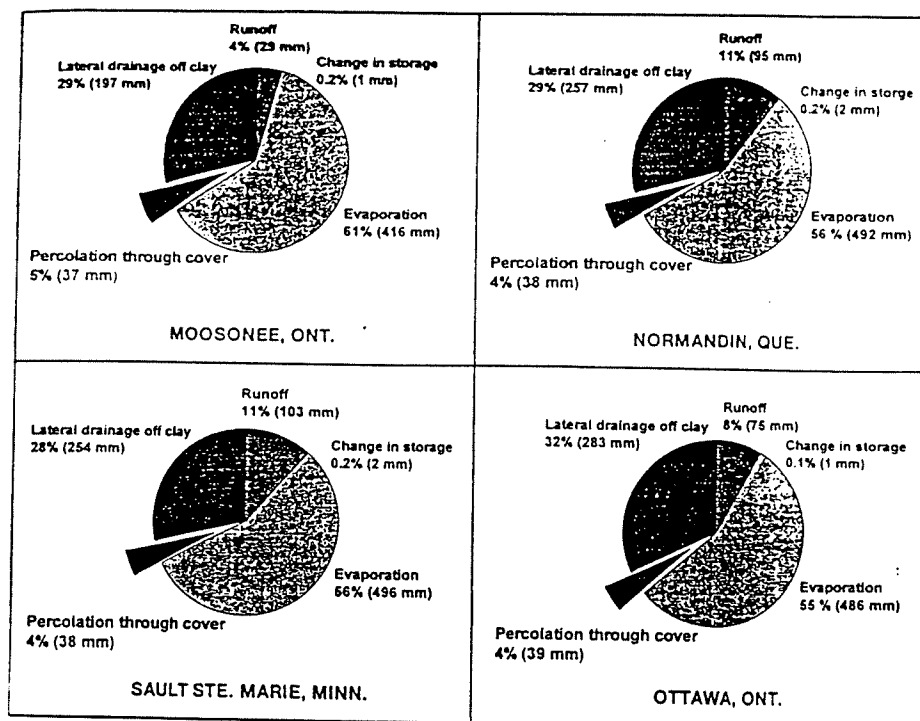


Figure 4.12 : Résultats des modélisations réalisées avec le logiciel HELP (tirée de Woysner et Yanful, 1995)

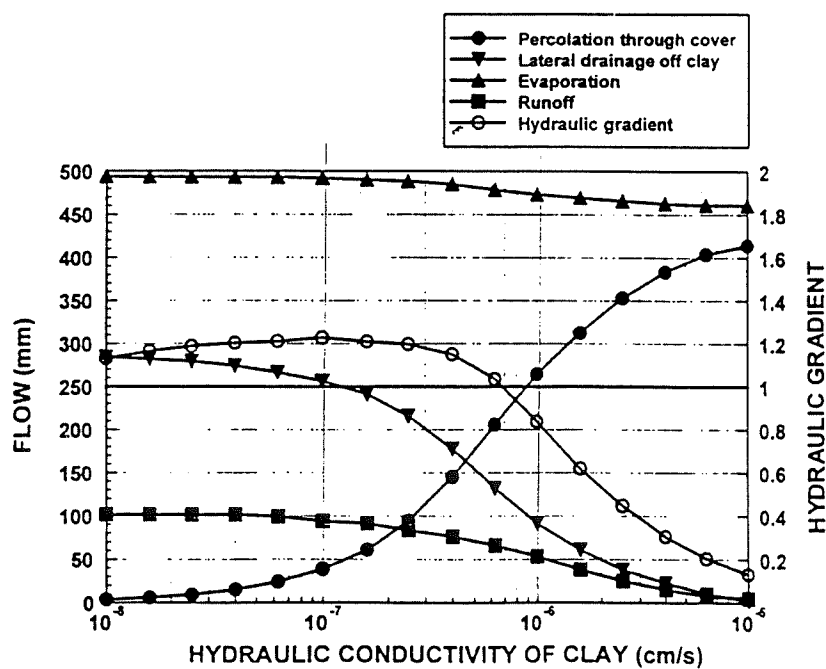


Figure 4.13 : Résultats de l'analyse de sensibilité des modélisations réalisées à l'aide de HELP pour les données météorologiques provenant de Normandin, Québec (tirée de Woysner et Yanful, 1995).

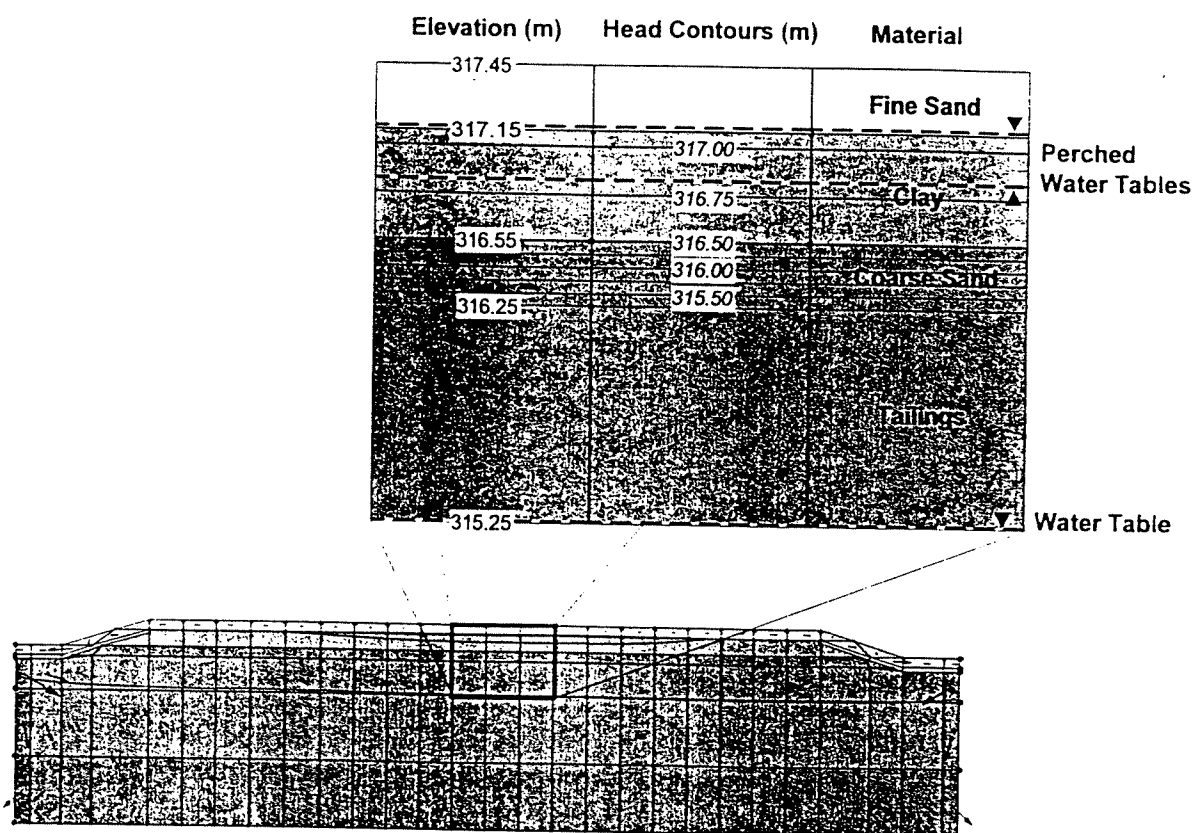


Figure 4.14 : Résultats de l'analyse numérique d'une couverture multicouche réalisée à l'aide de SEEP/W (tirée de Woyshner et Yanful, 1995).

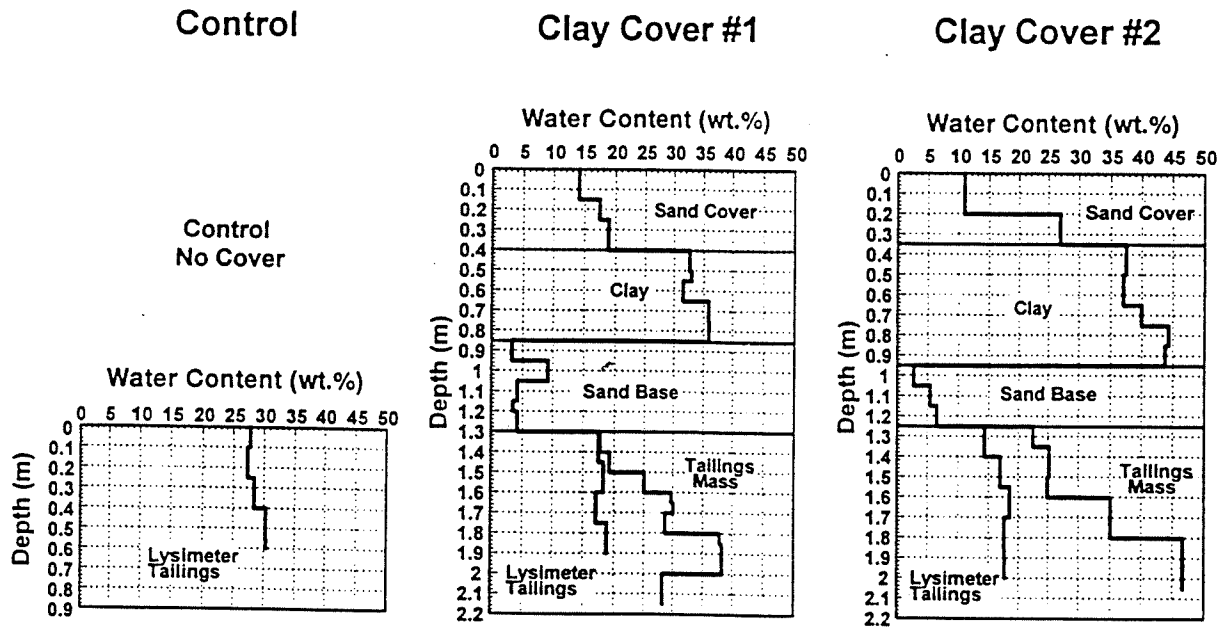


Figure 4.15 : Teneurs en eau massique réalisées à l'été 1993 (tirée de Woyshner et Yanful. 1995).

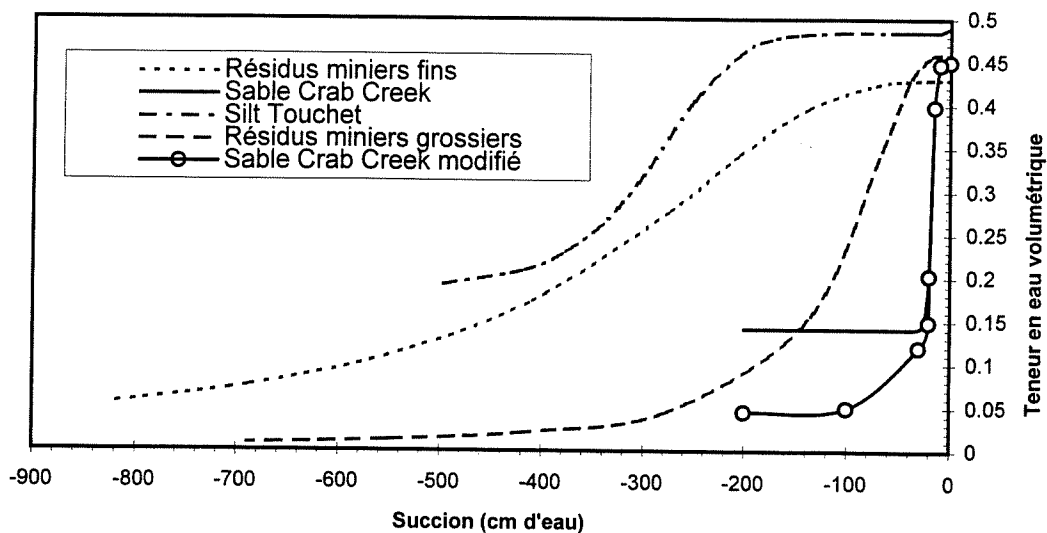


Figure 4.16 : Courbes caractéristiques de succion des matériaux étudiés

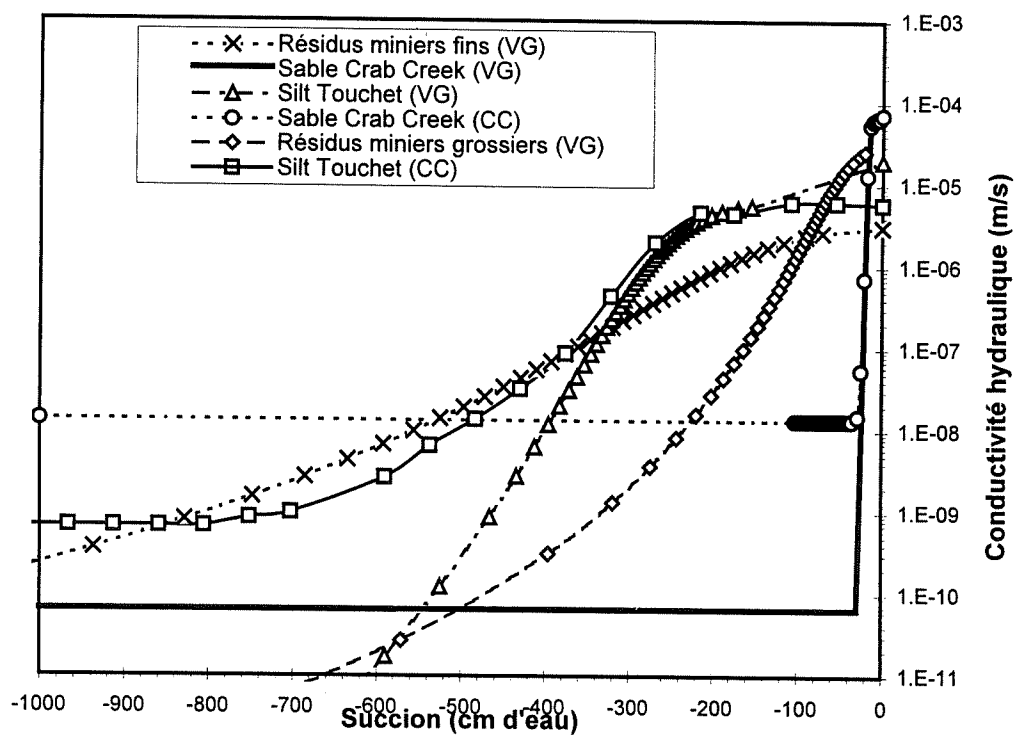


Figure 4.17 : Fonctions de perméabilité des matériaux étudiés

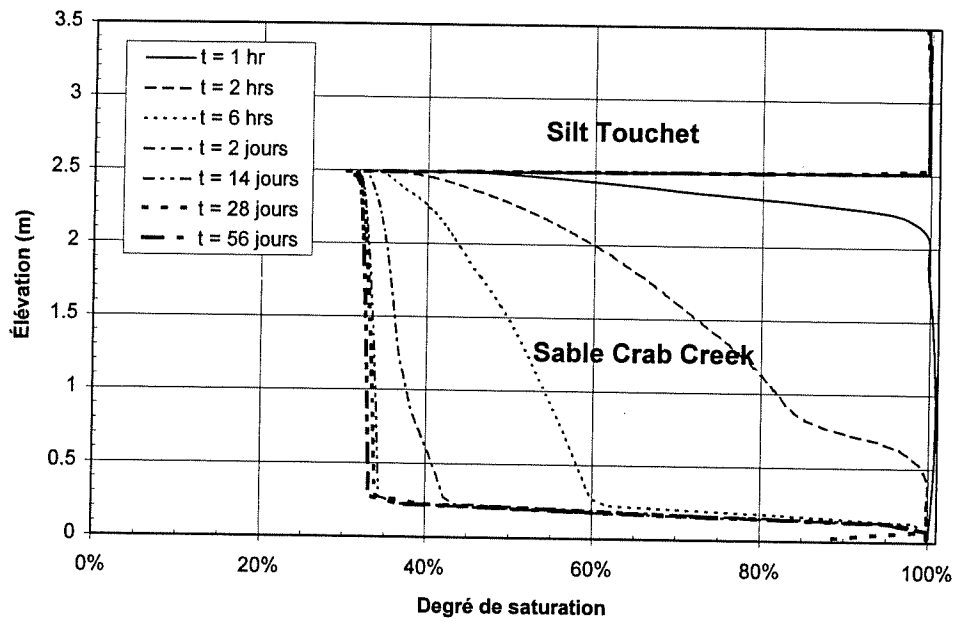


Figure 4.18 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 1

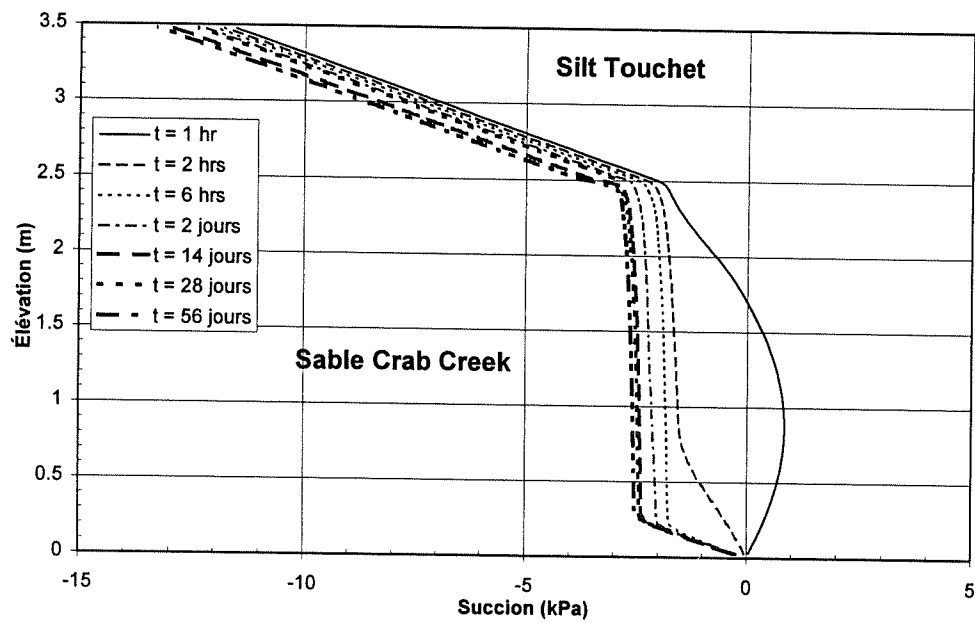


Figure 4.19 : Profil de succion pour la modélisation 1

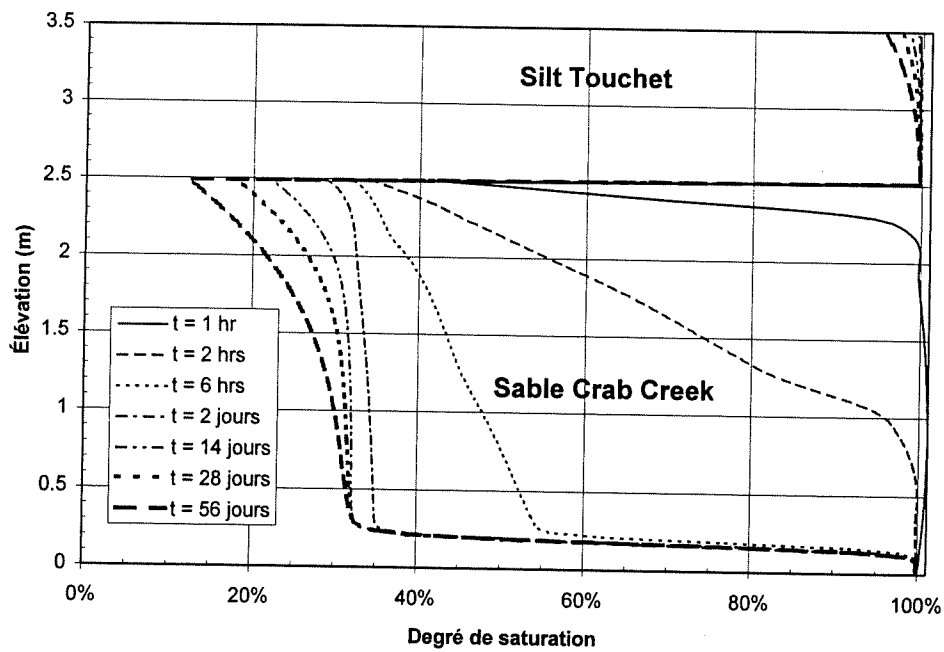


Figure 4.20 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 2

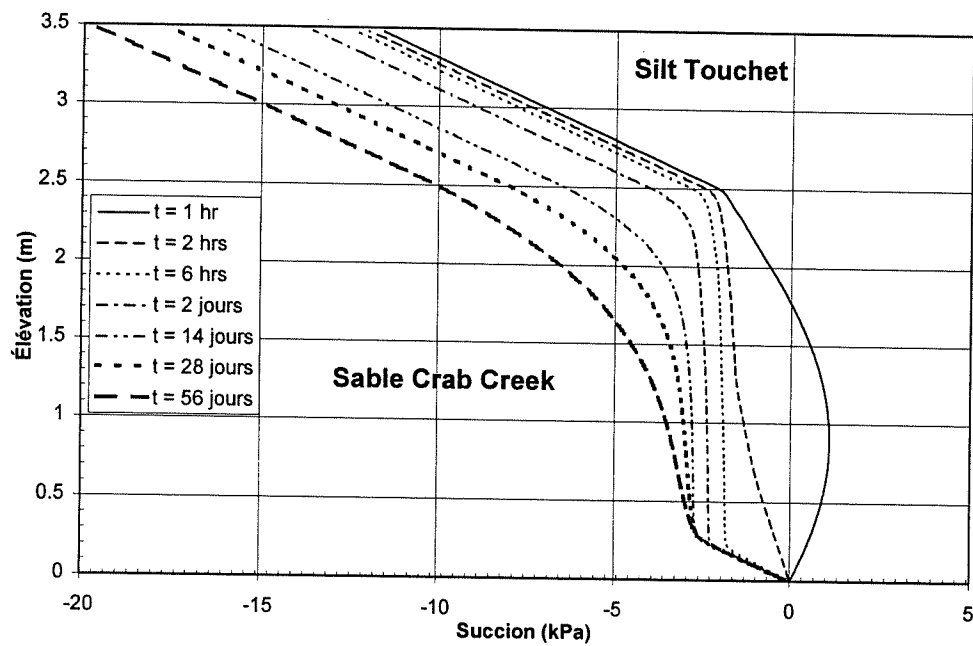


Figure 4.21 : Profil de succion pour la modélisation 2

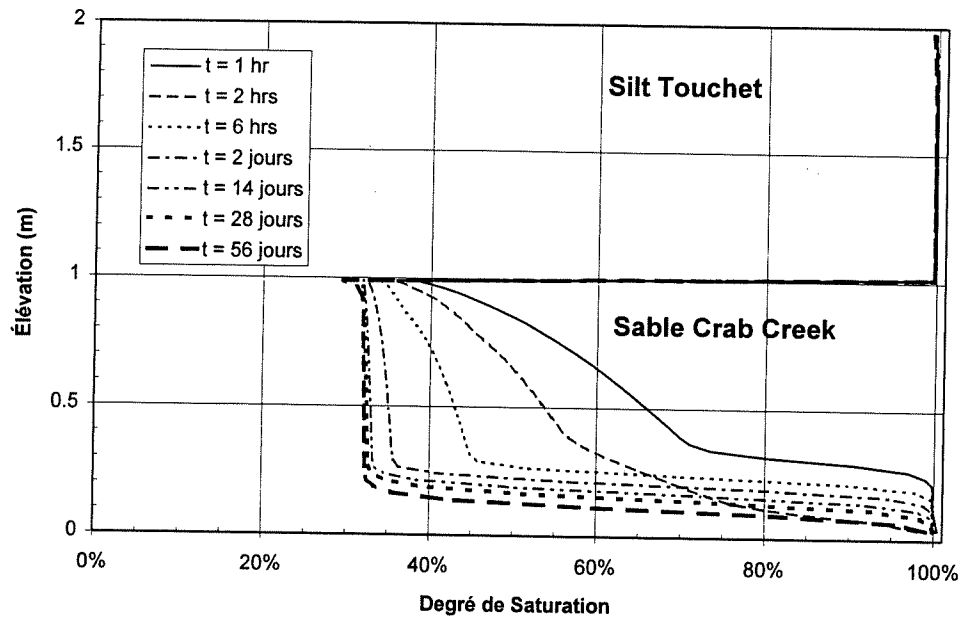


Figure 4.22 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 3

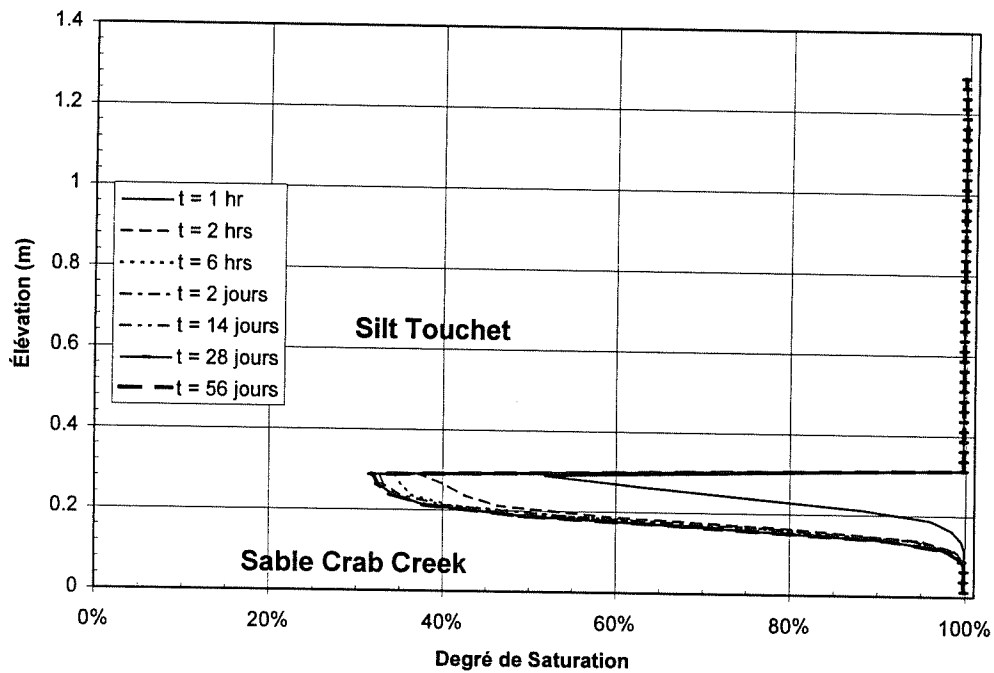


Figure 4.23 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 4

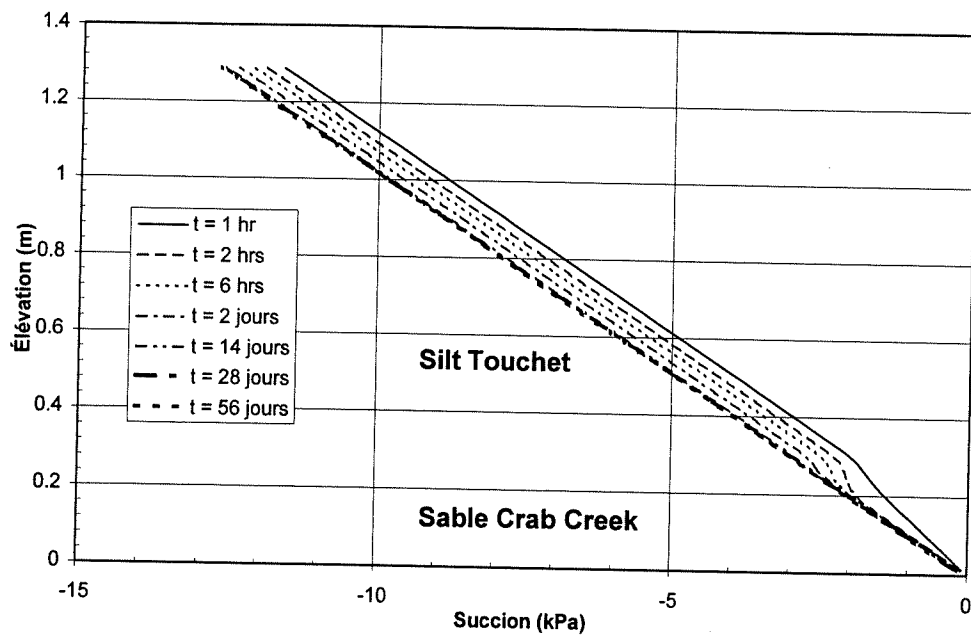


Figure 4.24 : Profil de la succion pour la modélisation 4

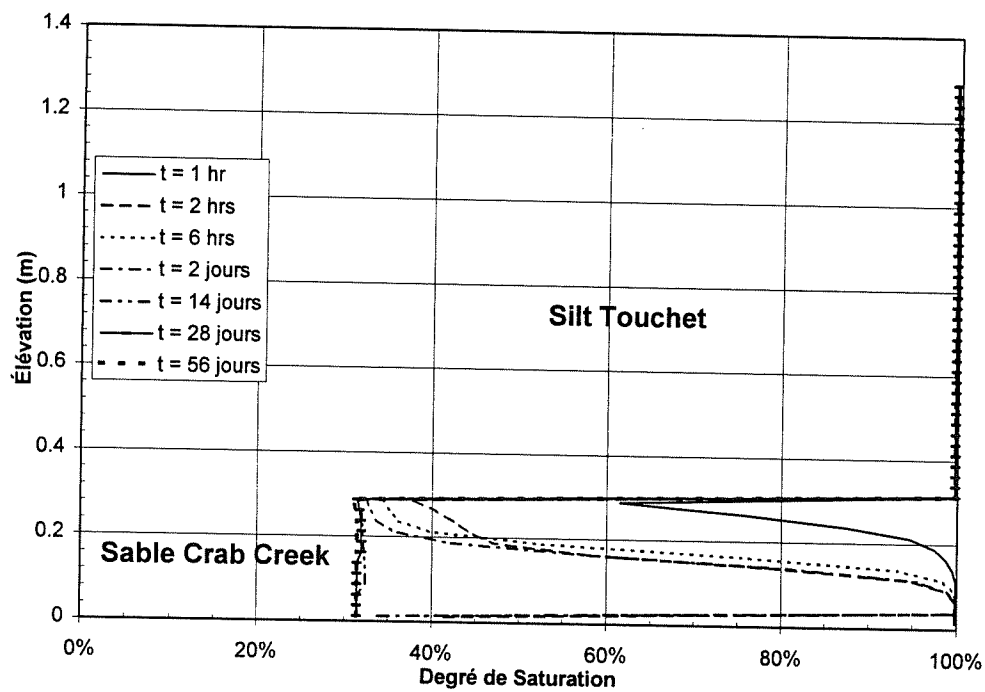


Figure 4.25 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 5

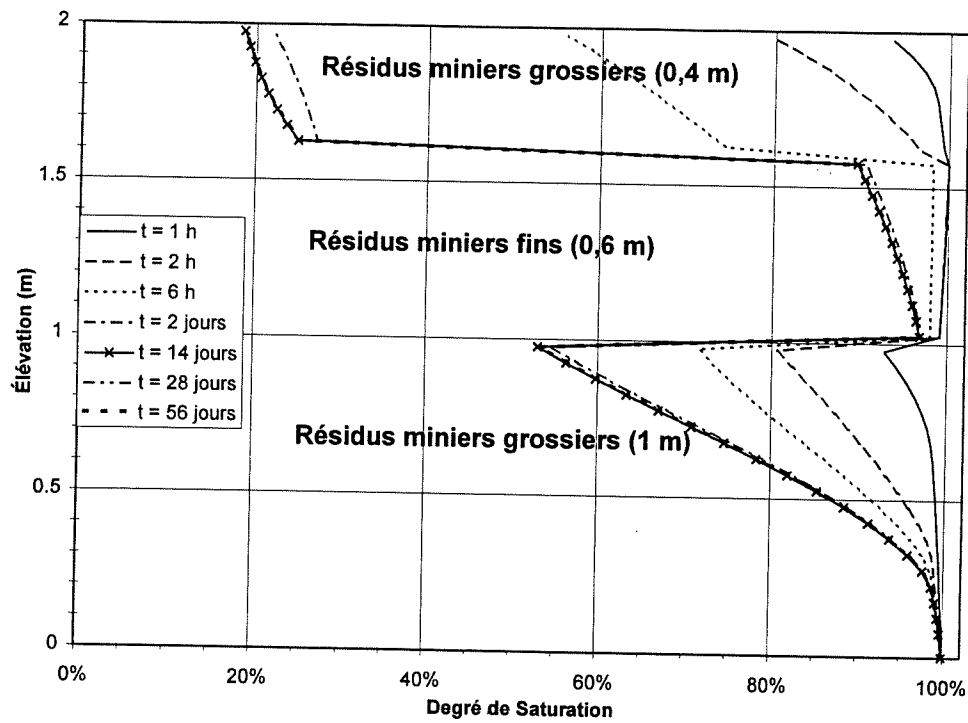


Figure 4.26 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 6

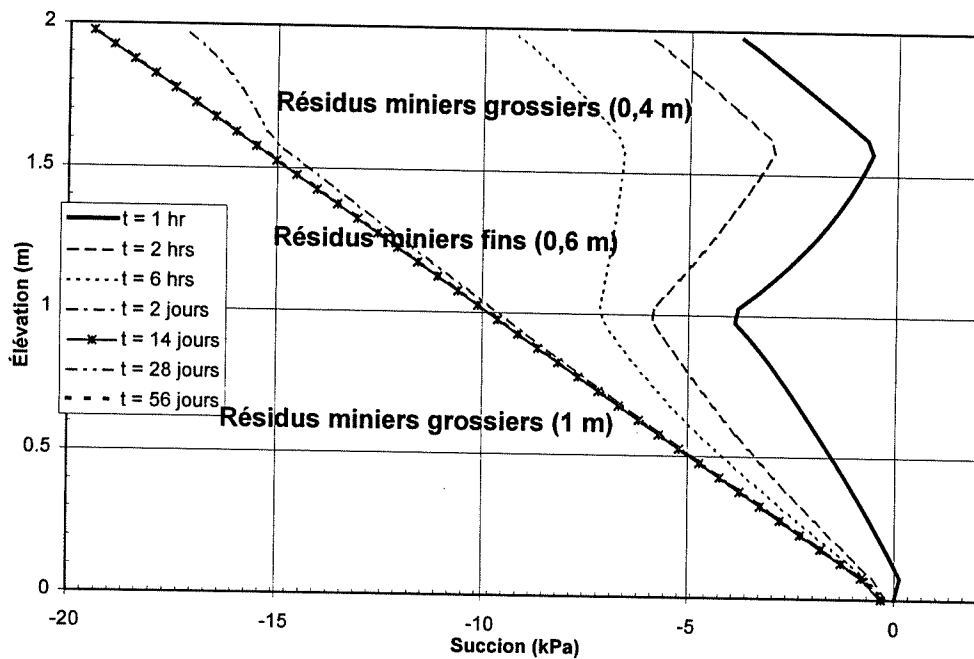


Figure 4.27 : Profil de la succion pour la modélisation 6

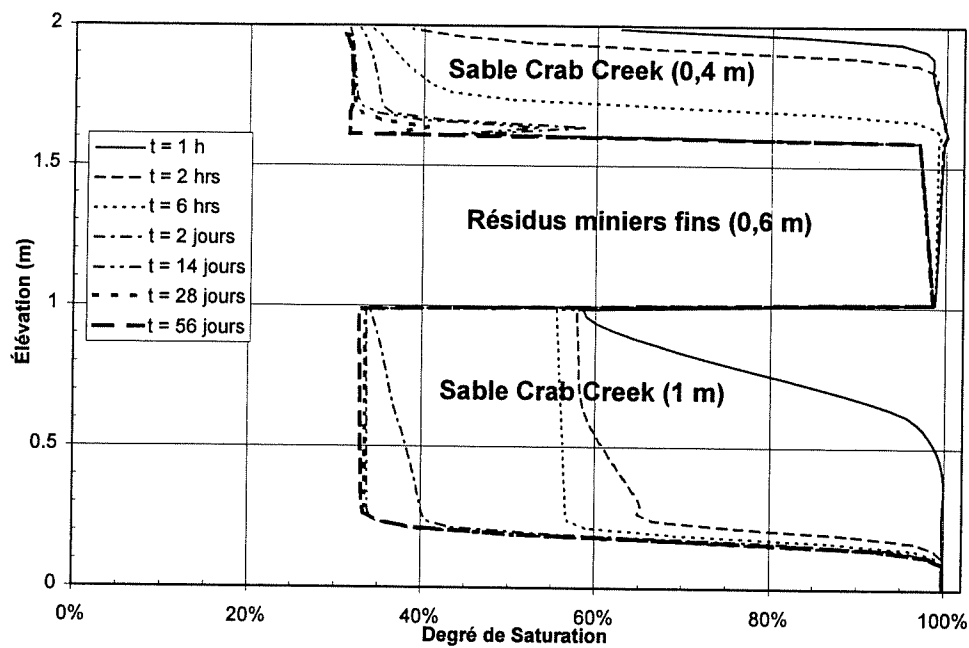


Figure 4.28 : Profil du degré de saturation pour la modélisation 7

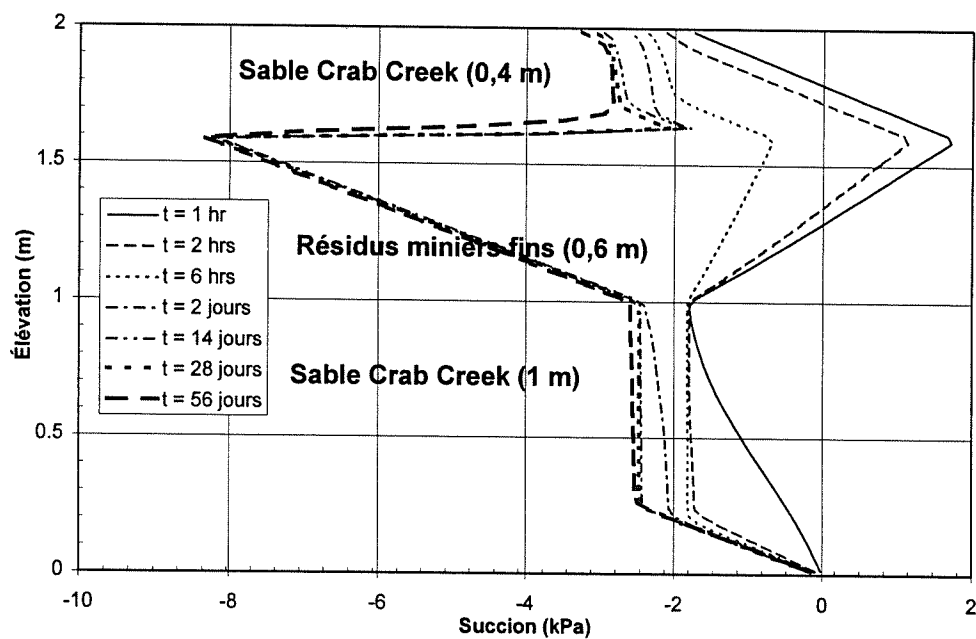


Figure 4.29 : Profil de la succion pour la modélisation 7

CHAPITRE V

ÉCOULEMENT DANS LES COUVERTURES INCLINÉES

L'angle que fait une couche de sol par rapport à l'horizontale a un effet direct sur son comportement hydrogéologique. Lorsque l'on veut concevoir des recouvrements multicouches utilisant le principe de barrière capillaire, on doit tenir compte de ce phénomène afin de prédire le comportement du recouvrement puisque, dans la plupart des cas, les recouvrements doivent être installés en pente. Cette section du document a donc pour but de présenter les principes physiques de base ainsi que les équations mathématiques qui permettent de décrire le mouvement de l'eau dans des sols stratifiés (en couches) inclinés. Plus de détails sur l'écoulement en pente peuvent être trouvés dans la littérature (e.g. Zaslavsky et Sinai, 1981b, c; McCord et Stephens, 1987; Selim, 1988; Miyazaki, 1988; Philip, 1991; Wallach et Zaslavsky, 1991; Jackson, 1992)

5.1 Équations d'écoulement

Les hypothèses initiales qui seront utilisées tout au long de l'élaboration des équations mathématiques sont les suivantes. Tout d'abord, on considère un nouveau système de coordonnées, n et s , qui forme un angle α avec le système habituel, soit x et z (voir figure 5.1). La direction s se trouve à être parallèle à la pente du sol tandis que n est perpendiculaire à celle-ci. On suppose l'uniformité selon s , c'est-à-dire qu'il n'y a pas de variation des paramètres (succion, perméabilité, etc.) selon s . Cette hypothèse pourrait entraîner des écarts entre la réalité et les valeurs prédites pour une barrière capillaire puisque l'on sait que la succion ne sera pas toujours la même, pour un même n , selon que l'on se situe dans le haut ou dans le bas de la pente. On suppose également une pente homogène et que le sol est isotrope en tout point.

5.1.1 Régime permanent

Les débits d'écoulement, selon les axes n et s et pour les hypothèses initiales mentionnées précédemment, peuvent être évalués à l'aide de l'équation de Darcy.

$$q_s = k \sin \alpha \quad (5.1)$$

$$q_n = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial n} + \cos \alpha \right) \quad (5.2)$$

Comme une des hypothèses formulées initialement est que la succion ψ ne varie pas selon l'axe s , le gradient hydraulique de l'équation 5.1 se résume à la variation de l'élévation. Pour l'équation 5.2, le gradient a une composante due à la variation de ψ et une autre associée à la variation d'élévation. Tout au long de ce travail, le terme k fera référence à une variable qui est fonction de ψ et n ($k(n, \psi)$).

Les débits selon les axes x et z peuvent être définis à partir de simples transformations géométriques et des équations 5.1 et 5.2.

$$q_x = q_s \cos \alpha + q_n \sin \alpha = -k \frac{\partial \psi}{\partial n} \sin \alpha \quad (5.3)$$

$$q_z = -q_s \sin \alpha + q_n \cos \alpha = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial n} \cos \alpha + 1 \right) \quad (5.4)$$

On peut également déterminer q_x et q_z à l'aide de l'équation de Darcy.

$$q_x = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial x}{\partial z} \right) \quad (5.5)$$

Comme $\partial x / \partial z = 0$, l'équation 5.5 peut être écrite comme suit :

$$q_x = -k \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5.6)$$

Pour la composante en z de q, on peut écrire :

$$q_z = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) \quad (5.7)$$

ou encore, de façon simplifiée :

$$q_z = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (5.8)$$

On présente, à la figure 5.2, un schéma qui montre les différents paramètres impliqués dans l'écoulement à travers un sol bicouche incliné. Dans des conditions d'écoulement permanent, de pente uniforme et d'isotropie en tout point, le débit qui passe à travers une surface unitaire parallèle au sol est le même peu importe où la surface se situe selon l'axe n. Pour la surface dA de la figure 5.2, on peut écrire:

$$-P \cos \alpha dA = q_n dA \quad (5.9)$$

avec P défini comme étant les précipitations sur une surface horizontale au-dessus du sol. On peut réécrire l'équation 5.2 de la façon suivante.

$$q_n = -P \cos \alpha dA = -k \left(\frac{\partial \psi}{\partial n} + \cos \alpha \right) \quad (5.10)$$

À partir des équations 5.10 et 5.2, il est possible de déduire les débits horizontaux, verticaux, selon l'axe n et s, et ce, en fonction de différents paramètres tels les précipitations, l'angle d'inclinaison α , l'épaisseur des couches et la conductivité

hydraulique en régime permanent. Pour plus de détails concernant ces équations, on peut consulter Zaslavsky et Sinai (1981c).

5.1.2 Régime transitoire

Wallach et Zaslavsky (1991) ont étudié le cas de l'écoulement en pente dans des milieux non homogènes en régime transitoire. Les débits selon les axes n et s sont encore une fois décrit par les équations 5.1 et 5.2. On sait que l'équation de continuité peut être exprimée comme suit:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_i}{\partial x_i} \right) \quad (5.11)$$

où i définit n'importe quel système de coordonnées cartésien orthogonal. Pour le système de coordonnées x - y - z , l'équation 5.11 s'écrit comme l'équation 2.5. En remplaçant les équations 5.1 et 5.2 dans l'équation 2.5, en posant l'axe n positive vers le bas et en se rappelant qu'une des hypothèses est que toutes les quantités physiques sont indépendantes de l'axe s , c'est-à-dire que :

$$\frac{\partial q_s}{\partial s} = 0 \quad (5.12)$$

on obtient (Wallach et Zaslavsky, 1991) :

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[k \frac{\partial \psi}{\partial n} - \cos \alpha \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5.13)$$

Sachant que :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = C(n, \psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (5.14)$$

où $C(\psi)$ est la capacité de stockage. On peut insérer ce dernier terme dans l'équation 5.13 et obtenir :

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[k \frac{\partial \psi}{\partial n} - \cos \alpha \right] = C(n, \psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (5.15)$$

Pour évaluer, à l'aide de méthodes numériques, le comportement hydrogéologique d'un système non homogène incliné en régime transitoire, il est essentiel de définir les conditions frontières. Dans le cas étudié, la condition frontière à la surface du sol ($n = 0$) est une précipitation uniforme P . Si l'on inverse la direction de l'axe n (positive vers le bas) pour des raisons pratiques, on peut écrire mathématiquement cette condition comme suit :

$$-k \frac{\partial \psi}{\partial n} + k \cos \alpha = P(t) \cos \alpha \quad (5.16)$$

où :

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 & \text{si } 0 \leq t < T \\ P(t) &= 0 & \text{si } t \geq T \end{aligned}$$

Au bas, $n=N$, on suppose une frontière imperméable (débit nul).

$$k \frac{\partial H}{\partial n} = 0 \quad (5.17)$$

Parce qu'il y a des écarts importants dans les valeurs de k et de θ aux interfaces entre les couches, il est impossible de résoudre le système en le prenant comme une entité. Il faut plutôt le séparer par couche et supposer la continuité entre les couches en termes de flux et de pressions. À l'aide de l'équation 5.13 et des conditions frontières (équation 5.16 et 5.17), on peut connaître en tout temps le comportement hydrogéologique d'un sol non homogène incliné. Des résultats des modélisations réalisées par Wallach et Zaslavsky (1991) sont présentés plus loin dans ce chapitre.

5.2 Comportement hydrogéologique d'un système non uniforme incliné

Tel que mentionné précédemment, les sols présentés à la figure 5.2 sont isotropes. On pourrait donc s'attendre à ce que le système pris dans son ensemble soit également isotrope. Zaslavsky et Sinai (1981b, c) ont cependant montré, théoriquement et à l'aide d'un exemple, que si l'on considère le système dans son ensemble, on doit le considérer comme étant anisotrope.

Lorsque l'on suppose l'isotropie en un point, on suppose que la force qui dirige l'écoulement (gradient) et que le débit sont parallèles, ce qui fait que le rapport des composantes du flux est identique à celui du rapport des composantes des forces (Zaslavsky et Sinai, 1981b). On peut représenter le rapport des composantes de flux (pour un régime permanent) en intégrant le rapport des équations 5.1 et 5.2 selon n et en divisant ce ratio par $\int dn$ pour obtenir des valeurs moyennes.

$$\frac{\int \frac{q_s}{q_n} dn}{\int dn} = \frac{\int \frac{\sin \alpha dn}{\frac{\partial \psi}{\partial n} + \cos \alpha}}{\int dn} \quad (5.18)$$

Quant au ratio des composantes de forces, il est obtenu en intégrant le gradient parallèle selon n et en divisant celui-ci par la composante normale du gradient toujours selon n .

$$\frac{\bar{F}_s}{\bar{F}_n} = \frac{\sin \alpha \int dn}{\int \left(\frac{\partial \psi}{\partial n} + \cos \alpha \right) dn} \quad (5.19)$$

Le système se comporte de façon isotrope uniquement si le rapport entre les équations 5.18 et 5.19 est égal à un. D'après ces deux équations, la seule façon où cette condition est remplie est lorsque $\partial \psi / \partial n = 0$ ou lorsque l'angle $\alpha = 0$, c'est-à-dire un sol non

incliné. En résumé, dans le cas de l'écoulement permanent dans un sol non homogène incliné où $\partial \psi / \partial n \neq 0$ et $\alpha \neq 0$, il y a toujours un débit non parallèle à la force qui dirige l'écoulement, qui est dans notre cas la gravité. De plus, ce débit est toujours vers le bas de la pente.

Cette dernière observation (débit vers le bas de la pente) n'est cependant pas valable en régime transitoire, et ce, particulièrement au début du processus d'infiltration. En effet, les simulations numériques de Wallach et Zaslavsky (1991) ont montré que les lignes de pression (ψ) sont en forme de zigzag, ce qui entraîne un changement de direction dans le débit latéral d'une couche à l'autre (voir figure 5.3). On observe, sur cette figure, que le débit remonte la pente dans les couches de matériaux qui ont une conductivité hydraulique à saturation (k_{sat}) plus faible tandis que le débit descend la pente dans la couche la plus perméable à saturation. Le débit latéral global peut donc être en remontant la pente au début de l'infiltration. Cependant, lorsque le régime permanent sera atteint, le débit va changer de direction vers le bas tel que démontré par Zaslavsky et Sinai (1981b).

5.3 Effets de la pente sur l'efficacité des CEBC

On a montré, dans les sections précédentes de ce chapitre, comment la pente pouvait influencer l'écoulement dans des milieux poreux non uniformes et inclinés. Dans cette section, on présente plus particulièrement l'effet de la pente sur l'efficacité des barrières capillaires. Ross (1990) stipule qu'une barrière capillaire, pour être efficace, doit empêcher l'accumulation d'eau à l'interface entre la couche fine et la couche grossière sous-jacente. Une façon d'y parvenir est d'incliner l'interface.

Dans une barrière capillaire bicouche inclinée, on retrouvera peu d'eau d'infiltration à l'interface dans le haut de la pente. La quantité d'eau augmentera au fur et à mesure que

l'on descend la pente jusqu'à un point critique. À ce point, la pression exercée sur la couche grossière dépassera la pression limite à l'entrée de l'eau, c'est-à-dire la pression qui permet à l'eau d'entrer dans un sol sec (Steenhuis et al., 1991). La barrière capillaire n'existe alors plus. Ce point est ce que l'on appelle la limite d'infiltration du bas de pente que l'on identifiera dans ce texte DDL ("*Down Dip Limit*"). Le débit latéral (dans le sens de la pente) du haut de la pente jusqu'au point DDL est appelé la capacité de diversion d'une barrière capillaire. Quant à la distance horizontale entre le sommet de la pente et le point DDL, celle-ci est appelée longueur effective de la barrière capillaire. Ces deux valeurs permettent d'évaluer l'efficacité d'une barrière capillaire à empêcher l'infiltration. On présente, dans cette section, des solutions analytiques permettant d'évaluer la capacité de diversion et la longueur effective d'une barrière capillaire pour différents cas particuliers.

Cas A

Dans un premier temps, on étudie le cas d'un sol grossier sous-jacent à un sol fin. On considère que l'interface est loin de la surface, que la nappe phréatique est beaucoup plus basse que l'interface, qu'on est en présence d'un régime permanent, que l'angle de l'interface par rapport à l'horizontal est de α , que la relation entre la conductivité hydraulique k et la pression ψ est définie, telle que proposée par Ross (1990), par l'équation de Gardner (1958) présentée au chapitre 2 :

$$k = k_{sat} e^{a_s \psi} \quad (5.20)$$

où a_s est un paramètre du sol appelé "*Sorptive Number*". Si l'on pose :

$$k_{rel} = e^{a_s \psi} \quad (5.21)$$

on peut réécrire l'équation 5.20 comme suit :

$$k = k_{sat} k_{rel} \quad (5.22)$$

où k_{rel} définit la conductivité hydraulique relative. Les paramètres identifiés $*$ sont valides pour la couche grossière du bas. Si l'on prend un système de coordonnées aligné à l'interface, similaire à celui de la figure 5.1 à l'exception que n est positif vers le bas, l'équation de l'écoulement de l'eau non saturé peut s'écrire de la façon suivante (Ross, 1990) :

$$\nabla \cdot (k \nabla \psi) = \frac{\partial k}{\partial s} \sin \alpha + \frac{\partial k}{\partial n} \cos \alpha \quad (5.23)$$

L'équation 5.23 peut également s'écrire comme suit :

$$\nabla^2 k_{rel} - a_s \sin \alpha \frac{\partial k_{rel}}{\partial s} - a_s \cos \alpha \frac{\partial k_{rel}}{\partial n} = 0 \quad (n < 0) \quad (5.24)$$

La même équation est valide pour la couche du bas ($n > 0$) avec a_s^* et k_{rel}^* .

À l'interface entre les deux couches, la pression ψ doit être égale, c'est-à-dire que $\psi(0) = \psi^*(0)$. Si l'on isole ψ de l'équation 5.21 et que l'on égalise pour les deux côtés de l'interface, on obtient :

$$\frac{1}{a_s^*} \ln k_{rel}^*(0) = \frac{1}{a_s} \ln k_{rel}(0)$$

ou

$$k_{rel}(0) = \left[k_{rel}^*(0) \right]^{a_s/a_s^*} \quad (5.25)$$

De plus, le débit à travers l'interface doit être continu afin de respecter la conservation de la masse. En ce qui concerne la condition frontière du haut, on pose que l'infiltration P est égale à la conductivité hydraulique k .

$$P = k = k_{sat} k_{rel} \quad (5.26)$$

Tel que mentionné précédemment, l'important est de connaître les conditions au point DDL. À cet endroit, il n'y a pas de gradient selon la direction s et l'infiltration à l'interface est de P (régime permanent). Cela revient à dire :

$$k_{rel}^* = \frac{P}{k_{sat}^*} \quad (5.27)$$

On peut maintenant évaluer la solution pour k_{rel} . En insérant la condition $\partial k_{rel} / \partial s = 0$ au point DDL, l'équation 5.24 s'écrit :

$$\nabla^2 k_{rel} - a_s \cos \alpha \frac{\partial k_{rel}}{\partial n} = 0 \quad (5.28)$$

La solution générale de cette équation pour la couche supérieure est :

$$k_{rel} = c_1 e^{a_s \cos \alpha n} + c_2 \quad (n < 0) \quad (5.29)$$

c_2 est évalué comme étant P/k_{sat} . L'équation 5.29 est également valide pour la couche du bas en remplaçant c_1 , c_2 , k_{rel} et a_s par c_3 , c_4 , k_{rel}^* et a_s^* . Si l'on pose que la nappe phréatique est loin du contact à N , qu'à cet endroit (à la nappe phréatique) $k_{rel}^* = 1$ et que $e^{-a_s^* \cos \alpha N}$ est très petit, on peut alors écrire :

$$k_{rel}^*(0) = c_4 \quad (5.30)$$

Physiquement, ceci signifie que k_{rel}^* est de 1 à la nappe phréatique et diminue en se rapprochant de l'interface à une valeur asymptotique d'environ c_4 . En plaçant les équations 5.29 et 5.27 dans la condition frontière définie par l'équation 5.25, on obtient :

$$c_1 + \frac{P}{k_{sat}} = \left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} \quad (5.31)$$

En isolant c_1 de l'équation 5.31 et en le substituant dans l'équation 5.29, on obtient la solution de $k_{rel}(n)$.

$$k_{rel}(n) = \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P}{k_{sat}} \right] e^{a_s \cos \alpha n} + \frac{P}{k_{sat}} \quad (5.32)$$

Maintenant que nous connaissons la relation entre k_{rel} et la profondeur n , on peut maintenant définir la capacité de diversion, c'est-à-dire le débit d'eau horizontal dû au bris capillaire. À noter que l'on parle maintenant de débit horizontal plutôt que de débit selon l'axe s . La raison est que le débit horizontal n'inclut pas de composante dû à la gravité, ce qui élimine une difficulté.

Par la loi de Darcy, on peut écrire le débit horizontal en fonction de n $q_h(n)$.

$$q_h(n) = k_{sat} k_{rel} \sin \alpha \frac{\partial \psi}{\partial n} \quad (5.33)$$

Cette équation est similaire à l'équation 5.3 où l'on remplace k par l'équation 5.22. Pour obtenir le débit horizontal total Q_{max} , il suffit d'intégrer le long d'une droite verticale qui représente la région d'où l'on veut connaître le débit. La longueur différentielle utilisée dans l'intégrale est $dn/\cos \alpha$.

$$Q_{max} = \int k_{sat} k_{rel}(n) \sin \alpha \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{dn}{\cos \alpha} = k_{sat} \tan \alpha \int k_{rel} d\psi \quad (5.34)$$

Parce que le débit horizontal se passe uniquement dans la couche fine, on peut écrire l'équation 5.34 de la façon suivante :

$$Q_{max} = k_{sat} \tan \alpha \int_{\psi=-\infty}^{\psi=0} k_{rel} d\psi = k_{sat} \tan \alpha \int_{\psi=-\infty}^{\psi=0} e^{a_s \psi} d\psi = k_{sat} \tan \alpha [k_{rel}(0) - k_{rel}(-\infty)] \quad (5.35)$$

Si l'on se sert de l'équation 5.34 pour évaluer $k_{rel}(0)$ et $k_{rel}(-\infty)$, on obtient une équation exacte de la capacité de diversion.

$$Q_{\max} = k_{sat} \frac{\tan \alpha}{a_s} \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P}{k_{sat}} \right] \quad (5.36)$$

Tel que mentionné précédemment, la longueur horizontale de la pente où l'on observe le principe de la barrière capillaire (du haut de la pente jusqu'au point DDL) est une autre donnée intéressante à connaître. Parce que l'on considère que le débit latéral ne s'effectue que dans le matériau fin, on peut écrire le débit pour n'importe quel point n comme suit :

$$Q(n) = Pn \cos \alpha \quad (5.37)$$

Si l'on pose que $k_{sat}k_{rel}(-\infty) = P$, que l'on est en présence de deux matériaux avec un grand contraste granulométrique ($k_{rel}(0) = 1$) et que $k_{sat} \gg P$, on peut écrire l'équation 5.36 comme suit :

$$Q_{\max} < \frac{k_{sat} \tan \alpha}{a_s} \quad (5.38)$$

L'endroit limite où la barrière capillaire est encore efficace (point DDL) est la valeur $Q(n = \text{DDL})$ et cette valeur de débit est équivalente à $Q_{\max}$.

$$Pn_{DDL} \cos \alpha < \frac{k_{sat} \tan \alpha}{a_s} \quad (5.39)$$

La longueur horizontale maximale ($L = n_{DDL} \cos \alpha$) de la barrière capillaire peut donc s'écrire comme suit :

$$L < \frac{k_{sat} \tan \alpha}{Pa_s} \quad (5.40)$$

Cas B

Le cas B est similaire au cas A à l'exception du fait que l'on utilise la fonction de perméabilité de Rijtema (1965) plutôt que celle de Gardner (1958). En effet, Steenhuis et al. (1991) ont proposé cet ajustement afin de mieux représenter le comportement de k en fonction de ψ et ce, spécialement pour les cas où l'on se situe près de la saturation. L'équation de Rijtema s'écrit comme suit :

$$k = k_{sat} \exp\left[a_s (\psi + \psi_a)\right] \text{ pour } |\psi| \geq \psi_a$$

$$k = k_{sat} \text{ pour } |\psi| < \psi_a \quad (5.41)$$

Rappelons que :

- a_s : coefficient expérimental souvent appelé "*Sorptive number*"
- ψ_a : AEV ("*Air Entry Value*")
- k_{sat} : conductivité hydraulique à saturation

En suivant la même démarche que celle décrite dans le cas A (Ross, 1990) et en posant comme hypothèse que l'eau à l'interface ne s'infiltrera dans la couche grossière que si la pression à l'interface est plus grande que la pression limite à l'entrée d'eau du matériau grossier ψ^*_0 , on peut écrire l'équation 5.32 comme :

$$k_{rel}(n) = \left[e^{a_s(\psi_a - \psi^*_0)} - \frac{P}{k_{sat}} \right] e^{a_s \cos \alpha n} + \frac{P}{k_{sat}} \quad \text{pour } |\psi| > \psi_a \quad (5.42)$$

On peut définir de façon générale Q_{max} (équation 5.35) :

$$Q_{max} = k_{sat} \tan \alpha \int_{\psi=-\infty}^{\psi=0} k_{rel} d\psi$$

Si on insère dans cette équation la fonction de perméabilité de Rijtema (1965), on obtient :

$$Q_{\max} = k_{sat} \tan \alpha \int_{\psi=-\infty}^{\psi=\psi_a} e^{a_s(\psi+\psi_a)} d\psi + k_{sat} \tan \alpha \int_{\psi_a}^0 d\psi \quad (5.43)$$

Si on résout l'équation 5.43 pour $\psi_a \leq \psi_0^*$, c'est-à-dire dans le cas où l'eau s'infiltré à l'intérieur de la couche grossière avant que la couche fine soit saturée, on obtient :

$$Q_{\max} = \frac{k_{sat} \tan \alpha}{a_s} \left(e^{a_s(\psi_a - \psi_0^*)} - \frac{P}{k_{sat}} \right) \quad (5.44)$$

La longueur horizontale maximale de la barrière capillaire dans ce cas est de :

$$L = \frac{k_{sat} \tan \alpha}{P a_s} \left(e^{a_s(\psi_a - \psi_0^*)} - \frac{P}{k_{sat}} \right) \quad (5.45)$$

Dans le cas où $\psi_a \geq \psi_0^*$, il est nécessaire d'intégrer le débit latéral pour les deux conditions de l'équation de Rijtema. La solution obtenue dans ce cas est la suivante :

$$Q_{\max} = k_{sat} \tan \alpha \left[a_s^{-1} \left(1 - \frac{P}{k_{sat}} \right) + \psi_a - \psi_0^* \right] \quad (5.46)$$

La longueur horizontale maximale de la barrière capillaire est, quant à elle, définie par l'équation suivante :

$$L = \frac{k_{sat} \tan \alpha}{P} \left[a_s^{-1} \left(1 - \frac{P}{k_{sat}} \right) + \psi_a - \psi_0^* \right] \quad (5.47)$$

Si l'on considère P beaucoup plus petit que k_{sat} , on peut alors écrire l'équation 5.47 comme suit :

$$L \leq \frac{k_{sat}}{P} \tan \alpha \left[a_s^{-1} + (\psi_a - \psi_0^*) \right] \quad (5.48)$$

Cas C

La particularité du cas C est d'inclure, à l'intérieur des équations de capacité de diversion $Q_{\max}$ et de longueur horizontale maximale de la barrière capillaire L , le concept d'anisotropie. L'anisotropie dans le matériau fin est définie ici par le rapport entre la conductivité hydraulique en s et celle en n , et est considérée dans ce cas-ci comme étant une constante selon les axes s et n . Le matériau grossier quant à lui est considéré comme étant isotrope. La figure 5.4 (tirée de Stormont, 1995a) présente une représentation schématique d'une barrière capillaire inclinée avec une couche fine anisotrope ainsi que le système de coordonnées utilisé.

Pour incorporer l'anisotropie dans l'équation 5.32 qui donne la relation entre k_{rel} et la position n , il faut incorporer à l'équation un terme qui détermine la déflexion de l'infiltration par rapport à la verticale, soit $\cos\xi/\cos\alpha$. L'équation de fonction de perméabilité utilisée dans ce cas est la fonction de Gardner (1958).

$$k_{rel}(n) = \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right] e^{a_s \cos \alpha n} + \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \quad (5.49)$$

Cette équation est valide dans le cas où la couche fine est d'une épaisseur b finie et relativement grande (b est quelques fois plus grand que $(a_s \cos \alpha)^{-1}$), ce qui fait que la condition frontière du dessus n'est à peu près pas affectée par l'interface entre les deux matériaux. L'équation pour la capacité de diversion est la suivante.

$$Q_{\max} = k_{sat-ss} \frac{\tan \alpha}{a_s} \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right] + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha \cos \xi P b \quad (5.50)$$

Contrairement à l'équation 5.36, cette équation contient deux termes. Le premier représente le débit latéral créé par la barrière capillaire. On remarque que, dans ce premier terme, c'est la perméabilité dans la direction s qui contrôle le débit latéral. Le deuxième terme, quant à lui, quantifie l'effet de l'anisotropie de la couche fine sur le débit latéral. Si l'on suppose comme précédemment qu'il n'y a pas d'infiltration dans la couche grossière avant le point DDL et donc, que toute l'eau qui s'infiltre avant ce point est déviée latéralement, la longueur horizontale maximale de la barrière capillaire L peut être définie par :

$$L = k_{sat-ss} \frac{\tan \alpha}{Pa_n} \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right] + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha \cos \xi b \quad (5.51)$$

Cas D

Ce cas est identique au cas C à l'exception que l'on utilise la fonction de perméabilité proposée par Rijtema (1965) plutôt que celle de Gardner (1958). Les différentes équations pour déterminer la capacité de diversion et la longueur horizontale maximale de la barrière capillaire sont similaires à celles du cas B à l'exception du fait que l'on incorpore l'effet d'anisotropie. La fonction qui détermine k_{rel} pour n'importe quelle profondeur est similaire à l'équation 5.42 avec en plus, un deuxième terme qui définit la déflexion de l'infiltration par rapport à la verticale (Stormont, 1995a).

$$k_{rel}(n) = \left[e^{a_s(\psi_a - \psi_0^*)} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right] e^{a_s \cos \alpha n} + \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \quad \text{pour } |\psi| > \psi_a \quad (5.52)$$

Encore une fois, cette équation est valide dans le cas où la couche fine est d'une épaisseur b finie et relativement grande. Pour évaluer la capacité de diversion, on doit tenir compte de deux cas distincts. Tout d'abord, celui où $\psi_a \leq \psi_0^*$, c'est-à-dire dans le

cas où l'eau s'infiltre à l'intérieur de la couche grossière avant que la couche fine ne soit saturée. Dans ce cas, la capacité de diversion peut s'écrire :

$$Q_{\max} = \frac{k_{sat-ss} \tan \alpha}{a_s} \left(e^{a_s(\psi - \psi_a)} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right) + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha P \cos \xi b \quad (5.53)$$

La longueur horizontale maximale de la barrière capillaire dans ce cas est de :

$$L = \frac{k_{sat-ss} \tan \alpha}{P a_s} \left(e^{a_s(\psi - \psi_a)} - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right) + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha \cos \xi b \quad (5.54)$$

Dans le cas où $\psi_a \geq \psi_0^*$, il est nécessaire d'intégrer le débit latéral pour les deux conditions de l'équation de Rijtema (1965). La solution obtenue dans ce cas est la suivante :

$$Q_{\max} = k_{sat-ss} \tan \alpha \left[a_s^{-1} \left(1 - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right) + \psi_a - \psi_0^* \right] + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha P \cos \xi b \quad (5.55)$$

La longueur horizontale maximale la barrière capillaire est, quant à elle, définie par l'équation suivante :

$$L = \frac{k_{sat-ss} \tan \alpha}{P} \left[a_s^{-1} \left(1 - \frac{P \cos \xi}{k_{sat-nn} \cos \alpha} \right) + \psi_a - \psi_0^* \right] + \left(\frac{k_{sat-ss} - k_{sat-nn}}{k_{sat-nn}} \right) \tan \alpha \cos \xi b \quad (5.56)$$

Cas E

Dans tous les cas présentés précédemment, on considère l'épaisseur des couches comme étant infinies. Ross (1990) et Stormont (1995a) ont même déterminé que l'on pouvait

utiliser ces équations pour des épaisseurs de couches fines b de quelques fois supérieures à $(a_s \cos \alpha)^{-1}$. Pour les cas où l'on ne respecte pas cette condition, Billiotte et *al.* (1988) proposent une nouvelle équation qui tient compte de l'épaisseur de la couche. On sait d'après l'équation 5.34 que :

$$Q_{\max} = \int k_{sat} k_{rel}(n) \sin \alpha \frac{\partial \psi}{\partial n} \frac{dn}{\cos \alpha} = k_{sat} \tan \alpha \int k_{rel} d\psi$$

et que (équation 5.32) :

$$k_{rel}(n) = \left[\left(\frac{P}{k_{sat}^*} \right)^{a_s/a_s^*} - \frac{P}{k_{sat}} \right] e^{a_s \cos \alpha n} + \frac{P}{k_{sat}}$$

Si l'on pose dans l'équation 5.32 que $k_{sat} \gg P$ et que l'on prend la limite que $e^{a_s \cos \alpha n} \approx 1$, l'équation 5.34 intégrée entre 0 et $-b$ peut alors s'écrire :

$$Q_{\max} = k_{sat} b \tan \alpha \quad (5.57)$$

5.4 Études de cas tirées de la littérature

Maintenant que l'on a présenté certaines équations de l'écoulement à travers des sols stratifiés inclinés et que l'on sait comment évaluer certains paramètres indicatifs de l'efficacité des barrières capillaires, on peut présenter des résultats provenant de différents travaux qui permettront de mieux comprendre les phénomènes physiques impliqués dans l'écoulement dans des barrières capillaires inclinées ainsi que l'importance des différents paramètres. Les travaux présentés sont des travaux de laboratoire et de terrain, des simulations à l'aide de solutions analytiques ainsi que des simulations numériques.

5.4.1 Travaux de laboratoire et de terrain

Miyazaki (1988)

Les travaux de Miyazaki (1988) avaient pour objectifs d'observer expérimentalement l'écoulement de l'eau dans des sols non homogènes inclinés. Les caractéristiques de succion ont été évaluées au laboratoire à l'aide d'essais en colonne et par une méthode se servant d'une chambre à pression négative. En ce qui concerne les fonctions de perméabilité des matériaux, elles ont été évaluées à l'aide de la méthode d'infiltration constante par arroseurs ("*Steady Sprinkling Infiltration Method*") et d'essais en colonne drainée. Les sols étudiés sont un sable et un gravier.

L'expérience réalisée consistait à placer dans une boîte de métal de 50 cm x 25 cm x 30 cm trois couches de matériaux superposés d'épaisseurs respectives de 12 cm, 3 cm et 10 cm. À des fins de comparaison, une boîte avec seulement du sable a été installée. Dans les deux boîtes, 27 tensiomètres ont été placés dans le côté. Les auteurs ont également fait varier l'angle entre la boîte et le sol (0°, 15° et 30°). Des conditions de drainage libre ont été placées au bas de la boîte. Différentes précipitations ont été simulées, soit entre 8 à 120 mm/h. Une fois les conditions de régime permanent atteintes, la simulation des précipitations a été arrêtée. Durant les 24 heures suivantes, des mesures du drainage accumulé ainsi que des pressions dans la boîte ont été réalisées.

Les résultats obtenus ont montré que, tel que l'on pouvait s'attendre selon la théorie, le front de mouillage ne se rend pas dans la couche grossière dans le haut de la pente. À une certaine distance du haut de la pente, l'eau commence à s'infiltrer dans la couche grossière ; le bris capillaire disparaît (figure 5.5). Les résultats mesurés au laboratoire ont également montré qu'une grande partie du débit se retrouve à l'interface entre le sable du

dessus et le gravier. En ce qui concerne le drainage, on remarque de leurs expériences, qu'il y a une moins grande accumulation de drainage lorsque le sol est non uniforme. La raison est que le matériau grossier se draine et agit comme une barrière capillaire pour le matériau du dessus. Cependant, lorsque la pente est grande, l'accumulation d'eau à l'interface a tendance à faire disparaître le bris capillaire et la quantité de drainage accumulé devient plus grande et même, se rapproche du cas du sol uniforme (figure 5.6).

Larson et al. (1988)

Des cellules expérimentales (4) de différentes configurations ont été construites sur le site Sheffield, en Illinois. L'objectif de ces cellules expérimentales était de vérifier l'efficacité de barrières capillaires afin de limiter l'infiltration de l'eau. La configuration du système visant à empêcher l'infiltration d'eau est composée d'une couche de gravier de 1 à 2 pieds (selon la cellule) avec, par-dessus, une couche de matériau silteux d'une épaisseur variant de 2 à 3 pieds (voir figure 5.7). L'angle du plan de contact par rapport à l'horizontal entre les deux matériaux est d'environ 5 %. Chaque cellule est instrumentée de tensiomètres afin de connaître la succion qui permet par la suite de déduire la teneur en eau. Des données météorologiques sont également prises à proximité du site.

Les résultats obtenus ont démontré que, malgré un apport d'eau important, les systèmes inclinés, avec bris capillaire, empêchaient pratiquement toute infiltration d'eau à travers le système. On peut observer à la figure 5.8 l'évolution dans le temps de la teneur en eau dans les différentes couches. On remarque que le degré de saturation demeure au delà de 80 % dans la couche fine, sauf pour le bas de la couche au début de l'expérimentation (Octobre). Cependant, après un mois, le degré de saturation dans le bas a augmenté à une valeur de près de 90 %. La teneur en eau du sable du bas quant à elle demeure à une valeur stable dans le temps à environ 10 %. Deux phénomènes expliquent cette situation. Tout d'abord, une partie de l'eau "rebondit" à l'interface des deux matériaux et demeure

dans le matériau fin, d'où sa teneur en eau élevée. Ce phénomène, déjà discuté plus tôt, a été détaillé dans la littérature par certains auteurs (e.g. Shakelford et *al.*, 1994 ; Chiu et Shakelford, 1994 ; Morel-Seytoux, 1992). Le deuxième phénomène qui peut expliquer la teneur en eau faible dans le matériau grossier est la présence d'un écoulement latéral parallèle à l'interface suivant les lois élaborées dans les sections précédentes de ce chapitre. Cette quantité n'a cependant pas pu être évaluée. D'ailleurs, une des conclusions de cet article suggère que des travaux supplémentaires doivent être réalisés dans l'avenir afin d'étudier cet aspect.

Stormont (1995b)

Cette étude a permis de comparer la performance de deux configurations différentes de barrières capillaires à l'aide de cellules expérimentales sur le terrain. La dimension des deux cellules est de 7 m de longueur x 2 m de largeur x 1,2 m d'épaisseur avec une pente de 5 % (voir figure 5.9). Une couche de 25 cm de gravier a été placée dans le fond. À l'intérieur de ce gravier, des drains ont été placés à différents endroits le long de la pente. Ainsi, on pourra connaître l'emplacement du point DDL. Un drain a également été placé au bas de la pente dans le matériau situé par dessus le gravier. L'objectif de ce drain est de récupérer l'écoulement latéral. Des appareils permettant la mesure de la teneur en eau ont été placés à différents endroits dans les cellules. La configuration des deux cellules est présentée à la figure 5.10. La première cellule est constituée de deux couches, soit le gravier et un matériau silteux. La deuxième cellule, quant à elle, est constituée de six couches en plus du gravier.

Les résultats obtenus ont montré que la cellule constituée de plusieurs couches a une plus grande capacité de diversion que celle constituée de deux couches. En effet, 87 % de l'eau d'infiltration s'est retrouvée dans le drain de la couche fine alors que dans la première cellule, cette proportion est d'environ 17 %. La longueur effective du bris

capillaire L observée dans la cellule 1 est entre 0 et 2 m alors que pour la cellule 2, cette longueur est plus grande que 6 m. Ces valeurs corroborent les valeurs théoriques calculées à l'aide de la méthode de Steenhuis et al. (1991) pour la cellule 1 et celles calculée à l'aide de la méthode de Stormont (1995a) pour la cellule 2. Ces deux méthodes ont été présentées à la section 5.3.1 (cas B et cas D) de ce document.

En résumé, cette étude a permis de comparer l'efficacité de deux types de barrières capillaires soient, une avec une couche fine isotrope sur gravier pour la cellule 1 et l'autre avec une couche fine anisotrope sur gravier dans le cas de la cellule 2. Les résultats expérimentaux obtenus ont pu être comparés à ceux évalués à l'aide de solutions analytiques avec une assez bonne corrélation.

5.4.2 Simulations à l'aide de solutions analytiques

Zaslavsky et Sinai (1981b)

Zaslavsky et Sinai (1981b) ont simulé le comportement d'un sol stratifié incliné (bicouche) en régime permanent à partir des équations de base définies précédemment. La relation utilisée dans cette simulation pour décrire le comportement de la conductivité hydraulique k en fonction de la succion ψ est la suivante (Rijtema, 1965)(équation 5.41):

$$k = k_{sat} \exp\left[a_s (\psi + \psi_a)\right] \text{ pour } \psi + \psi_a < 0;$$

$$k = k_{sat} \text{ pour } \psi + \psi_a > 0$$

où :

a_s = coefficient expérimental souvent appelé "*Sorptive number*"

$\psi_a = \text{AEV ("Air Entry Value")}$

Les principales caractéristiques du modèle simulé sont:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{10}{6}; \frac{k_{sat2}}{k_{sat1}} = 10; \frac{a_{s2}}{a_{s1}} = 6 \quad (5.58)$$

où D_i est l'épaisseur de la couche i .

Le coefficient d'anisotropie U (anisotropie des débits) est défini par les auteurs comme suit:

$$U = \left(\frac{\bar{k}_x}{\bar{q}_z} - 1 \right) = \frac{\bar{q}_x}{\bar{q}_z} \quad (5.59)$$

où :

$\bar{k}_x$ = conductivité hydraulique moyenne en x sur l'ensemble des deux couches ;

$\bar{q}_z$ = débit vertical moyen ;

$\bar{q}_x$ = débit horizontal moyen.

Les modélisations ont été réalisées pour différentes intensités de précipitations P . On présente à la figure 5.11 les résultats obtenus sous la forme du coefficient U en fonction de l'intensité de précipitation relative P^r qui est le rapport entre l'intensité de précipitation P et la conductivité hydraulique saturée du matériau 1 (k_{sat1}). Entre autres, on montre dans cette simulation, présentée à la figure 5.11, qu'il existe une valeur de précipitation, que l'on appellera P_i , où l'on observe que le système se comporte de façon isotrope. Pour n'importe quelle autre valeur de P , on observe de l'anisotropie des débits. Pour des valeurs de P supérieures à P_i , la couche ayant la plus grande conductivité hydraulique à saturation sera la plus perméable. Par contre, pour des valeurs de P inférieures à P_i , la couche ayant la plus faible conductivité hydraulique à saturation devient la plus perméable. À ce moment, le système agit comme une barrière capillaire.

On peut donc déterminer, pour différentes configurations de systèmes non uniformes inclinés, le comportement hydrogéologique de ceux-ci.

Ross (1990)

Dans cet article, on retrouve une simulation, à l'aide des équations présentées dans la section 5.3.1 (cas A), qui permet de connaître la longueur effective du bris capillaire pour le cas spécifique de deux sols. On est en présence d'un matériau fin s'apparentant à un silt, qui a une conductivité hydraulique saturée k_{sat} de 2×10^{-4} cm/s et une valeur de a_s de 25 cm. Quant au sol grossier, sa valeur de k_{sat} est d'environ 8×10^{-3} cm/s. Le contact entre les deux sols est incliné de 6° .

En incorporant ces données dans l'équation 5.40 et en supposant une infiltration P de 30 cm/année (similaire à une région humide), on obtient une longueur effective de la barrière capillaire de moins de 5 m. Cependant, si l'on pose une valeur de P s'apparentant à des conditions de climat aride ($P = 3$ cm/année), la longueur effective de la barrière devient alors de 50 m. On peut donc voir que, pour des épaisseurs de sols infinies, le taux de précipitation a un impact important sur la présence d'un effet de barrière capillaire.

L'équation 5.40 indique que la longueur effective du bris capillaire L varie proportionnellement avec la conductivité hydraulique saturée et la tangente de l'angle d'inclinaison. Cette équation montre également que L est inversement proportionnel au taux de précipitation et au paramètre a_s . Par exemple, si pour la même simulation présentée précédemment, on fait varier la pente de 6 à 12° , on obtiendra une longueur effective du bris capillaire du double pour les deux cas simulés (période sèche et humide).

Steenhuis et al. (1991)

Steenhuis et al. (1991) ont proposé une nouvelle équation (équation 5.48) pour évaluer la longueur effective d'une barrière capillaire. Les différences entre l'équation de Steenhuis et al. (1991) et celle de Ross (1990) ont été présentées précédemment. L'obtention de l'équation proposée par Steenhuis et al. (1991) a été présentée à la section 5.3.1 (cas B). En reprenant le même cas que Ross (1990) dans un climat humide et en prenant comme hypothèse que $\psi_a = 100$ cm (qui semble une valeur réaliste pour un matériau ayant une k_{sat} de 2×10^{-4} cm/s) et $\psi_o^* = 5$ cm, on obtient une longueur effective de barrière capillaire de 26,52 m contrairement à environ 5 m pour l'équation de Ross (1990). Dans des conditions de climat aride similaires à celles proposées par Ross (1990), la longueur effective du bris capillaire à l'aide de l'équation de Steenhuis et al. (1991) est de 265,16 m contrairement à environ 50 m pour Ross (1990).

On peut voir, à l'aide de cet exemple, que les modifications faites par Steenhuis et al. (1991) ont un impact majeur sur le calcul de la longueur effective du bris capillaire. Comme les hypothèses de Steenhuis et al. (1991) sont plus réalistes (utilisation de l'équation de Rijtema (1965) et atteinte de la pression ψ_o^* avant d'avoir percolation dans le matériau grossier), on peut s'attendre à ce que cette technique permette d'obtenir des valeurs de L qui soient plus près de la réalité.

Stormont (1995a)

Les travaux réalisés par cet auteur visaient à introduire, dans les équations de Ross (1990) et Steenhuis et al. (1991), le phénomène de l'anisotropie. La méthode utilisée a été présentée dans la section 5.3.1 (cas C et D) de ce document. Des simulations ont été réalisées afin de quantifier l'impact de l'anisotropie sur la longueur effective du bris capillaire. Les paramètres de base des simulations sont : $b = 1$ m, $a_s = 5$, $k_{sat-n} = 10^{-4}$ cm/s,

$a = 0.02 \text{ cm}^{-1}$, $k_{\text{sat}}^* = 1 \text{ cm/s}$, $a^* = 5 \text{ cm}^{-1}$. L'infiltration P a varié de 0.1 à 0.01 $k_{\text{sat-z}}$. La fonction de perméabilité des matériaux utilisée dans la simulation est celle de Gardner (1958).

Les résultats ont montré que la longueur effective de la barrière capillaire varie presque de façon linéaire avec l'anisotropie (k_s/k_n) de la couche fine (voir figure 5.12). Un rapport d'anisotropie supérieur à 1 entraîne une longueur effective du bris capillaire L plus grande que lorsqu'il n'y a pas d'anisotropie.

Afin de comparer les résultats entre les méthodes de Ross (1990), de Steenhuis et al. (1991) et de Stormont (1995a), la longueur effective du bris capillaire pour le cas d'un sol fin (k_{sat} de $2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, a_s^{-1} de 25 cm, $\psi_a = 100 \text{ cm}$) placé sur un sol grossier (k_{sat} est d'environ $8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, $\psi_o^* = 5 \text{ cm}$) avec un angle d'inclinaison de 6° a été déterminée à l'aide des trois méthodes. Pour la méthode de Stormont (1995a), des valeurs du rapport d'anisotropie k_s/k_n entre 1 et 10 ont été simulées. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.13. Pour les méthodes de Ross (1990) et de Steenhuis et al. (1991), en conditions humides, la longueur effective du bris capillaire est estimée à 5m et 26.5 m respectivement. La solution de Stormont (1995a) est identique à celle de Steenhuis et al. (1991) lorsque l'on pose un sol fin isotrope. Cependant, si l'on pose un facteur d'anisotropie de 4 par exemple, on obtient une longueur effective du bris capillaire L d'environ 106 m. On peut remarquer sur cette figure que la variation de L par rapport à l'anisotropie est linéaire. Ce paramètre (l'anisotropie) peut avoir un impact majeur lors de la conception d'une barrière capillaire visant à limiter l'infiltration.

Donc, lorsque la couche fine est anisotrope, avec une conductivité hydraulique plus grande parallèlement au contact, le débit latéral sera plus grand, ce qui entraîne une performance de la barrière capillaire pour empêcher l'infiltration supérieure.

Selim (1987), Selim (1988) et Rogers et Selim (1989)

Ces auteurs ont publié trois articles qui visaient à présenter une solution analytique pour l'écoulement permanent de sols non homogènes (multicouches) inclinés. Cette solution analytique considère les sols saturés en eau et uniformément anisotropes. La méthode de résolution est basée sur la méthode d'orthonormalisation de Gram-Schmidt (Selim, 1988). Les cas avec une condition frontière au bas de la deuxième couche imperméable (Selim, 1987) et sans fond imperméable (Selim, 1988) ont été étudiés. L'article de Rogers et Selim (1989), quant à lui, a repris le cas avec fond imperméable avec, en plus, un drain placé dans la couche du fond. De plus, dans cet article, des modélisations numériques ont été réalisées pour des fins de comparaison.

Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de réseau d'écoulement. Plusieurs cas ont été simulés, soit : des couches isotropes, la première couche anisotrope et la deuxième isotrope, la première couche isotrope et la deuxième anisotrope. Dans toutes les simulations, la pente a été fixée à 15 %. Différents rapports d'anisotropie ont également été simulés. En tout, dans les trois articles, plus de cinquante cas sont présentés. Les résultats obtenus démontrent clairement l'impact de l'anisotropie sur le réseau d'écoulement et, par le fait même, sur les débits impliqués dans les couches.

Cependant, ces études sont de peu d'intérêt lorsque l'on veut étudier le comportement de barrières capillaires visant à empêcher l'infiltration d'eau et d'oxygène. La raison est que la solution analytique proposée est valide seulement en milieu saturé. On sait que les barrières capillaires impliquent l'écoulement non saturé. Pour cette raison, on ne poussera pas plus loin l'analyse de ce type de problèmes dans le présent travail.

5.4.3 Simulations numériques

Frind et al. (1976)

Frind et al. (1976) ont réalisés des simulations numériques visant à évaluer l'impact de différents paramètres sur l'efficacité de barrières capillaires. Ces paramètres étudiés sont la longueur de l'interface, la pente de l'interface, l'épaisseur de la couche fine, le type de sol composant la couche fine, le flux imposé à la surface et le volume total d'eau d'infiltration. Les valeurs utilisées dans les modélisations pour la pente de l'interface sont de 20, 50 et 70 % tandis que les épaisseurs de la couche fine considérées dans le modèle sont de 30, 50 et 70 cm. Deux valeurs de flux à la surface ont été étudiées, soit 2,5 et 25 mm/h, le dernier étant équivalent à la conductivité hydraulique du sol fin. Les deux types de sols étudiés comme matériau fin sont un sable et un silt de conductivité hydraulique saturée k_{sat} de $1,75 \times 10^{-4}$ m/s et $7,12 \times 10^{-6}$ m/s respectivement. Quant au volume total d'infiltration, les valeurs étudiées sont de 25 et 50 mm (multiplié par la surface de contact) pour le sable et de 50 et 75 mm pour le silt. On présente à la figure 5.14 un schéma typique présentant les conditions frontières et la configuration typique des modèles analysés.

Au total, 56 modélisations numériques ont été réalisées. Chaque simulation débute au temps zéro, se déroule avec un flux spécifique à la surface jusqu'à ce que le volume total d'infiltration soit atteint. On laisse ensuite drainer le système jusqu'à ce qu'un état d'équilibre en terme de drainage soit atteint.

Les principales observations que l'on peut tirer des modélisations de Frind et al. (1976) sont les suivantes. Tout d'abord, pour des conditions données d'infiltration, de type de sol et d'épaisseur des couches, un changement dans la pente de l'interface peut permettre

d'atteindre le bris capillaire. On peut voir à la figure 5.15 que, pour une épaisseur de couche fine, constituée de sable, de 50 cm, avec une accumulation totale de précipitation de 5 cm, la pression critique observée à l'interface (pression maximale ou succion minimale observée sur toute la longueur de l'interface) est positive (donc pas d'effet de barrière capillaire) pour une pente de 20 % alors qu'elle devient négative (effet de barrière capillaire présent) pour des pentes de 50 et 70 %. Sur cette même figure, on peut observer l'effet du volume total d'infiltration sur la pression critique à l'interface. Pour une épaisseur de 50 cm, la pression critique est positive lorsque l'on est en condition de précipitation totale de 5 cm alors qu'elle est négative pour une précipitation de 2,5 cm. À noter que la localisation de la pression critique varie dans le temps et selon les conditions appliquées. On retrouve à la figure 5.16 un exemple de la pression calculée à l'interface pour différents points le long de cette interface. En ce qui concerne le taux d'infiltration, on peut voir son influence aux figures 5.17 et 5.18. Plus le taux d'infiltration est grand, plus la pression est grande (ou succion faible). Évidemment, comme on peut s'en douter, si l'on a un taux d'infiltration grand et une pente faible, les cas d'absence de bris capillaire sont plus probables. Une autre observation que l'on peut faire à partir des deux mêmes figures est que le type de matériau utilisé comme composante de la couche fine influence le comportement de la barrière capillaire. Pour des conditions similaires, le silt donne des pressions critiques plus faibles que le sable.

En conclusions, Frind et al. (1976) considèrent que le choix de la pente de l'interface et de l'épaisseur de la couche fine peut être optimisé afin d'obtenir un effet de barrière capillaire efficace pour des conditions données.

Wallach et Zaslavsky (1991)

Les auteurs de cet article avaient pour but de formuler et de résoudre les équations d'écoulement transitoire dans des profils de sols non homogènes inclinés et de longueurs

infinies. La formulation des équations a été présentée à la section 5.3 (régime transitoire) de ce document. Un autre objectif de ce papier est d'évaluer l'effet de différents paramètres tels l'intensité de pluie instantanée, la pluie cumulative, l'épaisseur des couches et la pente.

Les conditions frontières des cas étudiés sont : un taux de précipitation uniforme sur les dessus, un fond imperméable, une nappe phréatique profonde qui n'influence pas le sol stratifié étudié, les conditions de continuité à l'interface de deux couches, des propriétés $k(\psi)$ et $\psi(\theta)$ uniformes pour les deux sols utilisés (sable et argile). Afin de résoudre les équations de l'écoulement en milieu non homogène incliné en régime transitoire, Wallach et Zaslavsky (1991) ont utilisé un logiciel utilisant la méthode des éléments finis conçu spécifiquement pour leurs travaux.

Des simulations ont été réalisées avec une épaisseur des couches de 50 cm et une pluie d'intensité de 1,44 cm/h. Les résultats sont présentés, pour différents temps, sous la forme du débit le long de l'axe s ($q_{s \text{ net}}$) en fonction de la profondeur. Les résultats obtenus montrent que, au début du processus d'infiltration, les valeurs du gradient de pression sont négatives (voir figure 5.3). Comme le débit latéral net peut être défini de la façon suivante (Wallach et Zaslavsky, 1991) :

$$(q_s)_{\text{net}} = k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial n} \tan \alpha \quad (5.60)$$

Si $\partial \psi / \partial n$ est négatif, le débit latéral net se trouve à remonter la pente. Ce phénomène d'écoulement dans le sens contraire de la pente s'inverse dans le temps ; on observe l'inversion de l'écoulement plus rapidement dans la couche la plus perméable. On retrouve donc, pour certains temps, de l'écoulement dans le sens de la pente dans la couche perméable et de l'écoulement dans le sens inverse de la pente dans la couche la moins perméable.

Les résultats ont également été présentés sous la forme de la transmissivité latérale (terme souvent utilisé en hydrogéologie) en fonction du temps depuis le début de la précipitation, pour différentes intensités de précipitation. La transmissivité peut être définie comme la sommation des conductivité hydraulique sur tout le profil (unité en $\text{cm} \times \text{cm/s}$). On déduit de ces résultats, présentés à la figure 5.19, que le débit latéral est proportionnel à l'intensité des précipitations au carré et directement proportionnel au temps.

$$Q_s(t) \approx \sin \alpha \frac{(\sum P)^2}{t} \quad (5.61)$$

Les auteurs ont montré l'influence de l'eau ajoutée en fonction de la capacité de diversion, identifiée dans le texte comme $Q_{s \text{ net}}$, et ce, pour différentes intensités de précipitation. On remarque qu'au début du processus, les valeurs de $Q_{s \text{ net}}$ sont négatives, donc un débit dans les sens contraire de la pente. Pour une certaine valeur d'eau ajoutée, la valeur de $Q_{s \text{ net}}$ devient positive. L'aspect intéressant de cette représentation, c'est qu'elle montre que ce point de transition est indépendant de l'intensité de précipitation.

Une autre façon intéressante de présenter les résultats est d'utiliser le volume latéral d'eau ($V_{s \text{ net}}$).

$$V_{snet}(t) = \int_t Q_{snet} dt \quad (5.62)$$

Les auteurs ont réalisé des simulations en supposant une certaine quantité d'eau initiale dans le sol. En plaçant sur un graphique le volume latéral d'eau en fonction de l'eau (ou précipitation) totale ajoutée, on voit que les courbes diffèrent selon la quantité d'eau déjà présente dans le sol. Pour obtenir un même volume latéral d'eau, il faut ajouter plus d'eau lorsque le sol est sec. La différence entre les deux volumes est à peu près équivalente à l'eau déjà contenue dans le sol.

De plus, les auteurs ont évalué l'influence de l'épaisseur des couches par rapport au débit latéral. Leur conclusion est que l'épaisseur des couches a seulement un effet secondaire sur l'écoulement latéral.

Oldenburg et Pruess (1993)

Oldenburg et Pruess ont comparé les résultats obtenus pour la mesure de la longueur effective du bris capillaire à l'aide d'une solution analytique (Ross, 1990) et de modélisations numériques. Ils ont également déterminé l'influence de certains paramètres numériques sur les résultats obtenus par modélisations numériques.

Une représentation schématique du modèle simulé, les propriétés des matériaux étudiés ainsi que les conditions frontières sont présentées à la figure 5.20. Comme on peut le voir dans cette figure, différents matériaux grossiers ont été considérés, soit des matériaux ayant des valeurs de a_s^* de 2, 4, 6 et 8. Tout comme Ross (1990), le modèle permettant le calcul de la fonction de perméabilité utilisé est celui de Gardner (1958). Les conditions initiales sont celles de l'équilibre statique sans infiltration. Le logiciel utilisé par les auteurs est TOUGH2 (Pruess, 1987, 1991) qui utilise la méthode des différences finies intégrales.

On présente à la figure 5.21 les résultats obtenus, en terme de rapport percolation/infiltration versus la distance Y , à l'aide des simulations numériques ainsi que ceux prédits par l'équation de Ross (1990). Le rapport percolation/infiltration étant entre l'eau qui passe à travers la barrière capillaire (percolation) versus l'infiltration à la surface. On remarque que l'équation de Ross (1990) ne prévoit aucune percolation jusqu'au point DDL (cas où $a_s^* = 4$). Par la suite, la percolation devient égale à l'infiltration. Quant aux résultats numériques, ils montrent plutôt que le processus de

percolation est progressif. Si le contraste entre les matériaux est suffisamment grand (a_s^* de 4, 6 et 8), la percolation augmente graduellement jusqu'à un certain seuil (ce seuil peut être plus grand que l'infiltration). Le phénomène de barrière capillaire est, dans certaines conditions, cyclique le long de la pente. Ceci est représenté sur la figure 5.21 par une baisse du rapport percolation/infiltration après l'atteinte d'un maximum. La raison de ce phénomène est que lorsque l'on dépasse la pression à l'entrée d'eau du matériau grossier ψ_0^* , une grande percolation à travers ce matériau se produit. Cette grande percolation permet au matériau plus bas d'agir à nouveau comme barrière capillaire. Pour ce qui est des résultats des analyses avec un matériau grossier n'ayant pas un grand contraste avec le matériau fin ($a_s^* = 2$), on voit qu'il n'y a peu d'effet de barrière capillaire. Le rapport entre la percolation et l'infiltration augmente avec la distance vers le bas.

En ce qui concerne l'effet de certains paramètres numériques, les analyses ont démontré que d'augmenter l'intensité du maillage augmente la précision mais que le maillage uniforme permettait quand même d'obtenir de bons résultats. Quant à l'orientation du maillage, il s'est avéré avoir peu d'impact sur les résultats à l'exception du cas où a_s^* est très grand (plus grand que 8).

Yeh et al. (1994)

Les modélisations numériques réalisées dans cette étude avaient pour but d'évaluer l'efficacité de recouvrements bi-couches et multicouches visant à empêcher l'infiltration. Cette efficacité a été évaluée principalement en quantifiant l'effet de l'épaisseur de la couche la moins perméable sur la dispersion latérale du front de mouillage et l'effet d'une variation du taux d'infiltration du point de déversement.

La résolution du modèle mathématique a été réalisée à l'aide d'un logiciel utilisant la méthode des éléments finis (VSAFT2). Les propriétés hydrogéologiques des différents sols (courbes caractéristiques de succion et fonctions de perméabilité) ont été déterminées au laboratoire. Le modèle RETC de van Genuchten (1991) a été utilisé pour le lissage de la courbe. Les conditions frontières des simulations réalisées sont : pas de débit dans les côtés et sur le dessus, un gradient unitaire dans le fond qui simule une épaisseur infinie de la couche grossière du bas. Le point de déversement, quant à lui, est constitué de trois nœuds à débit constant.

Les auteurs ont montré que, plus la couche de matériau à faible conductivité hydraulique est épaisse, plus la dispersion latérale du front de mouillage est grande. Ceci semble indiquer que l'épaisseur de la couche fine a un impact sur le comportement de la barrière, contrairement à ce qu'a prétendu Wallach et Zaslavsky (1991). Plusieurs simulations ont été réalisées afin de quantifier la relation entre l'épaisseur et la dispersion latérale. Les résultats obtenus en terme de temps pour le front de mouillage à se rendre à l'interface en fonction de l'épaisseur, montrent que la relation entre les deux paramètres est quadratique. Quant à la relation entre la dispersion latérale du front de mouillage et l'épaisseur, celle-ci est linéaire. En bref, on peut dire qu'en doublant l'épaisseur de la couche à faible conductivité hydraulique, on double la dispersion latérale du front de mouillage et on quadruple le temps d'arrivée du front de mouillage à l'interface.

Pour ce qui est de l'effet du taux d'infiltration du point de déversement, les simulations ont montré qu'un taux d'infiltration inférieur entraîne une dispersion latérale supérieure du front de mouillage. À noter que le volume d'eau d'infiltration dans les différentes modélisations réalisées a été constant.

Des simulations de recouvrement à trois couches ont aussi été réalisées. La configuration du recouvrement est la suivante : une couche d'argile sur une couche de sable médium placée à son tour sur une couche de sable grossier. L'épaisseur de chacune des couches est de 0,305 m. La pente a été fixée à 3 %. Les résultats obtenus, présentés à la figure 5.23 et 5.24, ont montré un double effet capillaire. Le premier effet s'effectue à l'interface entre l'argile et le sable médium. Lorsque la pression à l'interface est plus grande que la pression minimale à l'entrée d'eau ψ_0^* dans le sable fin, le lixiviat commence à s'infiltrer à travers le sable médium. Lorsque le front de mouillage atteint l'interface entre le sable médium et le sable grossier, le même phénomène est observé. L'effet de bris capillaire empêche donc la migration de l'eau vers le bas. L'effet de la pente n'est cependant pas décelable sur les graphiques présentés.

Aubertin et al. (1997a)

Récemment, des résultats d'analyses numériques ont été présentées par Aubertin et al. (1997a). Ces analyses permettront d'évaluer l'impact de l'angle et de la longueur de la pente sur le degré de saturation du matériau fin d'une CEBC. Le modèle analysé numériquement consiste en un système trois couches placé sur des résidus miniers. Le système multicouche consiste en une couche de matériau fin (0,6 m de silt) placée entre deux couches de matériau grossier (1 m en bas et 0,4 m en haut). Dans cette étude, la nappe phréatique est placée juste sous la couverture. L'angle des pentes étudiées est de 2 ou 4 %. Quant à la longueur des pentes, deux valeurs ont été étudiées, soient 10 et 50 m. Le logiciel utilisé pour les simulations est SEEP/W qui a été décrit au chapitre 3 de ce document. Les modèles utilisés pour déterminer les courbes caractéristiques de succion et les fonctions de perméabilités, sont ceux de van Genuchten (1980) et de Mualem (1976).

Les résultats obtenus ont montré que l'angle et la longueur de la pente a un impact majeur sur le degré de saturation dans le haut de celle-ci. À la figure 5.24, on présente un profil de saturation représentant les conditions au haut d'une pente de 50 m inclinée de 4 % lorsqu'une période de sécheresse de 60 jours est appliquée. On remarque que le degré de saturation de la couche fine est fortement affecté (valeurs inférieures à 20 % de saturation dans le haut de la couche). Un profil de saturation pris au même endroit, toujours après une sécheresse de 60 jours mais où la pente est inclinée de 2 %, est présenté à la figure 5.25. On remarque que cette fois-ci, le degré de saturation de la couche fine se situe à des valeurs supérieures à 90 %.

La principale conclusion que l'on peut tirer de ces travaux est que l'angle et la longueur de la pente d'une barrière capillaire affecte le degré de saturation de la couche fine. Comme dans certains cas (couvertures placées sur des résidus miniers générateurs de drainage minier acide par exemple) on veut limiter l'infiltration de l'oxygène à l'aide de barrières capillaires, et que le degré de saturation est le paramètre le plus important pour diminuer la diffusion d'un gaz (Collin et Rasmuson, 1990), cet aspect ne doit pas être négligé lors du design. De simples modélisations numériques unidimensionnelles pourraient entraîner la surestimation de l'efficacité de couvertures avec effet de barrière capillaire pour limiter l'infiltration de l'oxygène.

5.5. Autres considérations

Si l'on veut définir de façon précise l'écoulement en pente d'un système non homogène, certaines autres considérations doivent être prises en compte telles l'évapotranspiration, la dispersion de la pluie dans des systèmes en pente, le phénomène de "*fingering*", la variation de l'anisotropie en fonction de la succion.

La prédiction de l'évapotranspiration est un facteur déterminant dans la reconstitution du bilan hydrique de systèmes non homogènes inclinés. Les méthodes les plus fréquemment utilisées sont celles du "*Bowen ratio*" et de Penman modifiée. La méthode du "*Bowen ratio*" permet de mesurer le flux d'évaporation à partir de données météorologiques de terrain et est défini comme étant le rapport entre le flux de chaleur sensible et le taux de transfert de chaleur latente (Hillel, 1980b). Quant à la méthode Penman modifiée, elle évalue le taux d'évaporation réel, c'est-à-dire qu'elle tient compte des conditions non saturées de surface (Wilson et *al.*, 1994, Wilson et *al.*, 1993). L'équation Penman modifiée est basée sur les caractéristiques physiques du sol telles la conductivité hydraulique, la diffusion de vapeur et les caractéristiques de rétention d'eau. Des données météorologiques sont également nécessaires pour évaluer le taux d'évaporation réel.

Un autre phénomène qui pourrait avoir un certain impact est la dispersion de la pluie lors du contact avec le sol ("*raindrop splashes*"). En effet, lorsqu'une goutte de pluie percute le sol, celle-ci se brise et forme plusieurs petites gouttelettes. Si le sol est incliné, les gouttelettes feront une plus grande distance vers le bas que vers le haut. On se retrouve donc avec une condition frontière sur le dessus qui est une fonction et non plus une constante. On peut retrouver, dans la littérature, des renseignements sur ce phénomène ainsi que des modèles pour le décrire (Mutchler, 1967, 1970, 1971 ; Zaslavsky et Sinai, 1981a).

Lorsqu'un sol fin se trouve par dessus un sol grossier (cas d'une barrière capillaire) et qu'il y a infiltration, le front de mouillage, lorsqu'il est rendu à l'interface, peut entraîner un phénomène de "*fingering*" (voir figure 5.26). On appelle aussi ce phénomène **instabilité du front de mouillage ou écoulement instable** (Hillel et Baker, 1988). Des conditions nécessaires à l'apparition de ce phénomène ont été proposées par plusieurs auteurs dont Raats (1973) et Baker et Hillel (1990). Une estimation des débits à

l'interface due à l'écoulement instable a été proposée par Parlange et Hoggart (1985) en deux dimensions et par Glass et *al.* (1990) en trois dimensions. Cependant, l'influence de ce phénomène sur l'écoulement dans des sols non homogènes inclinés ne semble pas avoir été encore étudié.

Lorsque l'on est en présence d'un milieu hydraulique anisotrope, on peut représenter la conductivité hydraulique comme un tenseur de second ordre, symétrique k_{ij} (Bear, 1972). En milieu saturé, on considère que ce tenseur ne varie pas dans le temps et dans l'espace. Une revue détaillée a été réalisée par Chapuis et Gill (1989) concernant l'anisotropie hydraulique des sols et roches homogènes en milieu saturé. L'anisotropie étant ici définie comme étant le rapport entre la conductivité hydraulique dans la direction x et la conductivité hydraulique dans la direction y (k_x/k_y) (cas bi-dimensionnel). Cependant, ce rapport évolue de façon différente en milieu non saturé. En effet, il semble que l'anisotropie ne soit pas une propriété de la matrice du sol seulement, mais aussi fonction du degré de saturation (ou de la succion dans le sol) (Mualem, 1984). Selon des données tirées de la littérature (Mualem, 1984 ; Stephens et Heermann, 1988 ; McCord et *al.*, 1991a, b ; Green et Freyberg, 1995), la forme de cette fonction, entre l'anisotropie et la succion, est celle d'une cloche, plus ou moins prononcée (voir figure 5.27). Cela signifie que l'anisotropie varie en fonction de la succion et que la valeur minimale d'anisotropie ne se situe pas nécessairement, comme on pourrait le penser intuitivement, à saturation complète. Les effets d'anisotropie peuvent être très prononcés pouvant aller jusqu'à quelques ordres de grandeur. Comme il a été montré à la section 3.1 (cas D et cas E) dans ce document, l'anisotropie peut avoir un impact important sur le comportement d'une barrière capillaire. Tenir compte de l'évolution de l'anisotropie en fonction de la succion pourrait permettre d'évaluer de façon encore plus réaliste le comportement de recouvrements multicouches inclinés.

5.6 Conclusions sur l'écoulement dans les systèmes inclinés

Il a été démontré, dans ce chapitre, l'importance que peut avoir l'inclinaison dans le comportement hydrogéologique de barrières capillaires. De plus, l'impact de l'anisotropie de la couche fine sur l'efficacité du recouvrement à dévier l'eau de façon latérale a été mis en lumière. Plusieurs solutions analytiques, valables sous certaines conditions, ont été présentées avec, comme résultat final, des équations permettant d'évaluer la capacité de diversion et la longueur effective du bris capillaire. Différentes simulations tirées de la littérature ont permis de mieux comprendre les phénomènes physiques impliqués dans les systèmes de recouvrement multicouches inclinés.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de ce chapitre sont les suivantes. Tout d'abord, lorsque l'on est en présence de système stratifié incliné, il y a toujours un débit non parallèle à la force de gravité. Si cette force est verticale (comme la gravité), il y a toujours un débit horizontal et ce débit est dirigé vers le bas en régime permanent. Cependant, en régime transitoire, on peut se retrouver avec une résultante du débit vers le haut. Les solutions analytiques, quant à elles, ont démontré l'impact que peut avoir l'utilisation d'un modèle plutôt qu'un autre (en ce qui concerne les fonctions de perméabilité) sur l'efficacité d'une barrière capillaire. Ces solutions analytiques ont également permis de voir que l'anisotropie peut avoir un impact significatif sur la capacité de diversion et sur la longueur effective du bris capillaire. Un aspect qui devrait être regardé de plus près dans l'avenir est d'évaluer quelle est l'épaisseur minimale qui permet l'utilisation des solutions analytiques présentées dans la section 3. On sait qu'une des hypothèses des solutions présentées est que l'épaisseur de la couche fine est infinie. Ross (1990) et Stormont (1995a) stipulent que ces solutions sont valables pour des épaisseurs de couches fines **quelques fois supérieures** à $(a_s \cos\alpha)^{-1}$. Il serait important d'identifier les conditions d'application de ces formules.

Comme on peut le constater, la plupart des efforts de recherche sur l'efficacité des barrières capillaires ont été concentrés sur le contrôle de l'infiltration de l'eau. Cependant, on sait, en ce qui concerne les barrières de recouvrement multicouches placées sur des résidus miniers générateurs de drainage minier acide, que la barrière capillaire a également pour objectif de limiter l'infiltration de l'oxygène. Dans la littérature, on retrouve très peu de gens qui se sont intéressés au phénomène de la désaturation de la couche fine causée par l'effet de pente. Cet aspect, très important, devra être approfondi dans l'avenir.

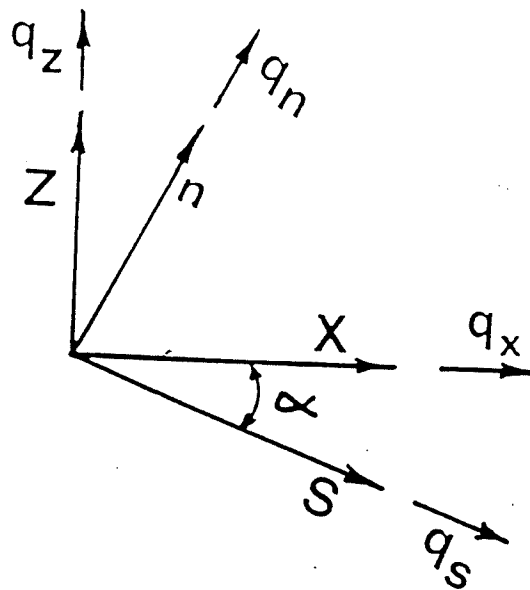


Figure 5.1 : Systèmes de coordonnées utilisés dans ce document (tirée de Zaslavsky et Sinai, 1981b).

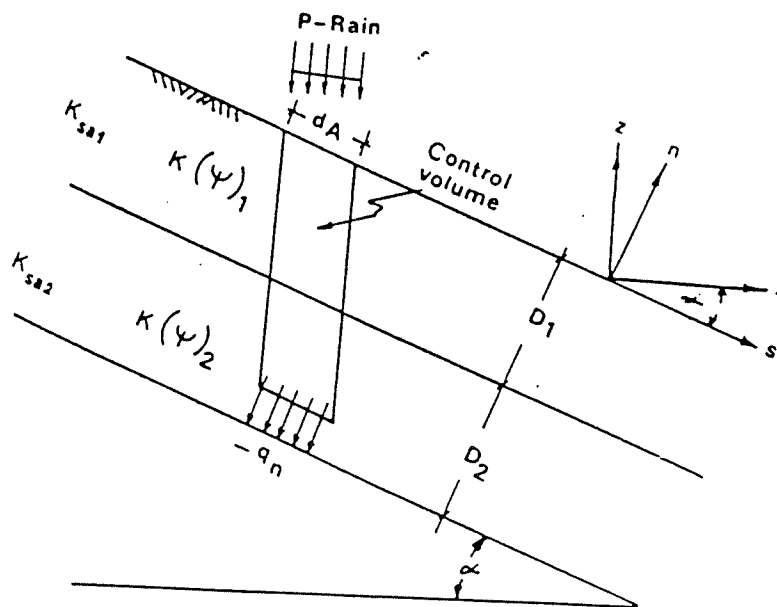


Figure 5.2 : Paramètres impliqués dans l'écoulement d'un système bi-couche incliné (tirée de Zaslavsky et Sinai, 1981b).

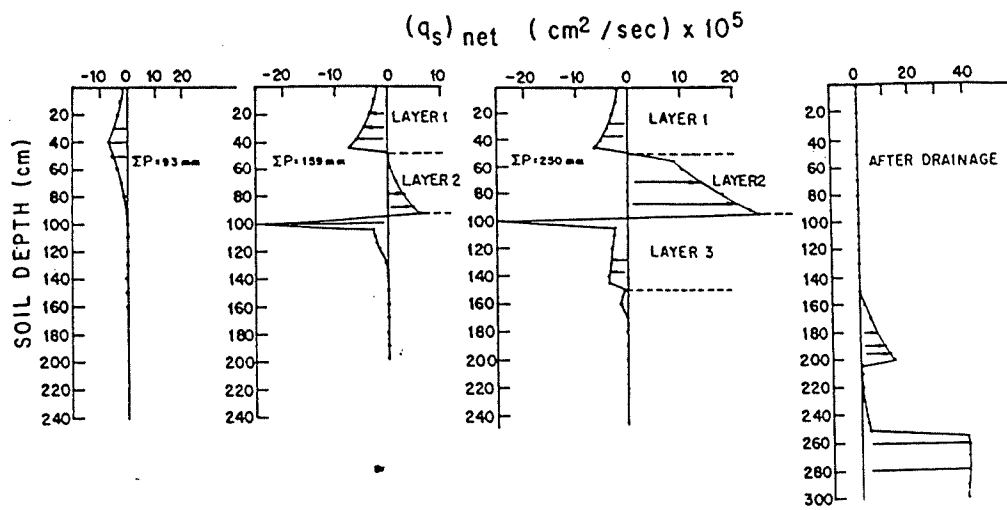


Figure 5.3 : Distribution du flux latéral avec la profondeur pour différents taux de précipitation (tirée de Wallach et Zaslavsky, 1991).

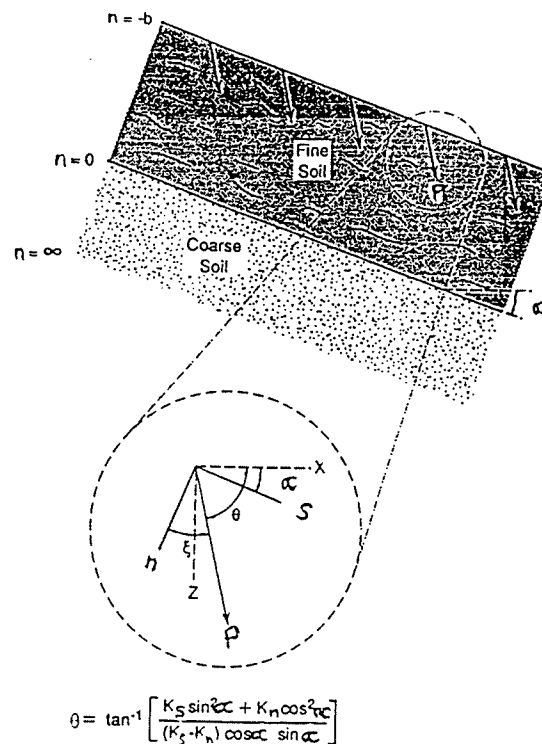


Figure 5.4 : Schématisation d'une barrière capillaire inclinée avec une couche fine anisotrope (tirée de Stormont, 1995a).

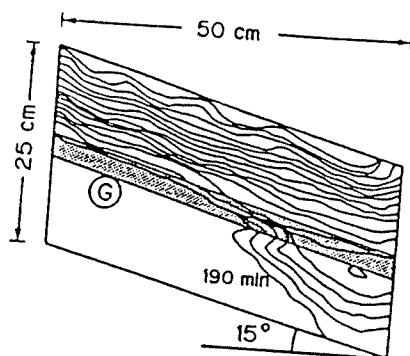


Figure 5.5 : Évolution du front de mouillage mesuré au laboratoire pour un système incliné (tirée de Miyazaki, 1988).

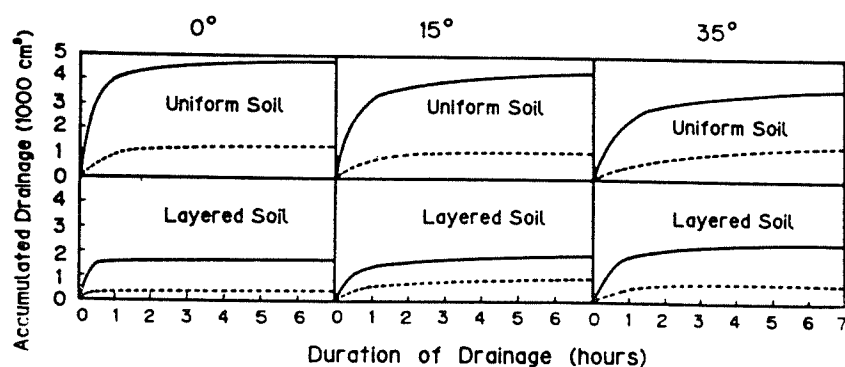


Figure 5.6 : Mesures de l'accumulation du drainage pour un système uniforme et non uniforme incliné à différents angles avec différents taux de précipitation (lignes continues pour 100 mm h^{-1} et lignes pointillées pour 10 mm h^{-1}) (tirée de Miyazaki, 1988).

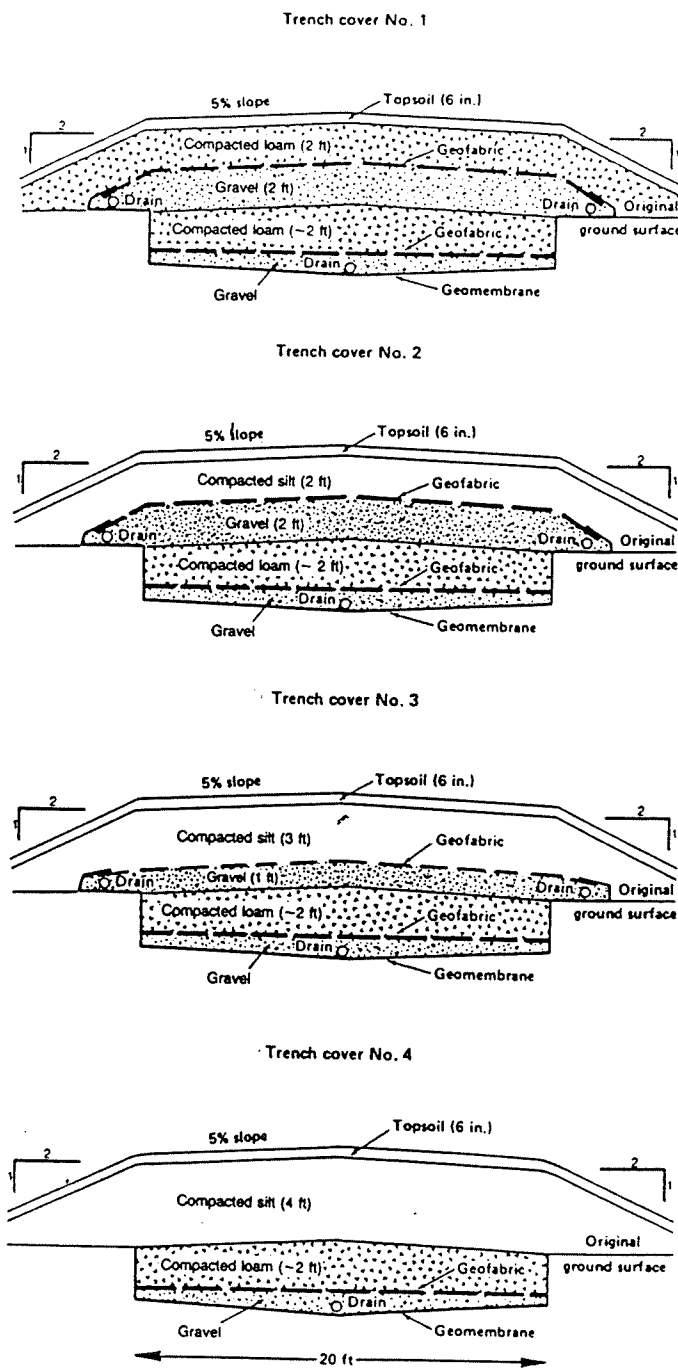


Figure 5.7 : Configurations géométriques des cellules expérimentales (tirée de Larson et al., 1988).

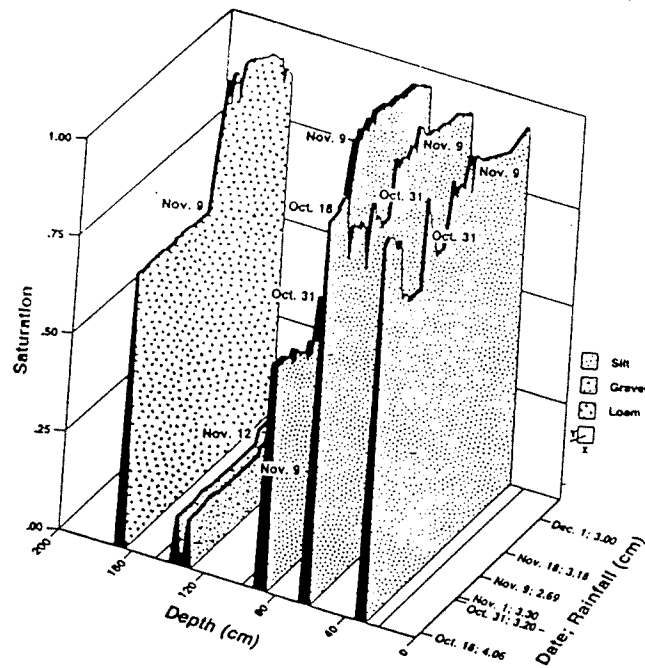


Figure 5.8 : Degré de saturation dans les couches de la cellule 2 (tirée de Larson et al., 1988).

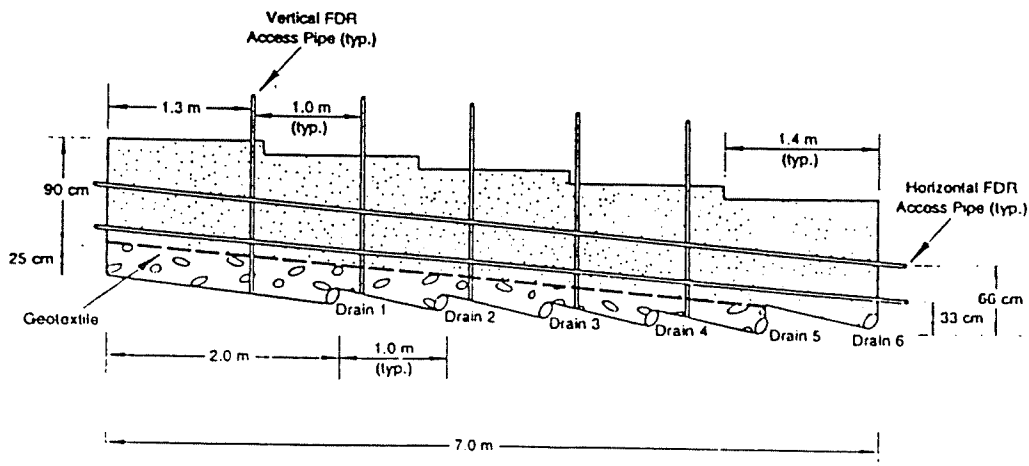


Figure 5.9 : Vue en section du montage pour les tests sur les barrières capillaires (tirée de Stormont, 1995b).

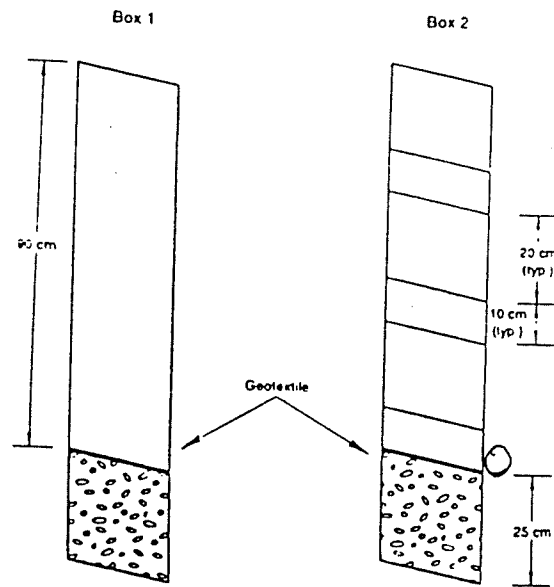


Figure 5.10 : Configuration géométriques des recouvrements étudiés (tirée de Stormont, 1995b).

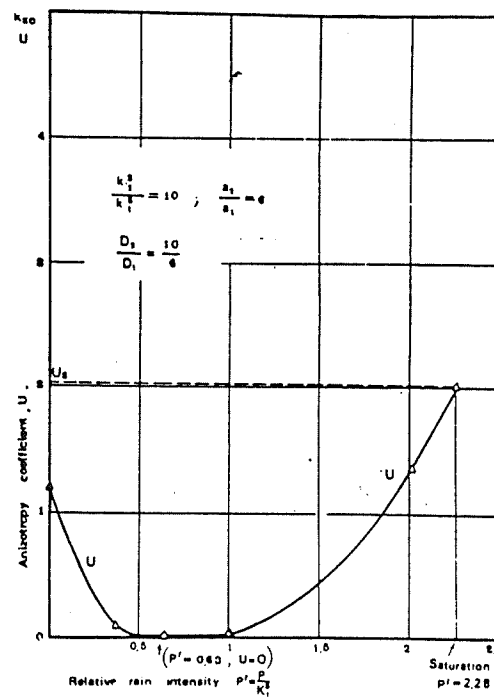


Figure 5.11 : Résultats des simulations en terme de coefficient d'anisotropie versus le taux de précipitation relatif (tirée de Zaslavski et Sinai, 1981b).

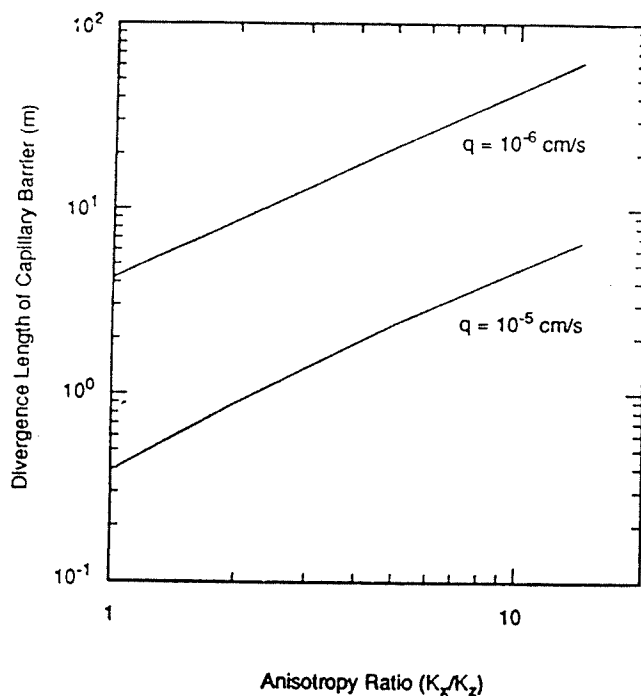


Figure 5.12 : Graphique de la longueur effective du bris capillaire versus le rapport d'anisotropie pour deux niveau de précipitation (tirée de Stormont, 1995a).

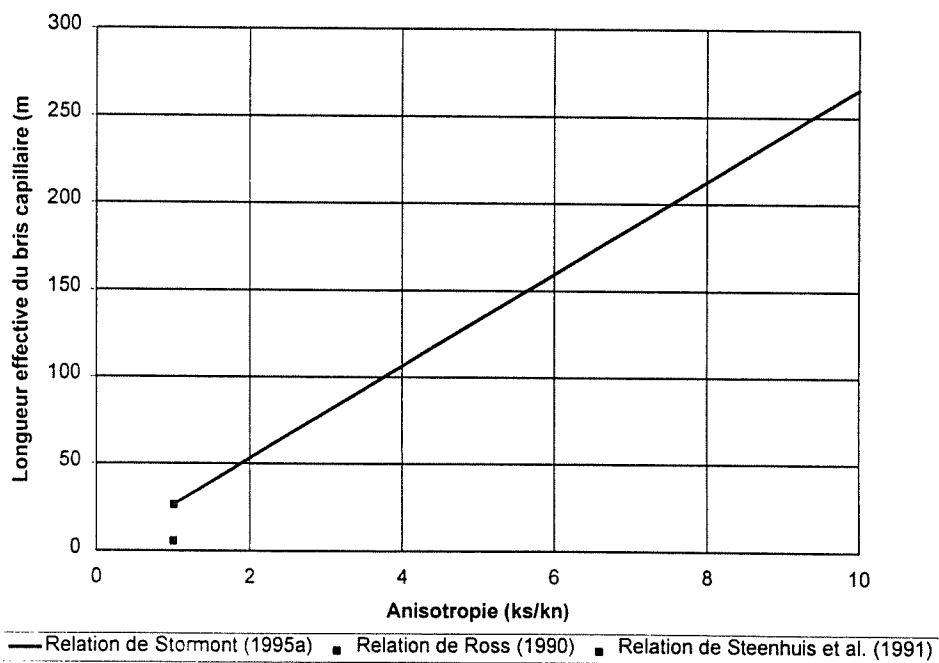


Figure 5.13 : Résultats des simulations pour les différentes solutions analytiques dans le plan longueur effective du bris capillaire en fonction de l'anisotropie.

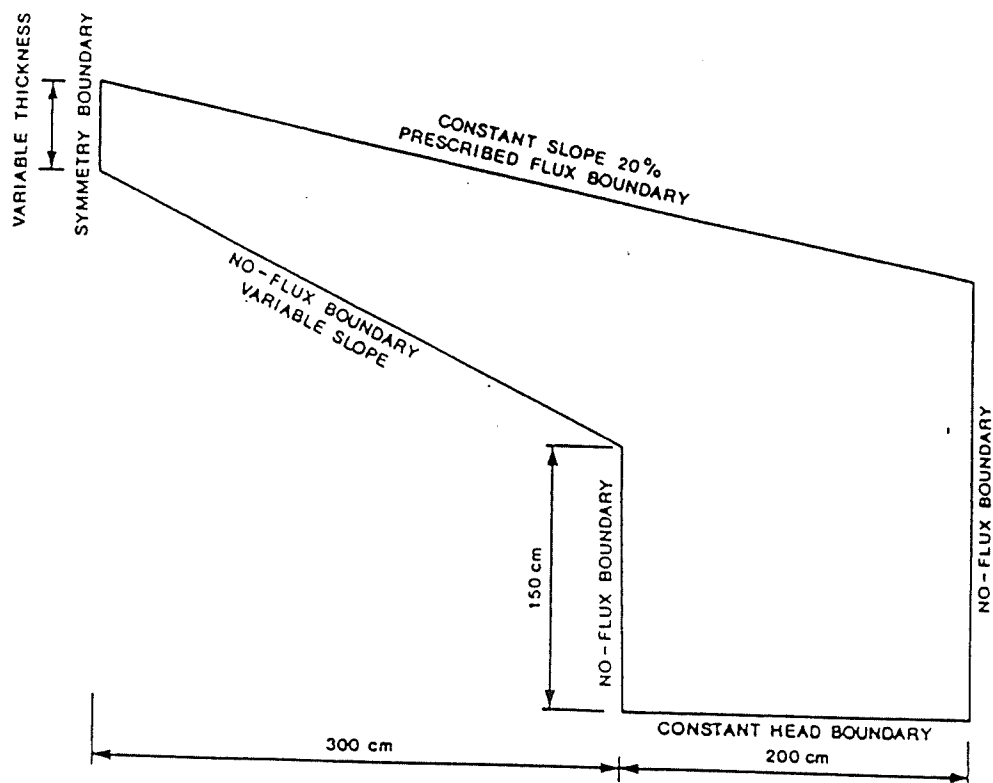


Figure 5.14 : Modèle simulé par Frind et al. (1976) avec les conditions frontières.

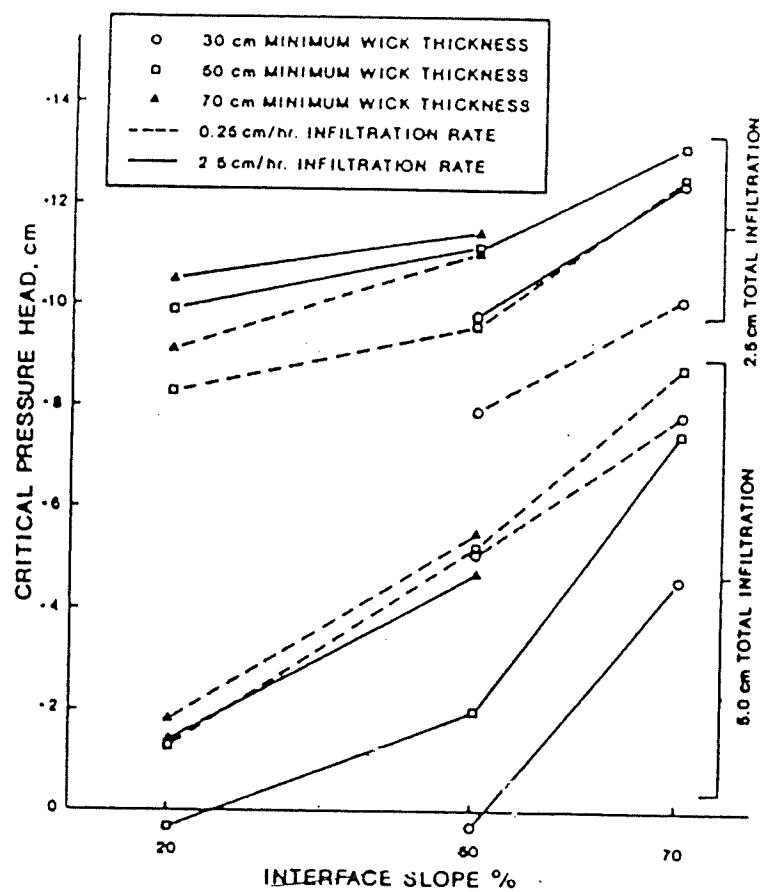


Figure 5.15 : Relation entre la pression critique à l'interface en fonction de la pente (tirée de Frind et al., 1976).

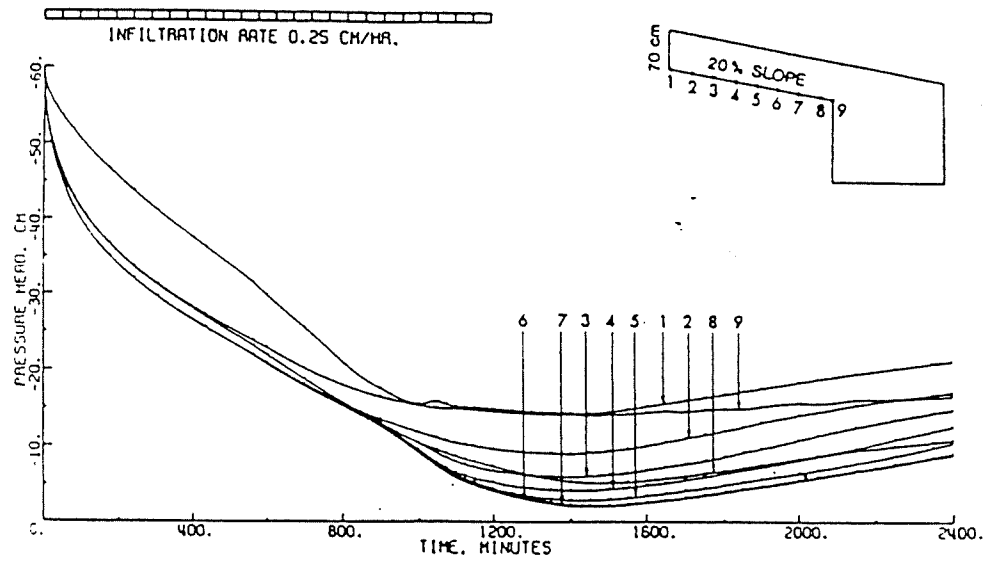


Figure 5.16 : Pression à l'interface pour différents points de l'interface (tirée de Frind et al., 1976).

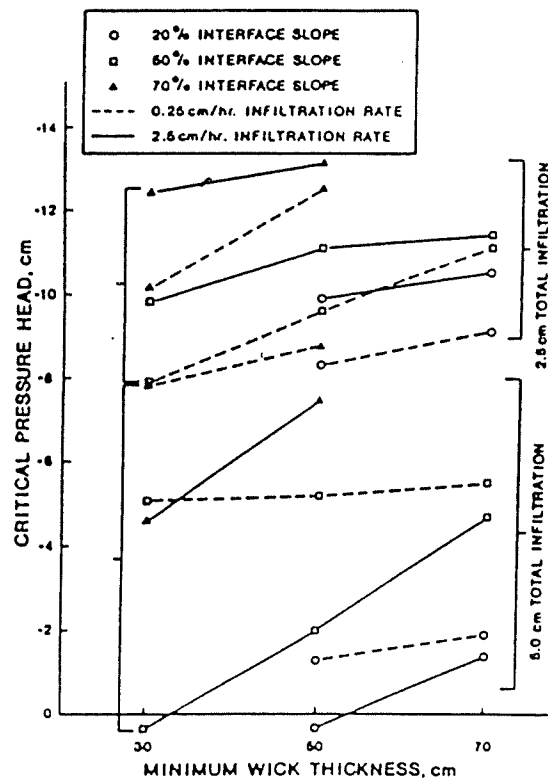


Figure 5.17 : Relation entre la pression critique et l'épaisseur de la couche fine pour des systèmes conçus avec du sable (tirée de Frind et al., 1976).

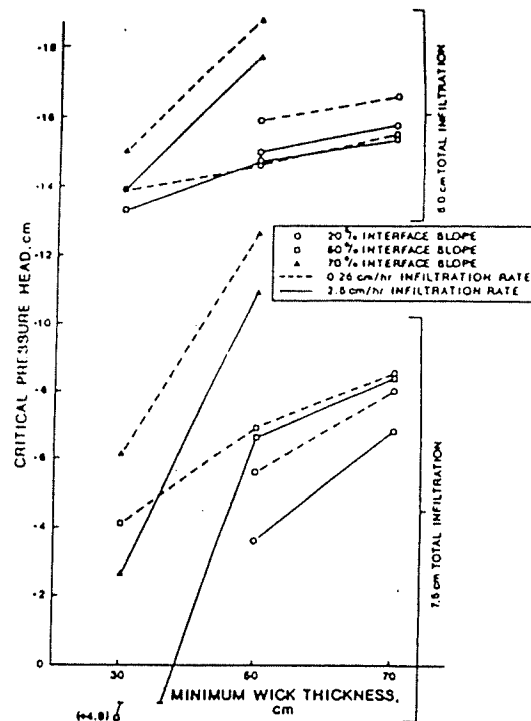


Figure 5.18 : Relation entre la pression critique et l'épaisseur de la couche fine pour des systèmes conçus avec du silt (tirée de Frind et al., 1976).

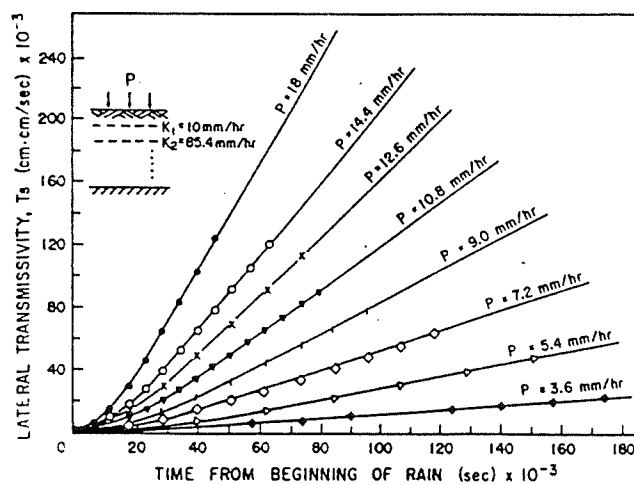


Figure 5.19 : Transmittivité latérale versus le temps de début de pluie pour différentes intensités de pluie (tirée de Wallach et Zaslavsky, 1991).

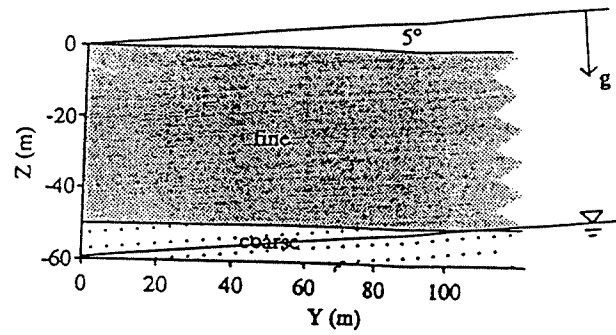


Figure 5.20 : Modèle de barrière capillaire simulé (tirée de Oldenburg et Pruess, 1993).

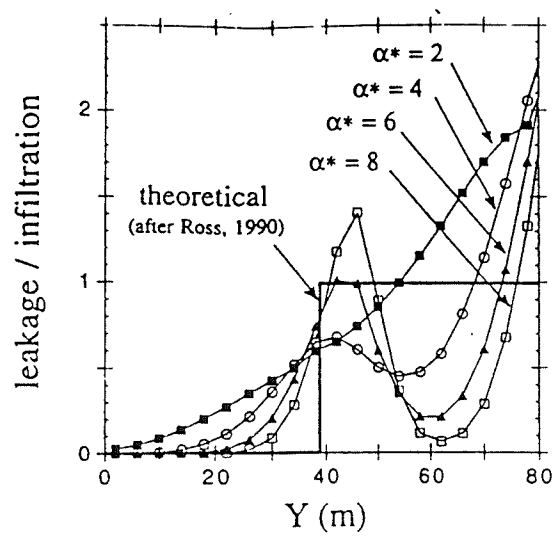


Figure 5.21 : Comparaison entre les résultats des simulations numériques et ceux de la solution numérique de Ross (tirée de Oldenburg et Pruess, 1993).

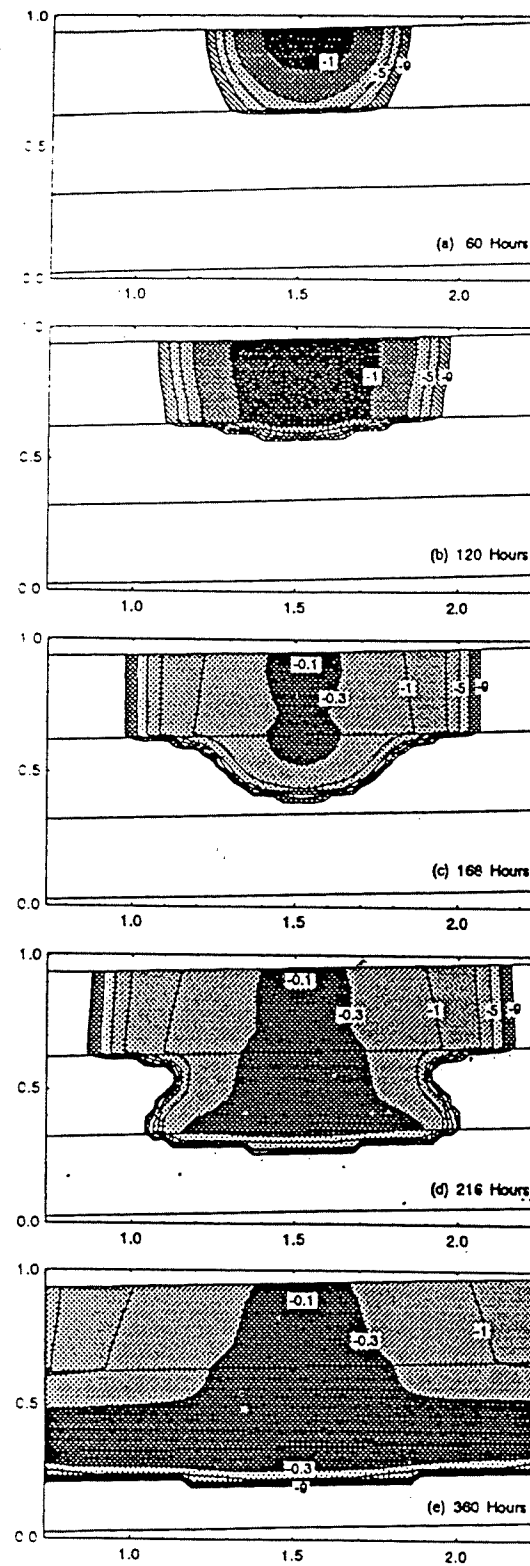


Figure 5.22 : Profil de suction des simulations d'un système de recouvrement incliné pour différents temps (tirée de Yeh et al., 1994).

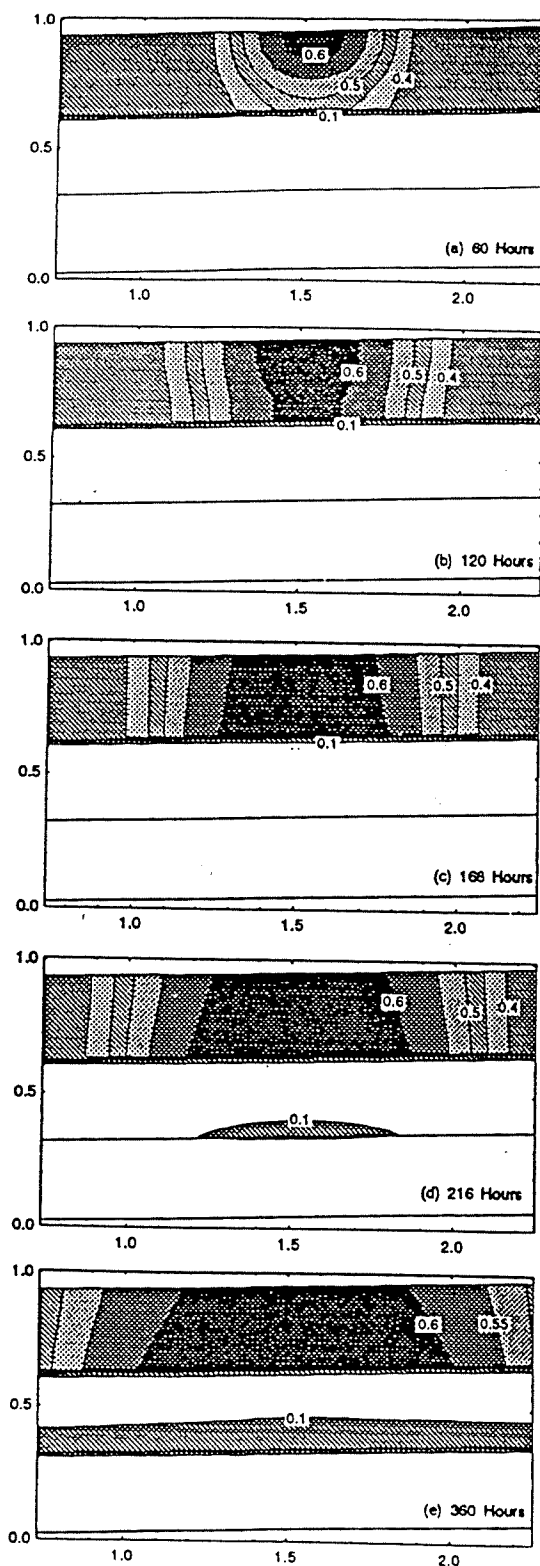


Figure 5.23 : Profil de teneur en eau des simulations d'un système de recouvrement incliné pour différents temps (tirée de Yeh et al., 1994).

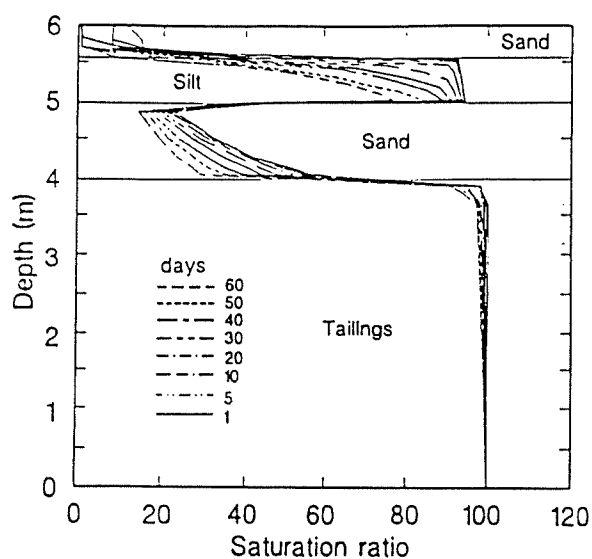


Figure 5.24 : Évolution du profil de saturation d'une section pris dans le haut de la pente (pente de 50 m de longueur) après une sécheresse de 60 jours, pour une pente 4 % (tirée d'Aubertin et al., 1997).

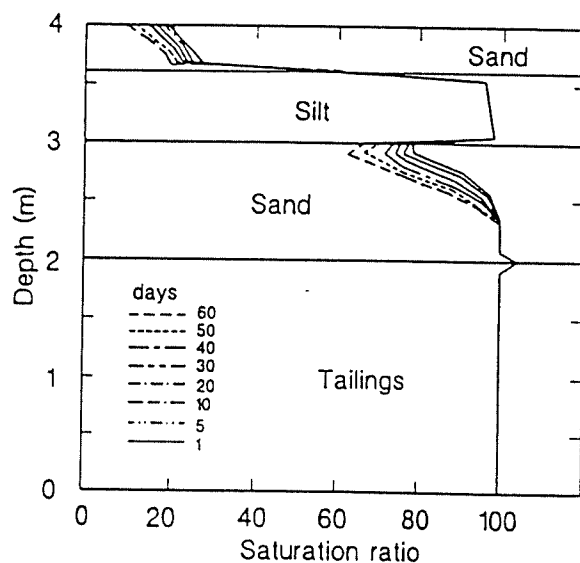


Figure 5.24 : Évolution du profil de saturation d'une section pris dans le haut de la pente (pente de 50 m de longueur) après une sécheresse de 60 jours, pour une pente 2 % (tirée d'Aubertin et al., 1997).

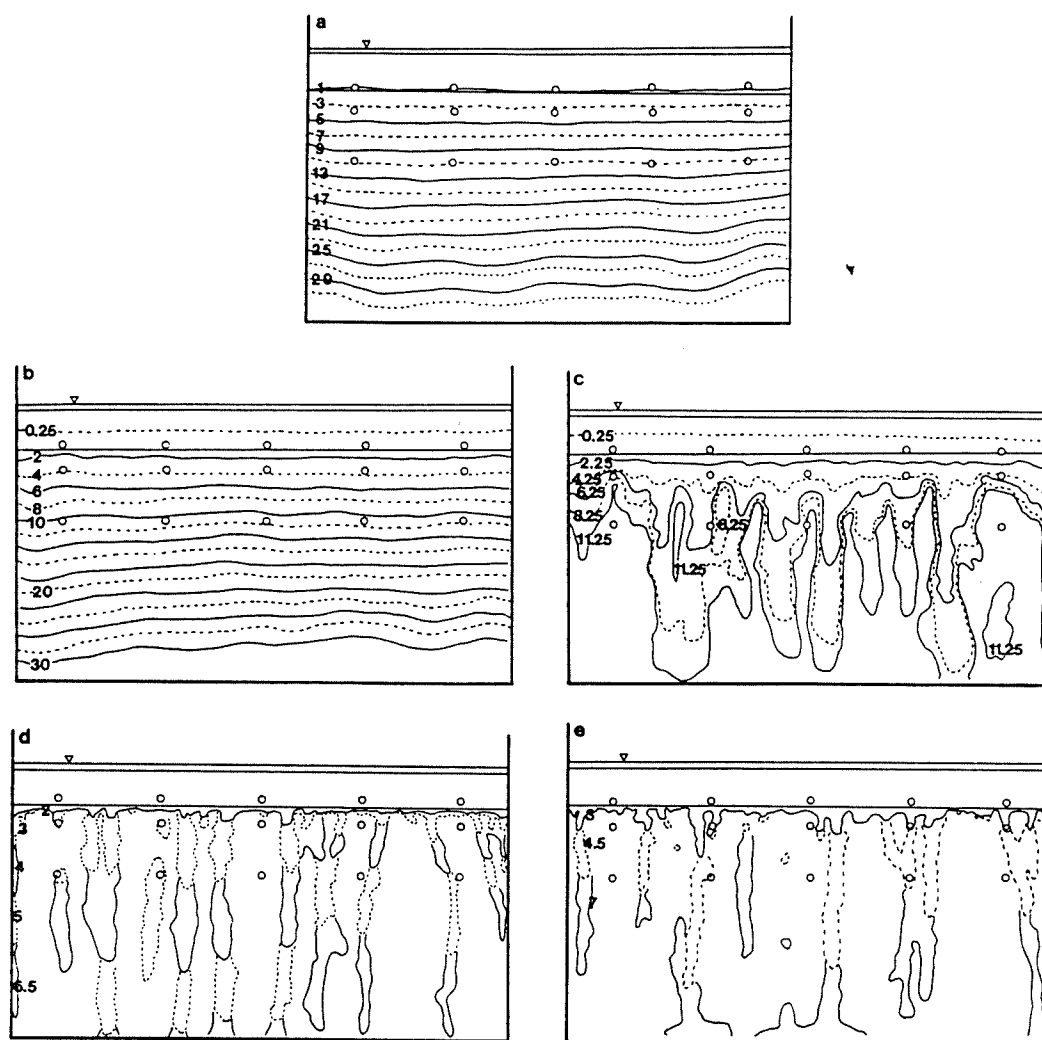


Figure 5.26 : Exemple d'infiltration avec (c, d, e) ou sans (a, b) phénomènes d'instabilité du front de mouillage (tirée de Baker et Hillel, 1990)

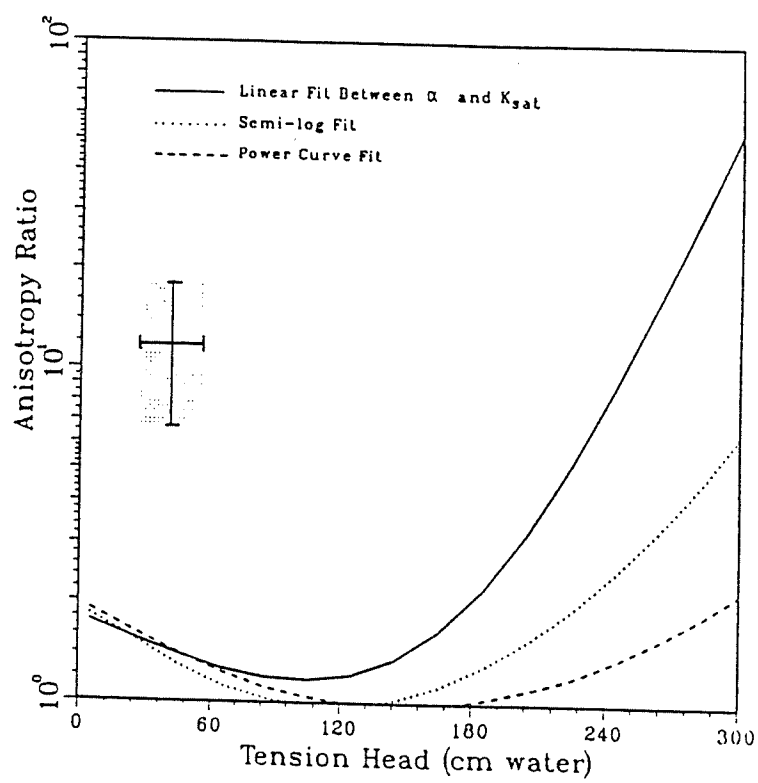


Figure 5.27 : Variation de l'anisotropie en fonction de la succion (tirée de McCord et al., 1991)

CHAPITRE VI

TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX EN COURS : OUTILS DE LABORATOIRE ET DE TERRAIN

Les recouvrements visant à empêcher une source potentielle de contamination de causer des problèmes environnementaux sont utilisés autant pour des résidus domestiques , dangereux, que miniers. Pour les déchets domestiques et dangereux, il existe des lignes directrices pour la conception de recouvrements visant à limiter les impacts environnementaux de ces déchets (e.g. EPA, 1991). Cependant, très peu de ces sites utilisent l'effet de barrière capillaire. On a plutôt recours à des matériaux synthétiques, telles les géomembranes, placés en combinaison avec différents types de sols.

Dans le domaine minier, contrairement aux sites d'enfouissement où l'on vise surtout à limiter l'infiltration de l'eau, l'objectif du recouvrement est de limiter en même temps l'infiltration de l'eau et celle de l'oxygène. Un des premiers sites miniers où l'on a utilisé un recouvrement pour limiter la production de DMA provenant de stériles miniers est le site Rum Jungle en Australie (Applegate et Kraatz, 1991). D'autres sites miniers ont également reçu des recouvrements pour limiter les répercussions environnementales ; mentionnons les sites de Mt. Washington en Colombie-Britannique (Galbraith, 1990) et Steffenburg en Suède (Lundgren et Lindahl, 1991). Au cours des dernières années, d'autres projets tels ceux de Heath Steele (Yanful et *al.*, 1993 a,b), Equity Silver Mines (O'kane et Wilson, 1993) et Waite-Amulet (Yanful et St-Arnaud 1991) ont servi à étudier l'efficacité des recouvrements pour limiter l'infiltration de l'eau et de l'oxygène. Dans ces cas, la conception a été faite de façon à incorporer l'effet de barrière capillaire.

Afin d'étudier plus en détails le comportement hydrogéologique des CEBC visant à limiter la diffusion de l'oxygène et l'infiltration de l'eau, certains outils de terrain et de laboratoire sont utilisés dans le cadre de ce projet de recherche. Tout d'abord, des cellules (6) expérimentales ont été construites et instrumentées à l'été 1995 sur un site minier à Val d'Or, sont étudiées. Ces cellules ont pour objectif de valider, dans un cadre plus réaliste et plus représentatif, les résultats d'essais en laboratoire déjà obtenus (Aubertin et *al.*, 1995b), et d'évaluer d'autres aspects qui n'ont pu être étudiés par ces essais (géométrie tridimensionnelle, effets climatiques, difficultés de mise en place, etc.). Cinq de ces six cellules ont des recouvrements multicouches avec effets de barrière capillaire.

Les résultats provenant d'autres projets *in situ* sont également disponibles grâce à la collaboration de Barrick Gold et de Golder et associés. Ainsi, le site minier LTA d'une superficie d'environ 97 hectares, a été restauré à l'aide d'une barrière de recouvrement multicouche avec effets de barrière capillaire. Plus de 20 stations instrumentées ont été placées à des endroits stratégiques afin d'évaluer le comportement hydrogéologique de la couverture (Ricard et *al.*, 1997). Un aspect intéressant du projet est l'instrumentation placée en différents points, sur le dessus du parc dans les pentes des digues. Les résultats tirés de ces stations devraient permettre une meilleure compréhension du phénomène de l'écoulement dans les CEBC inclinés. D'autres projets (CTCED, NORBEC A, Lorraine, etc.) présentement en cours de réalisation pourraient également fournir plus de renseignements sur le comportement hydrogéologique des barrières capillaires.

Des essais en laboratoire seront également réalisés afin d'étudier l'effet de différents paramètres (e.g. l'inclinaison, le taux de précipitation, les caractéristiques des matériaux) sur le comportement hydrogéologique de recouvrements monocouches et multicouches avec effets de barrière capillaire. En parallèle avec les essais sur systèmes inclinés, des essais en colonne de type colonne de drainage sont également prévus. Les principales

composantes du programme expérimentale présentement en cours sont décrites dans ce qui suit.

6.1 Cellules expérimentales du site Manitou

Dans le cadre d'un projet de recherche visant à évaluer la possibilité d'utiliser des résidus miniers (rejets de concentrateur) comme composante de recouvrements multicouches avec effets de barrière capillaire, six cellules expérimentales ont été construites à l'été 1995 sur le site Manitou, propriété de la compagnie ITEC Minéral Inc. On présente, dans cette partie du document, certains détails sur la conception, la construction et l'instrumentation des ces cellules. Plus d'informations concernant ce projet peuvent retrouvés dans certains documents (e.g. Aubertin et *al.*, 1995c, 1996a, b, c).

6.1.1 Configuration des cellules

On présente aux figures 6.1 à 6.6 la configuration de chacune des cellules. On remarque sur ces figures que les cellules sont en forme de pyramide tronquée inversée avec, au fond, un tuyau drainant entouré de géotextile amenant l'eau de percolation dans des réservoirs qui serviront à l'échantillonnage. Chaque cellule est isolée de l'environnement immédiat par une géomembrane de type COEX placée sur un sable densifié. En ce qui concerne les matériaux constituant chacune des cellules, on retrouve pour les cellules 1 à 5, du haut vers le bas, une couche de sable de 30 cm, une couche à forte rétention capillaire formée de divers matériaux selon la cellule (résidus miniers, silt d'origine naturel, résidus miniers amendés à la bentonite) dont l'épaisseur varie de 0,3 à 0,9 m, une couche de sable de 0,4 m et une couche de résidus sulfureux (non oxydés) d'une épaisseur d'environ 1,5 m. À noter que la cellule 6 ne contient que des résidus sulfureux non oxydés et servira de cellule témoin.

6.1.2 Propriétés des matériaux utilisés dans les cellules

Différents matériaux ont été utilisés dans la construction des cellules expérimentales. Des résidus sulfureux générateurs de DMA ont été placés au fond de chacune des cellules. Du sable à béton provenant du banc de Fournier et fils de Val d'Or a été utilisé comme couche grossière du bas et du haut du recouvrement multicouche. Ce sont ces deux couches qui doivent produire, en théorie, l'effet de barrière capillaire. Quant au matériau constituant la couche fine, il varie d'une cellule à l'autre. Pour la cellule 1, le matériau utilisé est un résidu minier provenant d'une zone inactive du parc à résidus de la mine Sigma. Dans ce travail, ce matériau est identifié par Sigma grossier. Quant à la cellule 2, sa couche fine est constituée d'un silt d'origine naturel. La couche fine des cellules 3 et 5 est constituée de résidus miniers provenant d'une zone active du parc à résidus Sigma identifié dans le texte par Sigma fin. En ce qui concerne la couche fine de la cellule 4, elle est constituée de 15 cm de résidus miniers Sigma grossier amendés à la bentonite par dessus laquelle on a placé 15 cm de résidus miniers Sigma grossier. Dans cette section, on présente un résumé des différentes caractéristiques de ces matériaux. Plus de détails peuvent être retrouvés dans les rapports d'avancement du projet de recherche intitulé : *Projet sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers - Phase II : Essais en place* (Aubertin et *al.*, 1995c, 1996b).

Analyses minéralogiques

Des analyses minéralogiques ont été réalisées, à l'aide de la diffraction aux rayons-X, sur différentes fractions granulométriques des matériaux utilisés dans la construction des cellules. Le faisceau de rayons-X a été généré par un tube au cuivre. La radiation utilisée pour la mesure des angles 2θ est celle du $\text{CuK}\alpha$ (1,5418 Å) générée à 40 kV et 20 mA. Les diffractogrammes ont été réalisés entre 5 et 60° de 2θ avec un défilement du papier à 1°/minute. Cette approche, visant à déterminer la minéralogie d'un échantillon, est

qualitative et permet l'identification des constituants minéralogiques majeurs (>2 %). Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Bernier, 1996).

On remarque dans le tableau 6.1 que les résidus miniers utilisés comme composante de la couche fine (résidus miniers de la mine Sigma) contiennent une faible quantité de pyrite (environ 1 %) en plus de minéraux qui ont un pouvoir tampon tels la chlorite, l'albite et les carbonates. Pour ce qui est des résidus sulfureux de Manitou, ils ont une teneur en pyrite se situant à près de 5 %, ce qui laisse supposer qu'ils sont générateur de DMA. D'ailleurs, des essais statiques (pas encore publiés) ont démontré que le potentiel de génération d'acide de ce matériel est de -98 kg de CaCO_3/t . C'est à dire qu'il faudrait l'équivalent de 98 kg de CaCO_3/t pour neutraliser l'acide générée par les sulfures contenus dans le minerai. Enfin, le silt naturel est très feldspathique et contient de l'albite qui est un minéral avec un potentiel de neutralisation d'acide. Plus de renseignement sur la minéralogie des matériaux sont présentés dans Bernier (1996).

Tableau 6.1 : Principaux résultats des analyses minéralogiques (Bernier, 1996)

	Minéraux											
	Qz	Ab	Or	Bt	Chl	Mo	Cal	Ank	To	Ilm	Ep	Py
Sigma Grossier	A	M	F	F	M	---	P	F	P	F	F	P
Sigma fin	A	M	F	F	M	---	P	F	P	F	F	P
Sigma amendé	A	M	F	F	M	F	P	F	P	F	F	P
	Minéraux											
	Qz	Ab	Or	Bt	Chl	Mo	Hn	Ep	To	Py		
Silt	A	M	M	P	P	P	F	P	P	tr		
	Minéraux											
	Qz	Ab	Or	Bt	Chl	Mu	Tlc	Gyp	Cal	Ep	Py	
Manitou	A	P	P	F	M	P	tr	P	tr	F	P	

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.

Granulométrie, densité relative et caractéristiques de compactage

Des analyses granulométriques, des essais de densité relative (ou densité relative des grains solides) D_r et des essais de compactage ont été réalisés sur les différents matériaux. En ce qui concerne la granulométrie, on retrouve à la figure 6.7 les courbes granulométriques de chaque matériau. On remarque sur cette figure que tous les matériaux fins utilisés sont des matériaux silteux qui contiennent peu de particules argileuses ($< 2\mu\text{m}$) et peu de sable. Quant au résidu sulfureux de Manitou, ils sont plus grossiers ayant un pourcentage passant au tamis $80\mu\text{m}$ de seulement 28 %. Pour ce qui est du sable Fournier, c'est un sable à béton typique avec moins de 5 % de particules plus petites que $80\mu\text{m}$. En ce qui concerne les résultats des essais de densité relative et de compactage, ils sont résumés au tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Résultats des essais de densité relative

	D_r	Compactage (Proctor modifié)		
		Optimum Proctor (kg/m^3)	Teneur en eau optimale (%)	Indice des vides à l'optimum
Sigma fin	2,809	1828	15,5	0,54
Sigma grossier	2,798	1817	15,7	0,54
Sigma amendé	2,818	1977	13,1	0,43
Silt (ou till)	2,743	1748	16,8	0,57
Manitou	2,849	2007	10,5	0,41
Sable Fournier	2,780	2110	10,0	0,32

Essais de perméabilité et de succion

Des essais de perméabilité ont été réalisés à l'aide du perméamètre à paroi rigide et de la cellule triaxiale. Les résultats de ces essais sont présentés au tableau 6.3. Les résultats observés, pour les résidus miniers non amendés, en terme de conductivité hydraulique

sont typiques de ceux retrouvés dans la littérature (Bussière, 1993 ; Aubertin et *al.*, 1996d). Les résidus amendés ont, pour leur part, une valeur de conductivité hydraulique de beaucoup inférieure (trois ordres de grandeur). Une partie de la différence peut s'expliquer par le faible indice des vides des essais réalisés sur les résidus amendés. Enfin, les résultats des essais de perméabilité réalisés sur le sable et le silt sont dans la plage observée pour ces types de matériaux.

Tableau 6.3 : Résultats des essais de perméabilité

Matériau	k (cm/s)	Indice des vides	Triaxiale	Perméamètre
Manitou	$6,34 \times 10^{-4}$	0,63	x	
	$6,68 \times 10^{-4}$	0,62		x
	$2,19 \times 10^{-3}$	0,82		x
Silt	$4,38 \times 10^{-5}$	0,73	x	
	$2,24 \times 10^{-5}$	0,68	x	
	$9,82 \times 10^{-5}$	0,83		x
Sigma grossier	$4,40 \times 10^{-5}$	0,70		x
	$4,58 \times 10^{-4}$	1,05		x
	$1,74 \times 10^{-4}$	0,81		x
	$1,07 \times 10^{-4}$	0,77	x	
Sigma fin	$6,06 \times 10^{-5}$	0,70	x	
	$5,05 \times 10^{-5}$	0,66	x	
	$3,73 \times 10^{-4}$	1,02		x
	$3,41 \times 10^{-4}$	0,86		x
Sigma amendé	$7,78 \times 10^{-8}$	0,51	x	
	$3,99 \times 10^{-8}$	0,52	x	
Sable Fournier	$5,86 \times 10^{-2}$	0,44		x
	$5,45 \times 10^{-2}$	0,47		x

On sait que la courbe de rétention d'eau des matériaux est la caractéristique la plus importante lorsque l'on veut faire l'analyse d'une CEBC. Afin de déterminer ces caractéristiques de rétention d'eau pour les différents matériaux, des essais de succion ont été réalisés à l'aide de la Tempe Cell. On présente, dans le tableau 6.4, les différents résultats obtenus. À noter que la méthode utilisée pour déterminer ψ_a est celle proposée par Fredlund et Xing (1994).

Tableau 6.4 : Principaux résultats des essais de succion

	Indice des vides	ψ_a (m d'eau)	Teneur en eau volumique résiduelle
Sigma fin	0,76	1,90	0,03
Sigma fin	0,72	2,90	0,13
Sigma grossier	0,64	2,30	0,10
Sigma grossier	0,71	4,25	0,13
Sigma amendé	0,65	3,10	0,16
Silt	0,62	3,50	0,18
Silt	0,79	2,70	0,14
Silt	0,72	2,80	0,17
Manitou	0,61	0,70	0,07
Manitou	0,69	1,10	0,05
Manitou	0,71	1,10	0,12
Sable Fournier	0,50	0,40	0,02

On remarque, à la lecture du tableau 6.4, que le contraste de succion entre les matériaux fins (Sigma grossier, Sigma fin, Sigma amendé et le silt) et le sable Fournier est grand, ce qui devrait permettre d'obtenir l'effet de barrière capillaire.

6.1.3 État en place des matériaux dans les cellules

Lors de la construction des cellules expérimentales, certains objectifs de compactage pour les différentes couches avaient été fixés. Ces objectifs ont été présentés dans le cahier de charge détaillé fourni à l'entrepreneur responsable des travaux. En ce qui concerne les couches de sable du bas et du haut, l'objectif à atteindre était de 92 % de l'optimum Proctor modifié. Pour la couche constituée de résidus miniers non sulfureux (cellules 1, 3, 4, 5), l'objectif à atteindre était de 85 % du Proctor modifié. Enfin, pour la cellule 2, la couche fine constituée d'un matériau silteux d'origine naturelle devait atteindre un niveau de compactage de 95 %. Les caractéristiques de compactage des matériaux ont été évaluées au laboratoire et sont présentées au tableau 6.2 de ce document.

On présente, dans ce qui suit, un résumé des résultats du contrôle de qualité du compactage effectué sur chaque cellule expérimentale lors de la construction. Les données présentées au tableau 6.5 décrivent l'état en place des différents matériaux placés dans les cellules. Certaines caractéristiques géotechniques des matériaux étant fonction de l'état en place (e.g. caractéristiques de rétention d'eau, conductivité hydraulique), il est donc essentiel de connaître celui-ci pour chaque matériau afin de réaliser des essais de laboratoire représentatifs et pour réaliser des simulations numériques réalistes.

Tableau 6.5 : Résumé du contrôle de qualité du compactage

	Compactage près du haut des tranches (% Proctor modifié)	Compactage à 10 cm du bas des tranches (% Proctor modifié)
Cellule 1 (sable du bas)	94 % et 93 %	88,9 % et 89,2
Cellule 1 (couche fine)	88,4 % et 85 %	---
Cellule 1 (sable du haut)	92,6 %	88,2 %
Cellule 2 (sable du bas)	90,1 % et 92,9	87 % et 89,4 %
Cellule 2 (couche fine)	93,3 %, 89,2 %, 90,2 % et 89,1 %	---
Cellule 2 (sable du haut)	97,3 %	89,5 %
Cellule 3 (sable du bas)	90,8 % et 92,0 %	88,4 % et 88,6 %
Cellule 3 (couche fine)	83,6 %	---
Cellule 3 (sable du haut)	91,9 %	88,9 %
Cellule 4 (sable du bas)	91,4 % et 90,2 %	90,7 % et 87,9
Cellule 4 (couche fine)	81,6 %	---
Cellule 4 (couche fine amendée)	74,0 %	---
Cellule 4 (sable du haut)	97,5 %	88,7 %
Cellule 5 (sable du bas)	93,4 % et 92,6 %	86,7 % et 89,2 %
Cellule 5 (couche fine)	85,1 % et 86,7 %	---
Cellule 5 (sable du haut)	95,3 %	88,1 %

6.1.4 Instrumentation

Les cellules expérimentales sont instrumentées de façon à mesurer un ensemble de paramètres qui permettent d'évaluer l'efficacité des différents recouvrements et de mieux comprendre leur comportement hydrogéologique. Les paramètres mesurés dans

les différentes couches sont : la teneur en eau, la succion matricielle et la température dans le sol. Des plaques de tassements ont également été placées sur chacune des couches. Une station météorologique complète est présente sur le site afin de mesurer les principaux paramètres qui affectent les échanges atmosphériques près de la surface (température sèche, humidité relative, rayonnement solaire et vitesse du vent). On retrouve, dans ce qui suit, une brève description des appareils installés ainsi que la localisation de ceux placés dans les différentes couches des recouvrements. On peut trouver plus de détails dans Barbera (1996) et Aubertin et *al.* (1997b).

Teneur en eau

Comme il a été mentionné précédemment, l'effet de barrière capillaire entraîne une désaturation rapide de la couche grossière favorisant la rétention d'eau dans la couche fine située par dessus. Lorsque l'on veut empêcher la réaction d'oxydation des sulfures qui génère du drainage minier acide, une des techniques qui peut être utilisées est de limiter l'infiltration (ou la diffusion) de l'oxygène jusqu'aux résidus sulfureux. Une façon d'y parvenir est d'avoir une couche d'eau (ennoïement) ou une couche de matériau saturée en eau par dessus les résidus générateurs de DMA. C'est pour cette raison que les barrières capillaires constituent une façon de limiter la génération de DMA provenant de résidus miniers sulfureux. Les recouvrements placés sur les cellules expérimentales devraient toutes montrer un effet de barrière capillaire. Il est primordial, pour évaluer l'efficacité des différents recouvrements, de connaître les teneurs en eau dans les différentes couches afin de voir si l'effet de barrière capillaire escompté est présent et s'il correspond avec ce qui a été prédit au laboratoire et par les modèles numériques.

Dans ce projet, la méthode retenue pour mesurer la teneur en eau est celle du RDT (réflectométrie dans le domaine du temps). Cette technique est basée sur le fait que le contenu volumétrique d'eau peut être déterminé en mesurant le temps de voyage et

l'atténuation de l'amplitude d'une onde pulsée envoyée le long d'une ligne de transmission placée dans un sol. Dans le cadre de ce projet de recherche, des sondes enfouies ("*buriable*") à trois branches de 20 cm de long ont été sélectionnées. D'autres sites expérimentaux ont d'ailleurs utilisé cette technique au cours des dernières années (Heimovaara et Bouten, 1990 ; Baker et Allmaras, 1990 ; Herkelrath et *al.*, 1991 ; Yanful et St-Arnaud, 1991). Quant à l'appareil utilisé pour la prise de mesures, le choix s'est porté sur le système TRASE de la compagnie Soil Moisture. Cet appareil a été utilisé avec succès dans des travaux de recherche en laboratoire à Polytechnique pour déterminer l'efficacité de recouvrements multicouches (Aubertin et *al.*, 1995b). Plus de détails sur la technique RDT peuvent être trouvés dans la littérature (e.g. Topp et *al.*, 1980 ; Zegelin et *al.*, 1992).

L'emplacement des sondes de mesures dans les différents recouvrements est présenté à la figure 6.8. Deux sondes par couche ont été placées dans les recouvrements, certaines horizontalement d'autres verticalement, pour un total de 30 sondes. Habituellement, les sondes placées horizontalement ont été localisées dans le haut des couches afin de connaître la teneur en eau à l'endroit le plus susceptible de se désaturer. Les sondes placées verticalement, quant à elles, permettront de connaître la teneur en eau moyenne pour la longueur de la sonde (20 cm). On peut remarquer également à la figure 6.8 que dans la couche de sable du haut, deux sondes ont été placées à des endroits très similaires. L'objectif est de vérifier, après un certains temps (par exemple après 2 ans), l'impact du temps sur la calibration de la sonde.

Succion matricielle

Lorsqu'il y a écoulement dans la zone vadose (zone située au-dessus de la nappe phréatique), l'eau est en condition de pression négative (ou succion). Dans le cas des cellules expérimentales, la nappe phréatique est située dans les barils ; on se retrouve

donc dans une situation d'écoulement non saturé (condition de succion). Ainsi, pour bien comprendre le comportement des recouvrements placés sur les cellules, il est important de suivre l'évolution de la succion dans chacune des couches. De plus, pouvant connaître et la teneur en eau volumique et la succion pour un même point dans le sol, il est possible de déterminer les courbes caractéristiques de succion *in situ* de ce point que l'on pourra comparer avec celles mesurées en laboratoire.

On retrouve, dans les recouvrements, deux types d'appareils pour mesurer la succion matricielle, soit des tensiomètres et des blocs à résistance électrique. Le tensiomètre est composé d'un embout poreux de céramique fixé à l'extrémité d'un tube dont l'autre bout se termine par un bouchon par où il est possible de rajouter de l'eau à l'intérieur. Un appareil de mesure de pression (manomètre de mercure dans ce projet) branché sur l'instrument complète le tout. Le tensiomètre s'utilise en plaçant le bout poreux à l'endroit où l'on veut mesurer la succion dans le sol et en remplissant l'appareil d'eau jusqu'à l'appareil de mesure. Après un certains temps, la pression entre l'embout poreux et le sol s'équilibre. La pression négative mesurée par l'appareil de mesure correspond à la succion dans le sol. Les tensiomètres peuvent mesurer des succions variant entre 0 et 85 kPa. Plus de détails concernant le fonctionnement des tensiomètres sont présentés dans Stannard (1990), Everett et *al.*, 1984.

Le deuxième type d'appareil, installé dans les recouvrements, visant à mesurer la succion est le bloc à résistance électrique Watermark. Cet appareil mesure la variation de la résistance électrique et déduit, à partir de celle-ci, la succion. En effet, plus la teneur en eau est élevée, plus la conductivité électrique est élevée, et par conséquent, plus la résistance est faible. La résistance est mesurée à l'aide de deux ou plusieurs électrodes encastrées dans le bloc et d'un courant alternatif de hautes fréquences. Les avantages du bloc Watermark par rapport aux blocs de gypse conventionnels sont qu'il ne se dissout pas dans le sol, que la relation entre la conductivité mesurée par l'appareil et la succion

matricielle est linéaire et qu'il n'a pas besoin d'être calibré. Cependant, pour obtenir une mesure plus précise, on doit mesurer la température dans le sol où le bloc a été installé.

Quant à l'emplacement des appareils servant à mesurer la succion, on le retrouve à la figure 6.8. On remarque que vis-à-vis chaque sonde RDT on retrouve un bloc Watermark. L'objectif étant évidemment de mesurer en même temps la succion et la teneur en eau et ainsi recréer la courbe de succion *in situ*. Quant aux tensiomètres, on en retrouve un dans la couche du bas, deux dans la couche fine (sauf pour la cellule 3 où il n'y en a qu'un) et un dans la couche du haut.

Température sous la surface

La mesure de la température à l'intérieur des CEBC est avant tout nécessaire pour l'utilisation des blocs Watermark. En effet, tel que mentionné précédemment, la mesure de succion dans le sol à l'aide de cet instrument nécessite de connaître la température dans le sol pour une bonne précision des résultats. C'est pour cette raison que des thermistances ont été installées près de chaque senseur Watermark, comme on peut le constater à la figure 6.8. Un profil de température du recouvrement pourra être évalué en tout temps. On peut également remarquer à la figure 6.8 qu'une thermistance a été installée dans le haut de la couche sulfureuse. Parce que la réaction de génération d'acide des résidus sulfureux est exothermique, cette thermistance permet d'observer s'il y a des réactions chimiques en associant celles-ci à une augmentation de température.

La thermistance fonctionne sur le principe du changement de résistance associé à celui de la température. Les thermistances sont habituellement composées de matériau semi-conducteur. Leur coefficient de résistance thermique est très élevé, ce qui en fait un instrument de mesure très sensible, capable de détecter des changements de température

rapidement. Il est important de calibrer chaque thermistance avant l'installation. On peut connaître la température en tout temps à partir de trois points (température, résistance) et de l'équation de Steinhart-Hart (Omega, 1995) :

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3 \quad (6.1)$$

où :

T = température en degré Kelvin

R = Résistance de la thermistance

A,B,C = Constantes d'ajustement

Instrumentation météorologique

La prédiction de l'évaporation est un facteur déterminant dans la reconstitution du bilan hydrique des cellules expérimentales. Les principales méthodes pour évaluer le potentiel réel d'évaporation comprennent l'utilisation de micro-lysimètres, les mesures directes (Bowen ratio) et les méthodes prédictives. Dans ce projet, la méthode prédictive de Penman modifiée a été sélectionnée. Cette méthode se distingue des autres méthodes prédictives par le fait qu'elle prédit un taux réel d'évaporation (AE) plutôt qu'un potentiel d'évaporation (PE). Les méthodes qui prédisent PE (e.g. Thornwaite, 1948; Penman, 1948) donnent une borne supérieure puisqu'elles supposent que l'eau est disponible à la surface (milieu saturé). Cependant, le taux réel d'évaporation (AE) sur les cellules dépend de la disponibilité de l'eau (Wilson et *al.*, 1993). Comme les barrières sèches impliquent l'écoulement en milieu non saturé, l'évaporation réel (AE) à la surface des cellules sera inférieure à l'évaporation potentielle (PE). Wilson et *al.* (1993) ont modifié la méthode de Penman afin de tenir compte des surfaces non saturées. Les détails de la méthode Penman modifiée peuvent être trouvés dans Wilson et *al.* (1994) et Wilson et *al.* (1995).

Pour évaluer l'évaporation réelle AE, il est nécessaire de connaître les données météorologiques du site. Les paramètres exigés par la méthode de Penman modifiée sont : la radiation nette, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative et la température. De plus, afin de réaliser un bilan hydrique complet, un appareil mesurant les précipitations a été installé.

Pour la mesure des précipitations, un pluviomètre à auget basculant équipé d'un élément chauffant pour les mesures hivernales a été placé sur le site. La capacité de l'auget est de 0,2 mm et la précision de l'appareil varie de ± 3 à ± 5 % selon l'intensité de précipitation.

Pour ce qui concerne la radiation solaire, deux appareils sont présents sur le site, soit un radiomètre net et un pyranomètre. Le radiomètre net fait directement la différence entre les radiations hémisphériques pénétrantes totales et les radiations hémisphériques réfléchies totales. Cette différence, appelée radiation solaire nette, est nécessaire pour évaluer AE. Le pyranomètre, qui mesure la radiation totale, a été installé, quant à lui, pour compléter les informations fournis par le radiomètre net.

La température et l'humidité relative sont également mesurées sur le site. L'appareil choisi est une sonde Handar 435A. Très compacte, cette sonde de forme cylindrique contient un capteur d'humidité et une thermistance. La sonde est protégée de la poussière et des dommages physiques par une membrane filtre. La sonde permet de mesurer des températures entre -50°C et 60°C avec une précision de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ entre 0 et 60°C et de $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ entre -50 et 0°C . De plus, elle permet de mesurer l'humidité relative entre 0 et 100%, avec une précision $< 2\%$ entre 0 et 80% et $< 5\%$ entre 80 et 100% d'humidité relative.

Des appareils qui mesurent la vitesse (anémomètre) et la direction (girouette) du vent font partie intégrante de la station météorologique. L'anémomètre permet la mesure de la vitesse du vent entre 0 et 160 km/h avec une précision de $\pm 0,4$ km/h. Quant à la girouette, elle indique la direction du vent avec une précision $\pm 5\%$ pour des vents inférieurs à 160 km/h.

Tous les appareils mentionnés dans cette section sont reliés à un système d'acquisition de données SAD qui gère entièrement la prise de données. C'est lui qui fournit le courant aux divers instruments, qui prend les mesures aux temps programmés, les emmagasinent dans sa mémoire et les transmet sous la forme désirée au point de chute désiré. Pour l'ensemble des instruments (à l'exception du pluviomètre), le SAD prend une série de mesures à toutes les minutes et fait une moyenne à toutes les heures. Ce sont ces moyennes qui sont enregistrées dans la mémoire du SAD. Quant au pluviomètre, il envoie un signal au SAD à tous les événements de précipitation, soit à tous les 0,2 mm de pluie. De plus, lorsque le pluviomètre transmet un signal, le SAD enregistre le temps de celui-ci.

Des renseignements supplémentaires concernant le fonctionnement, les coûts et le choix des équipements installés sur les cellules expérimentales du site Manitou peuvent être trouvés dans Barbera (1996).

Cylindres pour essais de consommation d'oxygène

Une nouvelle technique est apparue au cours des dernières années pour évaluer l'efficacité de recouvrement pour limiter l'infiltration de l'oxygène, soit les essais de consommation d'oxygène (Eberling et Nicholson, 1996).

Le principe de l'essai est le suivant. Dans un premier temps, on installe un cylindre dans le recouvrement. Dans le cadre de ce projet, la longueur du cylindre est de 50 cm et le diamètre intérieur est d'environ 18 cm. On laisse un espace libre sur le dessus (entre 5 et 10 cm) qui sera utilisé comme réservoir d'oxygène. On place par la suite un couvercle étanche muni d'un senseur à oxygène. Comme l'oxygène est une composante de la réaction d'oxydation des sulfures, en mesurant la diminution de l'oxygène dans le réservoir du dessus, on peut déduire le taux d'oxydation instantané. Si le recouvrement est efficace, le taux d'oxydation devrait être très faible. Plus de détails sur cette nouvelle technique peuvent être trouvés dans Eberling et Nicholson (1996) et Nicholson et *al.* (1995).

6.2 Site LTA

Afin d'empêcher le parc à résidus miniers LTA de générer du drainage minier acide, le propriétaire du site a décidé de construire, en 1995, une barrière de recouvrement multicouche utilisant le principe de barrière capillaire. La superficie du parc restauré est de 97 hectares. On retrouve à la figure 6.9 (Golder et associés, 1996) une vue en plan du site. Afin d'évaluer l'efficacité du recouvrement, de l'instrumentation a été placée à différents endroits sur le site. Une attention particulière a été portée sur les pentes du parc à résidus. On présente, dans ce qui suit, les données pertinentes qui permettront d'approfondir les connaissances dans le domaine du comportement hydrogéologique de barrière capillaire *in situ*.

6.2.1 Design du recouvrement et caractéristiques des matériaux

Le design du recouvrement proposé par le consultant (basé sur les travaux d'Aubertin et al., 1995b) est composé de trois couches, soit 0,5 m de sable fin pour la couche grossière du bas, de 0,8 m de matériau silteux (résidus miniers non générateurs de DMA) pour la

couche de matériau fin et de 0,5 m de sable et gravier grossier pour la couche du haut (voir figure 6.10) (Golder et Associés, 1996 ; Ricard et *al.*, 1997). La pente sur le dessus du parc est de 0,5 % alors qu'elle varie autour de 3:1 sur les côtés du parc où l'on retrouve les digues. La pente du dessus du parc est orientée de façon à diriger l'eau vers une zone humide situé au sud ouest de celui-ci (voir figure 6.9).

Les caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés lors de la construction du recouvrement sur le site LTA ont été déterminées au laboratoire d'Hydrogéologie et environnement minier de l'École Polytechnique pour Golder et associés. Les principaux essais réalisés sont :

- analyses granulométriques ;
- densités relatives ;
- caractéristiques de compactage ;
- limites de consistance ;
- perméabilité ;
- essais de succion
- essais de diffusion d'oxygène
- perméabilité après cycles de gel-dégel.

En ce qui concerne la granulométrie des matériaux étudiés, on la retrouve à la figure 6.11. Les principaux résultats des analyses granulométriques, des essais de densité relative, de compactage et des limites de consistance sont présentés au tableau 6.6.

Tableau 6.6 : Principaux résultats des analyses granulométriques, des essais de densité relative, de compactage et de limites de consistance (tirés de Golder et associés, 1996)

Item	Résidus MRN	Sable
Granulométrie		
D_{60} (mm)	0,030	0,0750
D_{10} (mm)	0,005	0,500
C_U	6	2,5
C_C	0,96	1,11
Densité relative D_r	2,819	2,751
Essais de compactage		
Poids unitaire maximal γ_d (kg/m ³)	1750	1845
Teneur en eau optimale w_{opt}	15,7 %	14,2 %
Indice des vides e_{opt}	0,611	0,491
Limites de consistance		
Limite de liquidité w_L	23,0	---
Limite de plasticité w_p	19,5	---
Indice de plasticité I_p	NP	---

La figure 6.12 présente les résultats des essais de perméabilité sous la forme de graphiques de la conductivité hydraulique k versus l'indice des vides e . On remarque que k varie de $1,94 \times 10^{-4}$ à $3,06 \times 10^{-5}$ cm/s pour les résidus MRN alors que la valeur de k pour le sable varie $1,64 \times 10^{-1}$ à $8,57 \times 10^{-2}$ cm/s. Les essais ont été réalisés à l'aide de la cellule triaxiale pour les résidus MRN et avec un perméamètre à paroi rigide pour le sable.

Quant aux essais de succion, des résultats typiques sont présentés à la figure 6.13. On remarque sur cette figure que le contraste en terme de caractéristiques de succion est grand entre le matériau fin et la sable. Le ψ_a ou AEV du matériau fin se situe à plus d'un mètre pour le matériau fin alors que les valeurs mesurées pour le sable sont plus faibles (< 40 cm). Ceci devrait permettre d'obtenir l'effet de barrière capillaire escompté entre la couche grossière et la couche fine.

6.2.2 Instrumentation du site

Afin d'évaluer l'efficacité du recouvrement pour limiter l'infiltration de l'oxygène et de l'eau, une vingtaine de stations d'instrumentation ont été installées un peu partout sur le site. La sélection et l'emplacement de l'instrumentation a été inspirée des travaux réalisés sur le site Manitou. Chaque station possède 3 sondes RDT dont on peut voir l'emplacement approximatif à la figure 6.10. Ces sondes sont similaires à celles utilisées dans les cellules expérimentales présentées précédemment. De plus, des blocs à résistance électrique Watermark ont été placés vis à vis chaque sonde RDT. Encore une fois, l'objectif est de déterminer la courbe caractéristique de succion *in situ* des matériaux. Enfin, des cylindres d'aluminium servant à la réalisation d'essais de consommation d'oxygène sont installés dans chacune des stations.

En ce qui concerne les données météorologiques, étant donné la proximité du site Manitou (environ 50 km) où est installée la station météorologique présentée à la section 6.1.4, il a été décidé d'utiliser les résultats de celle-ci ainsi que les données provenant de la station d'Environnement Canada à Val d'Or pour évaluer l'évaporation et les précipitations s'appliquant pour le site LTA.

6.3 Essais sur systèmes inclinés au laboratoire

L'effet de la pente sur le comportement d'une CEBC a été présenté au chapitre 5. Cependant, comme il a été mentionné dans ce chapitre, plusieurs phénomènes influencent le comportement hydrogéologique de ces systèmes et beaucoup reste à faire pour bien comprendre les processus impliqués. Certains travaux tirés de la littérature ont permis d'éclaircir certaines particularités du comportement des systèmes inclinés (Nieber et Walter, 1981 ; Miyazaki, 1988 ; Stormont, 1995b). Les essais de laboratoire présentés dans ce qui suit devraient permettre d'aller plus loin en ce sens et d'établir l'effet de certains facteurs, tels l'inclinaison et le taux de précipitation, sur le comportement hydrogéologique des couvertures.

6.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental conçu pour ce projet est présenté à la figure 6.14. Ce dispositif est une boîte de 0,25 m x 2,5 m avec une profondeur de 1 m. Le matériel utilisé pour la construction est du Plexiglas de 1,25 cm d'épaisseur. Le fond sera perforé à tous les 25 cm afin de récolter l'eau de percolation et ainsi établir la longueur effective du bris capillaire. Un système de levier sera utilisé pour permettre de faire varier l'inclinaison du système. Trois valves seront également installées sur le côté le plus bas de la boîte afin de récolter l'eau de ruissellement ainsi que l'eau déviée par la barrière capillaire. De plus, un simulateur de pluie sera présent sur le dessus. Ainsi différents scénarios de précipitation pourront être simulés.

Comme on peut le constater à la figure 6.14, des instruments mesurant la teneur en eau et la succion seront installés dans la boîte. Les instruments choisis sont des sondes RDT de 20 cm pour mesurer la teneur en eau et des tensiomètres reliés à un senseur de pression pour mesurer la succion. Au total, on retrouvera 20 sondes RDT et 20

tensiomètres. Ces appareils permettront de comparer les profils de teneur en eau et de succion mesurés pour les différents scénarios avec les profils évalués à l'aide des modèles numériques. À noter que tous les appareils seront reliés à des dispositifs qui permettront de prendre en continu des mesures et ainsi observer de façon précises l'évolution des paramètres dans le temps.

6.3.2 Configurations et caractéristiques des essais

Dans le cadre des essais inclinés, deux types de matériaux seront utilisés, soit un sable et un gravier. Le choix des matériaux est relié aux caractéristiques hydriques de ceux-ci. En prenant des matériaux plutôt grossier (donc qui retiennent moins l'eau), il est possible d'observer les principales caractéristiques des barrières capillaires (longueur effective du bris capillaire, point DDL) dans des modèles réduits. Le sable a des caractéristiques similaires à un sable à béton. On peut observer à la figure 6.15 sa courbe granulométrique. Les autres caractéristiques géotechniques du sable sont résumées au tableau 6.7. Quant au gravier, l'objectif est d'avoir un gravier naturel avec peu de sable et de particules fines. Ainsi, le contraste granulométrique entre les deux matériaux devrait permettre d'observer l'effet de barrière capillaire. D'autres travaux visant à caractériser avec plus de détails, d'un point de vue géotechnique, les deux matériaux sont également prévus.

Tableau 6.7 : Principales caractéristiques géotechniques du sable

Propriétés	Sable
Conductivité hydraulique saturée ($0,47 < e < 0,62$)	$9,17 \times 10^{-3} < k < 1,07 \times 10^{-2}$ cm/s
Caractéristiques de compactage	
Masse volumique maximale ρ_d (kg/m ³)	1940
Teneur en eau optimale w_{opt}	11,5 %

Différentes configurations de matériaux sont prévues. Un système monocouche constitué d'une épaisseur de 0,8 m de sable sera dans un premier temps installé. La deuxième configuration est un système bicouche constitué de 0,3 m de gravier sous 0,5 m de sable. Cette configuration devrait permettre de déterminer l'effet de la pente et du taux de précipitation sur le comportement hydrogéologique d'une barrière capillaire. La troisième configuration prévue est un système trois couches avec 0,3 m de gravier au bas, 0,5 m de sable au centre et 0,1 m de gravier sur le dessus. Les trois configurations prévues devraient permettre de comparer l'impact d'avoir un système composé de 1, 2 ou 3 couches. De plus, l'effet de la pente et du taux de précipitation sur la performance des barrières capillaires pourra être éclairci grâce aux configurations 2 et 3. Pour chaque configuration, différentes simulations seront réalisées. Deux taux de précipitations seront simulés, soit un taux équivalent à la conductivité hydraulique saturée du sable et un autre valant la moitié de ce dernier. Quant à l'angle de la pente, des valeurs nulles (0°), faibles (environ 2°), moyennes (environ 10°) et relativement élevées (environ 18°) seront reproduites.

Le principal objectif de ces travaux de laboratoire est de comprendre, dans un environnement contrôlé, le comportement hydrogéologique de systèmes multicouches inclinés soumis à différents taux de précipitation. On pourra, par la suite, vérifier la validité des équations analytiques et des modèles numériques pour prédire ce comportement et, éventuellement, prédire de façon encore plus précise le comportement de CEBC sur le terrain.

6.4 Colonnes de drainage (cas 1D)

En parallèle avec les essais sur systèmes inclinés, des essais de drainage en colonnes sont prévus. Ce type d'essais a démontré au cours des dernières années son utilité pour

étudier le comportement hydrogéologique des systèmes en 1D (Yanful et Aubé, 1993 ; Barbour et Yanful, 1993 ; Aachib et *al.*, 1994 ; Aubertin et *al.*, 1995b).

On retrouve, à la figure 6.16, une représentation schématique de la colonne. L'appareillage consiste en une colonne verticale de Plexiglas de 110 cm. La colonne est instrumentée de tensiomètres et de sondes RDT implantés en dix sections de mesure également espacées afin de suivre l'évolution du profil hydrique dans la colonne. La base de la colonne est constituée d'une plaque céramique de 0,5 bar qui permettra le drainage de l'eau, empêchera la migration des particules et rendra possible la simulation d'une nappe phréatique sous la colonne.

L'objectif principal de ces essais est de comparer les résultats obtenus à l'aide du dispositif expérimental utilisé pour les essais inclinés et ceux avec les essais en colonne. Toutes les configurations prévues pour les essais inclinés seront repris dans les colonnes de drainage.

6.5 Résultats préliminaires et anticipés

La prise de mesures sur le site Manitou a débuté à l'automne 95. Les premiers résultats montrent que les effets de barrière capillaire sont bel et bien présents dans les différents recouvrements. On présente à la figure 6.17 un exemple de résultats mesurés à l'automne 95. Les résultats sont présentés sous la forme de la teneur en eau en fonction de la profondeur et de la succion en fonction de la profondeur. On remarque que la teneur en eau volumétrique dans la couche grossière du bas se situe entre 10 et 15 % alors que dans le matériau fin (le résidu minier dans ce cas-ci) on observe des teneurs en eau volumétriques près de la valeur à saturation, soit 40 %. Ces résultats confirment la présence de l'effet de barrière capillaire. Les profils de teneur en eau mesurés sont très semblables à ceux prédits par les modèles numériques (voir chapitre 4). En terme de

succion, on observe que celle-ci est faible dans la couche grossière du bas, augmente dans la couche fine de façon presque linéaire (pente 1:1) pour ensuite redescendre à des valeurs plus faibles dans la couche grossière du haut. Ce genre de profil de pression est également celui prédit par les modèles numériques.

En ce qui concerne le site LTA, des modélisations numériques réalisées par Golder et Associés (1996) ont démontré que le degré de saturation de la couche fine placée sur les côtés du recouvrement serait grandement affecté par la pente. Ainsi, les valeurs calculées du degré de saturation dans le haut peuvent descendre autour de 60 à 70 %. Évidemment, ce faible pourcentage pourrait affecter l'efficacité globale du recouvrement pour limiter la diffusion de l'oxygène. Les modélisations démontrent aussi que, même sur le dessus du parc où la pente est faible (environ 0,5 %), il est possible que le degré de saturation soit affecté par l'effet de l'inclinaison compte tenu de la longueur de la couverture. Les premiers résultats de terrain semblent démontrer que les tendances prédites par les modèles numériques sont réalistes (Ricard, 1996, communication personnelle). Évidemment, avant de conclure quoi que se soit, toutes les données de terrain devront être analysées en détail.

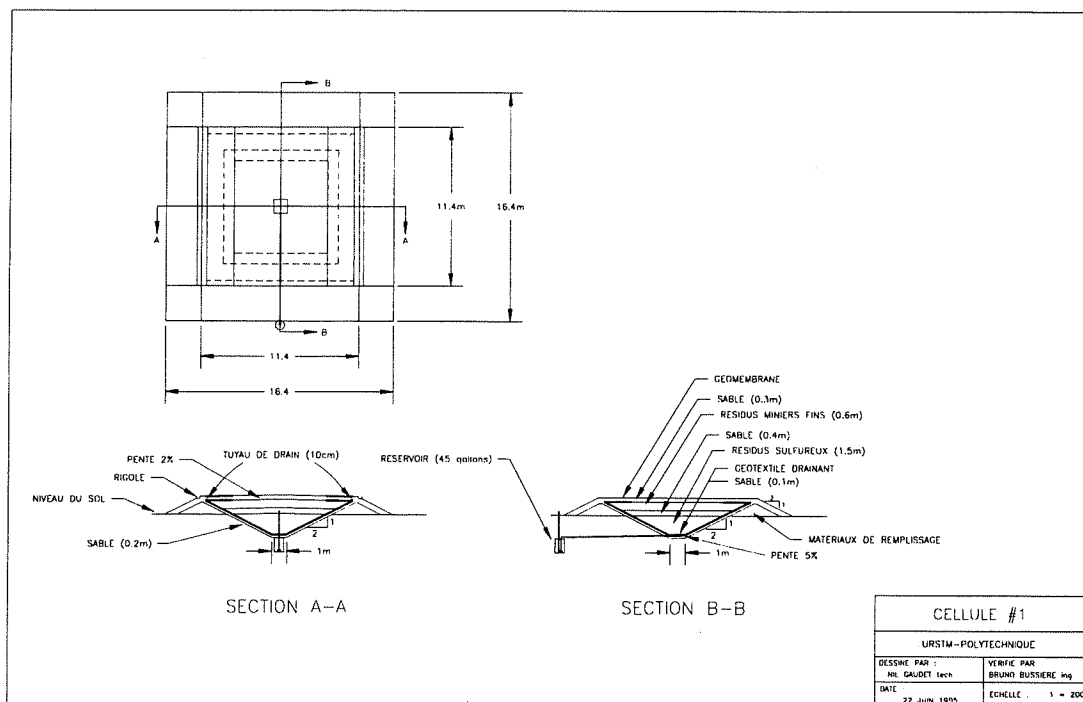


Figure 6.1 : Plan de la cellule 1.

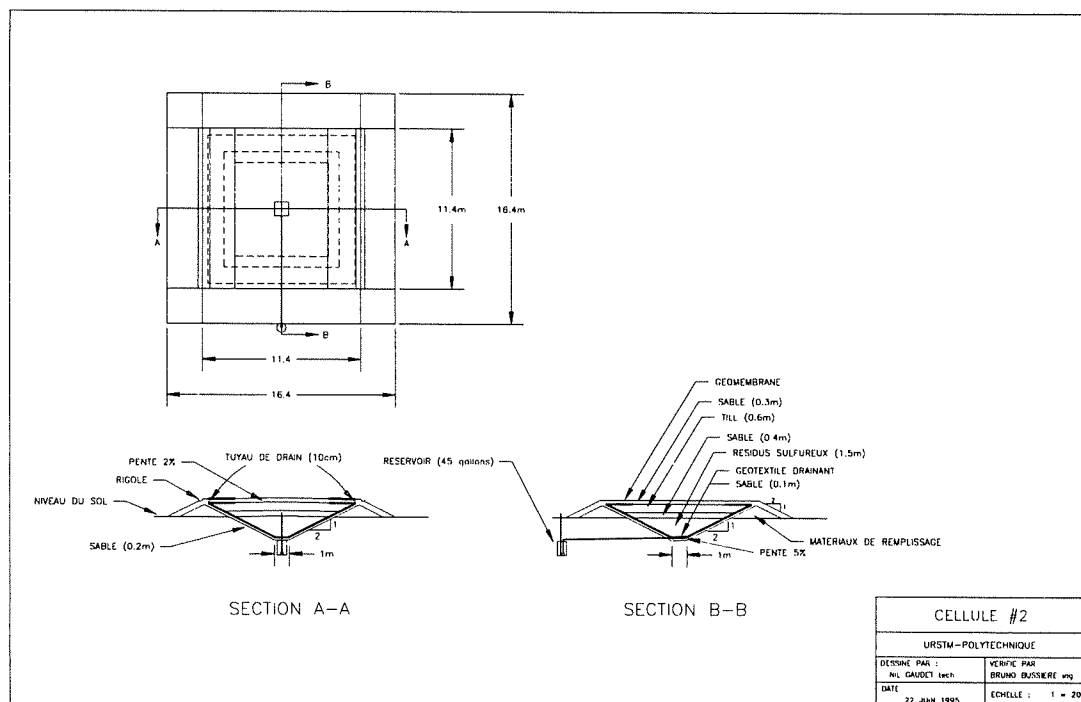


Figure 6.2 : Plan de la cellule 2.

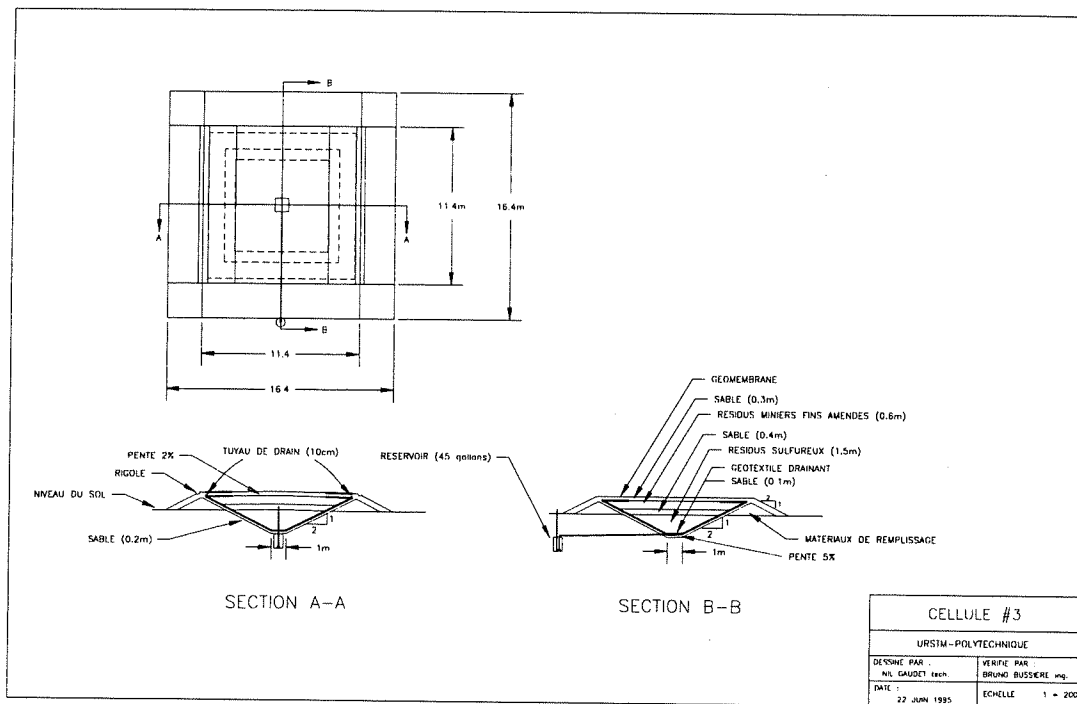


Figure 6.3 : Plan de la cellule 3.

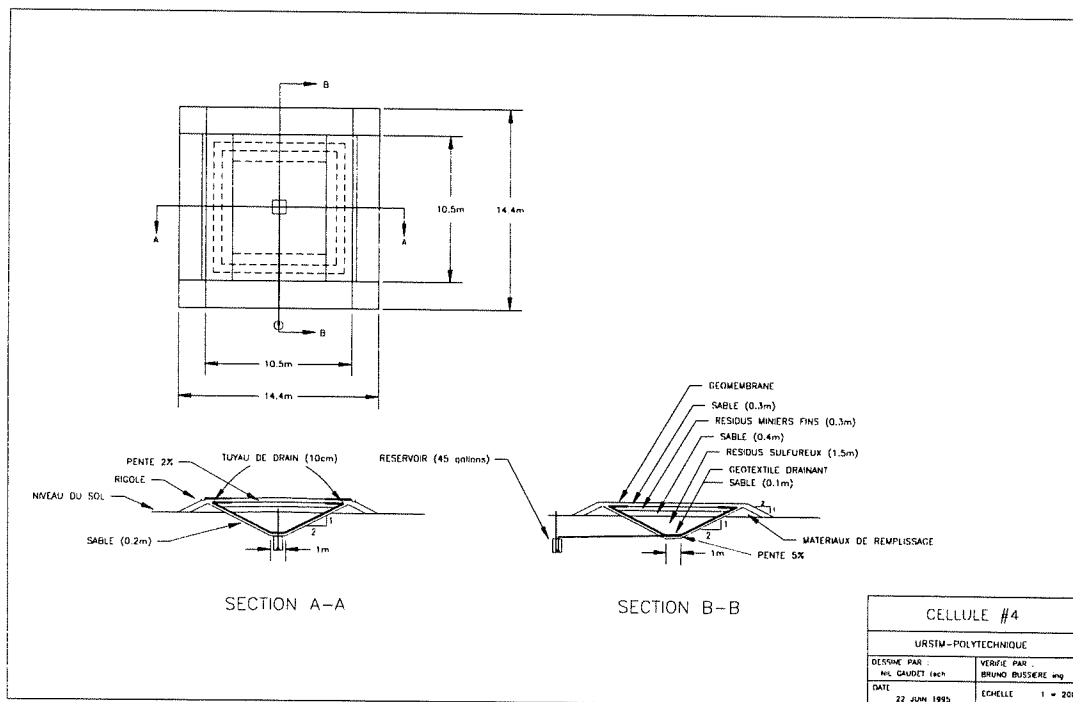


Figure 6.4 : Plan de la cellule 4.

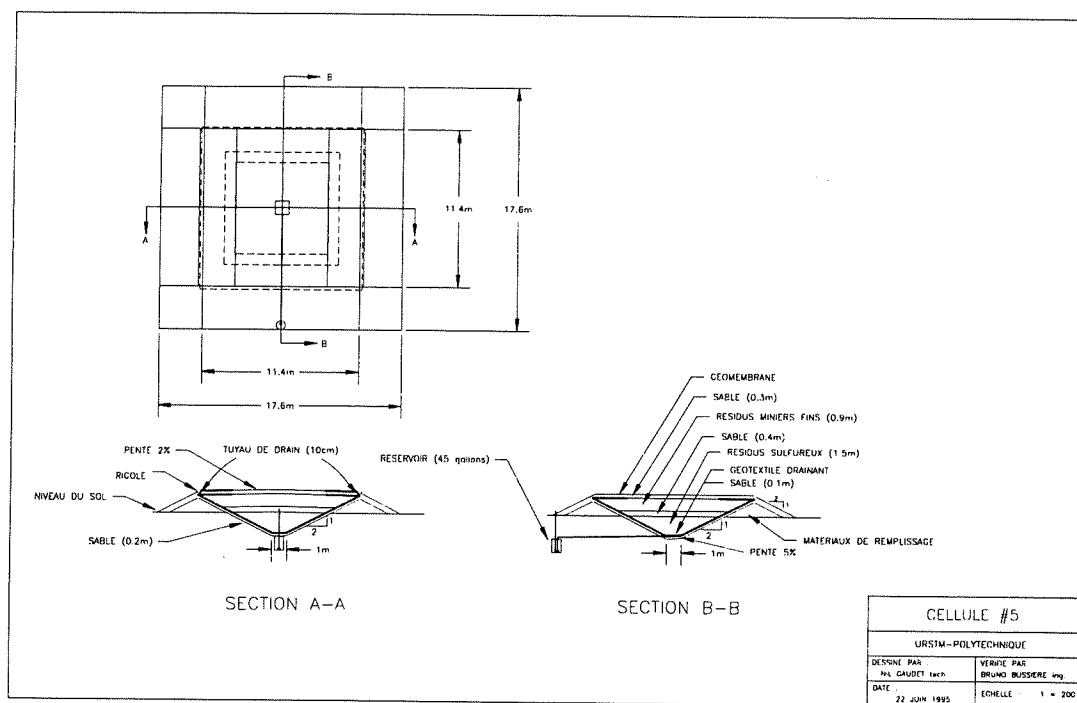


Figure 6.5 : Plan de la cellule 5.

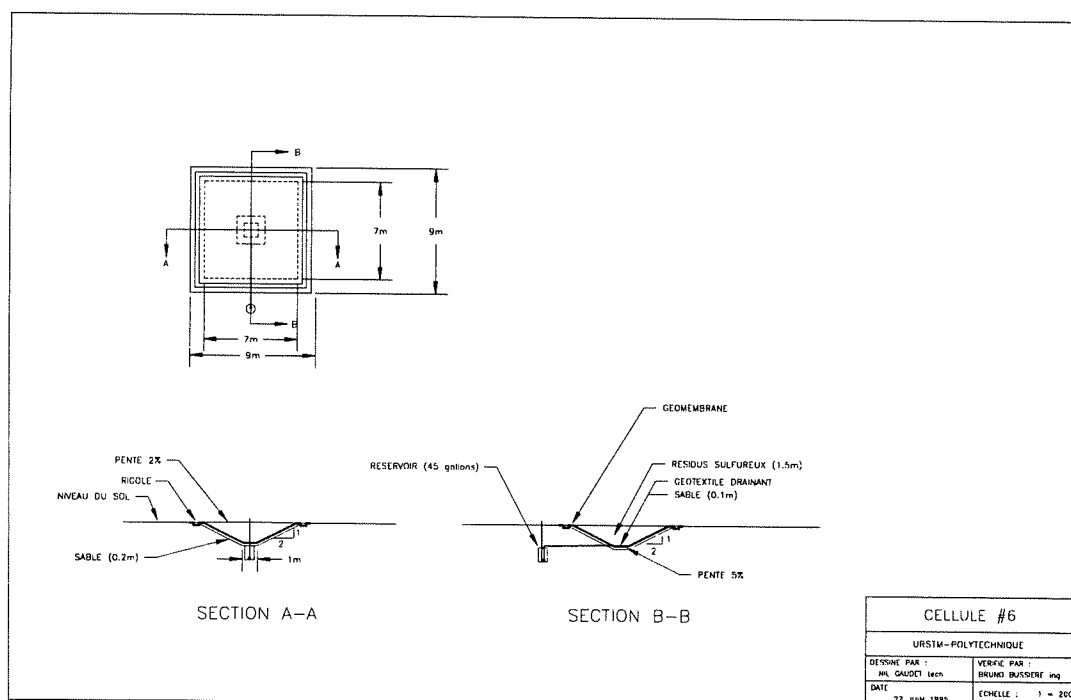


Figure 6.6 : Plan de la cellule 6.

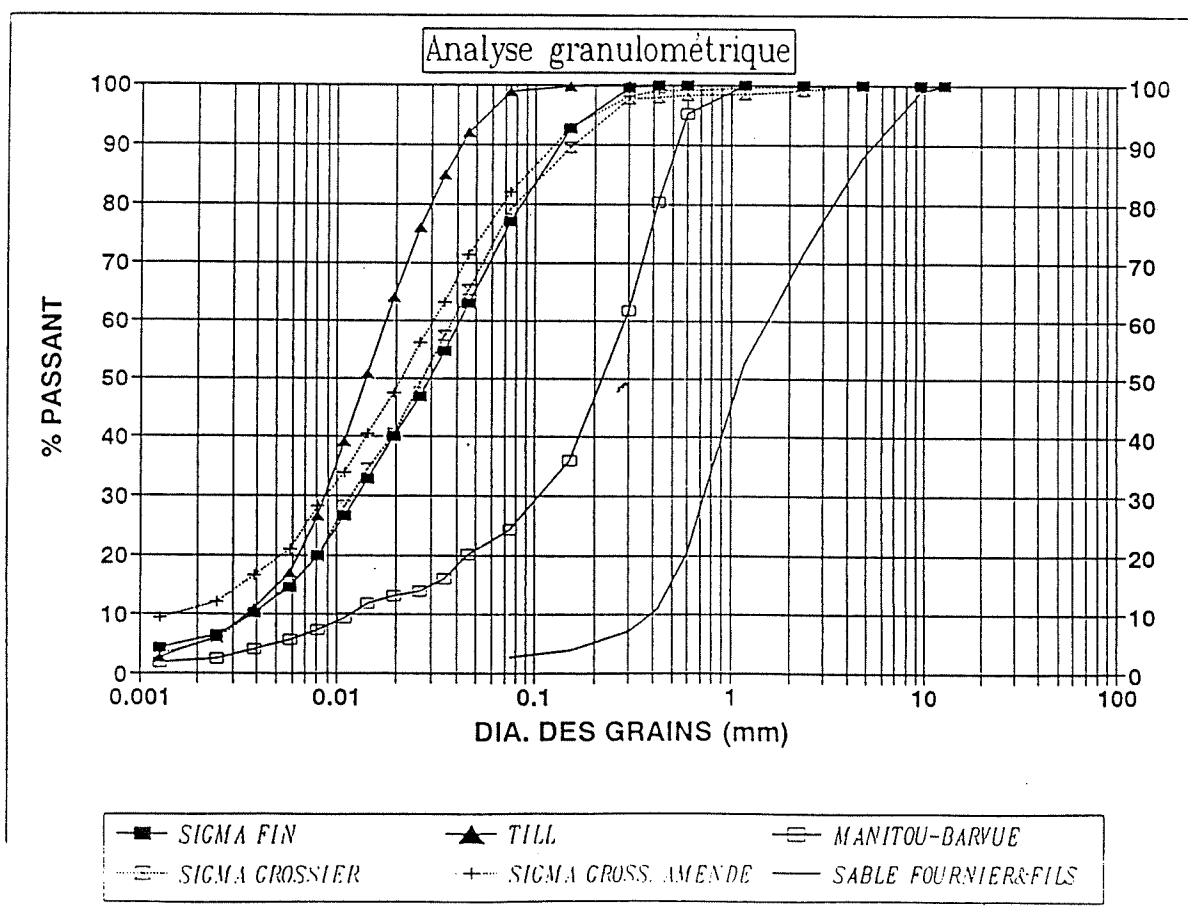


Figure 6.7 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés dans la construction des cellules sur le site Manitou.

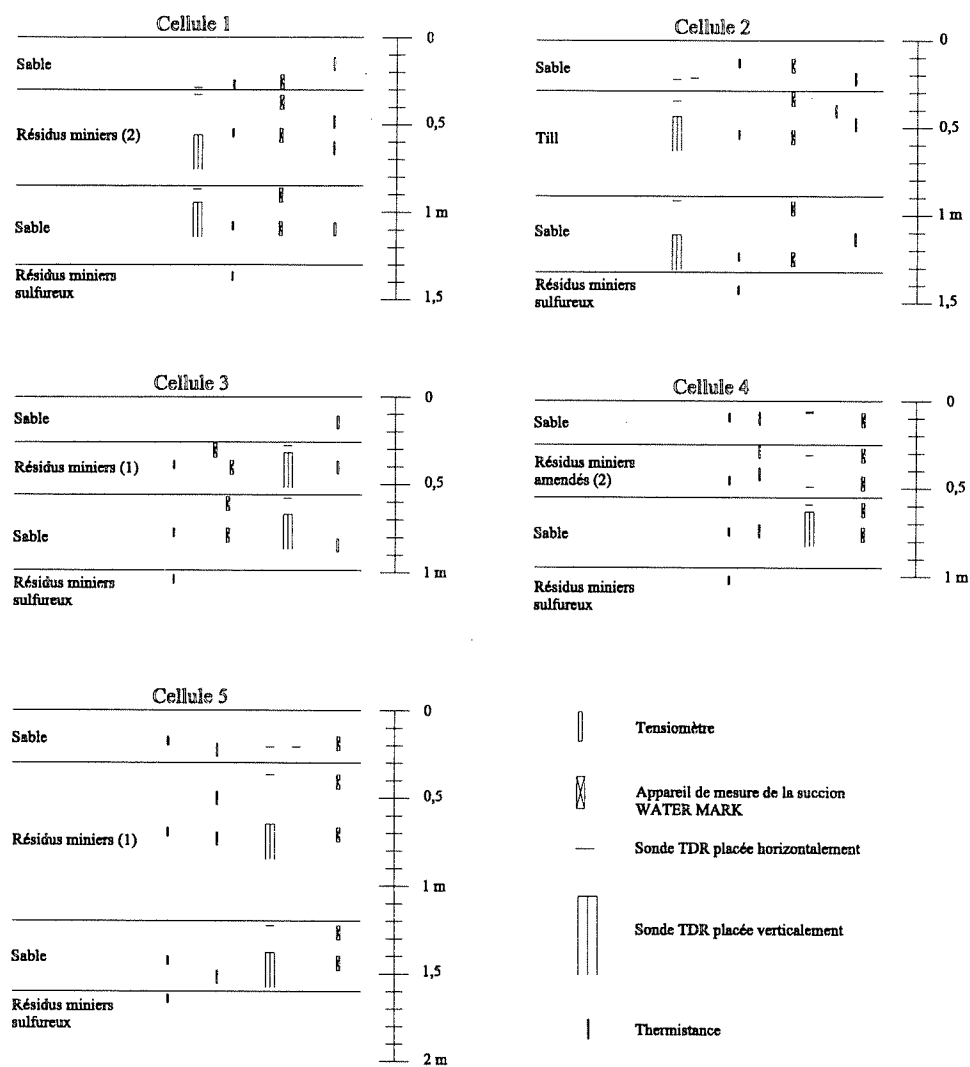


Figure 6.8 : Emplacement des instruments dans les 5 cellules avec CEBC.

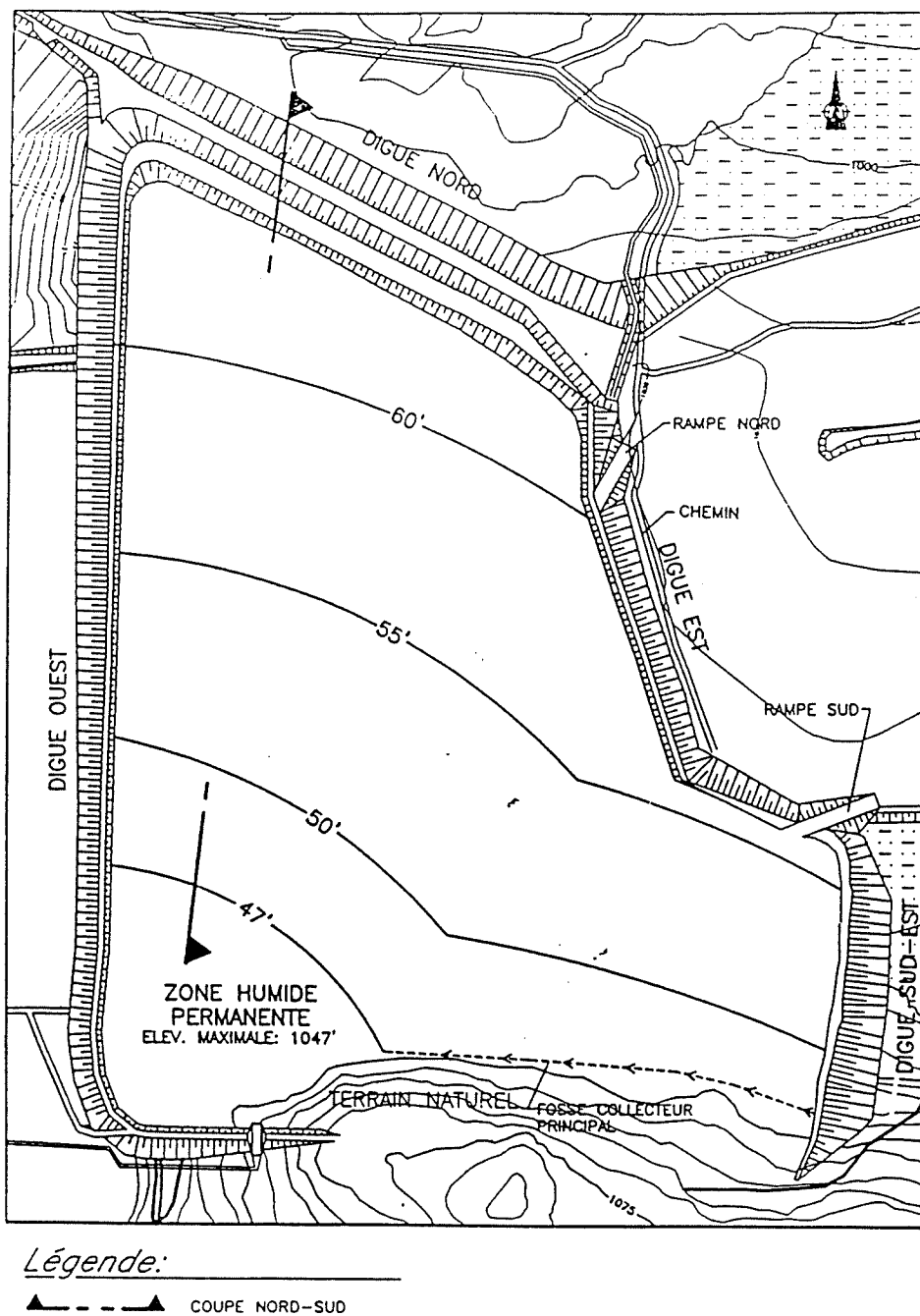
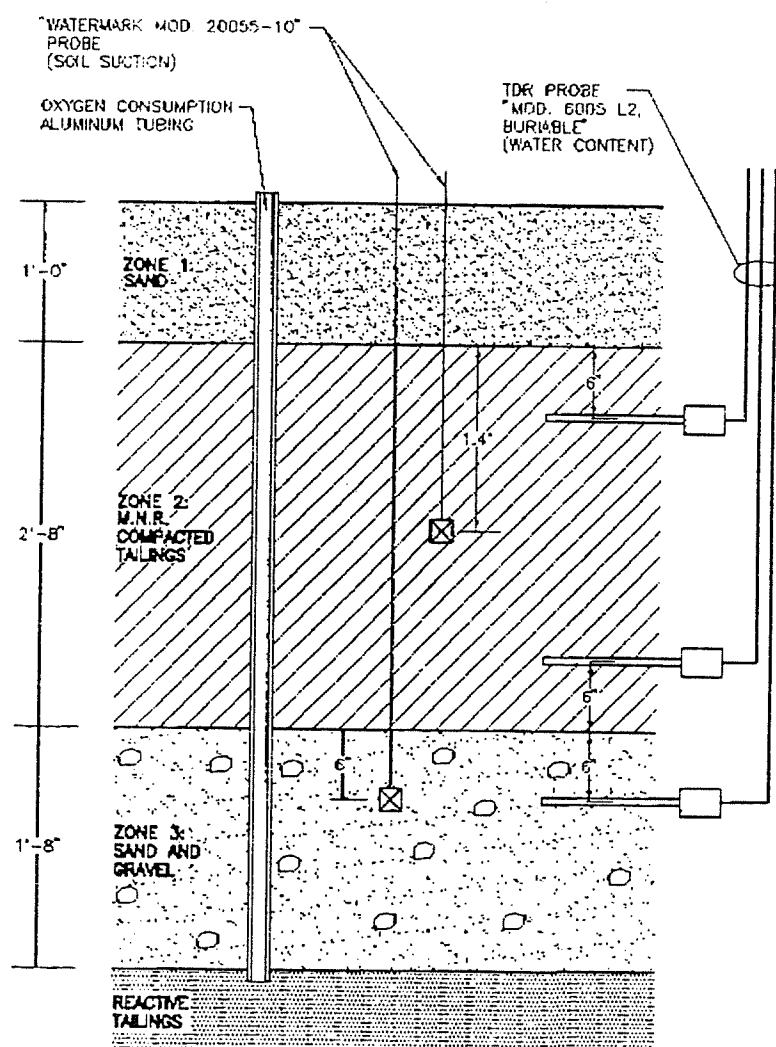


Figure 6.9 : Vue en plan du site LTA (tirée de Golder et associés, 1996)



NOT TO SCALE

Figure 6.10 : Vue en section de la barrière multicouche LTA avec l'emplacement approximatif des instruments (tirée de Ricard et al., 1997).

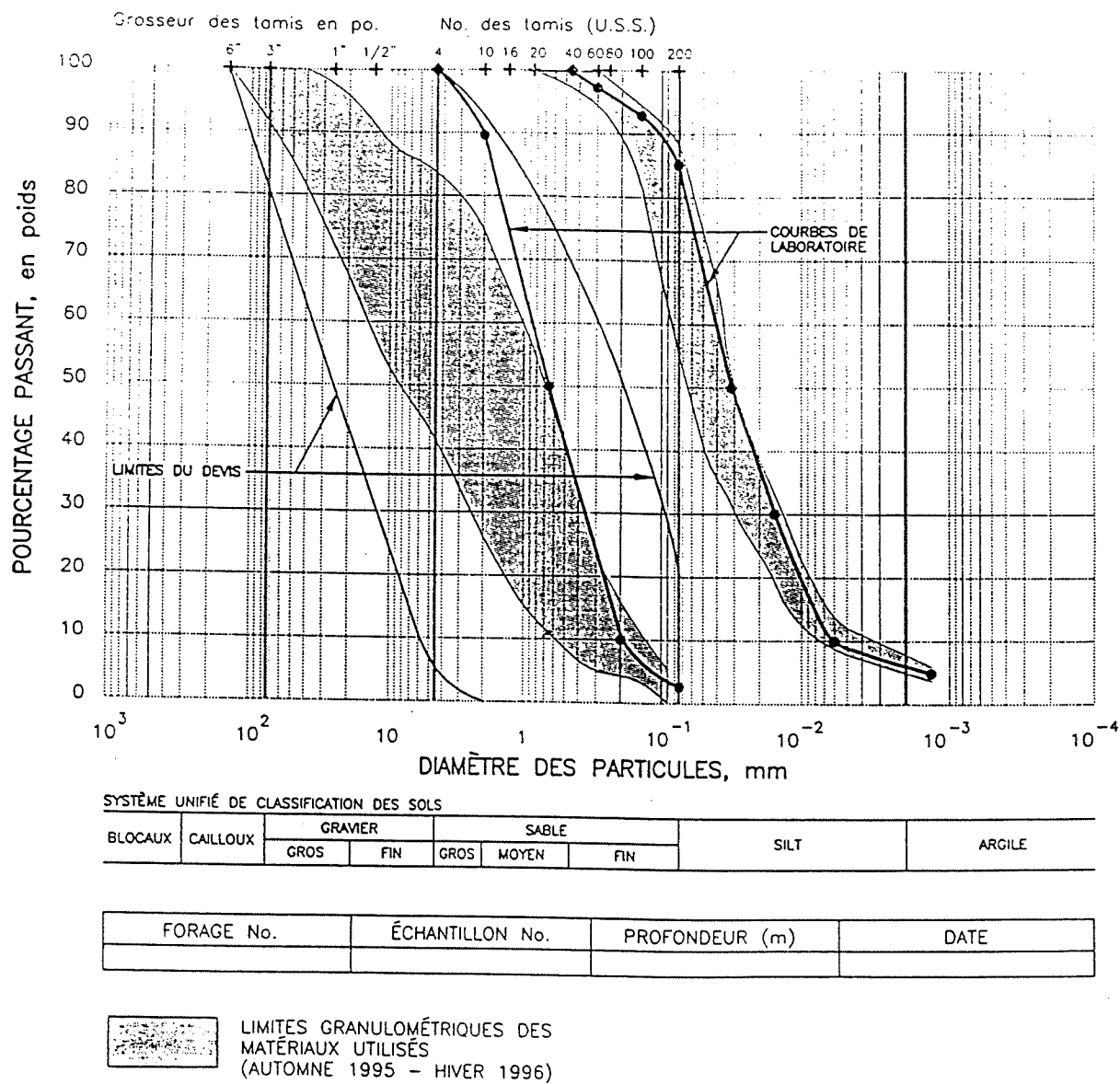
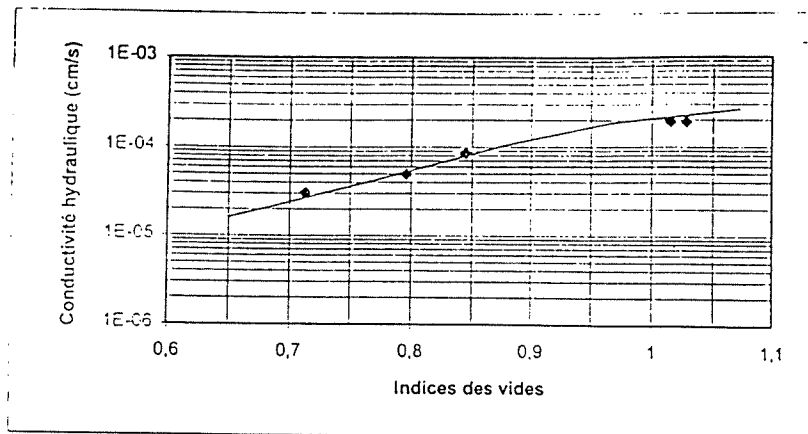
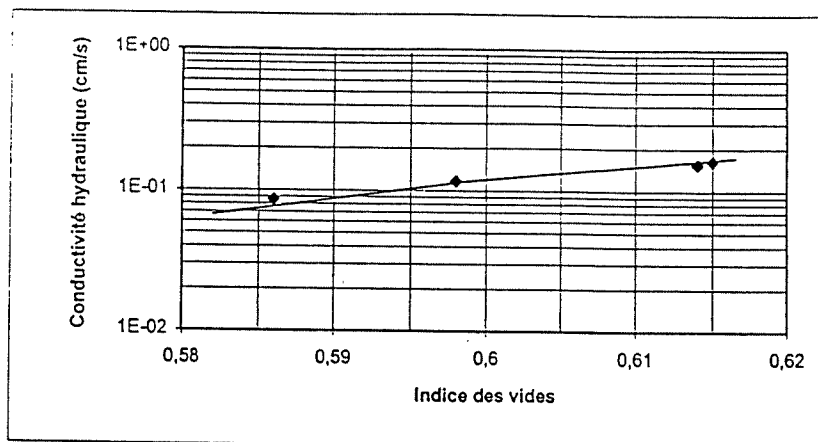


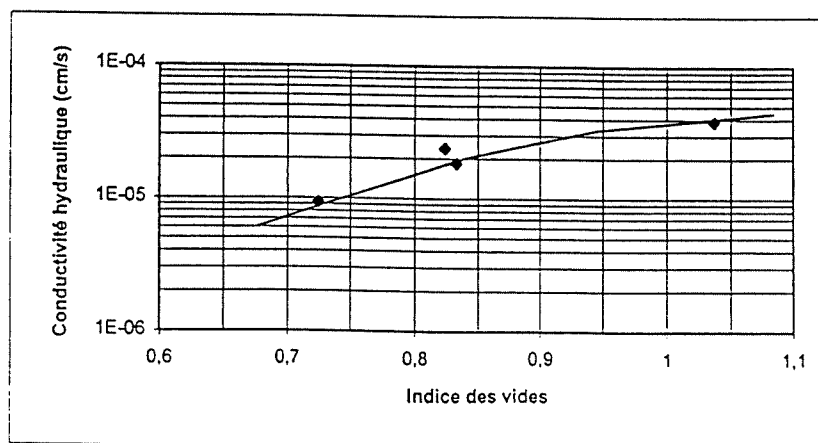
Figure 6.11 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés pour la construction de la barrière de recouvrement sur le site LTA (tirée de Golder et associés, 1996).



Conductivité hydraulique saturée du résidu MRN



Conductivité hydraulique saturée du sable d'emprunt



Conductivité hydraulique saturée du résidu LTA

Figure 6.12 : Résultats des essais de perméabilité réalisés sur les matériaux utilisés pour la construction de la CEBC sur LTA (tirée de Golder et associés, 1996).

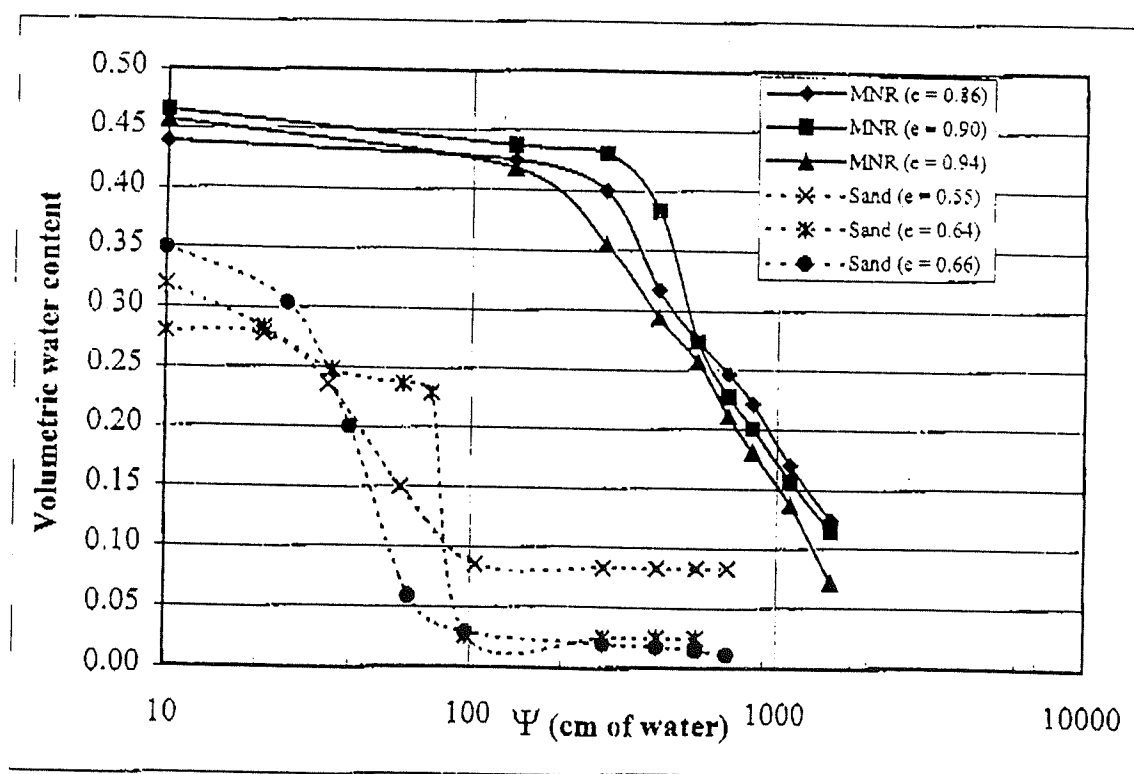


Figure 6.13 : Courbes caractéristiques de succion typiques pour les différents matériaux de construction utilisés sur le site LTA (tirée de Ricard et al., 1997).

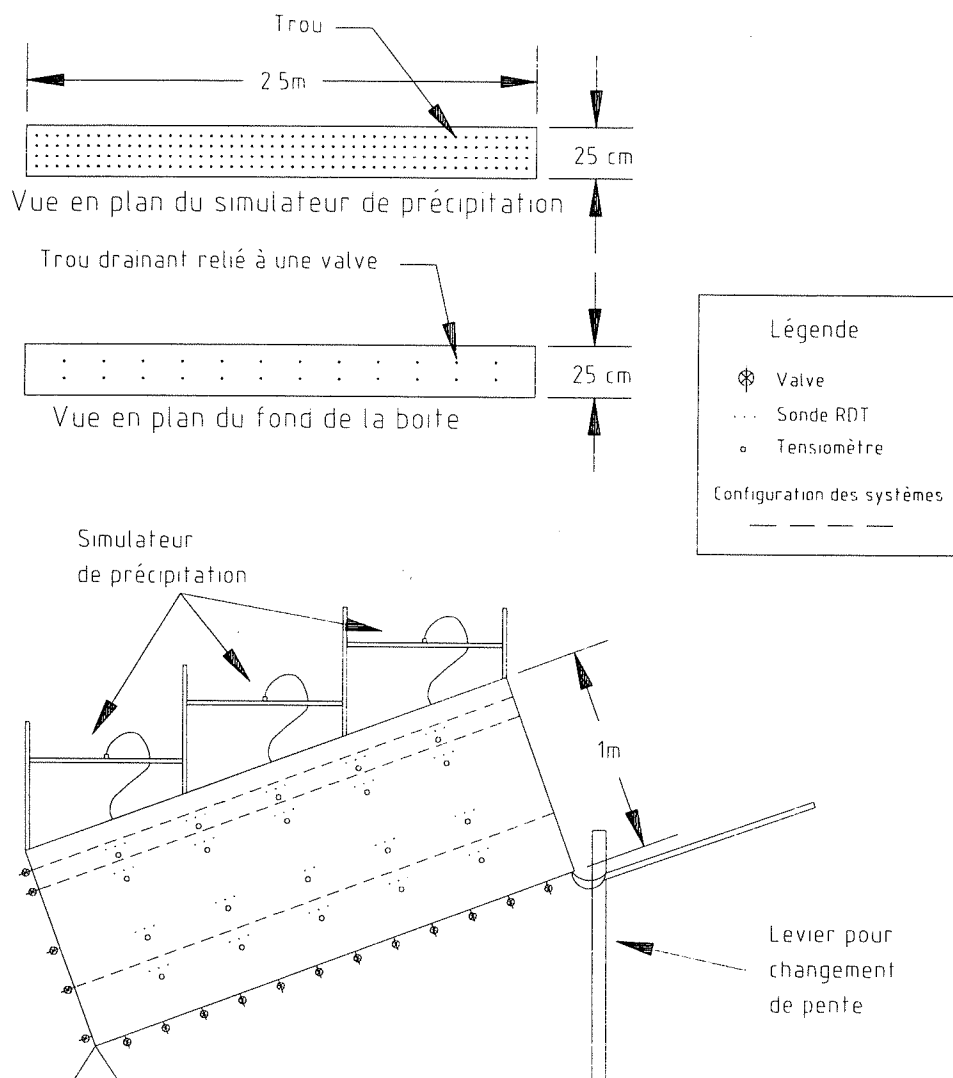


Figure 6.14 : Dispositif expérimental proposé pour la réalisation des essais inclinés.

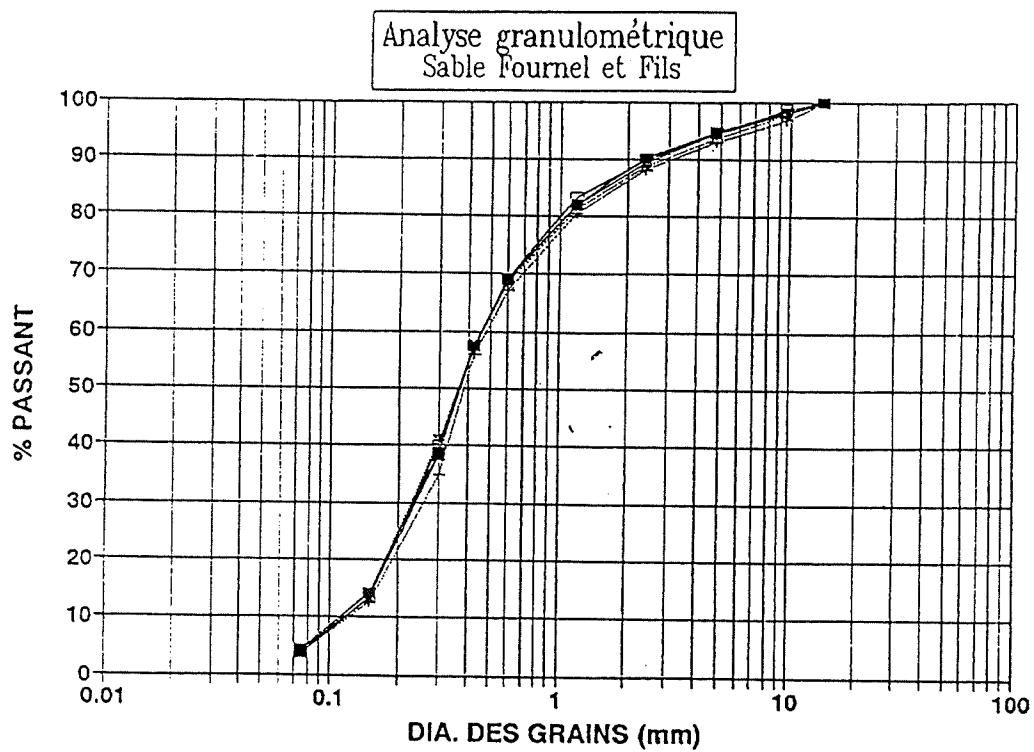


Figure 6.15 : Courbes granulométriques du sable qui sera utilisé dans les essais en laboratoire.

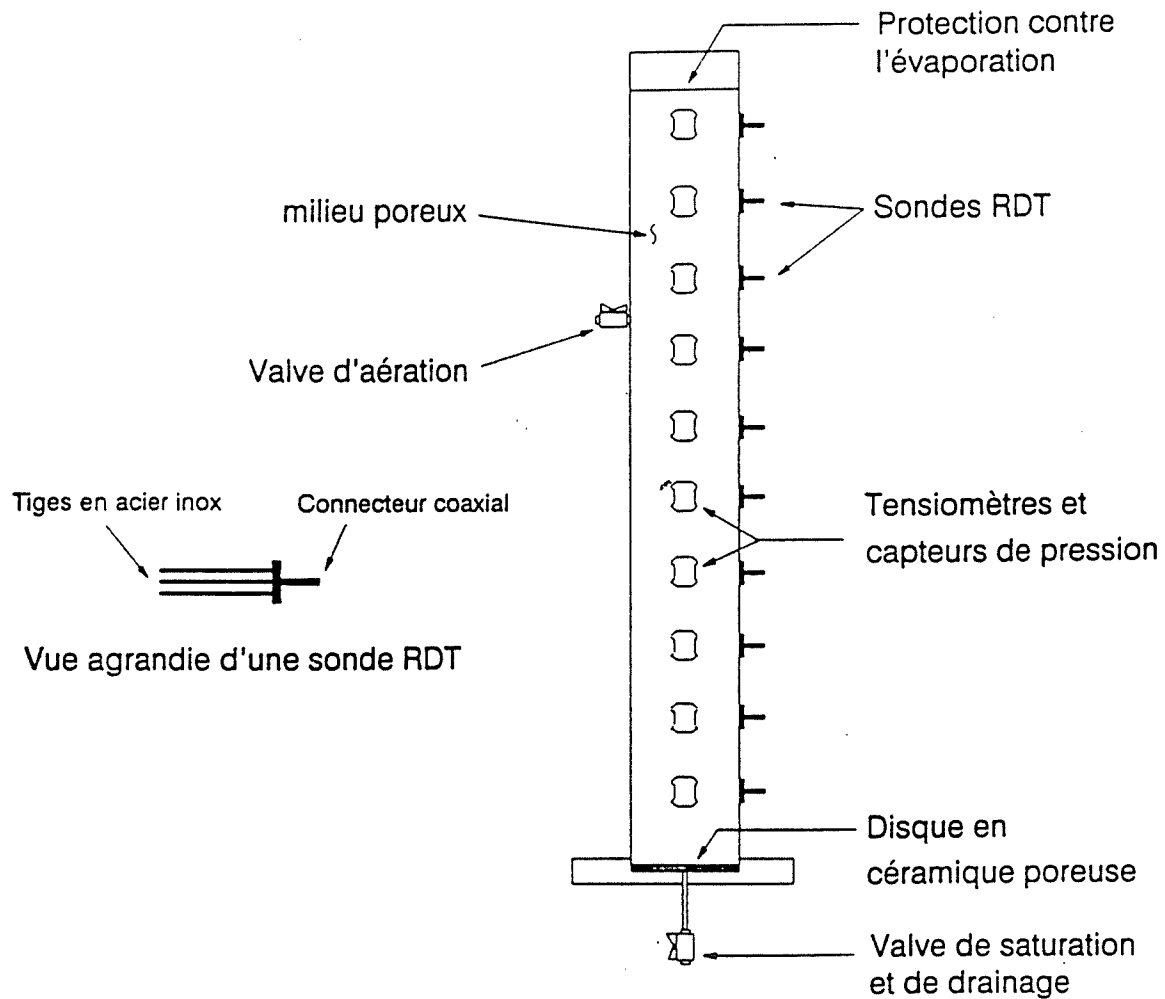


Figure 6.16 : Représentation schématique du montage pour les essais en colonne (tirée d'Aachib et al., 1993).

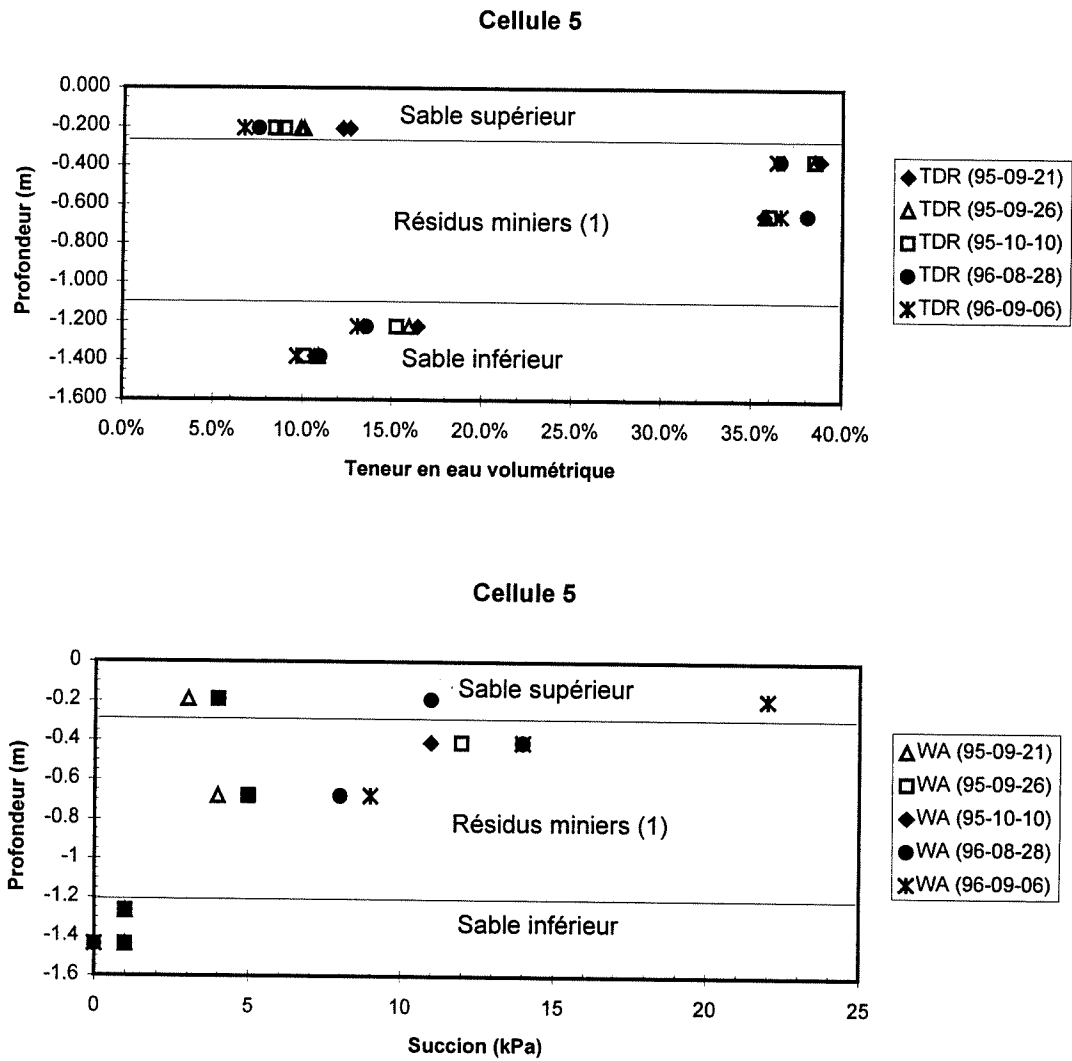


Figure 6.17 : Premiers résultats provenant des cellules expérimentales sur le site Manitou.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

Les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) sont de plus en plus utilisées pour la restauration de sites qui contiennent des déchets miniers (e.g. Applegate et Kraatz, 1991 ; Yanful et al., 1993 ; O'Kane et Wilson, 1993 ; Ricard et al., 1997). L'objectif de ces recouvrements est de limiter l'infiltration de l'eau et surtout de l'oxygène. Malgré que l'on retrouve dans la littérature quelques cas de travaux à grande échelle, la compréhension du comportement hydrogéologique de tels recouvrements n'est pas encore parfaite. On sait que l'effet de barrière capillaire est présent lorsqu'un matériau grossier est placé sous ou sur un matériau fin. Si le contraste granulométrique est suffisant entre les deux matériaux, les couches grossières limitent l'écoulement dans le matériau fin favorisant ainsi le maintien d'un haut degré de saturation. L'écoulement dans ce type de configuration, où l'on retrouve l'effet de barrière capillaire, est non saturé et il y a une évolution constante des variables (régime transitoire) ce qui rend difficile la prédiction du comportement hydrogéologique de ces systèmes.

L'objectif principal du projet de recherche présenté dans ce travail est de déterminer l'influence de différents paramètres sur le comportement hydrogéologique des CEBC afin d'établir des règles de design. Un de ces paramètres est la géométrie de la barrière capillaire. En effet, des travaux tirés de la littérature montrent que la pente (longueur et inclinaison) a un impact direct sur l'efficacité d'une barrière capillaire à limiter l'infiltration de l'eau. Ces travaux ont montré qu'il existe un écoulement à l'interface entre le matériau grossier et le matériau fin ("*wicking effect*"). Cet écoulement existe théoriquement jusqu'à un certain point (point DDL). À ce point, la pression exercée ψ_0 sur le matériau grossier est suffisante pour permettre l'infiltration dans la couche grossière et ainsi, l'effet de barrière capillaire disparaît. La position de ce point varie

selon les caractéristiques des matériaux et les conditions environnantes de la barrière capillaire (taux de précipitation, inclinaison). Plus la pente est grande, plus la barrière est efficace à limiter l'infiltration. D'un autre côté, il a été montré que la pente a un effet négatif sur la saturation de la couche fine, ce qui pourrait réduire l'efficacité des CEBC à limiter la production de drainage minier acide. D'autres facteurs peuvent également influencer le comportement d'une CEBC, comme par exemple le taux de précipitation et l'anisotropie de la couche fine, ou encore les caractéristiques hydriques des matériaux et les conditions de terrain (ou conditions frontières), telles l'évaporation, le ruissellement, l'effet des cycles mouillage-séchage et gel-dégel.

Des installations de terrains et de laboratoires seront utilisées pour étudier plus en détails le comportement hydrogéologique des couvertures avec effets de barrière capillaire. Des cellules expérimentales de dimensions réduites complètement instrumentées devraient permettre d'établir l'influence des conditions de terrain sur le comportement de CEBC faites de différents matériaux et de vérifier l'efficacité des modèles numériques à prédire le comportement de ces couvertures. En ce qui concerne les résultats obtenus du site LTA (et des autres sites potentiels), ils permettront de mieux comprendre l'effet de la pente sur l'écoulement dans les CEBC. Des données sur des faibles pentes et des pentes plus prononcées seront disponibles. L'aspect intéressant de ces travaux est qu'ils permettront d'avoir des données de terrain dans un contexte réaliste. Enfin, les travaux de laboratoire devraient permettre d'évaluer l'influence de la pente et du taux de précipitation sur l'efficacité de barrières capillaires. Le principal avantage du laboratoire est de pouvoir contrôler tous les paramètres et ainsi isoler les différentes variables.

RÉFÉRENCES

- AACHIB, M., AUBERTIN, M. et CHAPUIS, R.P. 1994. Column tests investigation of milling wastes properties used to build cover systems. Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and 3rd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, 2 : 128-137.
- 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.
- AKINDUNNI, F.F., GILLHAM, R.W. et NICHOLSON, R.V. 1991. Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. Canadian Geotechnical Journal, 28 :446-451.
- ALLEN, M.B. et MURPHY, C.L. 1986. A finite element collocation method for variably saturated flow in two space dimensions. Water Resources Research, 22 (11) : 1537-1542.
- ANDERSON, M.P. et WOESSNER, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press Inc.
- ANDRÉ-JEHAN, R., ARNOULD, M., BILLIOTTE, J., DEVEUGHELE, M. et ROUSSET, G. 1988. Une protection naturelle contre l'infiltration des eaux météoriques : la barrière capillaire - principe - modélisation des transferts d'eau. Bull. Ass. Int. Géologie de l'Ingénieur, 37 : 39-47.
- ANON. 1995. L'industrie minérale du Québec 1995. Ministère des Ressources naturelles du Québec.

- APPLEGATE, R.V. et KRAATZ, M. 1991. Rehabilitation of Rum Jungle uranium mine. Compte-rendus du Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par l'activité minière, Montréal, 3 : 155-169.
- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., BOUCHENTOUF, A. et BUSSIÈRE, B. 1997a. Unsaturated flow modeling of inclined layers for the analysis of covers. Préparé pour le 4^{ième} ICARD, Vancouver, B.C.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., BARBERA, J.M., CHAPUIS, R.P., MONZON, M. et AACHIB, M., 1997b. Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings. Préparé pour le 4^{ième} ICARD, Vancouver, B.C.
- AUBERTIN, M., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B. et CHAPUIS, R.P. 1996a. Recouvrements multicouches avec effets de barrière capillaire pour contrôler le drainage minier acide : études en laboratoire et *in situ*. Symposium International, Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement, février 96, Paris.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., MONZON, M. et CHAPUIS, R.P. 1996b. Rapports d'avancement #4 et #5 du Projet sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers - Phase II : essais en place soumis au Ministère des ressources naturelles.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M. et CHAPUIS, R.P. 1996c. Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. Hydrogéologie, 1 : 3-13.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. et CHAPUIS, R.P. 1996d. Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. Canadian Geotechnical Journal, 33 : 470-482.
- AUBERTIN, M., RICARD, J.F. et CHAPUIS, R.P. 1996e. A predictive model for the water retention curve : application to tailings from hard rock mines. Submitted to the Canadian Geotechnical Journal.

- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M., MONZON, M. et CHAPUIS, R.P. 1996f. Le contrôle du drainage minier acide à l'aide de barrières de recouvrement. Colloque sur le Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier, Rouyn-Noranda, 2 : 133-155.
- AUBERTIN, M., RICARD, J.F. et CHAPUIS, R.P. 1995a. A study of capillary properties of mine tailings: measurements and modeling. Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, 17-24.
- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B., RICARD, J.-F., et TREMBLAY, L. 1995b. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Rapport final préparé pour CANMET, Rapport C.D.T. P1622, École Polytechnique de Montréal, 164 p.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., MONZON, M. et CHAPUIS, R.P. 1995c. Rapports d'avancement #1 et #2 du Projet sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers - Phase II : essais en place soumis au Ministère des ressources naturelles.
- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., BUSSIÈRE, B. et AACHIB, M. 1993. Propriétés des résidus miniers utilisés comme matériau de recouvrement pour limiter le drainage minier acide (DMA). Geoconfine 93, Arnould, Barrès et Côme (eds), Balkema, 299-308.
- AUBERTIN, M. 1991. La problématique de la gestion des résidus miniers au Québec. Les Mines, le Développement Durable, et l'Environnement, Collection Environnement et Géologie, APGGQ, 12:139-152.
- BAKER, J.M. et ALLMARAS, R.R. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 54 : 1-6.
- BAKER, R.S. et HILLEL, D. 1990. Laboratory tests of a theory of fingering during infiltration into layered soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 54 : 20-30.

- BARBERA, J.-M. 1996. Instrumentation pour recouvrements multicouches. Mémoire de maîtrise, Département de Génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 122 p.
- BARBOUR, S.L. et YANFUL, E.K. 1994. A column study of static nonequilibrium fluid pressures in sand during prolonged drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 :299-303.
- BARRÈS, M. et BONNIN, H. 1993. The capillary barrier for surface capping. *Landfilling of Waste Barriers*, London, E & FN Spon, 139-148.
- BATHE, K.-J. 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, 282 p.
- BEAR, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications inc. 764 p.
- BERNIER, L.R. 1996. Rapport d'analyses minéralogiques par diffraction des rayons-X sur des échantillons de till et de résidus miniers des mines Sigma et Manitou, Val d'Or : Phase II. Rapport de GÉOBEREX RECHERCHE (non publié).
- BILLIOTTE, J., BOURGEOIS, M., DEVEUGHELE, M., JACQUARD, C. et ARNOULD, M. 1988. Étude d'un système bicouche sol fin - sol grossier à effet de barrière capillaire. *Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and Safety of Radioactive and Industrial Hazardous Waste Disposal*, Doc. 160, 149-161.
- BOUCHENTOUF, A. 1996. Modélisation de l'écoulement de l'eau en milieu poreux non-saturé : cas d'une barrière de recouvrement. Mémoire M.Sc.A., Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.
- BROOKS, R.H. et COREY, J.C., 1964. Hydraulic properties of porous medium. Colorado State University (Fort Collins), Hydrology Paper 3.
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., AACHIB, M., CHAPUIS, R.P. et CRESPO, R.J. 1995. Unsaturated flow modelling of covers for reactive tailings. CAMI'95, *Proceedings of the Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Montréal, 853-862.

- BUSSIÈRE, B., LELIÈVRE, J., OUELLET, J. et BOIS, D. 1994. Valorisation des résidus miniers : une approche intégrée. Rapport final soumis au Ministère des Ressources naturelles dans le cadre du volet Mines écologiques de l'Entente Auxiliaire du Développement Minéral, 194 p.
- BUSSIÈRE, B. 1993. Évaluation des propriétés hydrogéologiques de résidus miniers utilisés comme barrière de recouvrement. Mémoire M.Sc.A., Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.
- CELIA, M.A., BOULOUTAS, E.T. et ZARBA, R.L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, 26 : 1483-1496.
- CHAPUIS, R.P. et GILL, D.E. 1989. Hydraulic anisotropy of homogeneous soils and rocks : influence of the densification process. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 39 : 75-86.
- CHILDS, E.C. et COLLIS-GEORGE, G.N. 1950. The permeability of porous materials. *Proceedings 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 the 17th International Madison Waste Conference, Septembre 21-22, 1994, 357-375.
- CLEMENT, T.P., WISE, W.R. et MOLZ, F.J. 1994. A physically based, two-dimensional, finite difference algorithm for modeling variably saturated flow. *Journal of Hydrology*, 161 : 71-90.
- CLOTHIER, B.E., SCOTTER, D.R. et KERR, J.P. 1977. Water retention in soil underlain by a coarse-textured layer : theory and a field application. *Soil Science*, 123 No. 6 : 392-399.
- COLLIN, M. et 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, 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. Mémoire M.Sc.A., Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.
- DHATT, G. et TOUZOT, G. 1981. Une Présentation de la Méthode des Éléments Finis. Les Presses de l'Université Laval, 542 p.
- EAGLEMAN, J.R. et JAMISON, V.C. 1962. Soil layering and compaction effects on unsaturated moisture movement. *Soil Science Society Proceedings*, 26 : 519-522.
- EBERLING, B. et NICHOLSON, R. V. 1996, Field determination of sulphide oxydation rate in mine tailings. *Water Resources Research*, 32 : 1773-1784.
- ELZEFTAWY, A. et CARTWRIGHT, K. 1981. Evaluating the saturated and unsaturated hydraulic conductivity of soils. *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*, ASTM STP, T.F. Zimmie and C.D. Riggs (eds), 168-181.
- EPA (Environmental Protection Agency) 1991. Design and construction of RCRA/CERCLA final covers. Seminar Publication, EPA/625/4-91/025.
- EVERETT, L.G., WILSON, L.G. et HOYLMAN, E.W. 1984. Vadose Zone Monitoring for Hazardous Waste Sites. Noyes Data Corp.
- FAYER, M.J., ROCKHOLD, M.L. et CAMPBELL, M.D. 1992. Hydrologic modeling of protective barriers : comparison of field data and simulation results. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 56 : 690-700.
- FEDORS, R.W. 1996. Improvement in nonlinear solution schemes for saturated-unsaturated flow regimes. *Proceedings of the 16 Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, April 96, Fort Collins, Colorado, H.J. Morel-Seytoux (editor), 467-478.
- FLEENOR, W.E. et KING, I.P. 1995. Identifying limitations on use of the Help model. *Proceedings of the Landfill Closures - ...Environmental Protection and Land Recovery*, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 53, 121-135.
- 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, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532.
- FREDLUND, D.G., XING, A. et HUANG, S. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31: 533-546.
- FREEZE, R.A. et CHERRY, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall.
- FRIND, E.O., GILLHAM, R.W. et PICKENS, J.F. 1976. Application of unsaturated flow properties in the design of geologic environments for radioactive waste storage facilities. Proceedings of the 1st International Conference on Finite Elements in Water Ressources, Princeton, N.J.
- GALBRAITH, M. 1990. Mt. Washington acid rock mine reclamation project. Proceedings of the 14th B.C. Mine Reclamation Symposium, 1-12.
- GARDNER, W.R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. Soil Science, 85 : 228-232.
- GEOSLOPE International, 1994. SEEP/W User's Guide, Version 3.
- GILLHAM, R.W. 1984. The capillary fringe and its effects on the water-table response. Journal of Hydrology, 67 :307-324.
- GLASS, J.R., CANN, S., KING, J., BAILY, N., PARLANGE, J-Y. et STEENHUIS, T.S. 1990. Wetting front instability in unsaturated porous media : a three-dimensionnal study in initially dry sand. Transport in porous media, 5 : 247-268.
- GOLDER et ASSOCIÉS 1996. Rapport d'étape #1 - conception de la couverture de rétention capillaire Terrains Aurifères. Rapport #951-7117, Mai 96.
- GREEN, T.R. et FREYBERG, D.L. 1995. State-dependent anisotropy : comparisons of quasi-analytical solutions with stochastic resultsfor steady gravity drainage. Water Resources Research, 31 : 2201-2211.

- HANKS, R.J. et BOWERS, S.A. 1962. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. Soil Science Society of America Proceedings, 26 : 519-522.
- HAVERKAMP, R., VAUCLIN, M., TOUMA, J., WIERANGA, P.J. et VACHAUD, G. 1977. Comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 41 :285-294.
- HEALY, R.W. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modification to the US Geological Survey's computer program VS2D. US Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Rep., 90-4025.
- HEIMOVAARA, T.J. et BOUTEN, W. 1990. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. Water Resources Research, 26 : 2311-2316.
- HERKELRATH, W.N., HAMBURG, S.P. et MURPHY, F. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. Water Resources Research, 31 : 2201-2211.
- HILLEL, D. 1980a. Fundamental of Soil Physics. Academic Press, New York, 413 p.
- HILLEL, D. 1980b. Applications of Soil Physics. Academic Press, New York, 383 p.
- HILLEL, D. et BAKER, R.S. 1988. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. Soil Science, 146 (1) : 51-56.
- HILLS, R.G., PORRO, I., HUDSON, D.B. et WIERENGA, P.J. 1989. Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils - 1. Model development and evaluation. Water Resources Research, 25 (6) : 1259-1269.
- HUYAKORN, P.S., THOMAS, S.D. et THOMPSON, B.M. 1984. Techniques for making finite elements competitive in modeling flow in variably saturated media. Water Resources Research, 20 : 1099-1115.
- HUYAKORN, P.S., SPRINGER, E.P., GUVANASEN, V. et WADSWORTH, T.D. 1986. A three dimensionnal finite-element model for simulating water flow in variably saturated porous media. 22 : 1790-1808.

- HUYAKORN, P.S. et PINDER, G.F. 1983. Computational Methods in Subsurface Flow. Academic Press inc., San Diego, USA, 473 p.
- JACKSON, C.R. 1992. Hillslope infiltration and lateral downslope unsaturated flow, Water Resources Research, 28 (9) :2553-2539.
- KHIRE, M., MEERDINK, J., BENSON, C. et BOSSCHER, P. 1995. Unsaturated hydraulic conductivity and water balance predictions for earthen landfill final covers. Soil Suction in Geotechnical Engineering Practice, Geotechnical Special Publication No.48, ASCE, 38-57.
- KIRKLAND, M.R., HILLS, R.G. et WIERENGA, P.J. 1992. Algorithms for solving Richards' equation for variably saturated soils. Water Resources Research, 28 : 2049-2058.
- KISSIOVA, M. 1996. Étude en laboratoire des modèles de prédiction de la conductivité hydraulique des matériaux meubles non saturés. Mémoire M.Ing., Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.
- KLUTE, A. et DIRKSEN, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity : laboratory methods. Dans A. Klute (ed.) Methods of Soil Analysis, Part I, 2nd Edition, Agron. Monogr. No. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 687-734.
- KOVÁCS, G. 1981. Seepage Hydraulics, Elsevier Scientific Pub.
- 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.
- LARSON, T.H., KEEFER, D.A., ALBRECHT, K.A. et CARTWRIGHT, K. 1988. Infiltration through layered soil trench covers : response to an extended period of rainfall. Journal of Contaminant Hydrology, 3 : 251-261.
- LOCKINGTON, D.A. et PARLANGE, J.-Y. 1995. Approximate formulae for the wetting front position and boundary water-content during horizontal infiltration. Transport in Porous Media, 18 : 95-105.

- LUNDGREN, T. et LINDAHL, L.-A. 1991. The efficiency of covering the sulphidic waste rock in Bersbo, Sweden. *Compte-rendus du Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par l'activité minière*, Montréal, 3 : 239-255.
- 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.
- McCORD, T.J., STEPHENS, D.B. et WILSON, J.L. 1991a. Toward validating state-dependent macroscopic anisotropy in unsaturated media : field experiments and modeling considerations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7 : 145-175.
- McCORD, T.J., STEPHENS, D.B. et WILSON, J.L. 1991b. Hysterisis and state-dependent anisotropy in modeling unsaturated hillslope hydrologic process. *Water Resources Research*, 27 no.7 : 1501-1518.
- McCORD, T.J. et STEPHENS, D.B. 1987. Lateral moisture flow beneath a sandy hillslope without an apparent impeding layer. *Hydrological Process*, 1 : 225-238.
- MELCHOIR, S., BERGER, K., VIELHABER, B. et MIEHLICH, G. 1994. Multilayered landfill covers : field data on the water balance and liner performance. *Proceedings of the 33rd Hanford Symposium on Health and Environment*, Pasco, WA, 411-425.
- MILLER, D.E. 1969. Flow and retention of water in layered soils. *Conservation Research Report No. 13*, US Department of Agriculture, 28 p.
- MILLER, D.E. et BUNGER, WM. C. 1963. Moisture retention by soil with coarse layers in the profile. *Soil Science Society Proceedings*, 27 : 586-589.
- MILLY, P.C.D. 1985. A mass-conservative procedure for time stepping in models of unsaturated flow. *Adv. Water Ressources*, 8 : 32-36.
- MISHRA, S. et PARKER, J.C. 1990. On the relation between saturated conductivity and capillary retention characteristics. *Ground Water*, 28 (5): 775-777.
- MIYAZAKI, T. 1988. Water flow in unsaturated soil in layered slopes. *Journal of Hydrology*, 102 :201-214.

- MONTGOMERY, R. et PARSONS, L. 1990. The Omega Hills cover test plot study : fourth year data summary. Proceedings of the 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, 24-27.
- MOREL-SEYTOUX, H.J. 1992. The capillary barrier effect at the interface of two soil layers with some contrast in properties. HYDROWAR Report 92.4, Hydrology Days Publications, 57 Shelby Lane, Atherton, CA 94027-3926, 109 p.
- MOREL-SEYTOUX, H.J. 1993. Dynamic perspective on the capillary barrier effect at the interface of an upper fine layer with a lower coarse layer. Engineering Hydrology, Kuo, C.Y. (ed.), ASCE, 467-472.
- 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.
- MUALEM, Y. 1984. Anisotropy of unsaturated soils. Soil Sc. Soc. Am. J., 48 : 505-509.
- MUTCHLER, C.K. 1967. Parameters for describing raindrops splash. Soil and Water Conservation, Vol. 22, No.3.
- MUTCHLER, C.K. 1970. Splash of water drop at terminal velocity. Soil Science, 169 : 1311-1312.
- MUTCHLER, C.K. 1971. Splash amounts from water drop impact on a smooth surface. Water Resources Research, 5 : (1).
- NEUMANN, S.P. 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. J. Hydraulic. Div. ASCE, 99 (HY12) : 2233-2250.
- NICHOLSON, R.V., EBERLING, B. et WILLIAMS, G. 1995. A new consumption technique to provide rapid assessment of tailings reactivity in the field and the laboratory. Proceedings of the Conference on Mining and the Environment, Sudbury '95, 3 : 999-1006.

- NICHOLSON, R.V., AKINDUNNI, F.F., SYDOR, R.C. et GILLHAM, R.W. 1991. Saturated tailings covers above the water table : the physics and the criteria for design. Deuxième Conférence Internationale sur la Réduction des Eaux de Drainage Acide, Montréal, 443-460.
- NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A. et REARDON, E.J. 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal, 26 : 1-8.
- NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A. et REARDON, E.J. 1990. Reduction of acid generation in mine tailings through moisture-retaining cover layers as oxygen barriers : Reply. Canadian Geotechnical Journal, 27 : 402-403.
- NIEBER, J.L. et WALTER, M.F. 1981. Two-dimensional soil moisture flow in a sloping rectangular region : experimental and numerical studies. Water Resources Research, 17 : 1722-1730.
- NYHAN, J., HAKONSON, T. and DRENNON, B. 1990. A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. Journal of Environmental Quality, 19 : 281-288.
- O'KANE, M. et WILSON, G.W. 1993. Final report for the Equity Silver Mines Ltd., field instrumentation program. Geotechnical Engineering Group, Department of Civil Engineering, College of Engineering, University of Saskatchewan (non publié).
- OLDENBURG, C.M. et PRUESS, K. 1993. On numerical modeling of capillary barriers. Water Resources Research, 29 no.4 : 1045-1056.
- OMEGA 1995. Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia. Vol. 29, OMEGA ENGINEERING INC, Z1-Z32.
- PRUESS, K. 1991. A general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Rep. LBL-29400, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, CA.
- PRUESS, K. 1987. TOUGH2 users guide. Rep. LBL-20700, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, CA. Water Resources Research, 27 (6) : 925-931.

- PAN, L. et WIERENGA, P.J. 1995. A tranformed pressure head-based approach to solve Richards' equation for variably saturated soils.
- PANICONI, C., ALDAMA, A.A. et WOOD, E.F. 1991. Numerical Evaluation of iterative and noniterative methods for the solution of the nonlinear Richards Equation. *Water Resources Research*, 27 (6) : 1147-1163.
- PARLANGE, J-Y. et HOGGARTH, W.L. 1985. Steady state infiltration : consequences of α dependent on moisture content. *Water Ressources Research*, 21 : 1283-1284.
- PARLANGE, J.-Y., LISLE, I.G., BRADDOCK, R.D. et SMITH, R.E. 1982. The three-parameter infiltration equation. *Soil Science*, 133 : 337-341.
- PARLANGE, J.-Y. 1972. Theory of water movement in soils : 8. One-dimensional infiltration with constant flux at surface. *Soil Science*, 114 : 1-4.
- PENMAN, H.L. 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 193 : 120-146.
- PHILIP, J.R. 1991. Hillslope infiltration : planar slopes. *Water Ressources Research*, 27 (1) : 109-117.
- PHILIP, J.R. 1957. The theory of infiltration : 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83 : 345-357.
- RAATS, P.A.C. 1973. Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 37 : 681-685.
- RASMUSSEN, A. et ERIKSON, J.C. 1986. Capillary barriers in covers for mine tailings dumps. Report 3307, The National Swedish Environmental Protection Board.
- REDDY, J.N. 1993. *An Introduction to the Finite Element Method*. Second Edition, McGraw-Hill Inc. 684 p.
- RICARD, J.-F., AUBERTIN, M., FIRLOTTE, F.W., KNAPP, R., McMULLEN, J. et JULIEN, M. 1997. Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, Québec, Canada. Préparé pour le 4^{ième} ICARD, Vancouver, B.C.

- RICARD, J.-F. 1994. Étude en laboratoire de la relation capillaire et de la conductivité hydraulique de résidus miniers. Mémoire M.Sc.A., Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.
- RICHARDS, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *J. Physics*. 1 : 318-333.
- RIJTEMA, P.E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Rep. 659, Cent. For Agri. Publ. And Doc., Wageningen, Netherlands, 107 p.
- RITCEY, G.M. 1989. In: *Tailings Management, Problems and Solutions in the Mining Industry*, Amsterdam: ELSEVIER.
- ROBINS, J.S. 1959. Moisture movement and profile characteristics in relation to field capacity. *Internatl. Comn. Irrig. And Drain.*, 8 : 509-521.
- ROGERS, J.S. et SELIM, H.M. 1989. Water flow through layered anisotropic bedded soil with subsurface drains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 18-24.
- ROSS, B. 1990. The diversion capacity of capillary barriers. *Water Ressources Research*, 26 (10) : 2625-2629.
- ROSS, P.J., PARLANGE, J.-Y. et HAVERKAMP, R. 1995. Two-dimensional interaction of wetting front with an impervious layer : analytical and numerical solutions. *Transport in Porous Media*, 20 : 251-263.
- ROSS, P.J. 1992. Cubic approximation of hydraulic properties for simulation of unsaturated flow. *Water Resources Research*, 28, : 2617-2620.
- SEGERLIND, L.J. 1984. *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley and Sons.
- SELIM, H.M. 1987. Water seepage through multilayered anisotropic hillside. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 : 9-16.
- SELIM, H.M. 1988. Water flow in layered soils with sloping surface. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114 (3) : 442-462.
- SHACKELFORD, C.D., CHANG, C.K. et CHIU, T.F. 1994. The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers. *Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, ISSMFE/CGS, 789-793.

- SHOUSE, P.J., RUSSELL, W.B., BURDEN, D.S., SELIM, H.M., SISSON, J.B. et van GENUCHTEN, M.Th. 1995. Spatial variability of soil water retention functions in a silt loam soil. *Soil Science*, 159 (1): 1-12.
- SHROEDER, P.R., MORGAN, J.M., WALSKI, T.M. et GIBSON, A.C. 1984. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C.
- SMITH, G.M. 1996. Internal moisture control in tailings repositories with capillary barriers. *Proceedings of the 16 Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, April 96, Fort Collins, Colorado, H.J. Morel-Seytoux (editor), 467-478.
- SRK (Steffen, Robertson et Kirsten). 1989. Draft Acid Rock Technical Guide. BC AMD Task Force, Vol. 1.
- STANNARD, D.I. 1990. Tensiometers - theory, construction, and use. *Ground Water and Vadose Zone Monitoring*, ASTM STP 1653, D.M. Nielsen and A.I. Johnson, Eds, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 34-51.
- STEENHUIS, T.S., PARLANGE, J-Y. et KUNG, K-J.S. 1991. Comment on "The diversion capacity of capillary barriers" by Benjamin Ross. *Water Ressources Research*, 27 (8) : 2155-2156.
- STEPHENS, D.B. et HEERMANN, S. 1988. Dependence of anisotropy on saturation in stratified sand. *Water Ressources Research*, 24 (5) : 770-778.
- STORMONT, J.C. 1995a. The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance. *Water Ressources Research*, 31 (3) : 783-785.
- STORMONT, J.C. 1995b. The performance of two capillary barriers during constant infiltration. *Landfill Closures... Environmental Protection and Land Recovery*, Geotechnical Special Publication No. 53, ASCE, 77-92.
- SYDOR, R.C. 1992. Engineered mine tailings covers : verification of drainage behaviour and investigation of design parameters. Thèse M.Sc. en Sciences de la Terre, University of Waterloo, 136 p.

- THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 : 55-94.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. et ANNAN, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16 : 574-582.
- van GENUCHTEN, M.Th., LEIJ, F.J. et YATES, S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Environmental Protection Agency, EPA/600/2-91/065.
- 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. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- WALLACH, R. et ZASLAVSKY, D. 1991. Lateral flow in a layered profile of an infinite uniform slope. *Water Ressources Research*, 27 (8) : 1809-1818.
- WILSON, G.W. 1995. Assessment of protective covers and dump behavior. Proceedings of the 2nd Australian Acid Mine Drainage Workshop, Australia, March 1995.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G. et BARBOUR, S.L. 1994. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation, *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 151-161.
- WILSON, G.W., MARCHIBRODA, R.T., BARBOUR, S.L. et WOYSHNER, M.R. 1993. Modelling of soil evaporation from waste disposal sites, *Compte rendu de la Conférence Conjointe SCGC-ASCE sur le Génie Environnemental*, 1 : 281-288.
- WING, R. et GEE, G. 1994. Quest for the perfect cap. *Civil Engineering*, October, 38-41.
- 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.

- WOYSHNER, M.R. et YANFUL, E.K. 1995. Modelling and field measurements of water percolation through an experimental soil cover on mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 32 : 601-609.
- WOYSHNER, M.R. et ST-ARNAUD, L.C. 1994. Hydrological evaluation and water balance of a thickened-tailings deposit near Timmins, ON. *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and 3rd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, 2 : 198-207.
- YANFUL, E.K. 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 no.8 : 1207-1228.
- YANFUL, E.K., BELL, A.V. et WOYSHNER, M.R. 1993a. Design of composite soil cover for an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30 : 578-587.
- YANFUL, E.K., RILEY, M.D., WOYSHNER, M.R., et DUNCAN, J. 1993b. Construction and monitoring of composite soil cover on an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30 : 588-599.
- YANFUL, E.K. et AUBÉ, B. 1993. Modelling moisture-retaining soil covers. *Proceedings of the Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering*, Montreal, 1 : 373-380.
- YANFUL, E.K. et ST-ARNAUD, L.C. 1991. Design, instrumentation and construction of soil cover for reactive management. *Compte-rendus du Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par l'activité minière*, Montréal, 3 : 487-504.
- 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 (1): 2-11.

- YEH, T.-C. J., et SRIVASTAVA, A. 1990. VSAFT2 : Variably saturated flow and transport in 2-dimensions. A finite element simulator. Dept. Of Hydrology and Water Ressources, University of Arizona, Tucson. Technical Report No. HWR 90-010.
- YEH, T.-C. J. 1992. Users' manual : a finite element model of WATER flow through saturated-unsaturated porous media. Department of Civil Engineering, The Pennsylvania State University.
- YEH, T.-C. J. et WARD, D.S. 1981. FEMWATER : a finite-element model of water flow through saturated-unsaturated porous media. Rep. ORNL-5601, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- ZASLAVSKY, D. et SINAI, G. 1981a. Surface hydrology : II - Distribution of Raindrops. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107 (HY1) : 17-35.
- ZASLAVSKY, D. et SINAI, G. 1981b. Surface hydrology : III - Causes of lateral flow. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107 (HY1) : 37-52.
- ZASLAVSKY, D. et SINAI, G. 1981c. Surface hydrology : IV - Flow in sloping, layered soil. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107 (HY1) : 53-64.
- ZEGELIN, S.J., WHITE, I. et RUSSELL, G.F. 1992. A critique of the domain reflectometry technique for determining field soil-water content. Soil Science Society of America, Advances in Measurement of Soil Physical Properties : Bringing Theory into Practice, SSSA Special Publication, No 30.
- ZIENKIEWICZ, O.C. et TAYLOR, R.L. 1991. The Finite Element Method. Fourth Edition, Vol. 1 & 2, McGraw-Hill.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00171546 3

École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7