

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

UNE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES ROCHES
STÉRILES ET AUTRES MATÉRIAUX À GRANULOMÉTRIE ÉTALÉE

AURORA MARIA HERNANDEZ ORELLANA
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)
JUILLET 2007

© Aurora Maria Hernandez Orellana, 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-35706-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-35706-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

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

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

UNE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES ROCHES
STÉRILES ET AUTRES MATÉRIAUX À GRANULOMÉTRIE ÉTALÉE

présenté par : HERNANDEZ ORELLANA Aurora Maria

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

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

M. ZAGURY Gérard, Ph.D, président

M. AUBERTIN Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CHAPUIS Robert P., D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. MBONIMPA Mamert, Ph.D, membre

REMERCIEMENTS

En premier lieu, mes remerciements s'adressent à Michel Aubertin, mon directeur de recherche, pour toutes les connaissances transmises, pour sa disponibilité, même à distance et pour ses directions pendant la rédaction. Pour sa patience pendant la correction et pour toute son aide. Aussi, merci pour l'aide financière reçue de la Chaire Industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT.

Je voudrais aussi remercier Robert Chapuis, mon codirecteur, pour ses conseils concernant mon projet. Mes remerciements vont aussi à Étienne Bélanger pour son aide au laboratoire, pendant le montage et démontage des colonnes. Merci aussi à Vincent Martin et Mariam Ouangrawa pour leur correction de la langue pendant ma rédaction. Enfin, merci à tous les collègues étudiants et étudiantes pour leur générosité et leur camaraderie. Un gros merci à Lyne Lavoie pour sa promptitude et son aide à envoyer les documents à temps pendant l'étape des corrections du mémoire et son aide visant à corriger le texte.

Je tiens également à remercier Vilma Orellana, ma mère et amie pour croire en moi et pour me comprendre pendant mes moments de tension tout au long de ce projet. Mon père, Joaquin Henriquez, pour son indispensable support pendant mes études. Mon guide spirituel, Wilfredo Henriquez qui a toujours eu des paroles positives et d'encouragement, celui qui a cru toujours en moi. Finalement, je remercie ma grand-mère pour ses prières et son courage pendant la dernière étape de ma rédaction.

RÉSUMÉ

Le drainage minier acide (DMA) est produit lorsque les minéraux sulfureux réagissent avec l'eau et l'oxygène. Comprendre l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles (souvent riches en minéraux sulfureux) est un élément important pour pouvoir prévenir ou contrôler les problèmes du DMA. L'industrie minière investie fortement dans la recherche pour étudier le DMA et ses effets sur l'environnement. Ceci inclut l'évaluation du comportement hydrique des haldes à stériles.

Habituellement, l'écoulement en milieu non saturé est défini à l'aide de la conductivité hydraulique (k_{sat}) et de la courbe de rétention d'eau (CRE) qui servent aussi à déterminer la fonction de perméabilité.

La valeur de k_{sat} et la CRE peuvent être déterminées par des essais expérimentaux ou estimées par des méthodes prédictives. Les modèles prédictifs ont toutefois montré certaines limites dans le cas des matériaux grossiers, connue comme les roches stériles, et pour les mélanges entre un sol grossier et un sol plus fin.

L'objectif de l'étude présentée dans ce document est d'évaluer le comportement hydrogéologique (i.e. conductivité hydraulique et courbe de rétention d'eau) de matériaux granulaires incluant différents mélanges entre un sable et un gravier et aussi de roches stériles. Les résultats sont comparés aux modèles prédictifs de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman Modifié (KCM) pour k_{sat} et de Kovács Modifié (MK) pour la CRE. L'étude inclut aussi des résultats tirés de la littérature.

L'étude comprend une caractérisation des propriétés de base des matériaux, suivie par une série d'essais en colonne, dont les résultats sont comparés aux modèles prédictifs. La caractérisation vise les propriétés physiques du matériau telle la granulométrie et la densité des grains. Les essais de drainage et perméabilité sont effectués dans des colonnes de grande dimension sur divers matériaux, afin de mesurer la CRE et la conductivité hydraulique.

Les principaux résultats montrent que la conductivité hydraulique saturée des mélanges diminue en fonction du contenu des particules grossières jusqu'à un certain pourcentage (qui varie selon les études). Pour les mélanges sables et gravier testés ici le pourcentage est d'environ 60% gravier (pour atteindre le minimum de k_{sat}) ; ensuite, k_{sat} augmente. La tendance observée pour k_{sat} est aussi observée pour l'indice des vides e . Les modèles de prédiction KC et KCM donnent des résultats assez proches des valeurs mesurées.

Les valeurs de la pression d'entrée d'air, ou « air entry value » (l'AEV), et de la succion résiduelle (obtenus sur la CRE) ont tendance à augmenter entre 0 et 40% gravier ; ensuite les valeurs diminuent en fonction du pourcentage de gravier. Le modèle MK donne des CRE relativement proches aux courbes mesurées au laboratoire. On note toutefois certaines différences notamment au niveau de la succion résiduelle, l'écart entre les valeurs prédites et mesurées pourrait être dû (en partie) au temps de drainage limité dans les essais en colonnes. Aussi, certains matériaux ne suivent pas la tendance du modèle MK, surtout s'il y a une différence marquée entre le diamètre maximal et minimal des grains. L'analyse des nos résultats et de ceux tirés de la littérature ne permettent toutefois pas de tirer des conclusion claires pour corriger le modèle MK.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is produced when sulphuric minerals react with water and oxygen. Understanding water flow in waste rock piles (often rich in sulphuric minerals) is an important element to prevent and/or control AMD problems. The mining industry strongly invests in research studies to avoid AMD effects to the environment. This includes an evaluation to the hydraulic behaviour of rock piles. Normally, water flow in unsaturated media is defined with the hydraulic conductivity (k_{sat}) and with the water retention curve (WRC) which can help in determining the permeability function.

The value of k_{sat} and the WRC can be determined experimentally or estimated with predictive models. Nevertheless, predictive models have shown certain limits for coarse materials, such as waste rock, and for mixtures of coarse and finer soils.

The objective of this Master's project is to evaluate the hydrogeological behaviour (i.e. hydraulic conductivity and water retention curve) of coarse materials, including different mixtures between sand and gravel, and also of waste rock. The results are compared to predictive models: Kozeny-Carman (KC) and Kozeny-Carman Modified (KCM) for k_{sat} and Kovács Modified (MK) for the WRC. This study includes also some results extracted from the literature.

The first step is the characterisation of basic properties. Secondly, column permeability and drainage tests are performed. Thirdly, the results are compared with predictive models. The characterisation defines physical properties of the material, such as grain size curves and density of the grains. The drainage and permeability tests are conducted on large columns filled with different materials, allowing the measure of the WRC and hydraulic conductivity.

The main results show that saturated hydraulic conductivity of the mixed soils decreases with respect to the coarse soil percentage, up to a certain proportion (which varies according to the mixture). For the mixed materials tested here, the percentage

to achieve the minimum k_{sat} is around 60% gravel; beyond this percentage, k_{sat} increases. The trend observed for k_{sat} is also observed for the void ratio value. The prediction models (KC and KCM) give close results to the measured results.

The results of the air entry value (AEV) and the residual suction (obtained from the WRC) have a tendency to increase between 0% to 40% gravel, then, they decrease with respect to the coarse material percentage. The MK model gives relatively close results of the WRC compared to the curves measured in the laboratory. There are nevertheless some differences, especially for the residual suction. The difference between the values predicted and those measured could be due (in part) to the column test procedures. Also, some materials do not follow the trend of MK model, especially if there is a pronounced difference between the maximal and minimal diameter of the grains. The analysis of the project results and of those taken from the literature does not lead to any clear conclusions to correct the model MK.

TABLE DE MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DE MATIÈRES	ix
LISTE DE FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DE SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	xxiv
LISTE DES ANNEXES.....	xxvii
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1. Généralités:	1
1.2. Description du projet et contenu du mémoire	2
CHAPITRE 2. REVUE DE LITERATURE	4
2.1. Généralités	4
2.2. Haldes à stériles	5
2.2.1. Types de matériaux	5
2.2.2. Propriétés de base	5
2.2.3. Modes d'entreposage des roches stériles	9
2.2.4. Ségrégation	11
2.2.5. Drainage Minier Acide (DMA)	13
2.3. Hydrogéologie des roches stériles.....	14
2.3.1. Loi de Darcy	15
2.3.2. Écoulements non saturés	17
2.3.3. Détermination des propriétés hydriques	21
2.3.4. Facteurs d'influence.....	30
CHAPITRE 3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	41
3.1. Matériaux	41
3.2. Méthodes de caractérisation.....	43

3.2.1.	Granulométrie	43
3.2.2.	Mesure de la densité relative.....	43
3.2.3.	Tamissage	45
3.2.4.	Sédimentométrie	47
3.3.	Essais en colonne	49
3.4.	Conductivité hydraulique	54
3.4.1.	Essai à charge constante.....	54
3.4.2.	Essai à charge variable	56
3.5.	Drainage	58
CHAPITRE 4. RÉSULTATS DES ESSAIS		61
4.1.	Caractéristiques physiques de base.	61
4.2.	Mesures de la conductivité hydraulique	67
4.2.1.	Conductivité hydraulique et indice des vides	67
4.2.2.	Conductivité hydraulique et surface spécifique	69
4.2.3.	Conductivité hydraulique prédite et mesurée.....	72
4.3.	Courbes de rétention d'eau (CRE).....	83
4.3.1.	Paramètres du lissage du modèle de Van Genuchten	98
4.3.2.	Paramètres de la CRE analysées selon le modèle MK.....	101
4.3.3.	AEV en fonction de k_{sat}	122
CHAPITRE 5. ANALYSE ET DISCUSSION.....		123
5.1.	Analyse des résultats obtenus	123
5.1.1.	Caractéristiques physiques des matériaux.....	123
5.1.2.	Conductivité hydraulique saturée (k_{sat}).....	126
5.1.3.	La courbe de rétention d'eau (CRE)	130
5.2.	Analyses de résultats additionnels	136
5.2.1.	Présentation des données d'autres études.	136
5.2.2.	Étude de Milczarek et al. (2006).....	137
5.2.3.	Étude de Wickland et al. (2006) sur des mélanges de stériles et résidus miniers.	152

5.2.4.	Étude de Ouangrawa (2007)	162
5.2.5.	Autres mesures sur des roches stériles.	175
5.3.	Sommaire des résultats et remarques complémentaires	188
5.3.1.	Caractéristiques physiques des matériaux	189
5.3.2.	Conductivité hydraulique.....	190
5.3.3.	Courbes de rétention d'eau	192
CHAPITRE 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		194
RÉFÉRENCES		198
ANNEXES		213

LISTE DE FIGURES

Figure 2.1 Courbes granulométriques pour diverses roches stériles identifiées du tableau 2.1 (adaptée de McKeown et al. 2000).....	7
Figure 2.2 Courbes granulométriques générales de divers sols en relation avec leur capacité de drainage (Aubertin et al., 2002).	9
Figure 2.3 Conditions hydrologiques typiques des haldes avec peu de ségrégation (Smith et al., 1995).....	11
Figure 2.4 Conditions hydrologiques typiques des haldes avec ségrégation marquée (Smith et al., 1995).....	12
Figure 2.5 Étapes de la formation de DMA (dessin adapté de Kleinman et al. 1981, tiré de Aubertin et al., 2002)	13
Figure 2.6 Volume élémentaire du sol (figure d'après Hillel, 1980; adaptée de Bussière 1999)	16
Figure 2.7 Zonage selon le degré de saturation dans un sol uniforme.....	17
Figure 2.8 Représentation graphique de la conductivité hydraulique en fonction de la succion (tirée de Aubertin et al. 1995)	19
Figure 2.9 Représentation graphique de la CRE avec la succion résiduelle (ψ_r) et le AEV ($\equiv \psi_a$) (Aubertin et al. 1995)	21
Figure 2.10 Variation de la porosité en fonction du pourcentage des particules grossières pour des mélanges bimodaux (Wickland et al., 2005).....	34
Figure 2.11 Évolution de la valeur de la porosité en fonction du pourcentage de gravier pour des mélanges (tiré de Morin et al, 2004, 2006); $\Phi \equiv n$ (porosité)	35
Figure 2.12 Valeurs de k_{sat} pour divers mélanges de sable et gravier (Milczarek et al. 2006)	37
Figure 2.13 Courbes de rétention d'eau (CRE) pour différents mélanges de sols fins et grossiers (figure tirée de Yazdani et al. 2000)	38

Figure 2.14 Courbes de rétention d'eau des mélanges étudiés par Milczarek et al. (2005).....	39
Figure 2.15 Courbes de rétention d'eau pour résidus et un mélange entre résidus (1) et roche à stérile (4.4) (Wickland et al, 2006).	40
Figure 3.1 Trois courbes granulométriques cumulatives standards types représentant différents sols (Holtz et Kovacs, 1991).....	46
Figure 3.2 Montage pour l'essai de conductivité hydraulique à charge constante dans une colonne.....	55
Figure 3.3 Montage utilisé pour un essai de conductivité hydraulique à charge variable dans une colonne.....	57
Figure 3.4 Exemple d'un graphique du volume drainé en fonction du temps (obtenu pour le sol SD ₀).....	60
Figure 4.1 Courbes granulométriques des divers sols des groupes 1(a), 2(b) et 3(c).....	63
Figure 4.2 Valeurs de l'indice des vides moyen en fonction du pourcentage de gravier (résultats au montage et après démontage).....	66
Figure 4.3 Valeurs de la surface spécifique calculées avec les modèles de KC, KCM et MK pour chaque groupe de sols.	70
Figure 4.4 Valeurs de la surface spécifique des sols du groupe 2 calculées avec les modèles KC, KCM et MK, sans les données de la sédimentométrie.	71
Figure 4.5 Conductivité hydraulique mesurée et prédite avec les modèles Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman Modifié (KCM); essais à charge variable.....	73
Figure 4.6 Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne entre résultats à charge variable et constante) en fonction de k_{sat} prédite par les modèles KC et KCM.....	74
Figure 4.7 Valeurs de la conductivité hydraulique expérimentale et prédite (avec les modèles KC et KCM) selon le pourcentage de gravier pour les groupes 1(a), 2(b) et 3 (c).	76

Figure 4.8 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KCM en fonction de l'indice des vides (avec $C=981$).	77
Figure 4.9 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KC en fonction de l'indice des vides (avec $C = 196$)	79
Figure 4.10 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et selon le modèle KCM, en fonction du coefficient d'uniformité.	81
Figure 4.11 Conductivité hydraulique normalisée en fonction du D_{10} obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KCM.....	82
Figure 4.12 Illustration de la méthode graphique pour l'obtention des paramètres selon l'intersection des lignes.....	83
Figure 4.13 Courbes de rétention d'eau du matériau SD_0	88
Figure 4.14 Courbes de rétention d'eau du sol SD_7	88
Figure 4.15 Valeurs observées sur le sable Demers pour les colonnes montées par Pedneault (2007, mémoire de maîtrise) et par l'auteure.	89
Figure 4.16 Courbes de rétention d'eau du sol $SD80-G20$	90
Figure 4. 17 Courbes de rétention d'eau du sol $SD60-G40$	91
Figure 4.18 Courbes de rétention d'eau du sol $SD40-G60$	92
Figure 4.19 Courbes de rétention d'eau du sol $SD20-G80$	92
Figure 4.20 Courbes de rétention d'eau du sol G_3	93
Figure 4.21 Courbes de rétention d'eau du sol GMT_3	94
Figure 4.22 Courbes de rétention d'eau du sol GMP_3	95
Figure 4.23 Courbes de rétention d'eau du sol $SD50-GMP50$	95
Figure 4.24 Comparaison des valeurs mesurées pour construire la CRE pour les sols $S40-G60$, $SD50-GMP50$ et $SD60-G40$	96
Figure 4.25 Courbes de rétention d'eau du sol SOT	96
Figure 4.26 Courbes de rétention d'eau du sol SOA	97

Figure 4.27 Valeurs de l'AEV en fonction du pourcentage de gravier pour les trois groupes de sol étudiés. Les valeurs sont obtenues suite au issage avec le modèle de van Genuchten (1980) avec RETC et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa.....	99
Figure 4.28 Valeurs de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage gravier pour chaque groupe de sol étudié. Les valeurs sont obtenues par méthode graphique sur la courbe lissée avec RETC et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa.	100
Figure 4.29 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₀	103
Figure 4.30 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₇	105
Figure 4.31 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₈₀ -G ₂₀	106
Figure 4.32 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₆₀ -G ₄₀	107
Figure 4.33 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₄₀ -G ₆₀	108
Figure 4.34 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₂₀ -G ₈₀	110
Figure 4.35 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol G ₃	111
Figure 4.36 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol GMT ₃	112
Figure 4.37 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol GMP ₃	113
Figure 4.38 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD ₅₀ -GMP ₅₀	115

Figure 4.39 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial pour le sol SOT	116
Figure 4.40 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial pour sol SOA.....	116
Figure 4.41 Valeurs de l'AEV obtenues selon le modèle MK calculé (Éqn. 2.26) et par méthode graphique (valeurs initiales et ajustés) en fonction du pourcentage de gravier total dans le mélange.	118
Figure 4.42 Valeurs de l'AEV obtenues selon le lissage van Genuchten (1980, avec RETC) et selon MK (ajusté et non ajusté) par méthode graphique.	119
Figure 4.43 Valeurs de la succion résiduelle obtenues avec les modèles MK, MK ajusté et van Genuchten (1980) par méthode graphique et selon l'équation 2.26 en fonction du pourcentage de gravier.....	120
Figure 4.44 Valeurs de la succion résiduelle prédite avec MK et MK ajusté en fonction des valeurs mesurées (lissées van Genuchten 1980) pour chaque groupe de sol.	121
Figure 4.45 Valeurs de l'AEV selon van Genuchten (1980) avec le logiciel RETC par méthode graphique en fonction de k_{sat} mesuré au laboratoire (moyenne) et k_{sat} calculée selon Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM).	122
Figure 5.1 Indice des vides en fonction du pourcentage de retenu au tamis 5 mm pour les sols du groupe 2.	125
Figure 5.2 Conductivité hydraulique en fonction du pourcentage retenu au tamis 5 mm les sols étudiés du groupe 2.	128
Figure 5.3 Valeurs du paramètre m (de base et ajusté) du modèle MK en fonction du coefficient d'uniformité C_U pour les groupes 1 et 2.	133
Figure 5.4 Rapport entre la valeur de m ajusté sur m de base (modèle MK) en fonction du coefficient d'uniformité C_U pour les groupes 1 et 2.	134
Figure 5.5 Rapport m ajusté/ m prédit (modèle MK) en fonction du coefficient de courbure C_C pour chaque groupe de sols.	135

Figure 5.6 Rapport m ajusté/ m prédit (modèle MK) en fonction du coefficient de courbure C_C et coefficient d'uniformité C_U .	136
Figure 5.7 Courbes granulométriques des mélanges étudiés par Milczarek et al. (2006).	138
Figure 5.8 Indice des vides en fonction du pourcentage gravier (données tirées de Milczarek et al. 2006).	139
Figure 5.9 Surfaces spécifiques calculés selon les modèles KCM (a) et MK (b) en fonction de celle découlant du modèle KC (données tirées de Milczarek et al. 2006)	140
Figure 5.10 Valeurs de k_{sat} prédite avec les modèles KC (a) et KCM (b) en fonction de la valeur de k_{sat} mesurée (donnés tirées de Milczarek et al. 2006)	141
Figure 5.11 Valeurs de k_{sat} (mesurées et prédites) en fonction du pourcentage gravier (données tirées de Milczarek et al. 2006)	142
Figure 5.12 CRE expérimentales pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006); CRE lissées selon le code RETC (van Genuchten et al. 1991), et les courbes prédites selon le modèle MK.	145
Figure 5.13 Données expérimentales et CRE lissées selon van Genuchten (1980) et selon MK (ajusté) pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).	147
Figure 5.14 Valeurs du AEV obtenues selon les résultats expérimentaux (lissées selon van Genuchten (1980), selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté, pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).	148
Figure 5.15 Valeurs de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage gravier selon les résultats expérimentaux, selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006)	149
Figure 5.16 Valeurs de la teneur en eau résiduelle (θ_r) en fonction du pourcentage gravier selon les résultats expérimentaux, selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006)	150

Figure 5.17 Valeurs du paramètre a_c ajusté/ a_c prédit (modèle MK) en fonction du C_U (a) et du C_C (b) pour les sols étudiées par Milczarek et al. (2006)	151
Figure 5.18 Valeurs du m ajusté/ m prédit en fonction du C_U (a) et en fonction du C_C (b) pour les sols étudiées par Milczarek et al. (2006).....	152
Figure 5.19 Dimensions et proportion des mélanges tel que conçus pour les essais en colonne de Wickland (2006).....	154
Figure 5.20 Granulométries du résidu, de la roche stérile et du mélange à proportion 4.4:1 (colonne 1 et celle préparée au laboratoire) selon l'étude de Wickland et al. (2006).....	155
Figure 5.21 Courbes granulométriques de résidus miniers, le mélange de la colonne 1, la roche stérile et la roche stérile « <i>Black Sedimentary</i> ». Tirées de Wickland (2006).....	156
Figure 5.22 Indice des vides mesurés lors de l'essai de consolidation au laboratoire pour la roche stérile, le résidus et le mélange à proportion 4.4 :1 de roche stérile et résidus.	158
Figure 5.23 Conductivité Hydraulique en fonction des proportions de roche stérile à résidus minier. Tirées de Wickland (2006).	160
Figure 5.24 CRE pour les résidus, la roche stérile et le mélange 4.4:1 des roches stériles et résidus (données de Wickland et al. 2006).	161
Figure 5.25 Courbes granulométriques des résidus miniers et des mélanges (Ouangrawa, 2007).	163
Figure 5.26 Valeurs de l'indice des vides en fonction du pourcentage de particules grossières (données de Ouangrawa, 2007).....	164
Figure 5.27 Surface spécifique calculée selon les modèles KCM, MK et KC (données tirées de Ouangrawa 2007).....	165
Figure 5.28 Valeurs de k_{sat} prédites et mesurées (données de Ouangrawa 2007).....	166
Figure 5.29 Conductivité hydraulique en fonction de la proportion de particules retenues au tamis 0.08 mm (données de Ouangrawa 2007).....	167

Figure 5.30 CRE expérimentales, lissées avec le modèle van Genuchten (1980) et prédites selon MK (données tirées de Ouangrawa 2007).....	169
Figure 5.31 CRE expérimentales, lissées avec van Genuchten (1980) et obtenues avec MK selon des paramètres ajustés (données de Ouangrawa, 2007).....	171
Figure 5.32 Valeurs de l'AEV (a) et de ψ_r (b) en fonction de la proportion des particules grossières (≥ 0.08 mm) (données de Ouangrawa 2007).	172
Figure 5.33 Valeurs de a_c ajusté/ a_c prédit en fonction de C_U (a) et de C_C (b).	173
Figure 5.34 Valeurs du paramètre m ajusté en fonction du C_U (a), du rapport m ajusté/ m prédit en fonction de C_U (b) et du rapport m ajusté/m prédit en fonction du C_C (c).....	174
Figure 5.35 Granulométrie des matériaux servant à l'étude sur la roche stérile.	176
Figure 5.36 Indice des vides en fonction du pourcentage retenu au tamis 5 mm.	177
Figure 5.37 Surface spécifique selon les modèles KC et KCM (a) et KC et MK (b) pour la roche stérile.	178
Figure 5.38 Valeurs de k_{sat} prédites par KC (a) et KCM (b) en fonction de k_{sat} mesurée (charge constante et variable) pour l'étude sur la roche stérile.	180
Figure 5.39 Valeurs de k_{sat} mesurées et prédites en fonction du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm pour l'étude sur la roche stérile.	181
Figure 5.40 CRE expérimentales, lissées (van Genuchten, 1980) selon RETC et prédites selon MK pour les matériaux LARON-56 (a), LARON-28 (b) et LARON-20 (c).	183
Figure 5.41 CRE obtenues avec MK ajusté (paramètres m et a_c), et valeurs expérimentales et lissées selon van Genuchten (1980 selon RETC) pour les matériaux LARON-56 (a), LARON-28 (b) et LARON-20 (c).	184
Figure 5.42 Relation entre l'AEV (a) et ψ_r (b) et le pourcentage retenu sur le tamis 5 mm pour les roches stériles	185
Figure 5.42 Valeurs du paramètre m en fonction de C_U (a); m ajusté/m prédit en fonction de C_U (b); m ajusté/m prédit en fonction de C_C (c) pour la de roche stérile.	187

Figure 5.43 Valeurs du paramètre a_c ajusté/ a_c prédit en fonction du C_U (a) et C_C (b) pour la roche stérile.	188
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Compilation de données d'échantillonnage pour différents sites miniers (adapté de McKeown et al. 2000).....	6
Tableau 2.2	Compilation des valeurs du coefficient d'uniformité (C_U) et du coefficient de courbure (C_C) pour les roches stériles du tableau 2.1 (adaptées de McKeown et al. 2000).....	8
Tableau 3.1	Nom et description de chaque matériau utilisé.....	41
Tableau 3.2	Valeurs des hauteurs de la sortie pour la mesure du débit des diverses colonnes.	42
Tableau 3.3	Hauteur et diamètre des colonnes.	50
Tableau 3.4	Protocole pour le montage et le démontage des colonnes pour la mesure de la CRE (1e partie).....	50
Tableau 3.5	Vérification du degré de saturation selon la méthode des masses et des volumes pour les essais en colonne (inspiré de Chapuis et al. 2006).....	53
Tableau 3.6	Temps (heures) requis pour atteindre le régime quasi-permanent pendant l'essai de drainage des colonnes.....	59
Tableau 4.1	Propriétés de base des matériaux analysés.....	62
Tableau 4.2	Propriétés des sols dans les colonnes.....	65
Tableau 4.3	Valeurs de la conductivité hydraulique mesurée expérimentalement au laboratoire et valeurs de l'indice des vides et porosité au démontage.....	68
Tableau 4.4	Valeurs de la conductivité hydraulique prédite et valeurs de la surface spécifique selon les deux modèles de prédiction.....	69
Tableau 4.5	Rappel des termes, symboles et modèles utilisés pour les CRE.	84
Tableau 4.6	Paramètres de la CRE (ψ_a , ψ_r et n_v) déduites de la courbe ajustée avec RETC (van Genuchten et al. 1991).....	85
Tableau 4.7	Paramètres de la CRE (ψ_a , ψ_r et n_v) du modèle de van Genuchten (1980) déduits à l'aide des feuilles de calcul développées par Mbonimpa (2003).	86

Tableau 4.8 Résultats obtenus pour les paramètres de la CRE selon le modèle MK (voir texte pour explications).....	102
Tableau 5.1 Valeurs de D_{10} , D_{60} et porosité (n) utilisées pour prédire la CRE avec le modèle MK (données tirées de Milczarek et al. 2006); d'autres paramètres sont aussi inclus dans le tableau.	143
Tableau 5.2 Valeurs de la porosité n et des paramètres a_c , m pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).....	146
Tableau 5.3 Liste des mélanges et des types d'essais menés par Wickland (2006).....	157
Tableau 5.4 Valeurs de l'indice des vides pour le résidu, la roche stérile et la mélange à proportion 4.4 :1 (de la colonne 1).	157
Tableau 5.5 Valeurs de la conductivité hydraulique en fonction de la pression (pré consolidation) pour le résidus et le mélange 4.4:1. Tirées de Wickland (2006).....	159
Tableau 5.6 Valeurs de la conductivité hydraulique pour les colonnes à grande échelle. (Tirées de Wickland, 2006)	159
Tableau 5.7 Valeurs des caractéristiques granulométriques des matériaux pour les données de Ouangrawa (2007)	163
Tableau 5.8 Valeurs de S_s selon modèles KC, KCM et MK	165
Tableau 5.9 Valeurs des paramètres des modèles van Genuchten (1980 selon RETC) (a) et MK (méthode graphique sur CRE prédites) (b). Données de Ouangrawa (2007)	168
Tableau 5.10 Valeurs des paramètres ajustés du modèle MK. Données de Ouangrawa (2007)	170
Tableau 5.11 Identification des matériaux (Roches stériles à granulométrie tronquée).	175
Tableau 5.12 Valeurs de S_s obtenus selon KC, KCM et MK pour le rejet de LaRonde	178

Tableau 5.13 Valeurs de k_{sat} selon les modèles KC, KCM et mesurées au laboratoire (essais sur stériles de Laronde).....	179
Tableau 5.14 Valeurs des paramètres des CRE déterminées selon le modèle de van Genuchten (1980 - courbes lissée avec les modèles de RETC) (a) et pour le modèle de prédiction MK initial et ajusté (méthode graphique des tangentes)	182

LISTE DE SYMBOLES ET ABREVIATIONS

A	Aire [L^2]
a	Indice pour designer la phase gazeuse (air)
a_c	Coefficient d'adhésion (modèle MK)
AEV	Pression d'entrée d'air « air entry value » [$ML^{-1}T^2$]
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Paramètre d'ajustement du modèle de Kovacs Modifié (Aubertin <i>et al.</i> 2003)
C_c	Coefficient de courbure
C_G	Constante adimensionnelle du modèle de Kozeny-Carman modifié
C_u	Coefficient d'uniformité
d_{eq}	Diamètre équivalent des pores
D_H	Diamètre effectif équivalent des grains [L]
D_i	Diamètre des différentes fractions granulométriques [L]
DMA	Drainage minier acide
D_r	Densité relative des grains [--]
e	Indice des vides
g	Accélération de la pesanteur [LT^{-2}]
H	Charge hydraulique [L]
h_{co}	Hauteur de la remontée capillaire [L]
h	Niveau de la nappe; charge hydraulique [L]
i	Gradient hydraulique
q	Débit spécifique [LT^{-1}]
k, k_i	Conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité($i=x,y,z$) [LT^{-1}]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [LT^{-1}]
KCM	Kozeny Carman Modifié
L	Longueur [L]

m	Paramètre de distribution des pores dans le modèle de Kovács Modifié [--]
m_v	Paramètre du modèle de van Genuchten ($m_v = 1 - 1/n_v$)
MK	Modèle de Kovács Modifié (Aubertin et al., 2003)
M_s	Masse des solides
n	Porosité
n_v	Paramètre de lissage du modèle van Genuchten [--]
p_a	Pression de l'air [$ML^{-1}T^{-2}$]
P_{atm}	Pression atmosphérique [$ML^{-1}T^{-2}$] (101325 Pa)
p_w	Pression de l'eau [$ML^{-1}T^{-2}$]
q	Débit [L^3T^{-1}]
S_a	Degré de saturation associé à l'eau retenue par adhésion
S_c	Degré de saturation associé à l'eau retenue par capillarité
S_r	Degré de saturation
S_s	Surface Spécifique [L^2M^{-1}]
t	Temps [T]
u	Pression [$ML^{-1}T^{-2}$]
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Abitibi-Témiscamingue
v	Vitesse [LT^{-1}]
V	Volume [L^3]
V_w	Volume d'eau [L^3]
V_s	Volume de solide [L^3]
V_t	Volume total [L^3]
x	Distance ou coordonnée sur l'axe nord-sud [L]
y	Coordonnée sur l'axe est-ouest [L]
z	Élévation [L]

α	Coefficient de forme, modèle de Kovacs Modifié (Aubertin et al. 2003)
α_v	Paramètre du modèle van Genuchten [--]
γ	Masse volumique [ML^{-3}]
ρ_{eau}	Densité de l'eau [ML^{-3}]
ρ_s	Densité du sol [ML^{-3}]
μ	Viscosité dynamique [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]
θ	Teneur en eau volumétrique
ψ	Succion matricielle [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]
ψ_r	Succion résiduelle [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]
--	Résultat non disponible

LISTE DES ANNEXES

Annexes sur CD

ANNEXE 1 – Débit en fonction du temps

ANNEXE 2 – Porosité Moyenne

ANNEXE 3 – Courbes de rétention d'eau

ANNEXE 4 – Données de Milczarek et al. (2006)

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1.1. Généralités:

L'industrie minière est génératrice d'emplois et contribue de façon importante à l'activité économique du Québec et du Canada. Ses activités peuvent aussi perturber l'environnement de façon significative. Pour contrôler efficacement ses effets sur l'environnement, l'industrie investit largement sur de nouvelles technologies. Les recherches pour une meilleure compréhension des phénomènes à la source de la contamination permettent le développement de meilleures méthodes de gestion des rejets.

La gestion des rejets miniers représente toutefois une problématique complexe. Les rejets d'intérêt ici sont constitués de roches sans aucune valeur économique qui sont extraites du sous-sol. Ces roches stériles doivent être extraites et manipulées pour atteindre le minerai. Elles sont quelque fois renvoyées sous terre dans les chantiers désaffectés ou, plus fréquemment, déposées en surface dans des empilements appelés « haldes à stériles. »

Si les roches stériles contiennent des minéraux sulfureux, elles peuvent générer du drainage miner acide (DMA) lorsqu'elles sont en contact avec l'eau et l'air. Le DMA résulte de l'oxydation des minéraux sulfureux, ce qui produit une altération de l'eau qui comprend notamment une diminution du pH. Cette réaction peut-être néfaste pour la faune, la flore et l'esthétique du milieu. L'industrie minière consacre des ressources importantes pour contrôler le DMA. Ceci inclut des études afin de mieux comprendre les mécanismes d'échanges à l'intérieur des haldes à stériles. Un des défis à cet égard est la caractérisation de la roche stérile afin d'obtenir ses propriétés hydriques. Ces propriétés sont requises pour bien représenter le comportement de l'eau (et de l'air) dans une halde (e.g. Fala et al. 2003, 2005).

Cette caractérisation peut se faire au laboratoire ou sur le terrain. Les mesures peuvent aussi être comparées aux résultats de modèles prédictifs afin de les valider ou pour améliorer la qualité des modèles qui prédisent les propriétés hydriques. Les éléments sont à la base de ce mémoire.

1.2. Description du projet et contenu du mémoire

La production et la migration du DMA sont influencées par le contenu en eau, en oxygène et en particules sulfureuses dans les solides. Pour analyser le comportement de l'eau dans des haldes stériles, on étudie leur courbe de rétention d'eau et leur fonction de perméabilité. L'hypothèse de recherche veut que l'on puisse obtenir les courbes de rétention d'eau et la conductivité hydraulique avec des modèles de prédiction pour les mélanges et les sols grossiers (telles les roches stériles).

Les principaux objectifs de cette recherche sont :

- a) Étudier les propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée.
- b) Analyser le comportement hydrique de mélanges comportant différents pourcentages de particules grossières (gravier ou sable).
- c) Comparer les résultats obtenus au laboratoire avec les modèles prédictifs de la conductivité hydraulique (Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman Modifié (KCM)) et de la courbe de rétention d'eau CRE (Kovács Modifié (MK)).

Les résultats de l'étude comprennent des essais en colonnes sur divers mélange de matériaux. Les résultats des essais de perméabilité et de drainage sont montrés pour chaque matériau. Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée sont comparées à celles calculées selon les deux modèles de prédiction (Mbonimpa et al. 2002; Chapuis et Aubertin, 2003). Les courbes de rétention d'eau mesurées sont aussi analysées selon deux modèles soit les modèles de van Genuchten (1980) et MK (Aubertin et al. 2003).

L'étude expérimentale inclut trois groupes de sols. Le premier groupe comporte six mélanges à différents pourcentages (20%, 40%, 60% et 80%) de gravier ajouté à un sable. Le deuxième groupe introduit un gravier plus grossier au sable du groupe 1. Le troisième groupe est formé d'un sable grossier uniquement (sans mélange).

Différentes analyses ont été menées sur chaque matériau, incluant leur granulométrie et la sédimentométrie et de la densité relative. Ces essais donnent les paramètres requis pour le calcul prédictif de la conductivité hydraulique, de la surface spécifique et de la CRE (selon les 3 modèles prédictifs précités). Les essais en colonnes ont permis de mesurer l'indice des vides, la conductivité hydraulique, et la CRE pour chaque matériau. Les résultats présentés ici montrent qu'en général, les modèles prédictifs représentent assez bien les propriétés des matériaux fins, mais ils semblent moins valables lorsque le pourcentage de gravier augmente.

Le mémoire commence avec une courte introduction (chapitre 1), ensuite une revue de la littérature (chapitre 2) qui présente la problématique et un sommaire des connaissances disponibles à ce jour. On poursuit (chapitre 3) avec une description des procédures liées au protocole expérimental des essais en laboratoire. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus au laboratoire, incluant les principales caractéristiques des matériaux. Suit (chapitre 5) une analyse et une discussion des résultats, où l'on compare les données expérimentales (obtenues ici ou tirées d'autres études) avec les modèles de prédiction. Enfin, on complète avec la conclusion et quelques suggestions pour des travaux à futurs.

CHAPITRE 2. REVUE DE LITERATURE

2.1. Généralités

Les rejets miniers peuvent se diviser en trois catégories, soient les rejets solides, liquides et gazeux. Une grande partie des rejets générés par les exploitations minières de roches dures sont des solides sous forme de roches concassées. Une bonne gestion de ces rejets solides est importante pour l'environnement, mais elle peut s'avérer difficile, surtout à cause du grand volume de rejets et des risques des ouvrages de retenue (Aubertin et al., 2000).

Les rejets solides issus directement de l'exploitation de la mine sont appelés roches stériles. Souvent, les roches stériles sont entreposées en surface dans des empilements, appelés haldes à stériles. Ces haldes peuvent s'élever à plusieurs dizaines de mètres et recouvrir des dizaines d'hectares. Connaître et comprendre les caractéristiques des roches stériles permet une meilleure sélection de la configuration géométrique des empilements, ce qui aide à la stabilité physique et chimique des rejets (Martin, 2003).

Les caractéristiques physiques des roches stériles jouent un rôle important sur le comportement hydro-géotechnique et géochimique des haldes. La granulométrie, la densité des solides, l'indice des vides, l'angle naturel de dépôt, la résistance mécanique et le volume à disposer sont des caractéristiques qu'il faut connaître pour définir la meilleure méthode de construction et la géométrie appropriée.

A part la problématique de la stabilité, les haldes à stériles peuvent engendrer des problèmes environnementaux lors de l'entreposage, surtout à cause de la génération du drainage minier acide (DMA) suite à l'oxydation des minéraux sulfureux. Il faut donc comprendre les conditions d'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles pour contrôler les problématiques qu'elles entraînent (Andrina et al., 2006).

2.2. Haldes à stériles

Les problématiques les plus importantes à contrôler pour l'entreposage des roches stériles sont la stabilité de l'ouvrage et la génération des eaux contaminées. Il est important de connaître et comprendre les types de matériaux et leurs propriétés pour pouvoir contrôler et prévenir les problématiques géotechniques et géochimiques de la halde.

2.2.1. Types de matériaux

Les principaux rejets solides produits par les exploitations minières sont :

- Les sols de surface (mort-terrain);
- les roches stériles (extraites lors des opérations minières);
- les rejets du concentrateur (sous forme de pulpe après l'extraction du minerai).

Pour les fins de cette recherche, seules les roches stériles seront décrites ici.

Les roches stériles sont composées surtout de fragments de roche avec une granulométrie assez grossière. Ils sont entreposés soit en surface (haldes) ou sous forme de remblayage souterrain (Aubertin et al. 2002).

Certains rejets solides produits par les mines en roches dures contiennent des minéraux sulfureux réactifs. Leur granulométrie grossière engendre une forte perméabilité. Leur entreposage en surface favorise leur exposition à l'air et à l'eau. Dans ce cas, les rejets miniers réactifs sont potentiellement générateurs de drainage minier acide (DMA). Ce phénomène sera décrit plus loin (section 2.2.5). Cette problématique est très sérieuse et connue mondialement pour les conséquences néfastes à l'environnement.

2.2.2. Propriétés de base

Les roches stériles sont des matériaux à granulométrie étalée, contenant des matériaux de très grande taille (environ 1 m ou plus) jusqu'à des particules fines, inférieures à 0.08 mm. Leur granulométrie est très variable et leurs propriétés physiques aussi. Par exemple, la densité des grains solides (D_r) peut varier de 2.4 à 6 ou même plus.

L'indice des vides se situe typiquement entre 0.6 à 0.9. L'angle de friction interne (ϕ) est élevé, entre 33 à 41 degrés. Les caractéristiques requises pour analyser le mouvement de l'eau au sein de la halde sont définies brièvement dans ce qui suit (Mbonimpa et al., 2000; Aubertin et al., 2002).

▪ *Granulométrie*

Des études sur la granulométrie de diverses roches stériles, pour différents sites miniers, ont été présentées par McKeown et al. (2000). Certains résultats sont reproduits au tableau 2.1. On y retrouve le site avec le nombre et la grosseur des échantillons.

Tableau 2.1 Compilation de données d'échantillonnage pour différents sites miniers (adapté de McKeown et al. 2000)

Site minier	Nombre et taille des échantillons	Lieu de l'échantillonnage
Cluff Lake	19 échantillons entre 0.07 et 0.17 m ³	En surface de la halde
Golden Sunlight	242 échantillons pour un total de 2100 kg	À différentes profondeurs dans la halde
Kidston Gold	4 échantillons entre 7 et 11 kg	À la base et en surface de la halde
Myra Falls	3 échantillons entre 0.003 et 0.02 m ³	À une profondeur de 1,5m de la surface redessinée de la halde
Mt. Whale Back	27 échantillons entre 0.1 et 0.17 m ³	En surface de la halde
Equity Silver	3 échantillons entre 0.01 et 0.17 m ³	En surface de la halde

La distribution granulométrique pour les roches stériles identifiées au tableau 2.1 est montrée à la figure 2.1. Les courbes montrent certaines tendances. Par exemple, plusieurs roches stériles ont un pourcentage élevé en matériaux grossiers, avec une longue queue de matériaux fins.

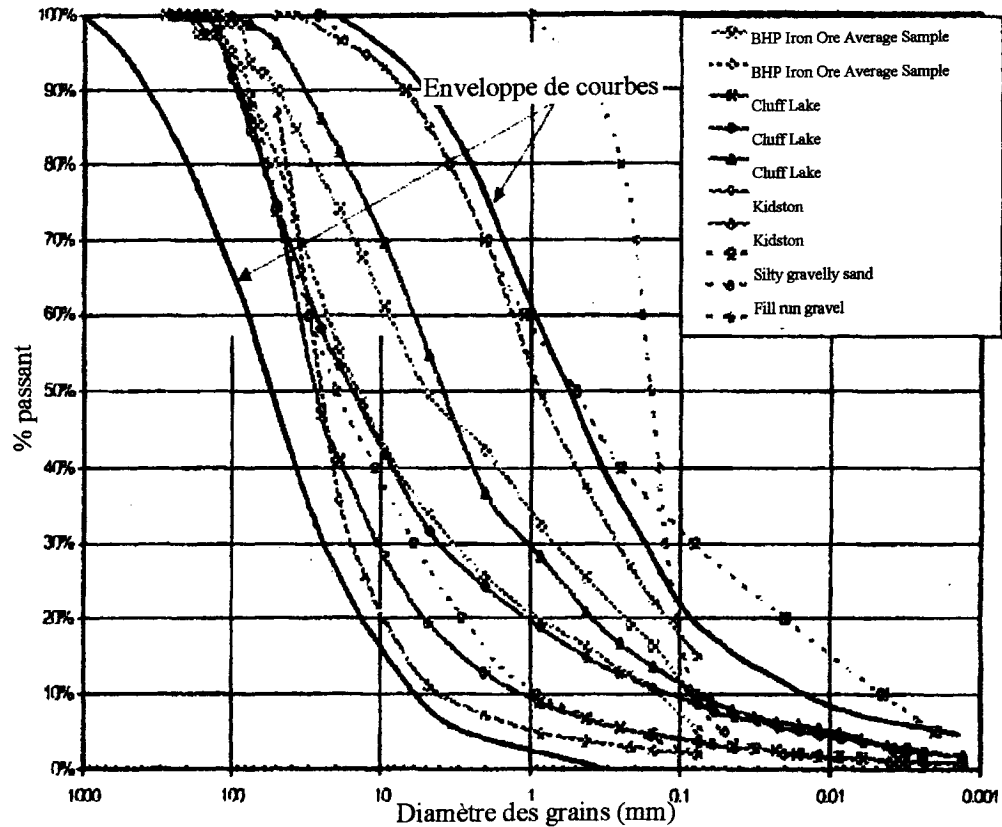


Figure 2.1 Courbes granulométriques pour diverses roches stériles identifiées du tableau 2.1 (adaptée de McKeown et al. 2000)

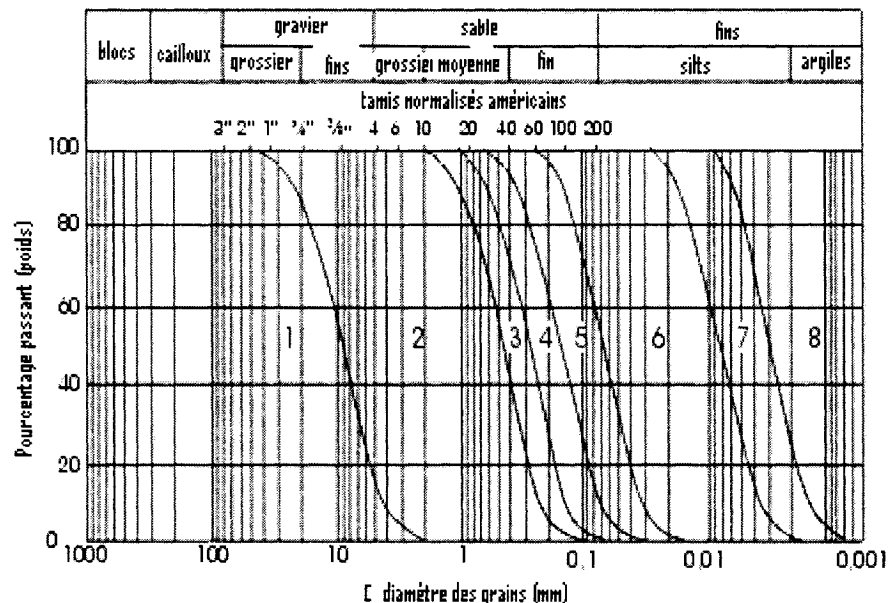
L'étude réalisée par McKeown et al. (2000) mentionne que, pour les sites utilisés pour l'étude (minéraux de métaux de base), la distribution granulométrique était étalée, comme le montrent les valeurs de C_U (le coefficient d'uniformité $C_U \equiv D_{60}/D_{10}$ où $D_i \equiv$ le diamètre des particules qui représentent le pourcentage i du matériau passant) et C_C (le coefficient de courbure $C_C = D_{30}^2/D_{60}D_{10}$) montrées au tableau 2.2. Cependant, la taille des matériaux les plus grossiers n'était pas présentée dans l'étude. La figure 2.1 montre que la taille des matériaux les plus grossiers se trouve entre 10 et 100 cm de diamètre.

Tableau 2.2 Compilation des valeurs du coefficient d'uniformité (C_u) et du coefficient de courbure (C_c) pour les roches stériles du tableau 2.1 (adaptées de McKeown et al. 2000)

Localisation	Minerai	C_u	C_c	Références
Mine Doyon, halde sud	Or	70,9	1,5	Lefebvre (1994)
Heath Steel	Cu, Zn, Ag	32,9	1,2	Li (2000)
Golden sunlight	Or	11 à 36,4	1,1 à 2	Herasymuik (1996)
Kidston Gold	Or	7,9 à 610	1,2 à 4,1	Barbour et al. (2001)
Cluff Lake	Uranium	32 à 369,6	2,2 à 7,1	Barbour et al. (2001)
BHP Iron Ore	Fer	46,4 à 176,9	0,9 à 3,2	Barbour et al. (2001)

La courbe granulométrique de chaque matériau aide à connaître ses caractéristiques hydriques. Par exemple, la figure 2.2 montre les caractéristiques hydriques types selon leur fuseau granulométrique. Selon les données de McKeown et al. (2000), les roches stériles se retrouvent dans les zones 1 et 2 de la figure 2.2, sauf pour ce qui est de la quantité de particules fines. Ces deux zones se caractérisent par une vitesse d'écoulement rapide.

Les caractéristiques hydriques des rejets grossiers sont en grande partie influencées par la granulométrie de la halde. Les roches stériles contiennent habituellement une assez forte proportion de particules fines, qui affectent leurs propriétés hydrauliques (Wilson et al. 2006). La granulométrie peut cependant varier grandement d'une halde à une autre.



Zone 1: Drainage difficile à cause du débit abondant. Coupures, remplissage des vides et ouvertures utiles.

Zone 2: Parfait pour drains ouverts, puits par gravité. Débit abondant.

Zone 3: Bonnes conditions pour drains ouverts et pour puits

Zone 4: Conditions bonnes à moyennes pour drains ouverts. Ensemblement des puits et pompage utiles. Érosion dans les grains ouverts.

Zone 5: Drainage par gravité lent et érosion forte. Ensemblement des puits et pompage nécessaire.

Zone 6: Drainage par gravité impossible sauf dans les fissures. Pompage habituellement efficace.

Zone 7: Puits ensablés: pompage parfois réussi. Meilleur drainage par électro-osmose.

Zone 8: Drainage par consolidation, accéléré par des ouvertures sablonneuses et des drains verticaux pour le sable.

Figure 2.2 Courbes granulométriques générales de divers sols en relation avec leur capacité de drainage (Aubertin et al., 2002).

2.2.3. Modes d'entreposage des roches stériles

Il existe quatre méthodes principales pour construire des haldes à stériles (Aubertin et al., 2002; Fala, 2002; Martin 2004). Le choix de la méthode dépend de la topographie du site, des dimensions de la halde, des équipements disponibles, ainsi que des caractéristiques physiques et chimiques du matériau (Barbour et al., 2001). Ces méthodes sont décrites dans ce qui suit.

- *Déversement à la benne (end-dumping)*

Avec cette méthode de mise en place, les roches à stériles sont déversées directement le long de la crête de la halde à partir du camion à benne, ce qui engendre une ségrégation du matériau. Les particules fines restent généralement accumulées en haut de la pente alors qu'une grande portion des particules grossières se retrouve plutôt au pied de la pente. La granulométrie au milieu (entre le haut et le pied) de la pente serait relativement uniforme. La ségrégation devient plus marquée lorsque la hauteur de halde est grande.

- *Déversement avec épandage au butoir (push-dumping)*

Les stériles sont déposés près de la crête et ensuite, ils sont poussés du haut de la pente à l'aide d'un tracteur à butoir (*dozer*). Cette méthode transmet moins d'énergie aux particules grossières (comparativement à la méthode précédente), pour les envoyer au pied de la halde. Seulement environ 40% des particules grossières se retrouvent au pied de la pente avec cette méthode. Les particules fines, en haut de la pente, se trouvent souvent mélangées avec les particules grossières.

- *Déversement à la benne avec régalage (free-dumping)*

Les stériles sont déposés par camion sur la surface de la halde, en petits empilements individuels d'environ 2 m de hauteur. La surface de ces empilements est régalée et compactée par la machinerie. La ségrégation est très faible avec cette méthode. Le matériau devient plus dense en comparaison des deux premières méthodes.

- *Déversement par pelle à la benne traînante (drag-line)*

Cette méthode est souvent utilisée dans les mines de charbon et les grandes mines à ciel ouvert. La pelle transporte et dépose les stériles sur l'empilement. Habituellement, quand cette méthode est utilisée, les stériles ont une granulométrie uniforme dans la halde. La densité des matériaux est plus faible qu'avec le déversement à la benne avec régalage.

2.2.4. Ségrégation

Selon la méthode d'entreposage utilisée, on peut identifier deux types de haldes, avec ségrégation ou sans ségrégation marquée (Morin et Hutt, 2000; Barbour et al, 2001). Chaque type a une stratigraphie interne différente, qui affecte l'écoulement de l'eau (et de l'oxygène).

- *Haldes à faible ségrégation*

Pour les haldes avec peu ou pas de ségrégation, l'écoulement sera surtout influencé par la distribution granulométrique des matériaux, qui peut engendrer des écoulements localisés (*channelling*), souvent associés aux grands espaces vides entre les particules de roche (i.e. matériau très poreux). La fraction de matériau grossier permettra ainsi l'infiltration et la décharge de l'eau rapidement. Si la quantité de particules fines est importante, l'écoulement sera toutefois affecté par la porosité du matériau fin. La figure 2.3 montre les conditions hydrologiques typiques pour une halde sans ségrégation.

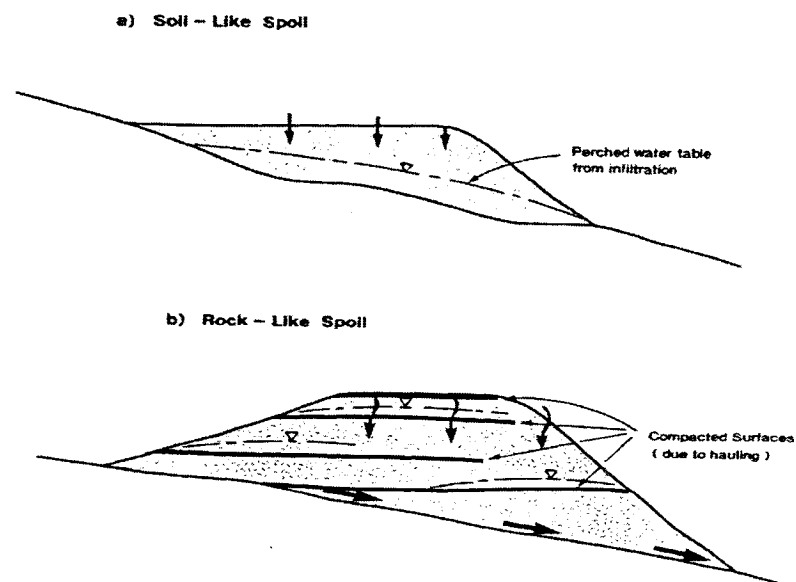


Figure 2.3 Conditions hydrologiques typiques des haldes avec peu de ségrégation (Smith et al., 1995)

Dans le premier cas (figure 2.3 a), le niveau de la nappe monte par infiltration quand les haldes sont dans les régions de décharge naturelle. L'élévation de la nappe dépendra du débit d'infiltration et de la conductivité hydraulique. Le deuxième cas (figure 2.3 b) montre la montée du niveau de la nappe à plusieurs échelons selon le compactage des strates pendant l'entreposage de la halde. Ce dernier type de halde a été analysé en détail par Fala et al. (2002, 2005).

▪ *Haldes avec ségrégation marquée*

La figure 2.4 montre les conditions hydrologiques typiques pour une halde avec ségrégation. Les particules fines qui se retrouvent en crête de la halde, qui peuvent être compactées par la machinerie, retiennent l'eau beaucoup plus que les particules grossières en bas de la pente. La percolation est aussi plus lente. Une zone d'écoulement se forme au bas de la pente.

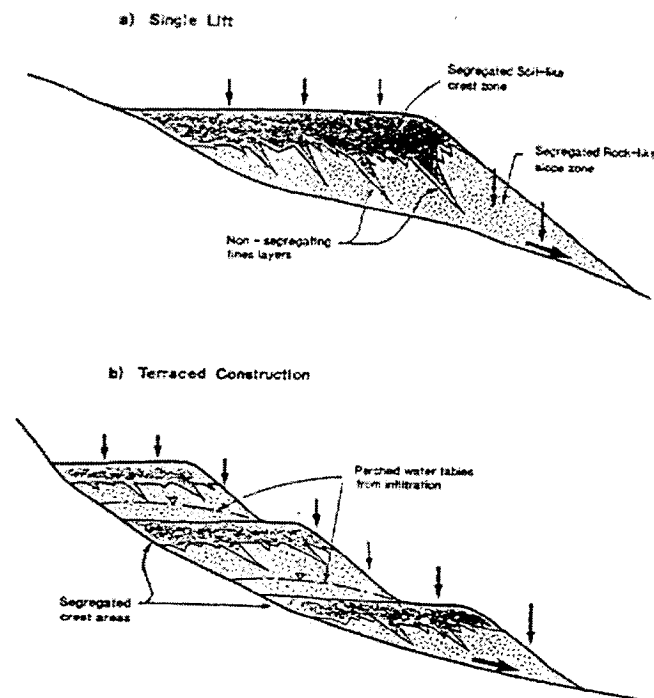


Figure 2.4 Conditions hydrologiques typiques des haldes avec ségrégation marquée (Smith et al., 1995)

La figure 2.4 montre que l'écoulement dans les haldes avec ségrégation marquée est dominé surtout par l'infiltration de l'eau dans les stériles grossiers au bas de la pente. Quand la halde montre une stratification (figure 2.4 b), une nappe perchée peut se former au-dessus de la section des particules fines dans la halde (e.g. Fala et al. 2003, 2005).

2.2.5. Drainage Minier Acide (DMA)

Le DMA est associé à la production des eaux acides pouvant contenir des éléments nocifs pour l'environnement. Les éléments dissous dans l'eau résultent des réactions chimiques avec les minéraux.

Le DMA soulève des préoccupations environnementales car il implique la mobilisation et/ou solubilisation de métaux lourds et d'autres substances toxiques pour l'environnement. Les équations chimiques de l'oxydation des minéraux sulfureux, qui produisent le DMA, sont montrées à la figure 2.5. La pyrite (FeS_2) est utilisée ici comme exemple. La réaction se produit en plusieurs phases, selon la diminution du pH en fonction du temps.

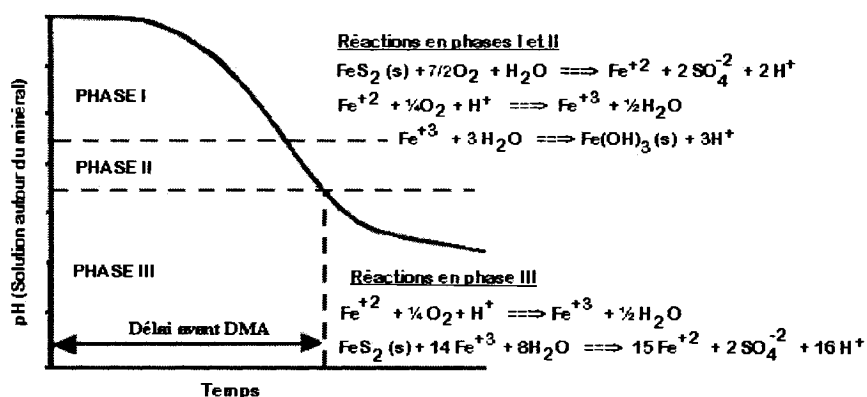


Figure 2.5 Étapes de la formation de DMA (dessin adapté de Kleinman et al. 1981, tiré de Aubertin et al., 2002)

La figure 2.5 montre trois étapes dans la formation du DMA. La phase I représente la mise en contact entre les minéraux sulfureux l'air et l'eau, ce qui entraîne une

oxydation chimique lente. La libération des ions H^+ permet l'acidification du milieu. La deuxième étape consiste en la transformation du fer ferreux en fer ferrique, avec précipitation d'un hydroxyde de fer. Le milieu devient de plus en plus acide. Le fer ferrique qui se trouve en solution devient ensuite un agent oxydant. C'est l'oxydation indirecte en phase III. Il peut y avoir un effet catalytique des bactéries acidophiles, qui contribuent à accélérer le processus d'oxydation du fer ferreux en fer ferrique, ce qui augmente le taux d'acidification générale et la libération des métaux lourds (Aubertin et al. 2002).

Comme illustrée aux équations de la figure 2.5, la production de DMA est tributaire de la présence d'air, d'eau et de sulfures. Les propriétés hydriques des matériaux doivent donc être définies si l'on souhaite prédire et/ou contrôler le DMA.

Notons en terminant ce bref survol que lorsque les haldes à stériles sont reconnues pour leur potentiel de production en DMA, il peut être intéressant d'envisager des méthodes alternatives pour gérer les rejets. Par exemple, divers auteurs ont étudié la possibilité d'utiliser des mélanges de rejets de concentrateur et de roches stériles. Les roches stériles offrent une stabilité prolongée, mais elles sont plus sensibles à l'oxydation à cause d'une perméabilité assez forte en conditions non saturées. Les rejets de concentrateur possèdent typiquement de faibles perméabilités. L'idée de combiner ces deux matériaux pour éviter les problèmes de DMA et d'instabilité des résidus a été étudiée par Williams et Kunganathan (1993) (voir aussi Morris et Williams 2000; Williams 1998). Cette méthode alternative de co-disposition semble avoir des avantages au niveau des coûts, de l'utilisation d'espace et sur les propriétés de matériaux (Wilson 2001).

2.3. Hydrogéologie des roches stériles

La conductivité hydraulique est une propriété importante pour comprendre l'écoulement de l'eau dans le matériau. La conductivité hydraulique peut être évaluée

de plusieurs façons. On fait ici un bref rappel des lois d'écoulement applicables aux haldes à stériles.

2.3.1. Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau a été étudié pendant plusieurs années avant d'en arriver avec une équation simplifiée qui donne l'écoulement de l'eau entre deux points. Cette équation est connue comme la loi de Darcy :

$$q = -ki \quad (2.1)$$

Où q = débit spécifique [L/T]

k = conductivité hydraulique [L/T] et

i = gradient hydraulique [L/L] qui représente la variation de la charge selon le sens inverse de l'écoulement.

Si l'écoulement est vertical, le gradient i [L/L] peut être défini en 1D comme le rapport entre le changement de charge hydraulique dh entre deux points (A et B) et le changement d'élévation dz entre les mêmes deux points.

$$i = \frac{dh}{dz} = \frac{h_A - h_B}{z_A - z_B} \quad (2.2)$$

Cette équation peut devenir plus élaborée selon la nature du milieu (i.e. isotrope ou non, stratifié, etc.) et l'étude à faire. Par exemple, en trois dimensions, l'équation de Darcy devient :

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = -k_{ij} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Où k_{ij} [L/T] est la conductivité hydraulique selon les axes cartésiens (x, y, z), et i_i est le gradient hydraulique dans la direction i ($i = x, y, z$). L'équation générale de la loi de Darcy pour l'écoulement dans les milieux poreux devient alors:

$$q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{et} \quad q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.4)$$

Cette équation est valable pour les milieux saturés et non saturés. En milieu non saturé, elle est combinée à l'équation de continuité (Hillel, 1980), et elle se définit comme suit :

$$\Delta q_x = q_x \Delta y \Delta z - \left[q_x + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \Delta x \right] \Delta y \Delta z \quad (2.5)$$

Ici, Δx , Δy et Δz [L] représentent les côtés du volume élémentaire (figure 2.6); q [L/T] est le débit spécifique d'eau qui passe à travers une surface unitaire par unité de temps dans une direction i spécifiée (dans ce cas, $i = x$).

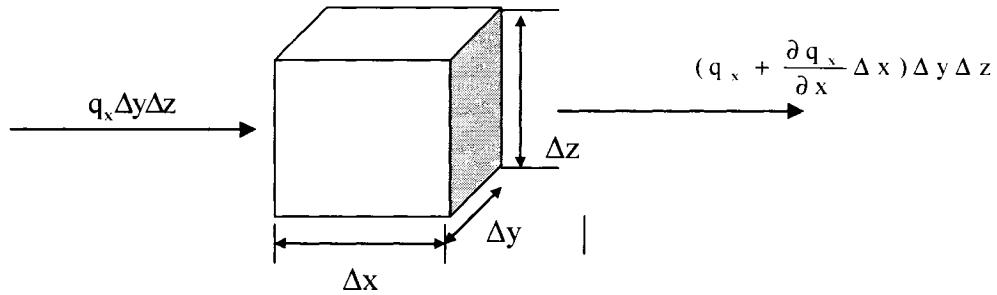


Figure 2.6 Volume élémentaire du sol (figure d'après Hillel, 1980; adaptée de Bussière 1999)

Lorsque l'équation de Darcy est appliquée aux milieux non saturés, la valeur de k (conductivité hydraulique) varie avec la succion (ψ) (ou la teneur en eau θ). On définit souvent la fonction $k(\psi)$ à partir de la relation θ - ψ que l'on appelle la courbe de rétention d'eau (CRE).

2.3.2. Écoulements non saturés

Un dépôt de sol uniforme peut souvent être divisé en deux zones : la zone non saturée (vadose) et la zone saturée (sous la nappe). La zone vadose se trouve entre la surface du sol et la surface de la nappe phréatique (figure 2.7). Dans la zone vadose, la pression d'eau est négative (suction). A mesure que l'on se rapproche de la nappe phréatique le sol devient de plus en plus saturé, bien que la pression demeure négative (i.e. inférieure à la pression atmosphérique de l'air).

La zone phréatique (submergée) se trouve au-dessous de la nappe. A la surface de la nappe phréatique, la pression totale est égale à la pression atmosphérique (avec la pression de l'eau $u_w=0$). Sous la zone phréatique, la pression de l'eau est supérieure à la pression atmosphérique et on considère que tous les vides sont remplis d'eau (degré de saturation $S_r = 100\%$).

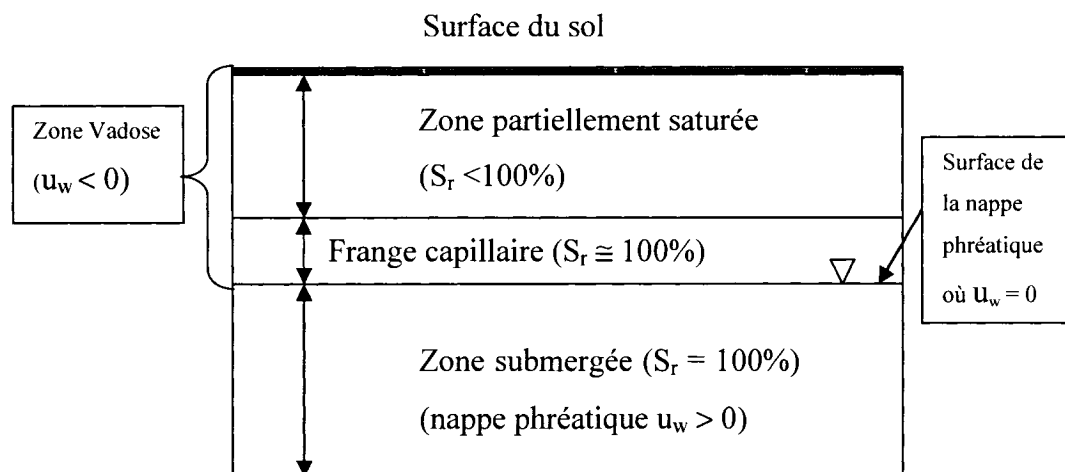


Figure 2.7 Zonage selon le degré de saturation dans un sol uniforme.

Au-dessus de la zone phréatique, il existe une frange quasi-saturée due à la remontée capillaire (McCarthy, 2002). Cette remontée est attribuée aux forces d'attraction entre l'eau et les particules, en raison de la tension de surface. L'épaisseur de cette frange capillaire est variable en fonction du type de sol, de la taille des grains et des vides, et selon leur forme. Lorsqu'un matériau est saturé, la pression interstitielle (u_w) dans les pores est positive. La conductivité hydraulique est alors pratiquement constante pour

un matériau donné. Pour les matériaux non saturés, les pressions d'eau deviennent négatives ($u_w < 0$) et k dépend de la teneur en eau volumique (θ), que l'on peut définir comme suit :

$$\theta = nS_r \quad (2.6)$$

Où θ = Teneur en eau volumique ($= V_w/V_{tot}$) [L^3/L^3]

n = Porosité du sol ($= V_v/V_{tot}$) [L^3/L^3]

S_r = Degré de saturation, qui dépend à son tour de la succion ($\psi = u_a - u_w$)

u_a = Pression d'air [Pa]

V_{tot} = Volume total [L^3]

V_w = Volume de l'eau [L]

V_v = Volume des vides

▪ *Conductivité hydraulique (k)*

La conductivité hydraulique est la capacité d'un sol à transmettre un volume d'eau, dans un temps quelconque, pour une section (aire) établie selon la direction du flux. Quand les pores sont saturés (remplis d'eau), la conductivité hydraulique est à son maximum et constitue une constante du matériau (pour une porosité donnée). Pendant la désaturation, l'air commence à remplacer l'eau dans les pores. L'air empêche le passage de l'eau, réduisant ainsi la conductivité hydraulique (Bédard, 2003). Habituellement, les gros pores se désaturent plus rapidement et les plus petits pores restent conducteurs. Les matériaux avec les pores les plus grands (i.e. sables et graviers) sont généralement les meilleurs conducteurs à saturation (Bernabe, 2003). Ces matériaux se vident aussi aisément lorsque l'on applique une succion. Les matériaux avec des plus petits pores retiennent l'eau à des valeurs supérieures de succion. Leur conductivité hydraulique est plus faible à saturation (par rapport à des matériaux plus grossiers), mais comme ils gardent plus d'eau par capillarité, ils peuvent avoir une conductivité hydraulique plus élevée que les matériaux avec les

pores les plus grands à une succion donnée (Shaap et al, 2006). Ceci est illustré à la figure 2.8 pour un sol fin (silt) et un sol plus grossier (sable).

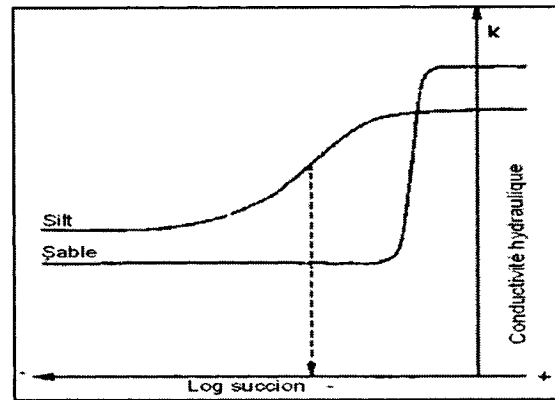


Figure 2.8 Représentation graphique de la conductivité hydraulique en fonction de la succion (tirée de Aubertin et al. 1995)

La figure 2.8 montre que la désaturation du sable se fait à des succions plus petites que le silt (matériau plus fin).

▪ La courbe de rétention d'eau (CRE)

La caractérisation d'un sol en condition non saturée se fait généralement à partir de la CRE, qui est ensuite utilisée pour définir la fonction de perméabilité montrée à la figure 2.8. La CRE représente la relation entre la teneur en eau volumique (θ) et la succion (ψ). La succion est la pression négative par rapport à la pression atmosphérique ($\psi = u_a - u_w$). La définition de la CRE et de la conductivité hydraulique pour les matériaux grossiers étudiés nous permet de définir le comportement des matériaux poreux, tels les roches stériles.

Sur la CRE, on cherche à déterminer deux valeurs particulières aux matériaux analysés (voir figure 2.9) :

▫ La pression d'entrée d'air (ψ_a) ou Air Entry Value (AEV)

Pendant la désaturation d'un matériau, l'air remplace l'eau dans les pores. L'air empêche le passage de l'eau, réduisant ainsi la conductivité hydraulique. Habituellement, les gros pores se désaturent plus rapidement et les plus petits pores restent conducteurs. Les matériaux avec les pores plus grands sont généralement des bons conducteurs en saturation, ils se vident donc aisément lorsqu'on applique une succion. Les matériaux avec les plus petits pores retiennent de l'eau à des valeurs supérieures de succion et leur conductivité hydraulique est plus faible à saturation.

La pression d'entrée d'air représente le début de la désaturation du sol, lorsque le degré de saturation devient inférieur à 100%. C'est la pression nécessaire pour vaincre la tension capillaire du sol (tension qui reste entre les petits pores qui leur permet de garder de l'eau) dans les pores les plus grossiers (Aubertin et al., 1995). L'épaisseur de la frange capillaire (figure 2.7) correspond approximativement au AEV (air entry value – ψ_a) du matériau, qui correspond à la pression négative qu'il faut appliquer sur le matériau lorsqu'il est saturé pour que l'air commence à rentrer dans les pores (Yazdani, 1995; Yazdani et al., 2000; Wilson et al., 2006).

Graphiquement, l'AEV correspond sur la CRE au point d'intersection entre la tangente sur la pente et le plateau de la courbe. Une autre façon de déterminer l'AEV est de poser l'hypothèse selon laquelle il correspond au point où la teneur en eau volumique est égale à 90 ou 95% de la valeur à saturation (Aubertin et al., 1996a, 2003).

▫ La succion résiduelle (ψ_r)

La valeur ψ_r (succion résiduelle) correspond à la teneur en eau volumique résiduelle (θ_r). L'eau qui reste se trouve alors retenue par adhésion et/ou tension capillaire à la surface des grains (figure 2.9)

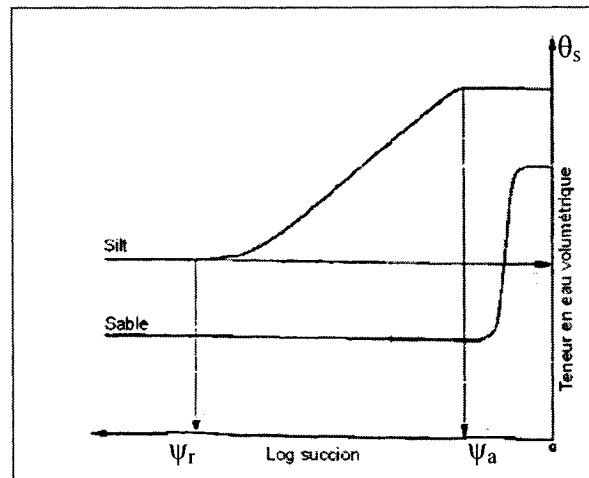


Figure 2.9 Représentation graphique de la CRE avec la succion résiduelle (ψ_r) et le AEV ($\equiv \psi_a$) (Aubertin et al. 1995)

Chaque type de matériau a une CRE qui lui est propre. La forme de la CRE dépend en grande partie de la grosseur et de la distribution des pores. Quand les pores sont petits, la tension capillaire admissible est élevée et le sol se maintient saturé à des succions plus fortes. Un sable se draine donc plus facilement (et rapidement) qu'un silt, dans les mêmes conditions. C'est ce qu'on observe à la figure 2.9.

La CRE peut-être affectée par la distribution granulométrique, l'historique de mouillage, la géométrie des pores (Aung, 2001), la lithologie et les caractéristiques de mouillage/séchage du sol (e.g., Herasymuik, 1996).

2.3.3. Détermination des propriétés hydriques

- **Conductivité hydraulique saturée (k_{sat})**

Dans cette étude, la conductivité hydraulique sera mesurée sur des matériaux saturés. La conductivité hydraulique est une caractéristique importante qui reflète l'espace permettant un flux de liquide. Des études montrent que k_{sat} peut être très variable, allant de magnitudes entre $10^{-9} - 10^{-6}$ cm/s pour les sols argileux jusqu'à $10^{-2} - 10^0$ cm/s pour les sols grossiers (e.g., Mbonimpa et al. 2002). Elle peut varier aussi

considérablement avec le même matériau dans les essais en laboratoire (Mbonimpa et al. 2004).

▫ Mesure de k_{sat}

Au laboratoire et sur le terrain il existe différentes façons de mesurer la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}). Par exemple, on peut réaliser des essais au perméamètre à charge variable ou à charge constante (ASTM D 5856 et ASTM D 2434 respectivement). Un protocole expérimental pour l'obtention des valeurs de k_{sat} au laboratoire sera présenté au chapitre 2.

L'interprétation des essais de laboratoire et de terrain est basée sur la loi de Darcy pour évaluer la conductivité hydraulique des matériaux. Cette équation peut s'écrire:

$$v = -k i \quad (2.7)$$

Où

v = vitesse d'écoulement [L/T^2]

k = conductivité hydraulique [L/T^2]

i = gradient hydraulique [--]

La mesure de la vitesse d'écoulement et du gradient hydraulique permet alors d'obtenir la valeur de k (voir aussi éq.2.1).

▫ Prédiction de k_{sat}

Plusieurs études ont été dédiées à la prédiction de la valeur de k_{sat} selon les propriétés de base des sols (e.g., Hazen 1911; Shepherd 1989; Vukovic et Soro 1992; Tieje et Hennings 1996; Chin 2000). La prédiction de k peut être utile pour les étapes préliminaires d'un projet. Les modèles de prédiction utilisés pour ce travail sont les modèles de Kozeny-Carman (Lambe et Whitman 1979; Chapuis et Montour, 1992; Chapuis et Aubertin 2003a) et de Kozeny-Carman modifié (Aubertin et al. 1996). Les équations 2.8 et 2.9 seront utilisées pour estimer k_{sat} .

Modèle de Kozeny-Carman (KC) (Chapuis et Aubertin, 2003a) :

$$k_{sat} = \frac{C * g}{\mu_w \rho_w} \left(\frac{e^3}{S_s^2 D_r^2 (1+e)} \right) * 100 \quad (2.8)$$

où k_{sat} : conductivité hydraulique saturée (cm/s) [L/T]

C : 0.2 (constante)

g : constante gravitationnelle (9.81 m/s^2)

ρ_w : masse volumique l'eau (998 kg/m^3 à 20°C)

D_r : densité relative des solides ($D_r = \rho_s / \rho_w$) [--]

S_s : surface spécifique des grains (en m^2/kg)

μ_w : la viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ à 20°C)

100 : conversion pour unités en cm/s

Modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) pour matériaux grossiers (d'après Mbonimpa et al. 2000, 2002) :

$$k_{satG} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_U^{1/3} D_{10}^2 \quad (\text{en cm/s}) \quad (2.9)$$

où C_G : 0.1 (constante),

x : 2 (peut varier selon le matériau),

γ_w : le poids volumique de l'eau ($\approx 9.81 \text{ kN/m}^3$)

C_U : le coefficient d'uniformité ($= D_{60}/D_{10}$)

D_{10} : le diamètre représentatif à 10% de la courbe granulométrique en cm.

L'équation de Kozeny-Carman modifiée (KCM) utilisée dans ce document est celle développée pour les matériaux grossiers (peu de plasticité, peu de cohésion).

▪ *La courbe de rétention d'eau (CRE)*

▫ *Mesure de la CRE*

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la CRE. Au laboratoire, on utilise les cellules de pression, la plaque drainante, la cellule triaxiale, le papier filtre, des tensiomètres (avec sondes TDR), des psychomètres ou des essais en colonne (e.g., Fredlund et Rahardjo 1993). Sur le terrain, on utilise surtout une combinaison de tensiomètres (pour obtenir ψ) et des sondes TDR (pour θ) (e.g., Aubertin et al. 1997, 1998; Zhang et Fredlund, 2003). Les avantages et désavantages de chacune de ces méthodes sont énoncés ailleurs, et ils ne seront pas expliqués ici à nouveau (Klute et Dirksen, 1986; Fredlund et Rahardjo 1993; Ricard 1994). Les seules méthodes qui ont été décrites sont celles utilisées au laboratoire pour cette étude, soit les essais en colonne et les essais au « Tempe cell ». La procédure pour l'obtention de la CRE est expliquée en détail avec le protocole expérimental au chapitre 3.

▫ *Courbes lissées :*

Diverses équations ont été développées pour représenter la CRE à partir des données expérimentales (θ , ψ). La plupart des modèles qui décrivent la CRE peuvent être obtenus à partir de l'équation générale posée par Leon et Rahardjo (1997a):

$$a_1\theta_e^{b_1} + a_2\exp(a_3\theta_e^{b_1}) = a_4\psi^{b_2} + a_5\exp(a_6\psi^{b_2}) + a_7 \quad (2.10)$$

où :

a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 , b_1 et b_2 sont des constantes du matériau.

θ_e = teneur en eau effective définie selon:

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.11)$$

où θ = teneur en eau volumique [L^3/L^3]

θ_r = teneur en eau volumique résiduelle [L^3/L^3]

θ_s = teneur en eau volumique à saturation [L^3/L^3]

Parmi les modèles les plus utilisés se trouvent ceux de Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980), et Fredlund et Xing (1994). Les équations pour ces modèles représentent des cas particuliers issus de l'équation 2.9. Elles sont présentées dans ce qui suit:

Gardner (1958) :

$$\theta = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a \psi^{n_G}} \right) + \theta_r \quad (2.12)$$

où n_G : constante du modèle

a : constante ($\cong 1/\psi_a$)

Brooks et Corey (1964) :

$$\theta = \left[(\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda_{BC}} \right] + \theta_r \quad (2.13)$$

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

van Genuchten (1980) :

$$\theta = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}]^{m_v}} \right) + \theta_r \quad (2.14)$$

où $1/\alpha_v \cong AEV$

m_v et n_v : constantes d'ajustement du modèle; on utilise souvent

$m_v = 1 - (1/n_v)$

Fredlund et Xing (1994) :

$$\theta = \left[\frac{C(\psi(\theta_s - \theta_r))}{\text{Ln}[e + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}]} \right] + \theta_r \quad (2.15)$$

Avec

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)} \quad (2.16)$$

où m_f et n_f : constantes au modèle

e : nombre népérien (2.71828)

a_f : valeur approximative du AEV

ψ_r : succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle [L]

Le paramètre C_ψ induit une teneur en eau nulle quand la succion s'approche de sa limite imposée par l'équilibre thermodynamique, correspondant à un état sec du sol, soit $\theta = 0$ lorsque $\psi = \psi_0 = 10^7$ cm (Fredlund et Xing 1994).

Les avantages et inconvénients de divers modèles de lissage ont été discutés par Leij et al. (1997) et Leong and Rahardjo (1997a).

On utilisera dans ce travail le modèle van Genuchten (1980). Il a été développé à partir des modèles Brook et Corey (1964) et Gardner (1958). Il est plus avantageux que ces modèles car il s'étend sur une gamme plus ample de succion et il s'applique à faible teneur en eau. Il est le plus couramment utilisé dans la littérature.

van Genuchten et al (1991) ont aussi développé le logiciel RETC (Retention Curve) pour décrire les propriétés hydrauliques des sols non-saturés avec la méthode désirée, à partir des données expérimentales. Lorsque le logiciel RETC utilise le modèle van

Genuchten (1980), il permet d'estimer les valeurs des paramètres α_v , n_v et m_v par régression non linéaire.

▫ Prédiction de la CRE

Les mesures de ψ et θ obtenues au laboratoire ou sur le terrain sont ponctuelles. Il faut ensuite utiliser un des modèles de lissage (tels ceux présentés plus haut) pour obtenir la CRE complète (Maqsoud et al., 2004).

Il existe aussi une autre méthode d'évaluation de la CRE : les modèles de prédiction. Les modèles de prédiction utilisent les propriétés de base du sol pour estimer la courbe. Il existe quelques modèles pour estimer la CRE; mentionnons : Arya et Paris (1981), Haverkamp et Parlange (1986), Haverkamp et al. (1999), Arya et al (1999). A cet égard, le modèle le plus connu serait celui d'Arya et Paris (1981).

Kovács (1981) a aussi proposé un modèle de ce type. Le modèle utilisé (et expliqué) ici est celui de Kovács Modifié (MK), développé par Aubertin et al. (1998, 2003). Il est présenté dans ce qui suit.

▪ *Modèle Kovács Modifié (MK)*

Le modèle Kovács Modifié est une version modifiée du modèle proposé par Kovács (1981). La CRE peut alors être obtenue d'une façon simplifiée en utilisant des paramètres de base du sol (i.e. la porosité et la granulométrie). Il inclut des composantes de capillarité et d'adhésion.

Aubertin et al (2003) ont adapté ce modèle à différents types de sols. Le modèle MK utilise le paramètre h_{co} [L], défini comme la remontée capillaire équivalente dans un milieu poreux. Ce paramètre peut être dérivé de l'expression de la remontée capillaire [L] de l'eau dans un tube de diamètre d . L'équation 2.17 définit h_{co} (Kovács, 1981; Mbonimpa et al. 2000, Aubertin et al. 2003) :

$$h_{co} = \frac{4\sigma_w \cos \beta_w}{\gamma_w d} \quad (2.17)$$

où σ_w : tension de surface de l'eau (0.073 N/m à 20°)

β_w : angle de contact entre l'eau et la surface du solide [-] (généralement très faible pour le quartz, $\beta_w \cong 0$)

γ_w : poids unitaire de l'eau (9.8 kN/m³ à 20°)

Cette équation indique que la montée capillaire est inversement proportionnelle au diamètre d du tube. Si on considère que les espaces vides (pores) du sol sont similaires à des tubes capillaires, on comprend pourquoi il existe une plus grande remontée capillaire dans les sols fins, que dans les sols grossiers où les espaces vides sont plus grands.

Pour un sol, les espaces vides ne sont pas uniformes en taille. Il est nécessaire d'introduire une valeur équivalente au diamètre des pores qui représenterait le diamètre. On peut pour cela écrire :

$$d_{eq} = 4 \frac{V_v}{A_v} \quad (2.18)$$

où V_v et A_v = Volume et surface des vides [L³], [L²] respectivement

La surface des grains solides A_G correspond approximativement à A_v , ou à la surface spécifique S_s [L²M⁻¹] (Scheidegger, 1974). Cette hypothèse permet d'obtenir l'équation 1.18

$$d_{eq} = 4 \frac{e}{\rho_s S_s} \quad (2.19)$$

où e : indice des vides (V_v / V_s)

ρ_s : la densité des grains solides [ML⁻³]

On peut alors modifier l'équation de la remontée capillaire équivalente h_{co} au-dessus de la nappe phréatique.

$$h_{co} = \frac{\sigma_w \cos \beta_w}{\gamma_w} \frac{\rho_s S_s}{e} \quad (2.20)$$

Cette expression est utilisée dans le modèle MK. Ce modèle considère que la rétention d'eau est due aux forces de capillarité, qui causent une saturation capillaire S_c , et aux forces d'adhésion, qui produisent une saturation d'adhésion S_a (Kovács, 1981). L'équation qui prédit la courbe de rétention d'eau (CRE), pour un degré de saturation S_r , est (Mbonimpa et al. 2006) :

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - (1 - S_a)(1 - S_c) \quad (2.21)$$

Les variables S_c et S_a sont définies par une équation propre:

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

et

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} (\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad (2.23)$$

n = la porosité

m = représente un coefficient de distribution de la taille des pores

a_c = coefficient d'adhésion

ψ_n = paramètre de normalisation introduit pour avoir une consistance entre les unités ($\psi_n = 1$ cm quand la succion ψ est donnée en cm).

Les équations du modèle MK ont été reliées aux propriétés physiques du sol par les équations suivantes:

$$h_{co} = \frac{0.75}{[1.17 \log(C_u) + 1] e D_{10}} \quad (2.24)$$

Pour les sols grossiers, avec peu de plasticité et sans cohésion, $m \cong 1/C_u$ et a_c prend une valeur approximativement constante de 0.01 (quand les paramètres de charge sont exprimés en cm). La succion résiduelle peut aussi se calculer par :

$$\psi_r = 0.86 h_{co}^{1.2} \quad (2.25)$$

On peut aussi estimer le AEV à partir de ce modèle. Aubertin et al (2003) ont proposé :

$$\psi_{a,est.} = \frac{b_1}{(eD_H)^{x_1}} \quad (2.26)$$

où

b_1 et x_1 : paramètres de lissage; les valeurs utilisées pour nos analyses sont

b_1 : 0.6 et x_1 : 0.8 (adaptées de Aubertin et al. 2003)

$$D_H : \text{Diamètre équivalent [L]} = [1 + 1.17 \log (C_U)]D_{10} \quad (2.27)$$

2.3.4. Facteurs d'influence

Plusieurs facteurs influencent les propriétés hydriques des matériaux meubles. Les principaux sont décrits ici.

▪ *Effet de la surface spécifique*

On a vu que les roches à stériles comportent généralement une assez forte proportion de matériaux fins (queue de la courbe granulométrique très longue). Les particules fines augmentent la surface spécifique du matériau, ce qui influence la valeur de k_{sat} .

Dans le modèle KC, la surface spécifique des grains est estimée selon l'équation proposée par Chapuis et Légaré (1992). L'équation est basée sur des considérations géométriques simples pour estimer la surface spécifique (S_s) des sols granulaires. Cette équation s'écrit :

$$S_s = (6/\rho_s) \sum [(P_{NoD} - P_{Nod})/d] \quad (2.28)$$

en m^2/kg

où ρ_s : densité des solides (kg/m^3)

$(P_{NoD} - P_{Nod})$: pourcentage (masse) de particules plus petites que le diamètre D

(P_{NoD}) et plus grandes que le diamètre d (P_{Nod}) en m.

Les courbes granulométriques ont toujours une taille minimale mesurée. La méthode de Chapuis et Légaré (1992) définit une taille équivalente (d_{eq}) pour toutes les particules plus petites que la taille minimale (D_{min}) sur la courbe granulométrique. L'équation pour obtenir la taille équivalente d_{eq} est :

$$d_{eq}^2 = \frac{1}{D_{min}} \int_D^{D_{min}} y^2 dy = \frac{D_{min}^2}{3} \quad (2.29)$$

Pour sa part, le modèle KCM permet aussi d'estimer la surface spécifique du sol même si celle-ci n'est pas directement utilisée dans l'équation de la conductivité hydraulique. L'équation de la surface spécifique pour le modèle KCM est (Mbonimpa et al. 2002):

$$S_s = \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{1}{C_d C_U^{1/3} D_{10}^2} \right)^{1/2} = \frac{1}{\rho_s} \left[\frac{1}{\sqrt{C_d} C_U^{1/6} D_{10}} \right] \quad (2.30)$$

où

S_s est en cm^2/g .

C_d : 0.01 (constante)

Le modèle de prédiction Kovac's Modifié (MK) permet aussi d'estimer la valeur de la surface spécifique par l'équation 2.31

$$S_s = \frac{\alpha}{\rho_s D_H} \quad (2.31)$$

où

S_s est en m^2/g .

α : 10 (constante)

D_H : $(1 + 1.17 \log C_U) (D_{10}/100)$ en cm ou en 10^{-2} m.

ρ_s en kg/m^3

Les valeurs de S_s calculées selon les trois méthodes seront comparées pour les matériaux testés ici.

▫ Arrangement des particules et effet de la porosité.

L'addition de particules grossières de différentes tailles à une population de particules fines peut modifier la densité du mélange puisque les particules fines peuvent occuper le volume des vides formés par les particules plus grossières (Atesian et al., 2006; Coussy et al., 1998; Junqueira, 2006). Dans plusieurs cas, la densité du mélange est plus grande parce que les grosses particules ont une porosité interne (quasi) nulle, alors que le volume des vides entre les grosses particules est rempli avec les particules fines. La structure de la matrice du mélange entre les particules fines et grossières peut toutefois devenir complexe (Chapuis et al, 1996). Il existe un arrangement optimal (ou idéal) qui forme une matrice bimodale de particules fines et des particules grossières (Kabwe et al., 2005, 2006). La position et la forme des particules grossières dans la matrice de particules fines affectent alors la densité du mélange, tant dans son état naturel que suite à un compactage (e.g., Lam, 1998). La densité au compactage atteint son maximum quand les particules atteignent cet arrangement optimal (Lobo-Guerrero, 2002).

Un arrangement 'idéal' requiert une différence assez marquée entre les deux fractions (fines et grossières). Lorsque la différence entre le diamètre des types de particules n'est pas assez grande, il n'y a pas suffisamment d'espaces vides (pores) pour bien combiner les deux fractions. La densité est affectée aussi par les mécanismes de mise en place.

La théorie des mélanges (*mixture theory*) utilise une forme matricielle pour représenter chaque sol qui forme le mélange entre les deux (Krishnan et al. 2000). Les propriétés du mélange sont alors déterminées par les proportions de chaque composante (Rijck et al. 2001). De façon simplifiée, la théorie des mélanges binaires (sols grossiers et sols fins) dit que si le sol fin est assez petit pour s'insérer facilement entre les pores du sol grossier, la porosité du mélange diminue jusqu'à une porosité minimale $n_{\min}$ (Aung et al, 2001; Shimko et al, 2004). Quand le mélange binaire 'optimal' est atteint, la

densité du mélange est à son maximum (Wickland et al., 2005; 2005a et 2005b). Les facteurs qui peuvent influencer la densité sont la taille des particules, leur forme et leur structure (Tons et Goetz, 1968). La théorie des mélanges (et l'arrangement optimal) est d'intérêt particulier dans le domaine minier. On peut par exemple mélanger les roches stériles (grossiers) avec les résidus miniers (fins) pour minimiser la porosité (Monzon, 1998; Vallejo et Mawby, 2000; Vervoot, et Cattle, 2003), de façon à mieux contrôler certains problèmes tel le DMA; (Wickland et al. 2005, 2006 et 2006a). À titre d'exemple, la figure 2.10 montre la variation de la porosité selon le pourcentage de particules grossières avec des mélanges bimodaux (deux types de sol, à différents pourcentages de matériau fin et grossier).

La figure montre la variation de l'indice des vides en fonction du pourcentage des particules grossières. Les courbes montrées font référence à différents ratios entre la taille des grains des deux matériaux analysés. Le rapport entre les tailles (size ratio) est évalué selon le diamètre passant pour 50% des courbes granulométriques (d_{50}). Plus la différence entre les tailles est grande, plus la différence entre l'indice des vides augmente. L'indice des vides minimal semble être obtenu à 70% des particules grossières par volume peu importe le ratio entre les matériaux analysés.

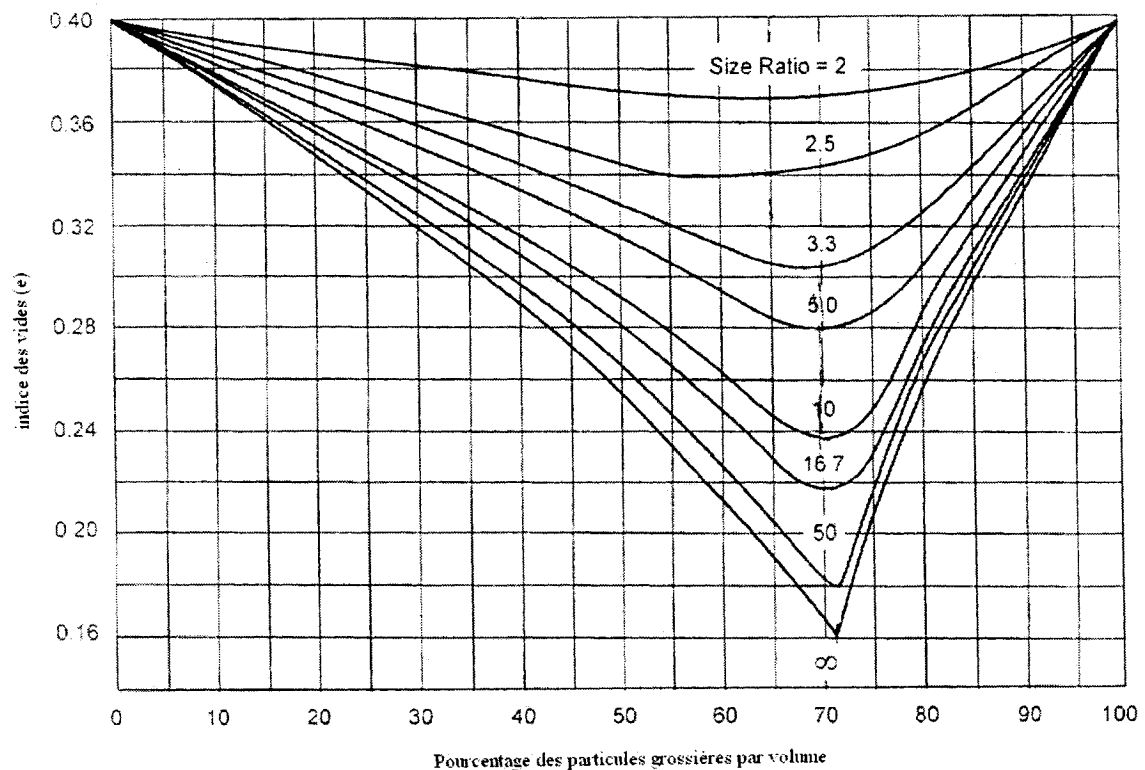


Figure 2.10 Variation de la porosité en fonction du pourcentage des particules grossières pour des mélanges bimodaux (Wickland et al., 2005)

Le contrôle du mélange permet aussi de contrôler les propriétés hydriques puisque la porosité (ou l'indice des vides) est reliée à la conductivité hydraulique (k_{sat}). En général, la conductivité k_{sat} augmente avec la porosité (e.g., Bouwer et Rice, 1984; Aubertin et al. 1996). Le lien k_{sat} - n est également lié à l'effet du pourcentage relatif des particules de diverses tailles. Par exemple, les travaux de Morin (2005) sur deux sites situés à Cape Cod, Massachusetts, USA montrent que la conductivité hydraulique n'est pas toujours corrélée positivement avec la porosité. Une relation inverse entre k_{sat} et la porosité (n) a ainsi été observée pour des aquifères de sables et graviers (Morin, 2004, 2006). L'étude en laboratoire associée au travail de terrain montre que la relation entre la conductivité hydraulique et la porosité peut être positive ou négative, en fonction de la distribution des grains (granulométrie). Cette étude indique

que la porosité diminue avec la diminution du diamètre équivalent des particules (augmentation du pourcentage de particules fines) jusqu'à une porosité minimale $n_{\min}$. Après ce point, la porosité augmente avec l'augmentation du diamètre équivalent des particules (ou avec l'augmentation du pourcentage des particules grossières). Ceci est illustré à la figure 2.11.

Milczarek et al. (2006) ont aussi montré que les propriétés hydriques des mélanges sont souvent contrôlées par les matériaux fins (plus petits que 0.85 mm dans ce cas). Leurs résultats indiquent que la conductivité hydraulique diminue jusqu'à un pourcentage de 30% gravier, puis elle augmente avec des pourcentages de gravier plus grands. Ceci va dans le même sens que les résultats de l'étude de Morin et al. (2004).

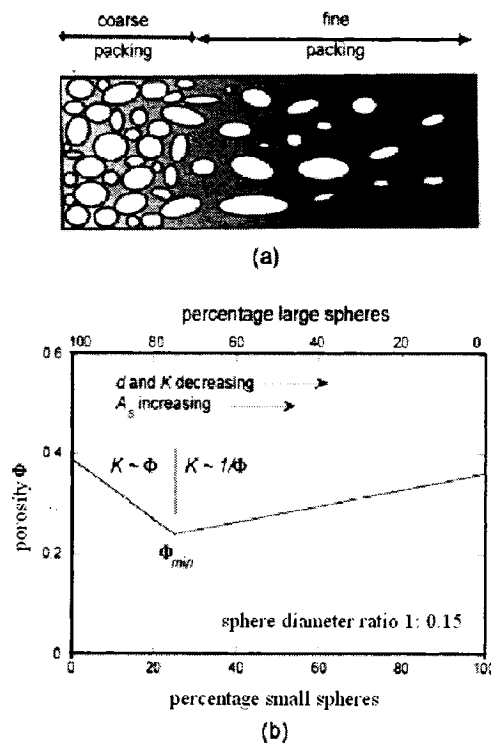


Figure 2.11 Évolution de la valeur de la porosité en fonction du pourcentage de gravier pour des mélanges (tiré de Morin et al, 2004, 2006); $\Phi \equiv n$ (porosité)

Le modèle de l'arrangement optimal (ou idéal) mentionné plus haut peut être utilisé pour estimer la conductivité hydraulique et les conditions de drainage de l'eau. Par exemple, une étude menée par Mota et al. (2003) sur un mélange entre particules fines et grossières, montre que la présence de plus de 10% de particules fines dans un milieu grossier réduit significativement la conductivité hydraulique du milieu. Dans ce cas, un modèle basé sur des mélanges binaires a permis d'obtenir une valeur théorique représentative de la porosité. La théorie du mélange binaire permet l'analyse de l'influence de chaque partie du mélange selon ses caractéristiques physiques (taille des grains, densité, proportion des mélanges).

Une autre étude sur la conductivité hydraulique de cendres ('pond ash') montre que la valeur de k_{sat} diminue avec l'addition d'un sol fin, notamment lorsque le mélange est compacté à sa densité sèche maximale (Kumar, 2004).

L'étude conduite par Milczarek et al. (2006) montre que les caractéristiques de rétention d'eau des roches stériles sont affectées par le pourcentage de particules grossières dans le mélange. Dans ce cas, la conductivité hydraulique diminue avec l'augmentation du pourcentage de gravier ($>4.75\text{mm}$) jusqu'à environ 30%; puis, k_{sat} augmente avec des pourcentages plus grands. La figure 2.12 illustre ces résultats.

Cette figure montre que la conductivité hydraulique diminue (un peu) jusqu'à un pourcentage d'environ 30% de gravier et ensuite elle augmente. Les valeurs prédites montrées dans la figure sont obtenues selon le modèle KCM de Mbonimpa et al. (2002) (et celui de Bouwer et Rice non présenté ici). On voit qu'il omit de expliquer et montrer des écarts entre les valeurs prédites et mesurées. La figure 2.13 montre la variation de la CRE pour les mélanges étudiés par Milczarek et al. (2006). Ces résultats seront revus et discutés plus en détail aux chapitres 4 et 5 de ce mémoire.

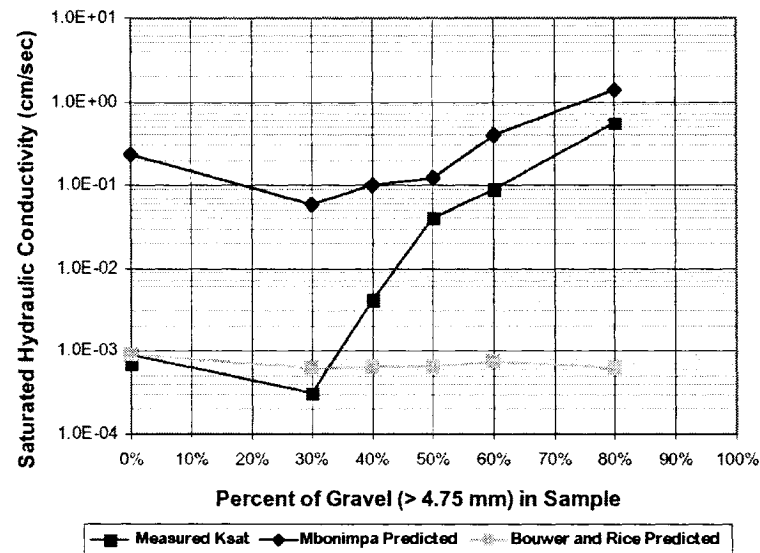


Figure 2.12 Valeurs de k_{sat} pour divers mélanges de sable et gravier (Milczarek et al. 2006)

▫ Effets sur la CRE

En plus d'affecter la porosité et la conductivité hydraulique, la granulométrie et l'arrangement d'un mélange affecte aussi la CRE. Cet aspect a toutefois été peu étudié.

Une étude de laboratoire sur les CRE pour deux matériaux séparés (un matériau fin et un grossier) et sur des mélanges des deux, conduite par Yazdani et al. (2000), montre que la forme de la CRE serait contrôlée par la fraction fine (≤ 4.75 mm). L'AEV serait relativement constant tant que la fraction fine domine la structure du sol (plus de 30-35% de gravier dans le mélange par volume). L'AEV serait ici une fonction des pores les plus gros, qui correspondent à la fraction grossière. Pour sa part, la teneur en eau résiduelle diminuerait avec l'augmentation du pourcentage de particules grossières. Quand le pourcentage de grossiers dépasse environ 60-65% de la masse totale, le sol se comporterait alors comme la fraction des grossiers. La figure 2.13 montre la variation de la CRE pour les mélanges étudiés. Ces résultats sont intéressants, mais ils

soulèvent plusieurs questions, notamment sur l'évaluation de la porosité (selon le % de particules grossières) et sur la teneur en eau résiduelle.

La courbe de rétention d'eau des matériaux grossiers, obtenue en laboratoire par la méthode des masses et volumes (voir chapitre 3), peut n'avoir qu'une seule valeur de θ lorsque le potentiel de capillarité est très petit (entre 0.1 et 5 cm pour les graviers). Ceci est surtout observé avec les matériaux très grossiers qui peuvent se drainer immédiatement après l'application d'une très faible succion (Wilson et al. 2005).

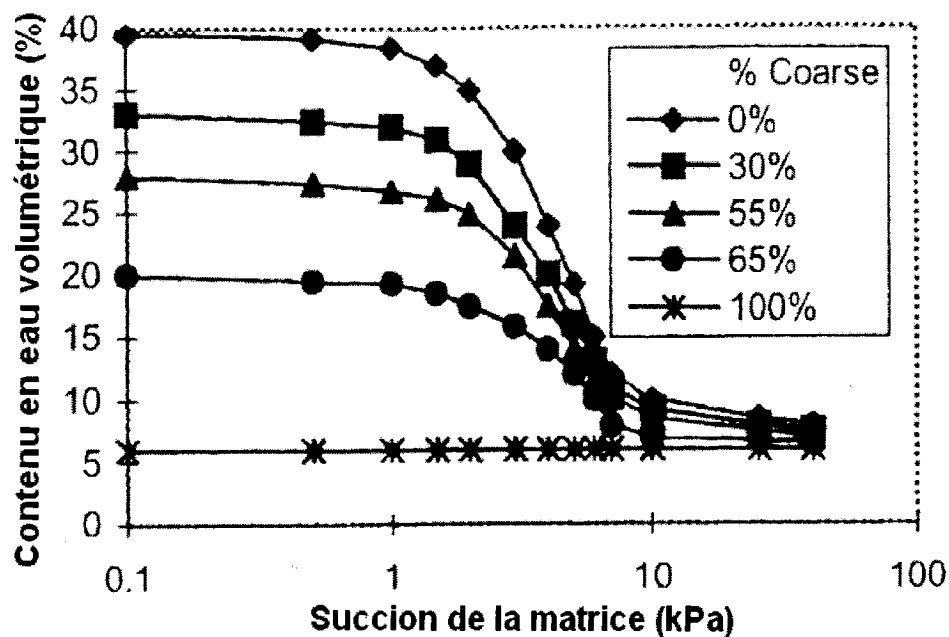


Figure 2.13 Courbes de rétention d'eau (CRE) pour différents mélanges de sols fins et grossiers (figure tirée de Yazdani et al. 2000)

Dans l'étude de Milczarek et al. (2006), les résultats semblent montrer que l'AEV et ψ_r diminuent avec l'augmentation de la fraction grossière. La figure 2.14 illustre certains des résultats.

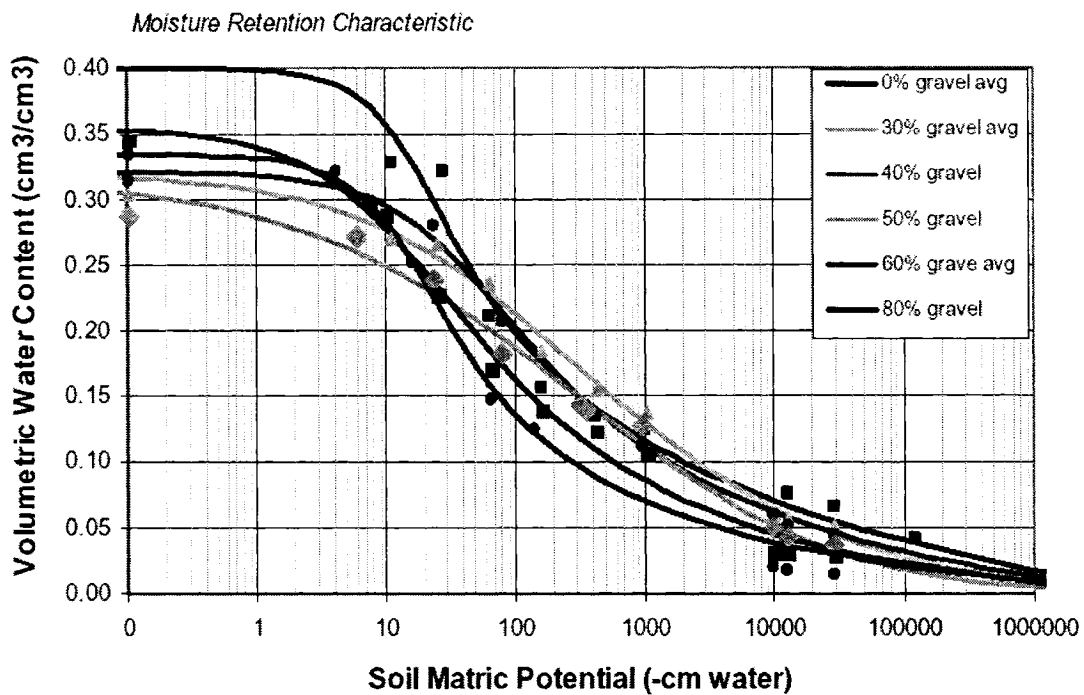


Figure 2.14 Courbes de rétention d'eau des mélanges étudiés par Milczarek et al. (2005)

Wickland et al. (2006) ont mené une autre étude sur des mélanges de roches stériles et des résidus miniers. L'étude montre que le mélange maintient une teneur en eau volumique plus petite à celle de la roche à stérile seule. La figure 2.15 montre les CRE obtenues selon l'étude pour un mélange de rapport 4.4:1 de roche stérile à résidus miniers par masse sèche. Ce mélange de 4.4:1 est le seul mélange qui a subi tous les essais au laboratoire et en colonne (avec la même granulométrie) pour obtenir la conductivité hydraulique et les CRE.

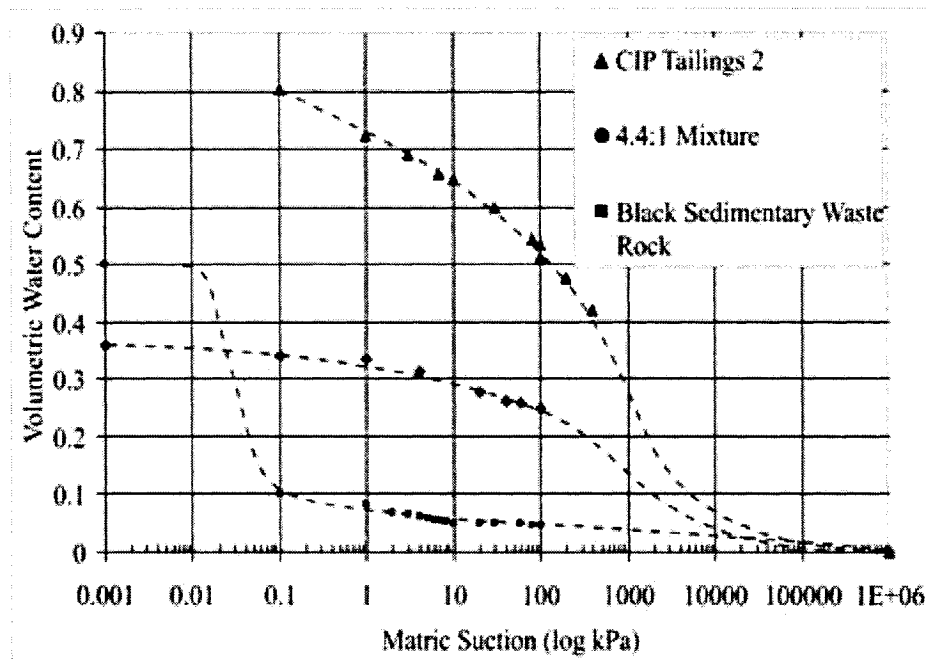


Figure 2.15 Courbes de rétention d'eau pour résidus et un mélange entre résidus (1) et roche à stérile (4.4) (Wickland et al, 2006).

Les résultats de Wickland et al. (2006) sont aussi repris au chapitre 5.

CHAPITRE 3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le principal objectif de ce projet est d'examiner le développement de la courbe de rétention d'eau (CRE) et la valeur de la conductivité hydraulique (k) pour différents matériaux grossiers (et de mélanges entre matériaux fins et grossiers), afin de relier leur comportement à leurs caractéristiques physiques (Chapuis et al., 2005). On vise aussi à comparer les résultats obtenus à ceux des modèles théoriques.

3.1. Matériaux

Quatre matériaux de base ont été utilisés. Il s'agit du sable Demers (SD), du gravier (G), du gravier Mirabel (GM), et du sable de l'Ontario (SO). Les essais de laboratoire ont été effectués sur le SD, le SO, le G, le GM et sur des mélanges entre le SD et les graviers. Les mélanges ont été préparés avec le SD et des pourcentages de 20, 40, 60 et 80% de G, et avec le SD combiné à 50 % de GM (fraction passant un diamètre de 10 mm). Le SO n'a pas été mélangé. Pour éviter une longue description des matériaux, le tableau 3.1 identifie ceux qui ont été utilisés dans la suite de ce document.

Tableau 3.1 Nom et description de chaque matériau utilisé

Nom du Matériau	Description
SD ₀	100% Sable Demers monté à Sec
SD ₇	100% Sable Demers humidifié à 7%
SD80-G20	Mélange : 80% du sable Demers et 20% gravier
SD60-G40	Mélange : 60% du sable Demers et 40% gravier
SD40-G60	Mélange : 40% du sable Demers et 60% gravier
SD20-G80	Mélange : 20% du sable Demers et 80% gravier
G ₃	100% Gravier humidifié à 3%
GMT ₃	100% Gravier Mirabel (granulométrie totale) humidifié à 3%
GMP ₃	100% Gravier Mirabel (partie passant 10mm) humidifié à 3%
SD50-GMP50	Mélange : 50% sable Demers et 50% gravier Mirabel (partie passant 10mm)
SOT	Sable de l'Ontario (site #1)
SOA	Sable de l'Ontario (site #2)

Les caractéristiques physiques de ces divers matériaux seront présentées plus loin. Le tableau 3.2 montre les hauteurs de la sortie de la colonne. La hauteur de la sortie est la position du tuyau de drainage du bas de la colonne au point de décharge (voir figure 3.3).

Tableau 3.2 Valeurs des hauteurs de la sortie pour la mesure du débit des diverses colonnes.

Identification	Pourcentage de gravier total dans le matériau* (%)	Hauteur de sortie (h) (cm)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux		
SD ₀	0	9.5000
SD ₇	0	9.5000
SD80-G20	20	9.5000
SD60-G40	32	9.5000
SD40-G60	60	9.5000
SD20-G80	80	9.5000
G ₃	100	9.5000
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux		
SD ₀	0	9.5000
SD ₇	0	9.5000
GMT ₃	100	11.5000
GMP ₃	100	9.5000
SD50-GMP50	50	9.5000
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario		
SOT	0	9.5000
SOA	0	9.5000

* Groupe 1 -- les particules du gravier passent le tamis 10 mm

Groupe 2 -- les particules du gravier passent le tamis 14 mm pour le GMP₃ et le tamis 75 mm pour le GMT₃

Groupe 3 les particules passent le tamis 14 mm

3.2. Méthodes de caractérisation

Une série d'essais en laboratoire a été menée pour connaître les caractéristiques physiques des matériaux. Une fois reçus, tous les matériaux ont été homogénéisés, humidifiés et placés dans des chaudières hermétiques avant de réaliser les essais nécessaires. Il est important de préparer une quantité suffisante du matériau avec les mêmes caractéristiques pour tous les essais. Ceci permet de maintenir une continuité dans les données (Bussière et al., 2002).

3.2.1. Granulométrie

Les essais granulométriques étaient menés en trois étapes. La première étape consistait à tamiser aux grands tamis pour enlever les gros cailloux et homogénéiser le mélange. Ensuite on décidait du pourcentage à utiliser pour faire le mélange entre le sable et le gravier. Après, la granulométrie du mélange était mesurée. Les résultats de cette granulométrie sont montrés à la figure 4.1

Pour le groupe 1, le gravier (G) utilisé passe le tamis 10 mm. Le pourcentage utilisé pour le mélange est le pourcentage du gravier total. Pour le groupe 2, le gravier Mirabel passant (GMP) au tamis 14 mm est utilisé, à l'exception du gravier Mirabel total (GMT) qui utilise le passant du tamis 75 mm. Pour le mélange entre le GMP et le sable, le pourcentage de gravier représente le pourcentage total dans le matériau mélangé. Pour le groupe 3, le sable de l'Ontario n'a pas été mélangé. Le matériau montre une granulométrie passant 14 mm.

Il faut noter que le matériau SD60-G40 visait avoir un mélange de 40% gravier; en réalité la granulométrie montre que son pourcentage total de gravier est d'environ 32%.

3.2.2. Mesure de la densité relative

Les essais de densité relative des solides se réalisent selon la taille des grains du matériau. L'essai consiste à comparer (à une température donnée) la masse volumique des grains de sol à celle de l'eau. S'il y a des grains retenus sur le tamis de 5 mm, la

norme ASTM C 127 est utilisée. Par contre, si les grains sont plus petits que 5 mm, les essais se font selon la norme ASTM C 128. Pour obtenir le D_r ($\equiv G_s$) moyen lorsqu'il existe des grains plus grands que 5mm, on calcule le D_r avec l'équation qui donnée par la norme ASTM D 854. Dans le cas où les échantillons ≥ 5 mm, ils sont séparés selon leur granulométrie pour calculer leur densité relative respective.

Pour les grains plus petits que 5 mm, on utilise les pycnomètres pour déterminer la densité relative apparente (D_{rl}). Il s'agit de prendre un échantillon de sol sec et de le submerger dans l'eau pendant 24 heures. Ensuite, on remplit le pycnomètre d'eau jusqu'à la calibration et on le met en succion (pour enlever l'air) pour au moins 30 minutes, après, on prend la température (T) et la masse du pycnomètre (M_{hl}) en grammes. On sèche l'échantillon au four, et on prend la masse sèche de l'échantillon (M_{sl}). Pour obtenir la masse du pycnomètre avec l'eau, il faudra suivre la même procédure que pour obtenir la masse du pycnomètre et l'échantillon (M_{hl}) sauf que seulement avec de l'eau (M_w) en grammes. La densité relative (D_{rl}) se calcule par l'équation:

$$D_{rl} = \frac{M_{sl}}{[M_{sl} + (M_w - M_{hl})]} \quad (3.1)$$

Les masses M_w et M_{hl} doivent être corrigées selon la température obtenue. La norme ASTM D854 donne les facteurs de correction. Toutes les masses sont mesurées en grammes.

Pour les échantillons ≥ 5 mm, la densité relative apparente (D_{r2}) est obtenue quand on submerge l'échantillon dans l'eau, pour une période de 24h, à température de la pièce. Ensuite il faut prendre la masse de l'échantillon en condition de saturation de surface sèche, celle-ci est obtenue quand on enlève l'échantillon de l'eau et on enlève tout résidu d'eau de la surface sans permettre l'évaporation des pores de l'échantillon. Une fois la masse prise, il faudra déterminer la masse de l'échantillon (M_{h2}) dans l'eau à 23°C à 997 kg/m³ de densité (pour éviter toute possibilité d'avoir de l'air pris dans

l'échantillon plein d'eau il faudra mélanger le contenu lorsqu'il est rempli d'eau). L'échantillon doit être ensuite séché au four, après le séchage, il faudra prendre la masse lorsque l'échantillon a pris la température de la pièce (M_s).

$$D_{r2} = \frac{M_{s2}}{(M_{s2} - M_{h2})} \quad (3.2)$$

Le calcul de la densité relative des grains pour l'ensemble des matériaux utilise les deux résultats, soit celui du matériau passant le tamis 5mm (D_{r1}) et celui du matériau retenu au tamis 5 mm (D_{r2}). L'équation suivante est utilisée pour le calcul de la densité relative moyenne:

$$D_r = \left[\frac{R}{100D_{r2}} + \frac{P}{100D_{r1}} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

Où D_r : Densité relative des grains moyenne

R : Pourcentage des particules retenues au tamis 5mm

P : Pourcentage des particules passant le tamis 5mm

D_{r1} : Densité relative des grains déterminée selon l'essai pour les particules passant par le tamis 5 mm (éqn 3.1)

D_{r2} : Densité relative apparente déterminée selon l'essai pour les particules retenues par le tamis 5 mm (éqn 3.2)

3.2.3. Tamisage

Les courbes granulométriques sont utilisées pour représenter la distribution de la taille des grains. Ces courbes peuvent être divisées en trois grandes catégories. On observe une courbe *étalée* lorsque le diamètre des particules couvre une gamme étendue, avec une forme régulière. Une courbe *discontinue* montre un sol ayant un déficit de particule(s) d'un certain diamètre donné. Un sol à granulométrie *uniforme* est un cas particulier d'un sol peu étalé. La figure 3.1 montre des exemples de courbes

granulométriques, qui sont présentées dans le plan du pourcentage cumulé passant en fonction du log du diamètre.

Les essais de tamisage (et de sédimentométrie) permettent d'établir la distribution de la grosseur des particules et d'obtenir la courbe granulométrique propre à chaque matériau. Sur ces courbes, les paramètres les plus souvent évalués sont le D_{60} , le D_{10} , et le D_{30} (où $D_i \equiv$ le diamètre des particules [L] qui représentent le pourcentage i du matériau passant). Ces paramètres nous permettent de calculer d'autres coefficients qui aident à classer le matériau d'intérêt. Par exemple, le coefficient d'uniformité ($C_U \equiv D_{60}/D_{10}$) nous permet d'évaluer l'étalement d'un matériau. Si la valeur du C_U est faible (≤ 3 à 6), le matériau est considéré uniforme, i.e. les grains sont à peu près de la même taille. Quand le C_U est autour de 1, on peut dire que le sol comporte des grains d'une seule grosseur. Si le C_U est grand (≥ 6), le matériel est étalé, i.e. ses grains ont des tailles différentes. Le C_U des sols à granulométrie très étalée peut varier entre 15 et 1000 (et plus). Un autre paramètre souvent utilisé est le coefficient de courbure ($C_C = D_{30}^2/D_{60}D_{10}$). Une valeur de C_C comprise entre 1 et 3 définit un sol comme étant bien étalé, à condition que C_U soit plus grand que 4 pour les graviers et plus grand que 6 pour les sables (tiré de Holtz et Kovacs, 1991).

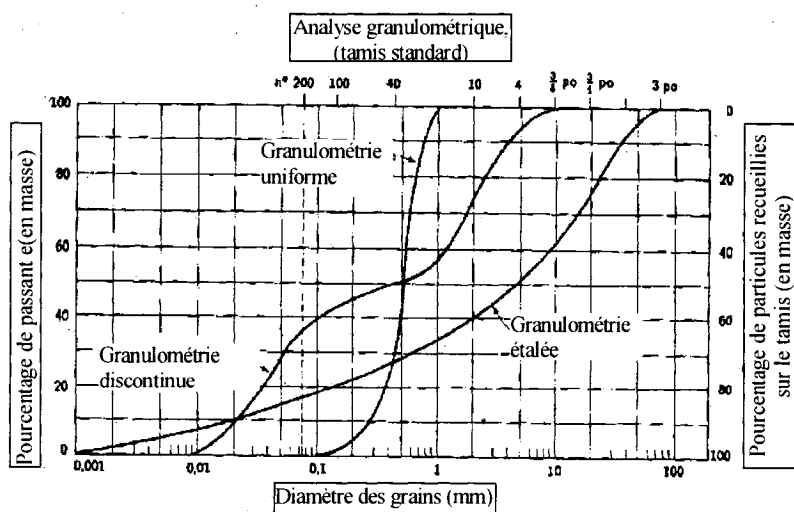


Figure 3.1 Trois courbes granulométriques cumulatives standards types représentant différents sols (Holtz et Kovacs, 1991)

Les essais permettant d'obtenir la courbe granulométrique se déroulent selon les indications du manuel de l'ASTM, norme D 422. Les tamis utilisés ont une maille de 50 mm, 25 mm, 20 mm, 14 mm, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1.25 mm, 0.63 mm, 0.315 mm, 0.160 mm et 0.080 mm.

Le matériel est d'abord tamisé avec les tamis 50 mm, 25 mm, 14 mm et 10 mm. Du matériel passant le tamis 10 mm, on prélève un échantillon de sol de 500 g. Cette masse sera divisée en deux fractions non égales; 300 g de l'échantillon du sol sec est passée au tamis 5 mm, 2.5 mm, 1.25 mm et 0.63 mm, 0.315 mm, 0.160 mm et 0.080 mm. Suite à une vibration mécanique de 10 minutes, la masse du sol sec restant sur chaque tamis est récupérée et pesée, et les valeurs sont notées de façon cumulative. Les 200 g restants de la masse initiale de l'échantillon de 500 g sont utilisés pour l'essai de sédimentométrie. L'essai de sédimentométrie s'effectue sur la partie passant le tamis 2.5 mm.

3.2.4. Sédimentométrie

Cet essai est aussi connu comme l'analyse à l'hydromètre. Il est basé sur la vitesse de chute des sphères dans un milieu visqueux. Cette vitesse varie en fonction de la taille des particules en suspension, de leur masse volumique et de la viscosité du fluide. On peut calculer le diamètre des grains à partir de la distance de chute et de l'intervalle de temps correspondant (selon la densité du solide).

La fraction passant le tamis de 2.5 mm est utilisée pour l'essai sédimentométrique. De la partie passant, on prélève approximativement 20 g pour mesurer la teneur en eau du matériau. Une masse sèche (approximativement 50 g pour un sol silteux ou argileux et 75 g pour un sol sableux) est submergée dans 125 ml de solution dispersante. L'agent de dispersion est le métaphosphate (solution avec un ratio de 40 g de méthaphosphate par litre d'eau, selon la norme ASTM D422-63). Le sol doit être brassé pour permettre un bon mélange de la solution avec le sol. Le trempage doit se faire pour une période

de 24 heures. Après cette période, l'échantillon du sol est brassé encore, pour remettre les particules en suspension. L'échantillon mélangé est transféré dans un cylindre de verre pour sédimentation. Il faut nettoyer le bécher avec de l'eau distillée, pour transvider les restes de l'échantillon au cylindre pour sédimentation, pour arriver à un total de 1L de solution. L'hydromètre doit être calibré dans 1 L d'eau distillée avec la solution dispersante selon les mêmes proportions qui seront utilisées avec l'essai de sédimentation; la valeur doit être notée (dR).

Les mesures à l'hydromètre sont prises aux intervalles de 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 400, 1440 minutes. Pour prendre ces mesures, il faut entre 20 et 25 secondes. Une fois que la lecture est faite, il faut immédiatement enlever l'hydromètre et le nettoyer avec un mouvement circulaire dans le cylindre rempli d'eau distillée. La température du mélange est aussi notée. Après la dernière lecture, il faut passer le composant au tamis à 0.08 mm. Le matériau retenu est séché et tamisé. L'équation 3.4 donne le pourcentage du sol en suspension au moment où l'hydromètre mesure la densité de la suspension.

$$P = (Ra/W) * 100 \quad (3.4)$$

Où P : Pourcentage du sol restant en suspension au moment où l'hydromètre mesure la densité de la suspension.

R : La mesure de l'hydromètre moins la correction du composite appliqué (dR)
voir section 7 de la norme ASTM D 422

a : Facteur de correction appliqué à la lecture de l'hydromètre 152H selon le tableau 1 de la norme.

W : La masse du sol séché au four (du pourcentage passant le tamis 2 mm)

Le pourcentage (P) cumulatif nous donne la portion fine de la courbe granulométrique complète du matériau. Il faut aussi faire une série de calculs corrigés pour tous les tamis pour tenir maintenir une masse représentative de celle calculée (voir étape 16 de la norme ASTM D422)

3.3. Essais en colonne

Concernant cette partie du programme, douze essais en colonne ont été montés (excluant deux autres essais sur des roches stériles – mine La ronde). Le diamètre intérieur des colonnes était de 10 cm, de 15 cm ou de 30 cm, selon le matériau testé. Les hauteurs de colonnes varient aussi selon le matériau.

Les essais en colonne permettent d'obtenir la CRE. Les colonnes étaient aussi utilisées pour conduire des essais de perméabilité (Chapuis et al., 1989, 2005). À l'aide de ces essais, nous pouvons estimer la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}).

Les colonnes utilisées pour les essais doivent avoir une taille spécifique selon la taille des grains. Certaines dimensions peuvent se calculer à l'avance. Par exemple, la hauteur minimale de la colonne est déterminée avec l'équation 2.24, qui donne la remontée capillaire du sol ($h_{co,G}$) qui est liée à la succion résiduelle (ψ_r).

Pour assurer l'obtention complète de la courbe de rétention d'eau, la hauteur (h) de la colonne devrait être au moins une demi-fois plus grande que la hauteur de la remontée capillaire ($h \geq 1.5\psi_r$). La taille maximale des grains dans le spécimen doit être égale ou plus petite que 1/6 du diamètre de la colonne (ASTM D 5856) afin d'éviter la formation des chemins préférentiels et la ségrégation du matériel. Le diamètre des colonnes utilisées pour la plupart de nos essais est de 15 cm, et les hauteurs varient entre 1.35 à 1.71 m. Le tableau 3.3 montre les diamètres et les hauteurs des colonnes pour chaque essai.

Le montage des colonnes et les différents essais se font selon une série d'étapes systématiques à suivre pour éviter les erreurs. Le déroulement peut se diviser en cinq étapes (Chapuis et al. 2006 et 2006a). Premièrement, le matériau est placé dans la colonne avec une densité uniforme. Le matériau est saturé avec une succion appliquée (on vérifie avec les masses et volumes). Deuxièmement, la conductivité hydraulique à saturation est déterminée avec des essais à charge variable ou/et constante. Pour la méthode à charge constante, il faut utiliser des piézomètres latéraux. Troisièmement, un essai de drainage par gravité est réalisé, pendant lequel on mesure le volume de

l'eau drainé dans le temps, et le débit de sortie. Quatrièmement, une fois le drainage terminé, le matériel est prélevé en tranches, du haut de la colonne jusqu'à en bas, pour déterminer la teneur en eau selon l'élévation. Cela donne la CRE (θ selon ψ = élévation à l'équilibre). Cinquièmement, des modèles descriptifs et prédictifs sont utilisés pour analyser les résultats expérimentaux.

Tableau 3.3 Hauteur et diamètre des colonnes.

Nom du Matériau	Hauteur (m)	Diamètre (m)	Taille Maximal des grains (mm)
SD ₀	1.71	0.10	1.25
SD ₇	1.73	0.10	1.25
SD80-G20	1.49	0.15	5.00
SD60-G40	1.47	0.15	5.00
SD40-G60	1.35	0.15	5.00
SD20-G80	1.45	0.15	5.00
G ₃	1.35	0.15	5.00
GMT ₃	0.84	0.30	50.00
GMP ₃	1.44	0.15	10.00
SD50-GMP50	1.29	0.15	10.00
SOT	1.35	0.15	10.00
SOA	1.48	0.15	5.00

Un protocole expérimental détaillé pour le montage des colonnes est présenté au tableau 3.4 Ce protocole a été construit en conformité avec les recommandations de Chapuis et al. (1989,2006), et de Mbonimpa et al. (2002).

Tableau 3.4 Protocole pour le montage et le démontage des colonnes pour la mesure de la CRE (1e partie)

1. Humidifier le sol ($w \approx 7\%$ pour sable, 3% pour gravier) au moins 24 heures avant le montage. Laisser reposer pour assurer l'uniformité.
2. Nettoyer chaque section des colonnes.

Tableau 3.4 Protocole pour le montage et le démontage des colonnes pour la mesure de la CRE (suite).
3. Vérifier que les sections : soient graissées (au parois), aient un piezomètre pour chacune, aient une protection sur chaque piezomètre (coton) pour éviter l'accumulation des particules fines et donc, le blocage des conduites.
4. Vérifier que tous les conduits d'eau fonctionnent normalement (pas de blocage, ni de fuites).
5. Assembler la colonne selon les sections désirées
6. Mesurer la hauteur totale de la colonne avec la plaque poreuse et le géotextile du bas. Aussi, mesurer le diamètre de la colonne. Prendre au moins cinq mesures pour chacune. Couvrir la colonne.
7. Notter la masse de la colonne vide (assemblée au complet et avec tous les accessoires dedans).
8. Remplir la colonne avec l'eau du robinet. Écoulement de l'eau du bas vers le haut (assurer la saturation de la colonne)
9. Peser la colonne pleine d'eau.
10. Avant de drainer, vérifier que tous les conduits fonctionnent normalement. Pas de fuite, pas de blocage. Drainer complètement.
11. Laisser assécher les sections.
12. Déposer la plaque poreuse et le géotextile en bas de la colonne.
13. Déposer le matériau au centre de la colonne. Le matériau doit se déposer par couches de 3 et 5 cm d'épaisseur. Il est important de maintenir une homogénéité avec les couches et d'éviter la ségrégation du matériel (qui doit être un peu humecté).
14. Densifier la couche du matériau avec le marteau proctor (le nombre de coups doit être constant pour chaque couche, et déterminé selon les caractéristiques du sol). Le matériau doit être placé dans la colonne avec une densité (ou indice des vides) constante.
15. Mesurer la masse du matériau déposé (pour le sable environ 500g, pour les mélanges environ 1000g) et la distance entre le haut de la colonne et le matériau compacté (au moins cinq mesures pour chaque couche).
16. Déposer le géotextile et la plaque poreuse en haut de la colonne. Assurer une pression en haut de la colonne (mettre des ressorts ou un support) avant de la fermer (voir norme ASTM D5856 et D2434).
17. Prendre la masse de la colonne remplie.
18. Laisser la colonne en succion (sous vide) pendant au moins 12h. La succion se fait en haut de la colonne.

Tableau 3.4 Protocole pour le montage et le démontage des colonnes pour la mesure de la CRE (suite).

19. Saturer la colonne, en succion, avec de l'eau désaérée et un écoulement du bas vers le haut. Le remplissage doit être lent dans le matériau. Quand l'eau se trouve à 10 cm du haut du sol, enlever la succion, le laisser à la pression atmosphérique (avec un <i>quick-connect</i> en haut de la colonne, au lieu du tuyau de succion) et continuer la saturation du sol. Cette étape peut prendre quelques jours selon la porosité du sol. Il faut avoir assez d'eau désaérée.
20. Laisser écouler l'eau jusqu'à atteindre une saturation d'au moins 90%. Pour obtenir une bonne saturation S_r , il faut avoir un spécimen initialement sans air (la succion enlève les gaz sans déranger le matériau). La colonne doit être étanche contre les écoulements d'eau et d'air. Pour vérifier si la colonne est saturée, la méthode des masses et volumes est utilisée (voir le tableau 3.5).
21. Prendre la masse de la colonne avec le sol saturé d'eau.
22. Réaliser les essais nécessaires en saturation (i.e. mesure de la conductivité hydraulique). Pour les matériaux grossiers, il est recommandé de conduire des essais à charge constante avec des piézomètres latéraux, pour éviter les erreurs dues aux pertes de charge dans les tuyaux, pierres poreuses, etc. Le résultat obtenu peut être comparé avec les valeurs obtenues par les modèles prédictifs.
23. La colonne saturée est ensuite placée sur une balance de 200 kg (avec une marge d'erreur de 2g ou moins). On ouvre la valve du bas. Pendant que la colonne se draine, on mesure le débit d'écoulement à des intervalles de temps spécifiques, avec la masse de l'eau et masse de la colonne. La valve du haut est ouverte à la pression atmosphérique. Le tube de drainage connecté au bas de la colonne maintient une charge hydraulique d'environ 10 cm (condition limite au bas de la colonne). Il faut noter la position du bout du tuyau de drainage, et mesurer le débit de sortie en fonction du temps.
24. Une fois le drainage terminé, habituellement quand il n'y a pas de pertes de masse pendant des jours (ceci peut prendre quelques jours à cause de l'eau retenue par les forces capillaires), on démonte la colonne.
25. Au démontage, enlever les épaisseurs de même taille qu'au montage. Mesurer la masse humide de chaque couche et la distance entre le haut de la colonne et le sol (les couches du matériau récupéré avaient ici une épaisseur typique de 3cm).
26. Mettre chaque couche humide au four pour une période de 24 heures. Mesurer la masse de chaque couche de sol sec.
27. Déterminer la masse d'eau pour chaque couche et estimer la pression (élévation) en cm (pour obtenir la CRE).

Tableau 3.4 Protocole pour le montage et le démontage des colonnes pour la mesure de la CRE (suite et fin).

- | |
|--|
| 28. Faire le graphique de la CRE = élévation (cm) vs. teneur volumique d'eau ($\theta = (w(1-n)D_r)$). |
| 29. Comparer les résultats expérimentaux avec les résultats des modèles théoriques. |

Le tableau 3.5 montre les étapes à suivre pour vérifier la saturation de la colonne avant le démontage. La colonne doit être saturé à plus de 95% avant le démontage. Les étapes à suivre pour calculer la saturation sont détaillées dans le tableau.

Tableau 3.5 Vérification du degré de saturation selon la méthode des masses et des volumes pour les essais en colonne (inspiré de Chapuis et al. 2006)

Les volumes des vides (V_v), de l'aire (V_a) et de l'eau (V_w) sont reliés par $V_v = V_a + V_w$
Le degré de saturation (S_r) est défini par $S_r = V_w/V_v = M_w/(\rho_w V_v)$ où M_w = la masse de l'eau (kg) et ρ_w = la masse volumique de l'eau (kg/m ³)
La porosité (n) est définie par $n = V_v/V = (V_a + V_w)/V$ où V = Volume total
La teneur en eau volumique (θ) et la teneur en eau w sont définies par $\theta = V_w/V = nS_r$ $w = M_w/M_s$ où M_s = la masse des solides
La masse sèche de la colonne et de tous ses accessoires secs (M_1), la masse de la colonne et de tous ses accessoires remplis d'eau désaérée (M_e) et la masse de la colonne sèche remplie avec le matériau sec (M_2) doivent être notées. Les masses M_1 et M_e sont prises avant le montage général du sol; quand le matériau n'est pas sec au montage la masse M_2 peut être obtenue lors du démontage (spécimen séché au four).
La masse des solides (sec) (M_s) s'obtient par $M_s = M_2 - M_1$ La masse totale M_{tot} est la masse de la colonne remplie de sol et d'eau désaérée.
La masse du spécimen humide (M_{ms}) dans le volume total V est défini par $M_{ms} = M_{tot} - (M_e - V\rho_w)$; la masse de l'eau dans le spécimen est $M_w = M_{ms} - M_s$
Le volume des vides dans le sol est défini par $V_v = V - (M_s/\rho_s)$ ρ_s = la masse volumique des particules solides obtenue selon les normes ASTM D854
Le degré de saturation peut se définir par $S_r = V_w/V_v = M_w/\rho_w V_v = \frac{M_{tot} - M_e + V\rho_w - M_s}{\rho_w [V - (M_s/\rho_s)]}$

3.4. Conductivité hydraulique

Au laboratoire, lorsque la saturation des colonnes est supérieure à environ 95%, on peut commencer les essais de conductivité hydraulique. Les essais peuvent se faire dans les colonnes ou dans des perméamètres. On a utilisé des colonnes de grande dimension pour réaliser les essais de perméabilité à charge constante ou à charge variable. Chaque essai permet d'évaluer la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) propre à chaque matériau, et de comparer celle-ci avec une valeur de k_{sat} prédite. Les deux méthodes de prédiction utilisées ici sont l'équation de Kozeny-Carman (eq. 2.7) et l'équation de Kozeny-Carman modifiée par Aubertin et al. (1996) et Mbonimpa et al. (2002) (eq. 2.8).

Les normes ASTM D 2434 et ASTM D 5856 sont utilisées pour réaliser les essais à charge constante et variable respectivement.

3.4.1. Essai à charge constante

L'essai à charge constante (ASTM D 2434) permet de déterminer la conductivité hydraulique (k_{sat}) selon la relation suivante (eqn. 3.6):

$$k_{sat} = \frac{QL}{Ath} \quad (3.5)$$

Où k_{sat} : conductivité hydraulique [L/T]

Q : quantité d'eau qui sort (ou débit sortant) [L^3] durant un intervalle de temps donnée t

L : distance entre les valves ou manomètres [L]

A : surface transversale de l'échantillon du sol [L^2]

t : intervalle de temps [T]

h : différence entre les niveaux d'eau des manomètres [L]

Le montage pour cet essai est montré à la figure 3.2 dans le cas des essais en colonnes. Le montage montré est un peu plus compliqué parce qu'il s'agit de trois sections (un manomètre pour chaque) pour une colonne.

Avant de commencer à prendre les mesures de la charge, du débit et de la température, selon des intervalles de temps définis, il faut laisser l'eau s'écouler de haut en bas pour permettre aux piézomètres de se stabiliser. Un écoulement d'environ 5 minutes peut être suffisant pour obtenir une charge stable dans les piézomètres.

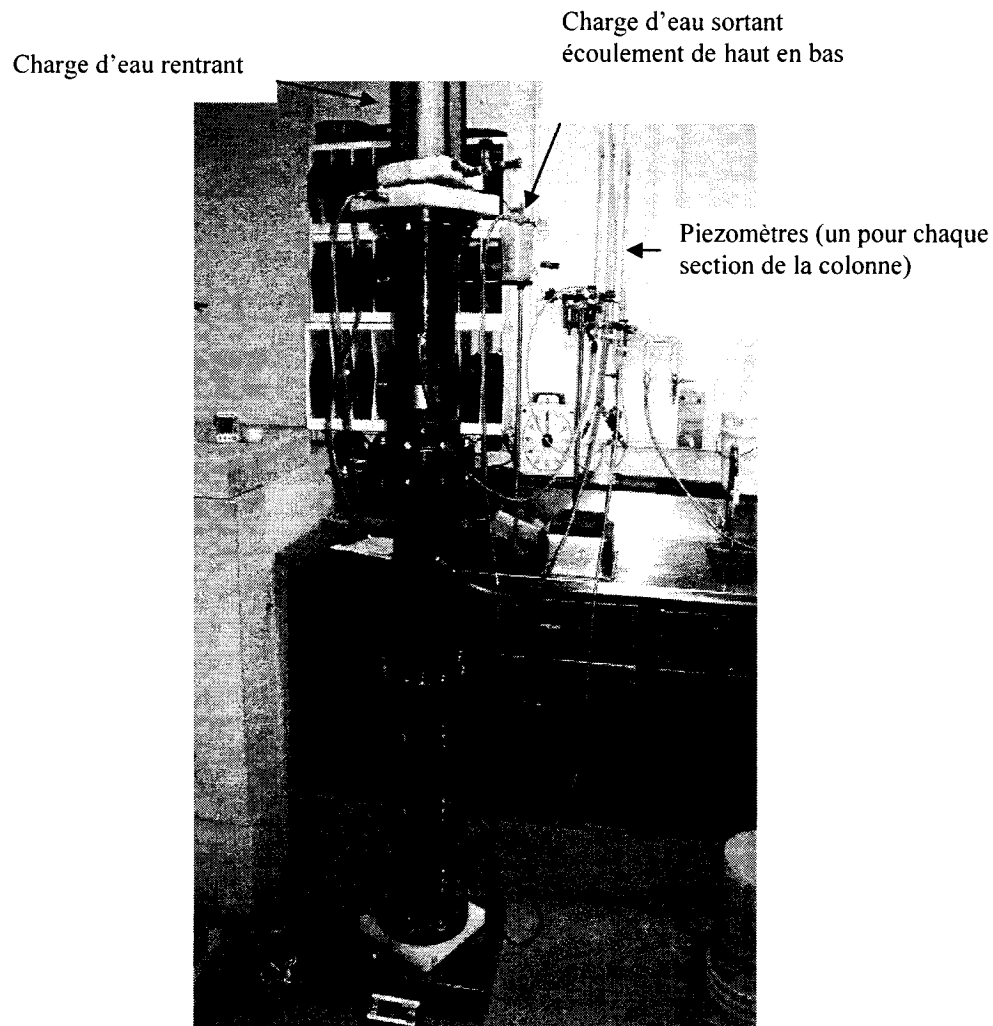


Figure 3.2 Montage pour l'essai de conductivité hydraulique à charge constante dans une colonne

3.4.2. Essai à charge variable

L'essai à charge variable (ASTM D 5856) donne la conductivité hydraulique selon

$$k_{\text{sat}} = \frac{a_{\text{in}} a_{\text{out}} L}{A \Delta t (a_{\text{in}} + a_{\text{out}})} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.6)$$

Si $a_{\text{in}} = a_{\text{out}} = a$, l'équation 2.7 devient

$$k_{\text{sat}} = \frac{aL}{2A \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3.7)$$

où k_{sat} : conductivité hydraulique [L/T]

$a_{\text{in}}, a_{\text{out}}$: surface du tube de mesure qui contient l'eau entrant et sortant, respectivement [L²]

L : hauteur du sol [L]

A : Aire normale de l'échantillon [L²]

Δt : intervalle de temps [T] nécessaire pour que la charge passe de h_1 à h_2

h : charge hydraulique (niveaux d'eau du manomètre respective) [L]

Le montage pour cet essai est montré à la figure 3.3 pour cet essai en colonne.

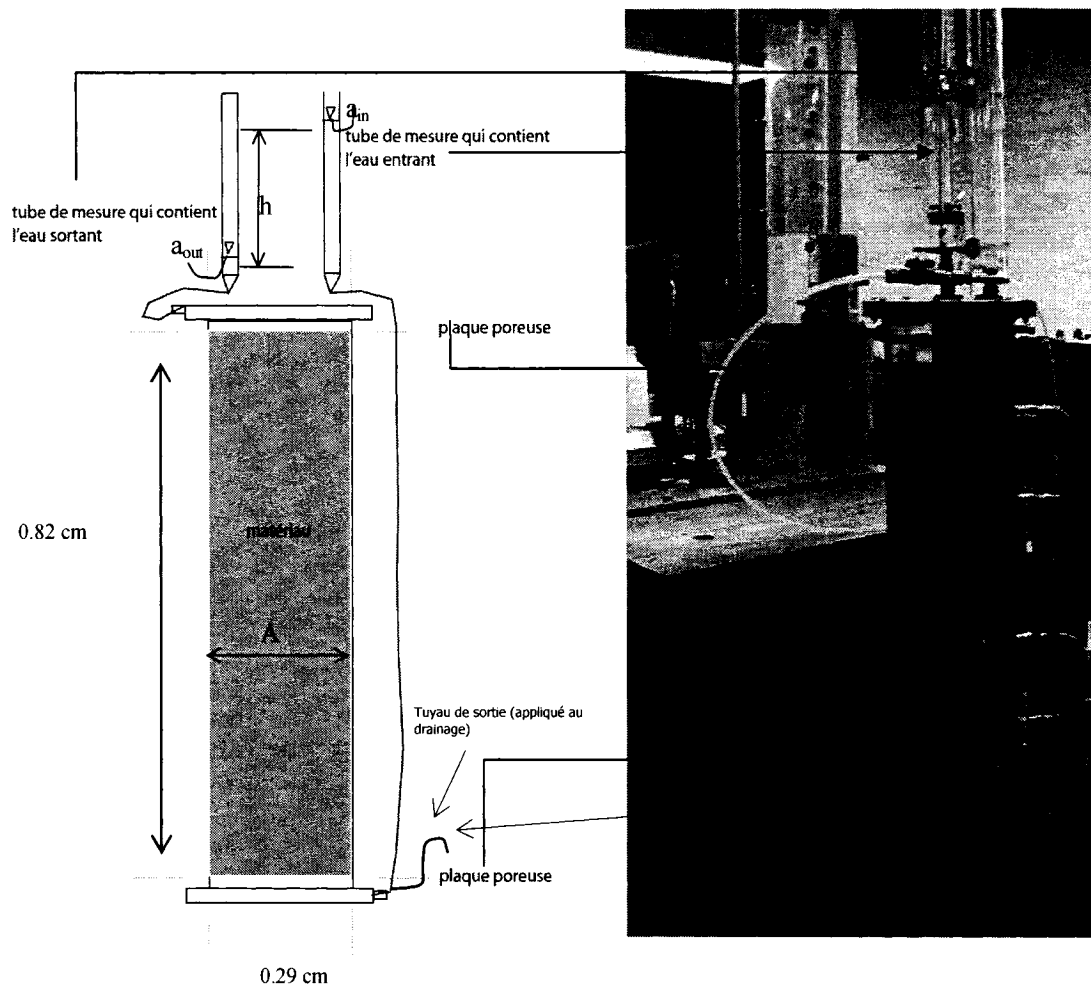


Figure 3.3 Montage utilisé pour un essai de conductivité hydraulique à charge variable dans une colonne.

Dans les essais, la valeur de k_{sat} doit être corrigée selon la température pour prendre en considération la viscosité de l'eau. L'équation suivante est utilisée pour cette correction :

$$k_{20} = R_t k_{sat} \quad (3.8)$$

Où k_{20} : correction de la conductivité hydraulique à 20°C [L^2/T]

k_{sat} : conductivité hydraulique mesurée à saturation à la température de l'essai [L^2/T]

R_t : Facteur de correction de la viscosité de l'eau selon sa température

La norme stipule deux particularités importantes à vérifier pour l'essai :

- i) que le diamètre maximal des grains ne dépasse pas 1/6 du plus petit des deux, soit le diamètre ou la hauteur de la colonne et
- ii) que la perte de charge dans l'échantillon soit mesurée avec au moins deux piézomètres latéraux.

Les résultats obtenus lors des analyses au laboratoire sont présentés aux chapitres trois et quatre.

3.5. Drainage

L'essai de drainage des colonnes est réalisé selon les recommandations mentionnées dans Chapuis et al. (2006). La colonne remplie d'eau désaérée est placée et pesée sur une balance de 200 kg (+/- 2g). Le haut de la colonne est ouvert à la pression atmosphérique. Le robinet à la base de la colonne est ouvert, afin que l'eau puisse s'écouler dans des béciers. La condition limite au bas de la colonne est contrôlée par un tube de drainage qui maintient une charge hydraulique d'environ 10 cm. Le drainage commence au temps $t=0$. La quantité d'eau évacuée ainsi que le poids total de la colonne sont mesurés à des intervalles de temps réguliers. Il est estimé que les mesures peuvent être arrêtées lorsqu'il s'écoule moins d'un gramme d'eau en 24 heures, la désaturation est alors devenue trop lente pour pouvoir être mesurée avec précision. En effet, l'eau s'évapore des béciers plus vite qu'elle ne les remplit. Les données obtenues, présentées en Annexe 1, permettent d'obtenir le graphique représentant la quantité d'eau évacuée en fonction du temps. Le tableau 3.6 montre le temps écoulé pour chaque matériau pour atteindre le régime quasi-permanent. La figure 3.4 montre un exemple de résultats des volumes d'eau drainée en fonction du temps (pour le sol SD₀).

Tableau 3.6 Temps (heures) requis pour atteindre le régime quasi-permanent pendant l'essai de drainage des colonnes

Sol	Temps (heures) requis pour atteindre le régime quasi-permanent
SD ₀	150
SD ₇	215
SD80-G20	287 (pas atteint, semble affecté par évaporation)
SD60-G40	280 (pas atteint, semble affecté par évaporation)
SD40-G60	250
SD20-G80	72
G ₃	45
GMT ₃	6
GMP ₃	45
SD50-GMP50	69
SOT	20
SOA	18

Le tableau 3.6 montre que les colonnes qui ont pris plus de temps pour atteindre le régime permanent comprenaient les sols SD80-G20 et SD60-G40. Le sol qui prend le moins de temps à se drainer est le GMT₃.

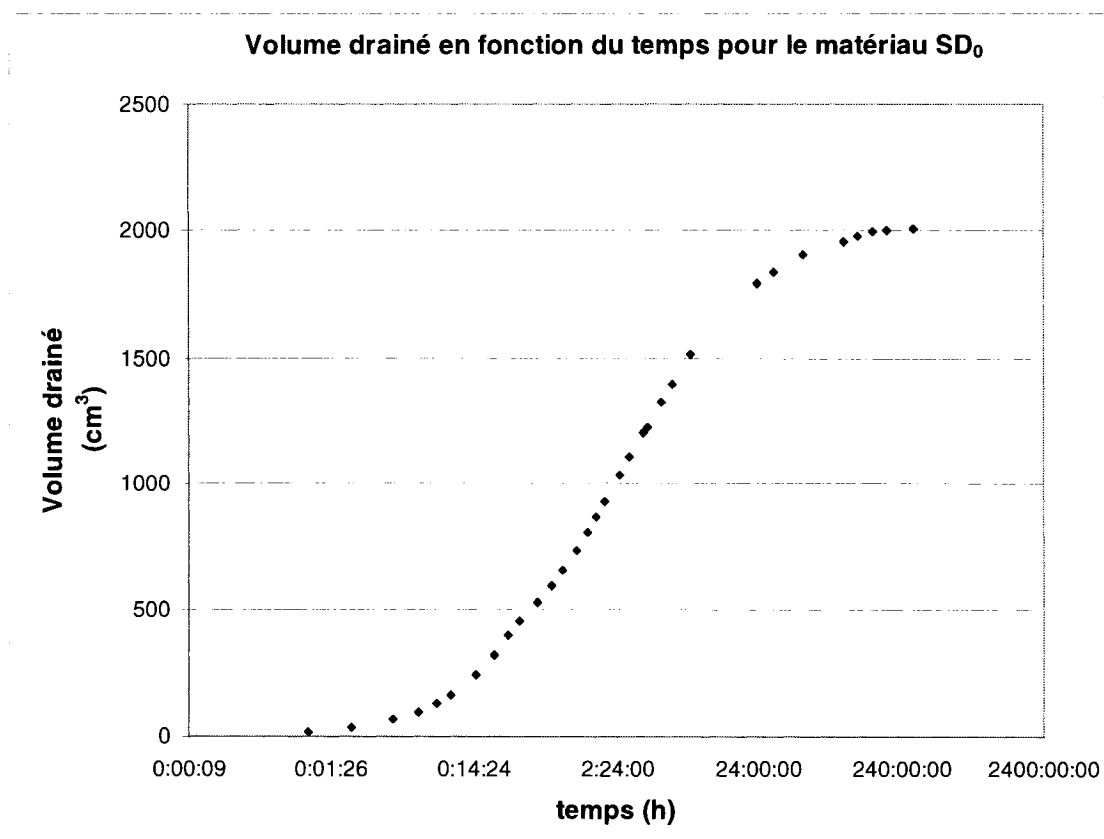


Figure 3.4 Exemple d'un graphique du volume drainé en fonction du temps (obtenu pour le sol SD₀)

Comme on le voit à la figure 3.4 le régime permanent est atteint (sommet de la courbe) à environ 150 heures pour le sol SD₀. Les résultats pour tous les autres matériaux sont montrés à l'annexe 1.

CHAPITRE 4. RÉSULTATS DES ESSAIS

Ce chapitre présente les principaux résultats d'essais réalisés dans le cadre de cette recherche. Les résultats obtenus pour ce projet sont divisés en quatre composantes principales, soient:

- les caractéristiques physiques de base;
- la conductivité hydraulique à saturation (k_{sat});
- la courbe de rétention d'eau (CRE);
- le débit de sortie des colonnes.

Ce chapitre présente les résultats des trois premières composantes. La dernière est montrée dans l'annexe 1. Les prochaines sections présentent les résultats expérimentaux ainsi que ceux obtenus avec les modèles de prédiction.

4.1. Caractéristiques physiques de base.

Pour faciliter la compréhension des résultats, les sols étudiés étaient séparés en trois groupes différents. Le tableau 4.1 donne les propriétés physiques de base pour les matériaux testés. Les paramètres déterminés sont D_{10} , D_{60} , C_U , C_C , et la densité relative des grains (D_r) pour chaque sol. La définition de ces différents paramètres apparaît dans les chapitres précédents. L'obtention de ces propriétés de base est une des premières étapes dans l'analyse de tout matériau.

La taille maximale des grains est de 5 mm pour tous les sols exceptés le GMT₃ (qui contient des cailloux d'un maximum de 30 mm) et le GMP₃ (qui a des grains jusqu'à 10 mm).

Le tableau 4.1 donne la nomenclature des sols, leur division par groupe et les paramètres cités précédemment. Les informations présentées au tableau 4.1 proviennent en grande partie des courbes granulométriques, montrées sur la figure 4.1

Tableau 4.1 Propriétés de base des matériaux analysés

Identification	Pourcentage de gravier total dans le matériau* (%)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	D _r (-)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux							
SD ₀	0	0.067	0.110	0.089	1.632	1.068	2.701
SD ₇	0	0.067	0.110	0.089	1.632	1.068	2.701
SD80-G20	20	0.071	0.130	0.092	1.831	0.917	2.713
SD60-G40	32	0.078	0.160	0.100	2.051	0.801	2.712
SD40-G60	60	0.072	2.200	0.120	30.556	0.091	2.708
SD20-G80	80	0.100	3.600	1.800	36.000	9.000	2.733
G ₃	100	1.500	4.000	2.800	2.667	1.307	2.744
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux							
SD ₀	0	0.067	0.110	0.089	1.632	1.068	2.701
SD ₇	0	0.067	0.110	0.089	1.632	1.068	2.701
GMT ₃	100	1.000	20.100	6.700	20.100	2.233	2.793
GMP ₃	100	0.100	5.500	1.900	55.000	6.564	2.787
SD50-GMP50	50	0.051	2.100	0.110	41.176	0.113	2.752
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario							
SOT	0	0.280	1.000	0.510	3.571	0.929	2.719
SOA	0	0.270	1.000	0.510	3.704	0.963	2.705

* Groupe 1 -- les particules du gravier passent le tamis 10 mm

Groupe 2 -- les particules du gravier passent le tamis 14 mm pour le GMP₃ et le tamis 75 mm pour le GMT₃

Groupe 3 les particules passent le tamis 14 mm

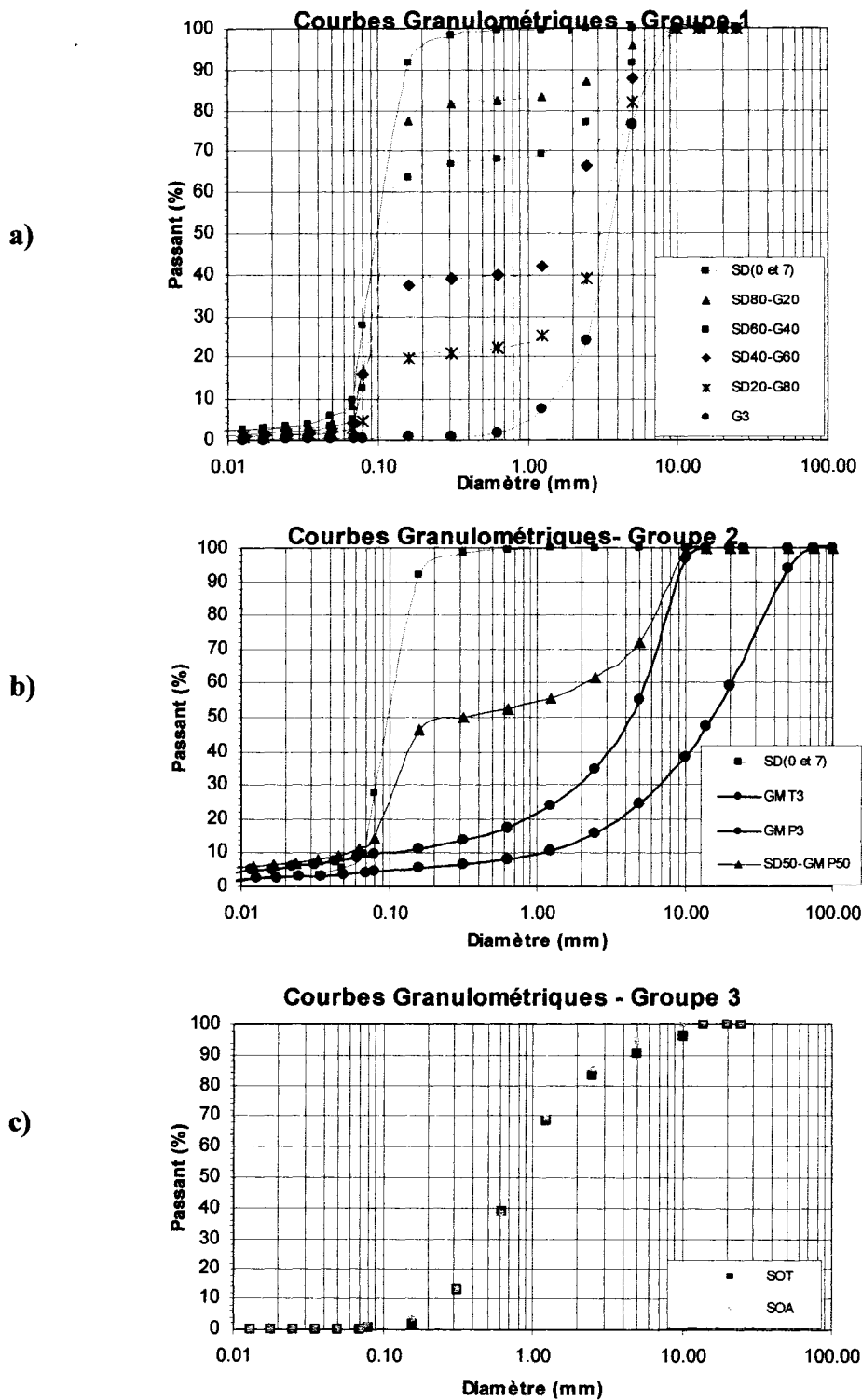


Figure 4.1 Courbes granulométriques des divers sols des groupes 1(a), 2(b) et 3(c)

La figure 4.1 montre que les courbes granulométriques des mélanges du groupe 1(a) et 2(b) forment une sorte de plateau selon le pourcentage de gravier ajouté au sable. Ce plateau peut affecter la valeur du coefficient d'uniformité (C_U) et du coefficient de courbure (C_C). Les sols non mélangés, tels le SD₀, SD₇, SOT, SOA, GMT₃, GMP₃ et G₃, sont plus homogènes.

Le tableau 4.2 montre les propriétés des sols suite à la mise en place des colonnes. Il donne les valeurs de la masse sèche, la porosité, la teneur en eau et l'indice des vides au montage calculés avec la méthode des relations masse-volume décrite par Chapuis et al. (1989, 2006), et présentée en détail au chapitre 3 (tableau 3.4). Ces valeurs représentent la porosité moyenne de l'ensemble de la colonne.

Le calcul de la porosité et de la masse sèche après l'essai est basé sur les données obtenues au démontage des colonnes. Le sol est enlevé des colonnes tranche par tranche. La porosité est calculée selon les mesures de volume et de masse, pour chaque tranche enlevée (voir Annexe 2 pour les détails). La porosité moyenne est ensuite calculée avec la moyenne des données obtenues pour chaque tranche de sol. L'élévation de chaque tranche correspond au milieu de la couche, par rapport à la plaque poreuse (au fond de la colonne). À noter que l'élévation (pour la pression d'eau) est calculée selon la position de la nappe.

La figure 4.2 montre la variation de l'indice des vides en fonction du pourcentage de gravier dans les sols placés dans les colonnes. Les valeurs données au montage sont identifiées au tableau 4.2

Tableau 4.2 Propriétés des sols dans les colonnes

Identification	Pourcentage de gravier total dans le matériau* (%)	Masse sèche (Ms) au montage (g)	Teneur en eau (w) au montage (%)	Porosité (n) au montage (-)	Indice des vides (e) au montage (-)	poids unitaire (g/cm ³)	Masse sèche (Ms) après l'essai (g)	indice des vides (e) après l'essai (-)	porosité (n) après l'essai (-)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux									
SD ₀	0	23 568.7	0.250	0.391	0.641	1.660	21 799.1	0.627	0.386
SD ₇	0	21 850.5	7.170	0.440	0.785	1.520	22 061.9	0.773	0.436
SD80-G20	20	45 485.0	6.030	0.382	0.617	1.710	45 255.9	0.586	0.370
SD60-G40	32	51 314.0	6.900	0.298	0.425	1.850	49 488.2	0.459	0.315
SD40-G60	60	49 758.0	6.500	0.251	0.336	2.000	49 310.7	0.353	0.261
SD20-G80	80	50 783.0	5.990	0.279	0.387	1.786	51 337.8	0.370	0.270
G ₃	100	37 858.5	5.990	0.432	0.762	1.530	37 635.4	0.788	0.441
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux									
SD ₀	0	23 568.7	0.250	0.390615	0.641	1.660	21 799.1	0.627	0.3855457
SD ₇	0	21 850.5	7.170	0.439776	0.785	1.520	22 061.9	0.773	0.4358258
GMT ₃	100	108 554.1	4.710	0.305	0.438	1.930	10 8028	0.448	0.309
GMP ₃	100	52 558.8	5.990	0.263	0.357	2.099	52 447.1	0.378	0.274
SD50-GMP50	50	45 437.4	8.330	0.303	0.435	1.860	45 426.9	0.424	0.298
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario									
SOT	0	44 808.0	2.820	0.327	0.485	1.830	44 866.5	0.497	0.332
SOA	0	48 729.0	3.160	0.333	0.499	1.780	48 550	0.507	0.337

* Groupe 1 -- les particules du gravier passent le tamis 10 mm

Groupe 2 -- les particules du gravier passent le tamis 14 mm pour le GMP₃ et le tamis 75 mm

pour le GMT₃

Groupe 3 les particules passent le tamis 14 mm

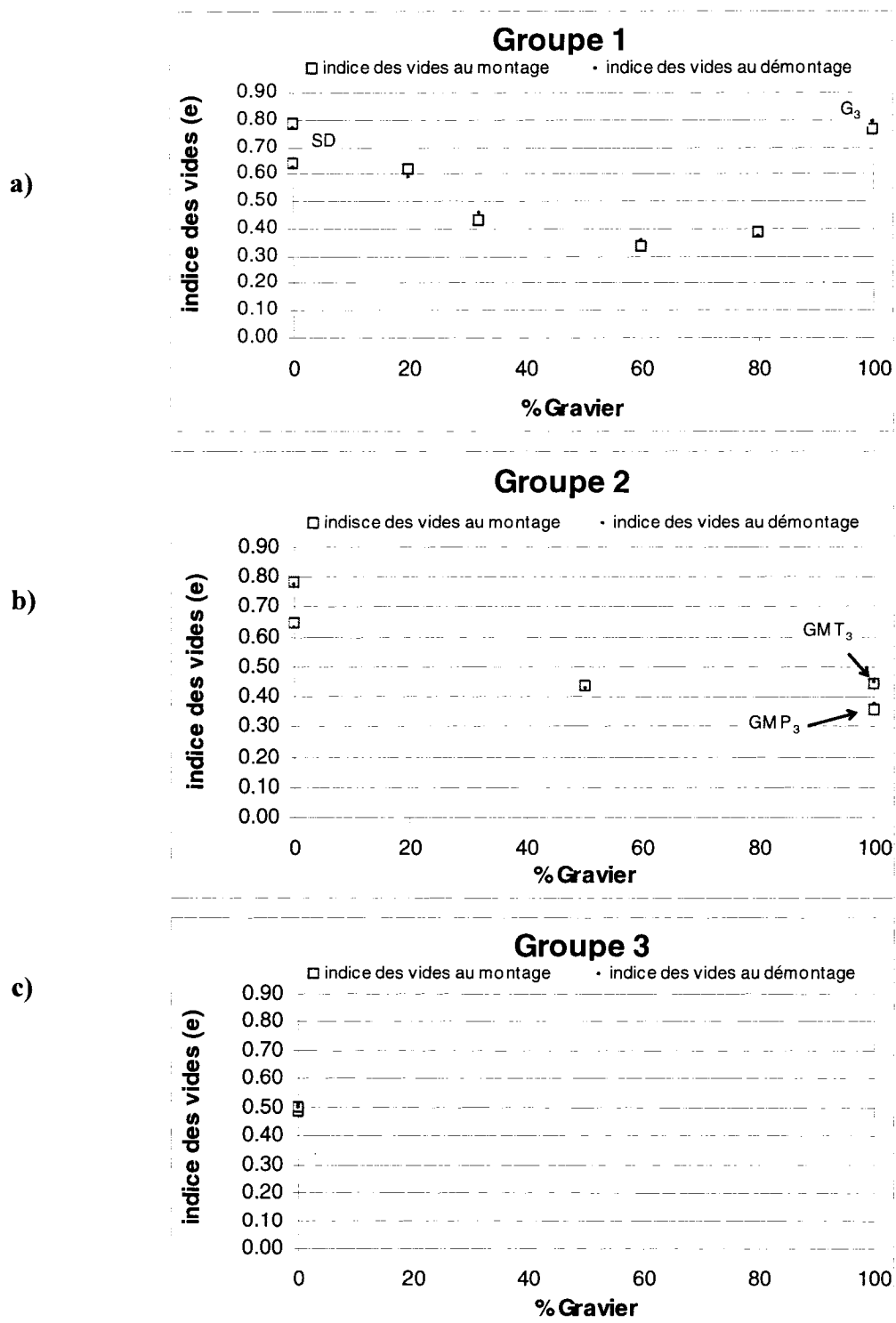


Figure 4.2 Valeurs de l'indice des vides moyen en fonction du pourcentage de gravier (résultats au montage et après démontage)

Rappelons que la méthode de mise en place de chaque sol dans les colonnes était uniforme. La même procédure de montage était accomplie et maintenue pour chaque sol.

Les résultats de la figure 4.2(a) montrent que l'indice de vides semble inversement proportionnel au pourcentage de gravier, jusqu'à un pourcentage de 60% environ. Au-delà de ce pourcentage, la valeur de n se stabilise ou augmente avec la quantité de gravier dans le sol. Ce résultat est en accord avec les résultats de Morin et al. (2004) pour deux sites au Massachusetts (USA). Les auteurs montrent que la porosité d'un mélange entre sable et gravier diminue avec l'augmentation du pourcentage de gravier, jusqu'à un pourcentage d'environ 75% graviers dans ce cas. Au-delà de ce pourcentage, la porosité augmente.

Les groupe 2 et 3 de la figure 4.2 (b,c) montrent que l'indice des vides des sols SOT et SOA (sable de l'Ontario) est similaire à celui du sol GMT₃ (gravier Mirabel Total).

4.2. Mesures de la conductivité hydraulique

Des essais de perméabilité à charge variable ont été réalisés sur des grandes colonnes pour tous les sols étudiés. Quelques essais ont aussi été réalisés à charge constante. Chaque essai était répété au moins deux fois pour chaque charge (variable ou constante). Les colonnes à parois rigides, décrites au chapitre 2, avaient un diamètre intérieur de 15 cm, excepté pour les sols GMT₃, SD₀ et SD₇ qui étaient montés dans des colonnes avec un diamètre intérieur de 30 cm (pour le sol GMT₃) et 10 cm (pour les sols SD₀ et SD₇).

4.2.1. Conductivité hydraulique et indice des vides

Le tableau 4.3 montre les résultats obtenus suite aux essais de perméabilité au laboratoire. Les valeurs de l'indice de vide des sols, déterminées au démontage des colonnes sont, aussi montrées dans le tableau.

Tableau 4.3 Valeurs de la conductivité hydraulique mesurée expérimentalement au laboratoire et valeurs de l'indice des vides et porosité au démontage

Identification	Indice des vides (e) au démontage (-)	Porosité (n) au démontage (-)	Conductivité hydraulique (k_{sat}) à charge variable (2 essais) (cm/s)	Conductivité hydraulique (k_{sat}) à charge constante (2 essais) (cm/s)	Conductivité hydraulique (k_{sat}) moyenne entre charges variable et constante (cm/s)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux					
SD ₀	0.627	0.386	1.55E-02	--	1.55E-02
SD ₇	0.773	0.436	4.76E-03	--	4.76E-03
SD80-G20	0.586	0.370	3.57E-03	--	3.57E-03
SD60-G40	0.459	0.315	2.50E-03	--	2.50E-03
SD40-G60	0.353	0.261	2.66E-03	8.83E-04	1.77E-03
SD20-G80	0.370	0.270	3.58E-02	7.25E-02	5.41E-02
G ₃	0.788	0.441	6.60E-02	1.42E+01	7.13E+00
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux					
SD ₀	0.627	0.386	0.016	--	1.55E-02
SD ₇	0.773	0.436	0.005	--	4.76E-03
GMT ₃	0.448	0.309	1.14E-01	--	1.14E-01
GMP ₃	0.378	0.274	3.13E-02	--	3.13E-02
SD50-GMP50	0.424	0.298	1.57E-03	--	1.57E-03
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario					
SOT	0.497	0.332	8.90E-03	7.16E-02	4.03E-02
SOA	0.507	0.337	9.81E-03	5.39E-02	3.19E-02

Les résultats expérimentaux ont été comparés à ceux prédits par des modèles prédictifs. Les modèles de prédiction utilisés sont ceux de Kozeny-Carman (KC) et

Kozeny Carman Modifié (KCM), qui ont été présentés à la section 2.3.3 du mémoire (éq. 2.8 et 2.9).

4.2.2. Conductivité hydraulique et surface spécifique

Le tableau 4.4 donne les valeurs de la conductivité hydraulique prédite selon deux modèles.

Tableau 4.4 Valeurs de la conductivité hydraulique prédite et valeurs de la surface spécifique selon les deux modèles de prédiction

Identification	Surface Spécifique (Ss) Kozeny-Carman (KC) Eqn. 2.28 (m ² /kg)	Surface Spécifique (Ss) Kozeny-Carman Modifié (KCM) Eqn. 2.30 (m ² /kg)	Surface Spécifique (Ss) Kovac's Modifié (MK) Eqn. 2.31 (m ² /kg)	Conductivité hydraulique (k _{sat}) Kozeny-Carman (KC) Eqn. 2.8 (cm/s)	Conductivité hydraulique (k _{sat}) Kozeny-Carman modifié (KCM) Eqn. 2.9 (cm/s)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux					
SD ₀	42.07	50.62	43.98	2.31E-03	3.13E-03
SD ₇	42.07	50.62	43.98	3.96E-03	8.14E-03
SD80-G20	28.92	46.94	39.71	4.05E-03	2.65E-03
SD60-G40	25.96	41.94	34.63	2.63E-03	1.06E-03
SD40-G60	15.53	29.01	18.74	3.62E-03	6.48E-04
SD20-G80	13.44	20.14	12.97	5.39E-03	1.65E-03
G ₃	1.90	2.06	1.62	1.98E+00	5.20E+00
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux					
SD ₀	42.07	50.62	43.98	2.31E-03	3.13E-03
SD ₇	42.07	50.62	43.98	3.96E-03	8.14E-03
GMT ₃	39.45	2.17	1.42	9.99E-04	3.31E-01
GMP ₃	87.90	18.40	11.82	1.28E-04	2.08E-03
SD50-GMP50	165.00	38.34	24.66	5.09E-05	8.49E-04
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario					
SOT	5.34	10.62	7.98	7.63E-02	2.38E-02
SOA	5.76	11.01	8.22	7.01E-02	2.47E-02

Le tableau 4.4 montre aussi les valeurs de la surface spécifique calculée selon les modèles de Kozeny-Carman (KC), Kozeny-Carman Modifié (KCM) et Kovac's Modifié (MK) à partir des équations 2.29, 2.31 et 2.32 respectivement. La surface spécifique est utilisée explicitement pour calculer la conductivité hydraulique avec la méthode de KC, et indirectement avec le modèle de KCM.

La figure 4.3 montre une comparaison entre les valeurs de la surface spécifique calculée selon le modèle KC et les modèles KCM et Kovac's Modifié (MK).

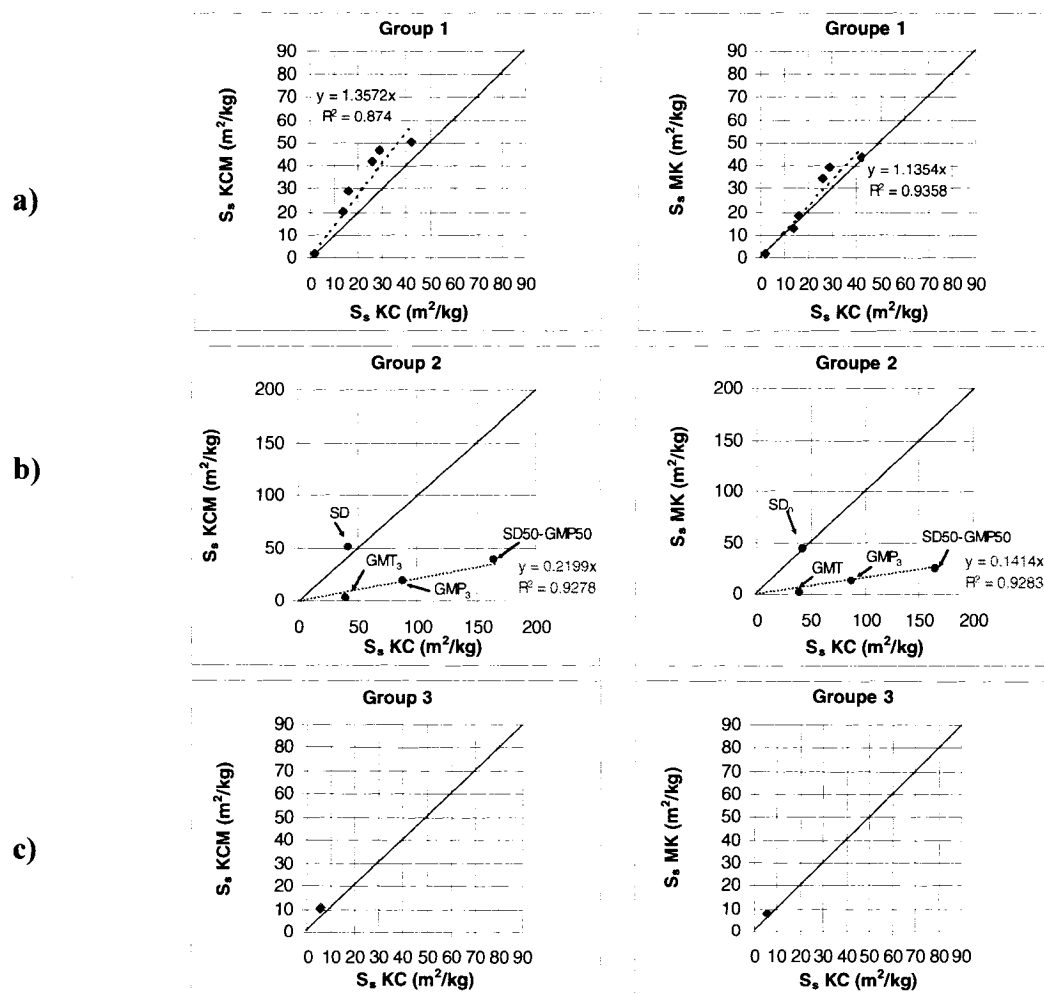


Figure 4.3 Valeurs de la surface spécifique calculées avec les modèles de KC, KCM et MK pour chaque groupe de sols.

On voit sur la figure 4.3 que les valeurs de la surface spécifique obtenues avec le modèle de KCM sont, pour le groupe 1 (figure 4.3 a), assez semblables à celles obtenues avec le modèle de KC, mais elles sont un peu plus grandes que celles du modèle MK. Le modèle MK obtient des résultats assez semblables au modèle KC. Pour le groupe 2 (figure 4.3 b), la surface spécifique selon KC est plus élevée en comparaison avec KCM et MK; ceci semble dû à la longue queue des particules fines (passant 0.08 mm) pour ces matériaux (le sable Demers est isolé des autres valeurs).

La figure 4.4 montre une comparaison entre les valeurs de la surface spécifique calculée selon les modèles KC, KCM et Kovac's Modifié (MK), sans les valeurs de la sédimentométrie (plus petits que 0.01 mm pour le groupe 2). On voit ici que les valeurs obtenues avec le modèle de KCM sont généralement assez semblables à celles obtenues avec le modèle KC. Quand on inclut les données issues de la sédimentométrie, la grande surface due aux particules fines (passant 0.80 mm) augmente la valeur de S_s . Les valeurs de S_s obtenues avec le modèle MK sont aussi semblables aux valeurs de S_s obtenus avec KC. Les divers modèles représentent donc différemment l'influence des particules fines sur S_s . À noter que les valeurs de la granulométrie ont été ajustées lorsque la partie passant 0.08 mm était enlevée.

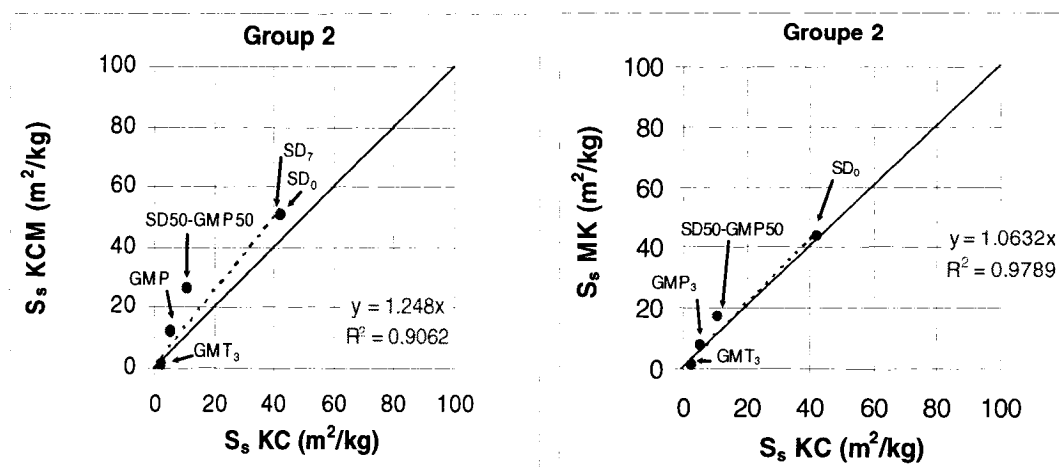


Figure 4.4 Valeurs de la surface spécifique des sols du groupe 2 calculées avec les modèles KC, KCM et MK, sans les données de la sédimentométrie.

Les valeurs de S_s selon MK sont un peu plus proches de S_s selon KC dans les deux cas (avec et sans sédimentométrie pour les grains plus petits que 0.01 mm).

4.2.3. Conductivité hydraulique prédite et mesurée.

La figure 4.5 montre une comparaison entre la valeur de la conductivité hydraulique expérimentale et celles prédites pour chaque sol selon les deux modèles utilisés (KC et KCM). Les résultats comprennent les essais à charge variable et à charge constante. La ligne inclinée sur chaque graphique de la figure 4.5 représente la corrélation parfaite entre les deux valeurs (expérimentale et prédite). Les traits pointillés représentent la corrélation parfaite à un ordre de grandeur près.

On voit à la figure 4.5(a) (groupe 1) que la valeur de la k_{sat} à charge variable pour le sol G_3 s'écarte de plus d'un ordre de grandeur de la valeur prédite par KC et KCM. Les valeurs de k_{sat} à charge constante sont assez proches des valeurs prédites par ces deux modèles. Pour le sol SD20-G80, la valeur de k_{sat} à charge constante est à plus d'un ordre de grandeur des valeurs prédites par les deux modèles (KC et KCM). La valeur expérimentale de k_{sat} à charge variable du sol SD20-G80 se trouve aussi à plus d'un ordre de grandeur de la valeur prédite par KCM.

La figure 4.5(b) montre que la valeur de k_{sat} pour tous les graviers du groupe 2 (GMP_3 , GMT_3 et SD50-GMP50) mesurées à charge variable sont à plus d'un ordre de grandeur (plus grands) des valeurs obtenues par KC. Ce sont les mêmes sols problématiques dont on a parlé à la figure 4.4 b pour la longue queue de particules fines (sédimentométrie plus petite que 0.01 mm).

Les valeurs obtenues avec le modèle KCM sont plus proches aux résultats expérimentaux que ceux par KC. Toutes les valeurs obtenues avec KCM sont à moins d'un ordre de grandeur à l'exception du matériau GMP_3 .

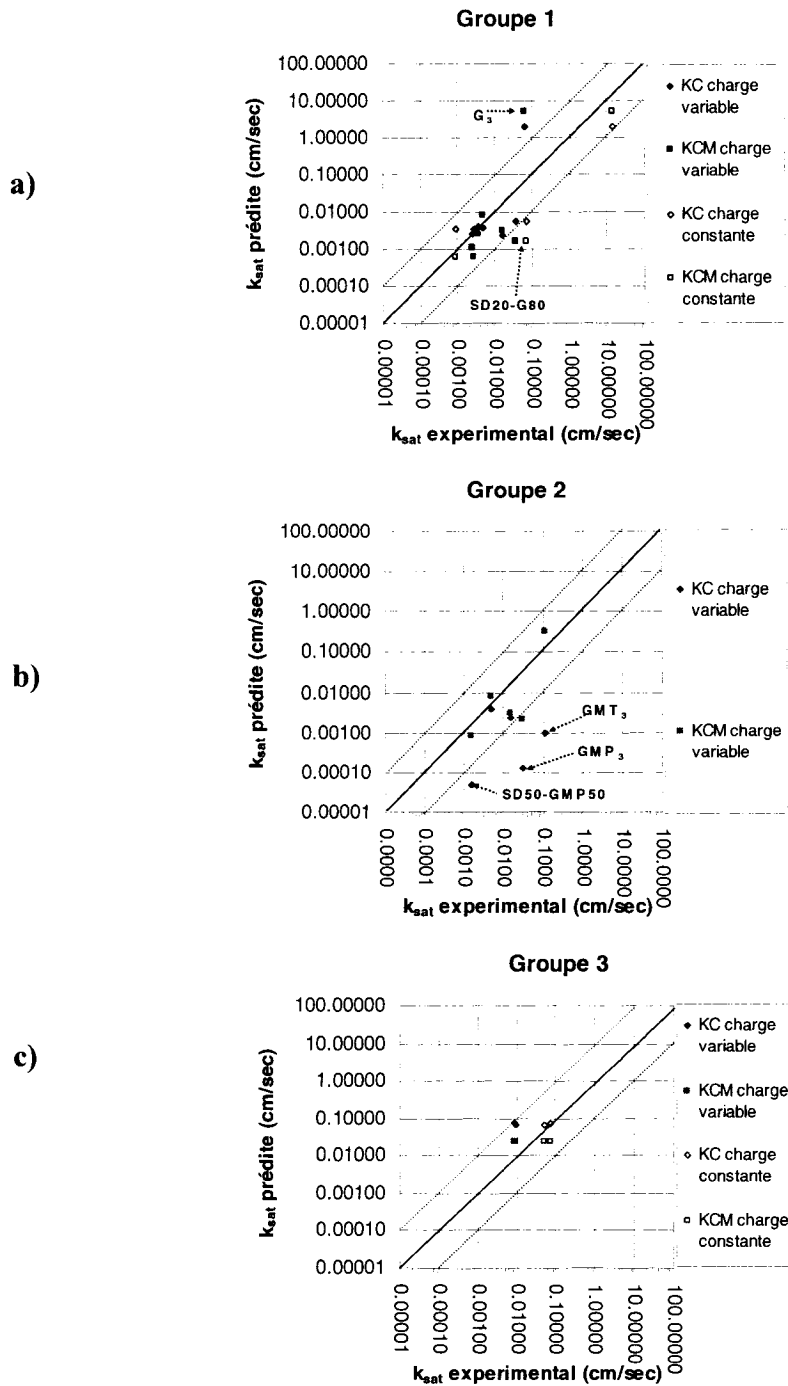


Figure 4.5 Conductivité hydraulique mesurée et prédite avec les modèles Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman Modifié (KCM); essais à charge variable.

La figure 4.5(c), montre que tous les résultats mesurés par les sols du groupe 3 sont à moins d'un ordre de grandeur des valeurs obtenues par les deux modèles. Les résultats expérimentaux obtenus lors des essais à charge constante sont plus proches des valeurs prédites par les deux modèles que ceux obtenus à charge variable.

En général, les valeurs de KCM semblent un peu plus proches des résultats expérimentaux, surtout pour les essais à charge constante.

La figure 4.6 montre la moyenne des résultats à charge constante et à charge variable, en fonction des résultats prédits par les modèles KC et KCM. On voit sur la figure qu'en général le modèle de KCM est plus proche des résultats expérimentaux. Notons ici que les sols GMT₃ et GMP₃ et SD50-GMP50 ont une forte proportion de particules fines, ce qui pourrait expliquer l'écart avec les valeurs prédites par KC.

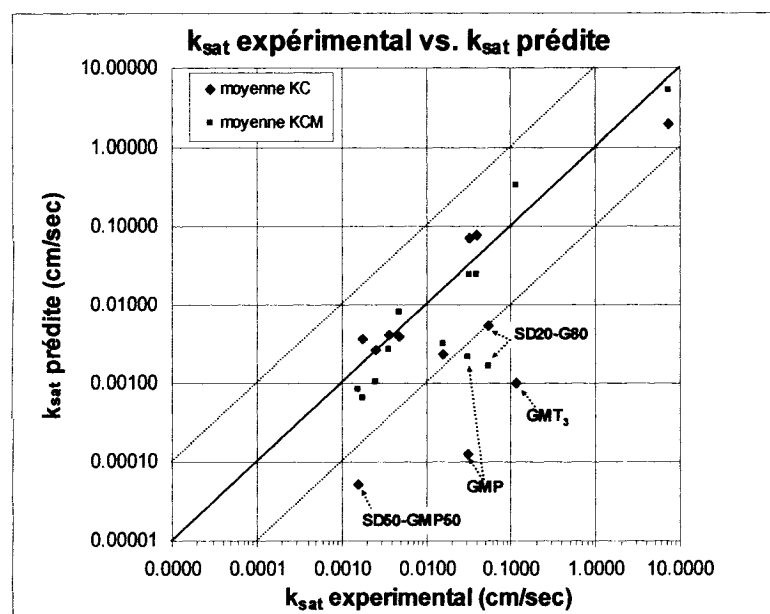


Figure 4.6 Valeurs de k_{sat} mesurée (moyenne entre résultats à charge variable et constante) en fonction de k_{sat} prédite par les modèles KC et KCM.

Les résultats expérimentaux de k_{sat} et ceux obtenus avec les deux modèles (KC et KCM) sont représentés en fonction du pourcentage gravier sur la figure 4.7 afin d'illustrer l'évolution de k_{sat} . Sur cette figure, on montre aussi la valeur de k_{sat} obtenue par Bussière (1999) sur le gravier utilisé dans certains essais.

La valeur de la conductivité hydraulique mesurée au laboratoire sous charge variable est définie pour chaque sol avec des cercles pleins de différentes couleurs (bleu pour le groupe 1 (fig. 4.7a), magenta pour le groupe 2, (fig. 4.7b), et orange pour le groupe 3 (fig. 4.7c)). Les triangles vides (avec les mêmes couleurs) représentent les résultats obtenus à charge constante.

Les résultats des modèles de prédiction y sont représentés par des carrés vides (modèle KCM) et des losanges vides (modèle KC). Les résultats expérimentaux de Bussière (1999) sont représentés sur cette figure par un triangle plein (de couleur verte).

Tout comme ce qui avait été observé sur la figure 4.2 (qui montre l'indice des vides ou la porosité vs. le pourcentage de gravier), on voit une diminution de la conductivité hydraulique avec l'augmentation du pourcentage de gravier jusqu'à une proportion entre 40% et 60%. À plus de 60 %, la conductivité hydraulique tend à augmenter.

Les matériaux des groupes 1 et 2 (figure 4.6 a et b) incluent des graviers avec les propriétés décrites aux tableaux 4.1 et 4.2. Le gravier GMP₃ du groupe 2 est l'exception.

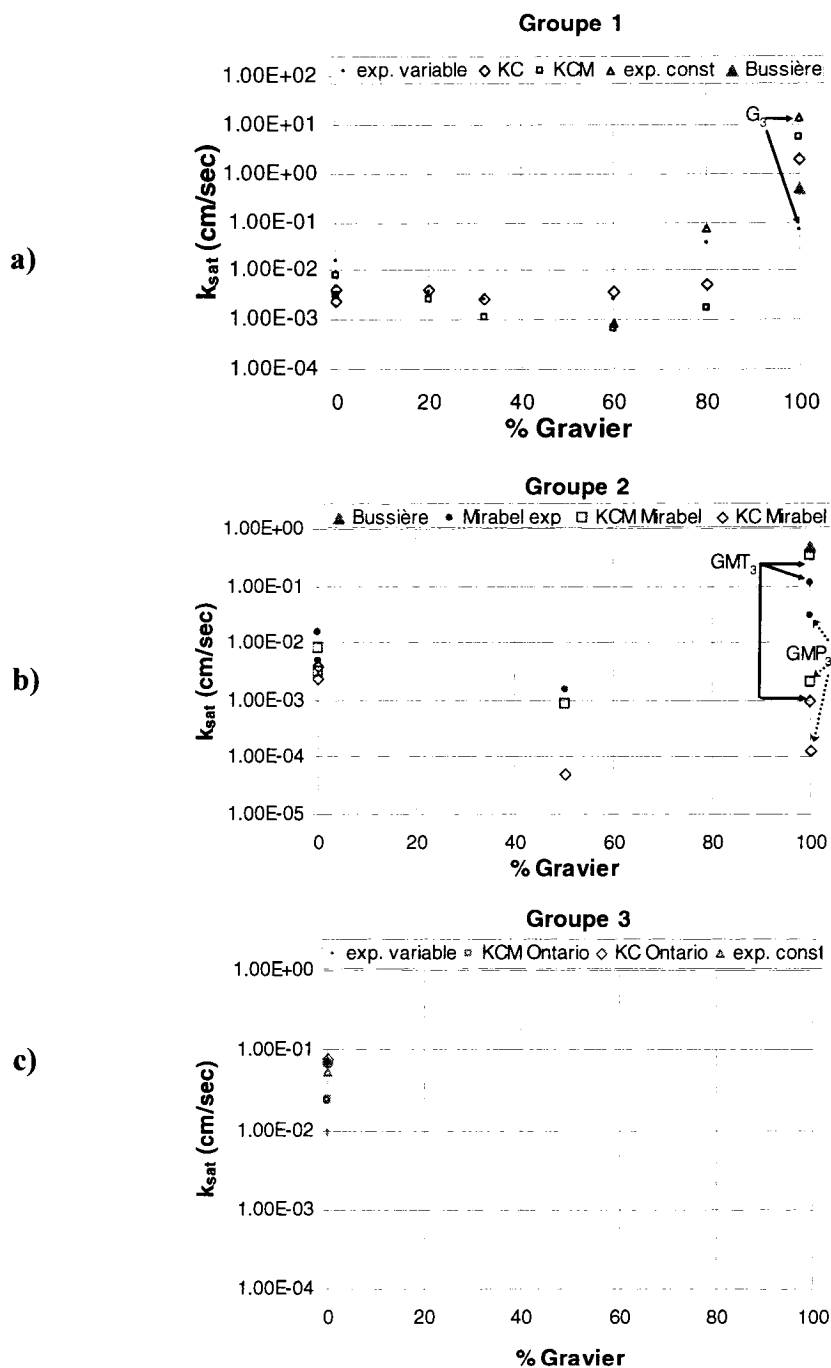


Figure 4.7 Valeurs de la conductivité hydraulique expérimentale et prédite (avec les modèles KC et KCM) selon le pourcentage de gravier pour les groupes 1(a), 2(b) et 3 (c).

Par ailleurs, les figures 4.8 et 4.9 montrent la relation entre la valeur de k_{sat} normalisée (selon les deux modèles KC et KCM) et l'indice des vides.

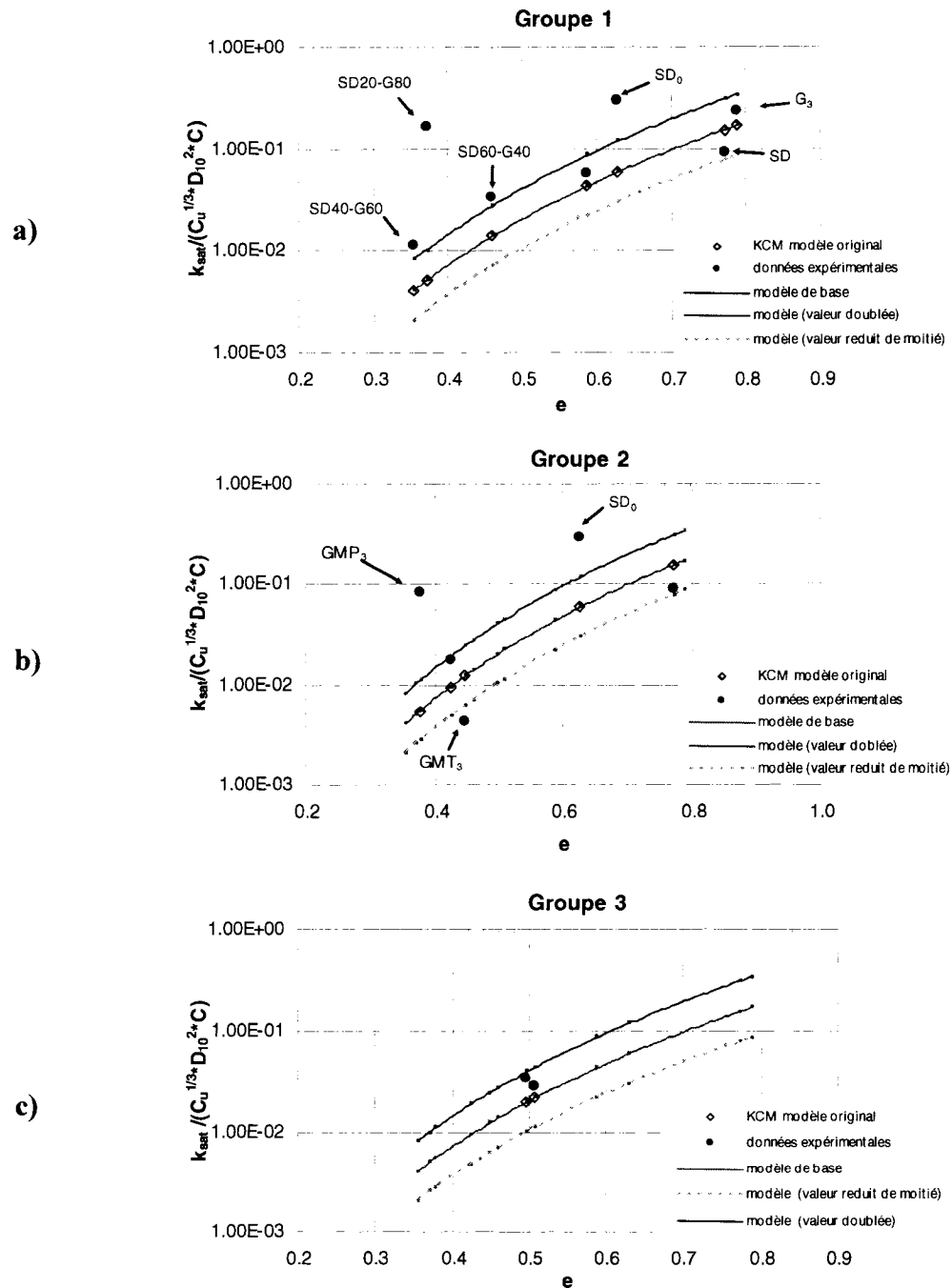


Figure 4.8 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KCM en fonction de l'indice des vides (avec $C=981$).

La figure 4.8 montre les valeurs de la conductivité hydraulique normalisée selon le modèle KCM (équation. 2.9). La valeur de la constante C utilisée dans les calculs est:

$$C = C_G (\gamma_w / \mu_w) = 0.1 \left(9.81 \text{ kN} / \text{m}^3 / 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{sec} \right) = 981 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-1} \quad (4.1)$$

Le modèle illustré à la figure 4.8 est basé sur une relation de type $f(e) = e^5/(1+e)$. Les cercles pleins représentent la valeur normalisée de la conductivité hydraulique expérimentale moyenne; les losanges représentent les valeurs normalisées de la conductivité hydraulique prédite. Le trait couleur magenta représente le modèle de base. Les traits bleus (continu et discontinu) représentent la fonction de l'indice des vides $f(e)$ multipliée par un facteur de 2 (trait bleu) ou par un facteur de 0.5 (trait discontinu, bleu pâle).

Les résultats expérimentaux normalisés sont du le même ordre de grandeur que les valeurs obtenues du modèle KCM, à l'exception des sols GMP₃, SD₀ et SD20-G80.

La figure 4.9 représente la conductivité hydraulique normalisée selon le modèle de Kozeny-Carman (KC) en fonction de l'indice des vides. Sur cette figure les cercles pleins représentent les résultats expérimentaux, les losanges vides représentent les résultats prédits avec le modèle KC (équation 2.8). La valeur de la constante C utilisée dans les calculs est:

$$C = \frac{C * g}{\mu_w \rho_w} = \frac{0.2 * 9.81 \text{ m} / \text{s}^2}{(10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}) * 998 \text{ kg} / \text{m}^3} = 1.96 \frac{\text{m}^5}{\text{kg}^2 \text{s}} * 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 196 \text{ m}^4 \text{ cm} / \text{kg}^2 \text{s} \quad (4.2)$$

Le modèle illustré est basé sur une relation de type $f(e) = e^3/(1+e)$. Le trait de couleur magenta (au milieu) représente le modèle de base (KC), soit la courbe de fonction $f(e) = e^3/(1+e)$. La courbe solide (bleue) représente la valeur calculée multipliée par un facteur de 2, et la courbe bleu pâle (discontinue) représente la valeur calculée multipliée par un facteur de 0.5.

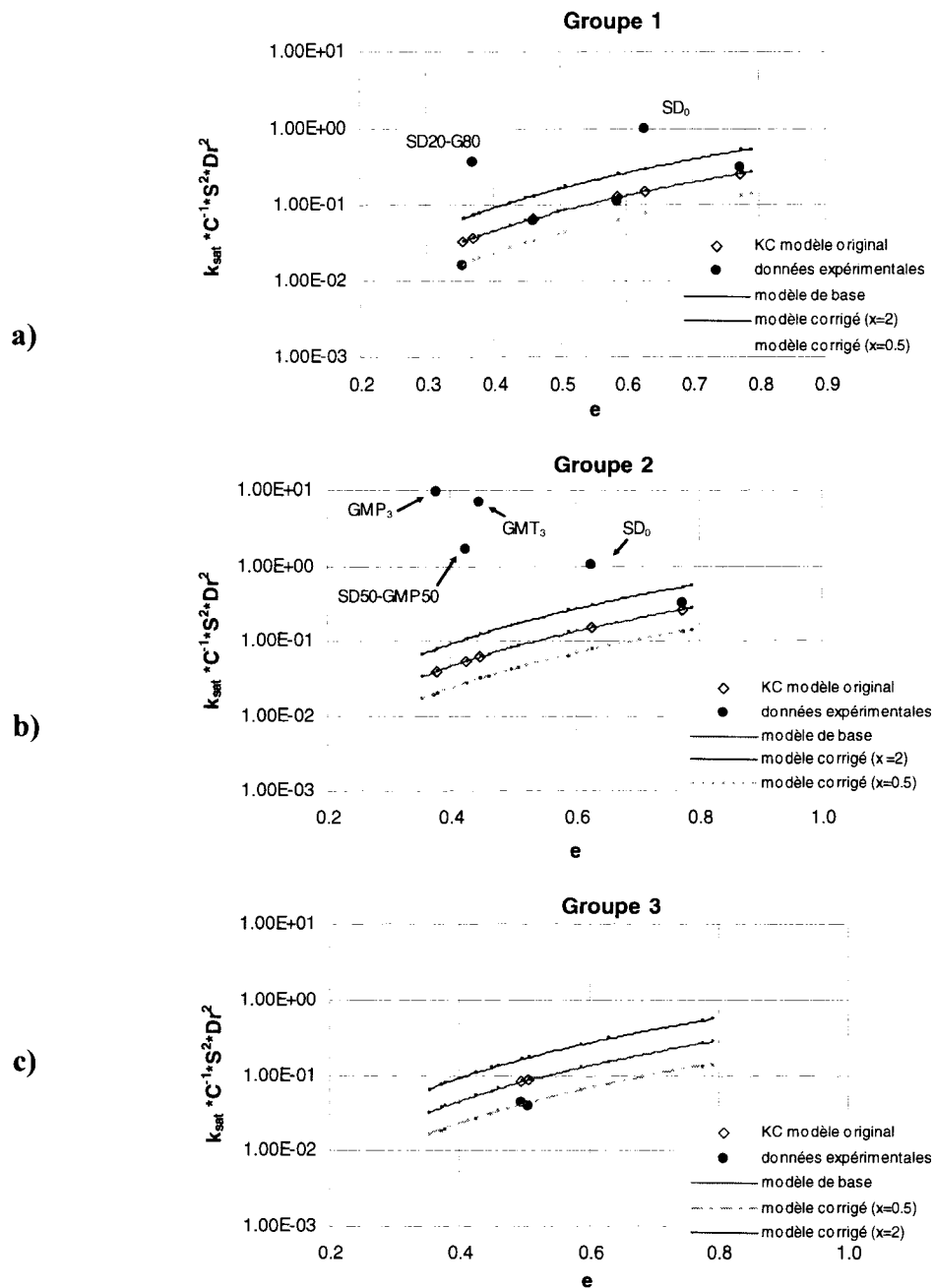


Figure 4.9 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KC en fonction de l'indice des vides (avec $C = 196$).

La figure 4.9 (a) montre que les résultats expérimentaux normalisés des sols SD₀ et SD20-G80 sont beaucoup plus grands que la valeur prédite. Ces deux valeurs ont

aussi été problématiques avec le modèle KCM (figure 4.8). La figure 4.9 (b), (groupe 2), montre que les résultats expérimentaux normalisés sont tous loin des valeurs prédites. La figure 4.9 (c) montre que les résultats expérimentaux (groupe 3) sont assez proches des valeurs prédites.

La figure 4.10 montre les valeurs de k_{sat} mesurées (normalisées) en fonction de C_U , selon le modèle de KCM. La fonction de normalisation qui se dérive de l'équation 2.9. On voit sur la figure 4.10 que quelques matériaux ne suivent pas les résultats de k_{sat} normalisée, soit la fonction $f(C_U) \approx C_U^{1/3}$ donnée par la courbe magenta. La figure 4.10a (groupe 1) montre qu'à l'exception du sol SD20-G80 et SD₀, les sols suivent la tendance prédite à un facteur de 2.9 près. La figure 4.10b (groupe 2) montre que les résultats normalisés expérimentaux ne semblent pas suivre la tendance, le sol GMP₃ est le plus éloigné de la fonction. La figure 4.10c, (groupe 3) montre que les résultats expérimentaux normalisés se trouvent assez proches de la courbe prédite (à un facteur de 1.6 près).

La figure 4.11 montre la relation entre k_{sat} normalisé et D_{10} (selon le modèle de KCM). La fonction normalisée devient ici

$$f(D_{10}) = \frac{k_{satKCM}}{C * \frac{e^5}{1+e} * C_U^{1/3}} = D_{10}^2 \quad (4.3)$$

où C est définie à l'équation 4.1

Le trait magenta sur la figure 4.11 représente la fonction de base $f(D_{10}) = D_{10}^2$. Le trait bleu représente la fonction $f(D_{10})$ ajustée (à un facteur près). La figure montre qu'en général, la valeur de k_{sat} (normalisée) augmente en fonction du D_{10} selon la tendance anticipée. Les exceptions sont, encore une fois, les sols SD₀, GMP₃ et SD20-G80.

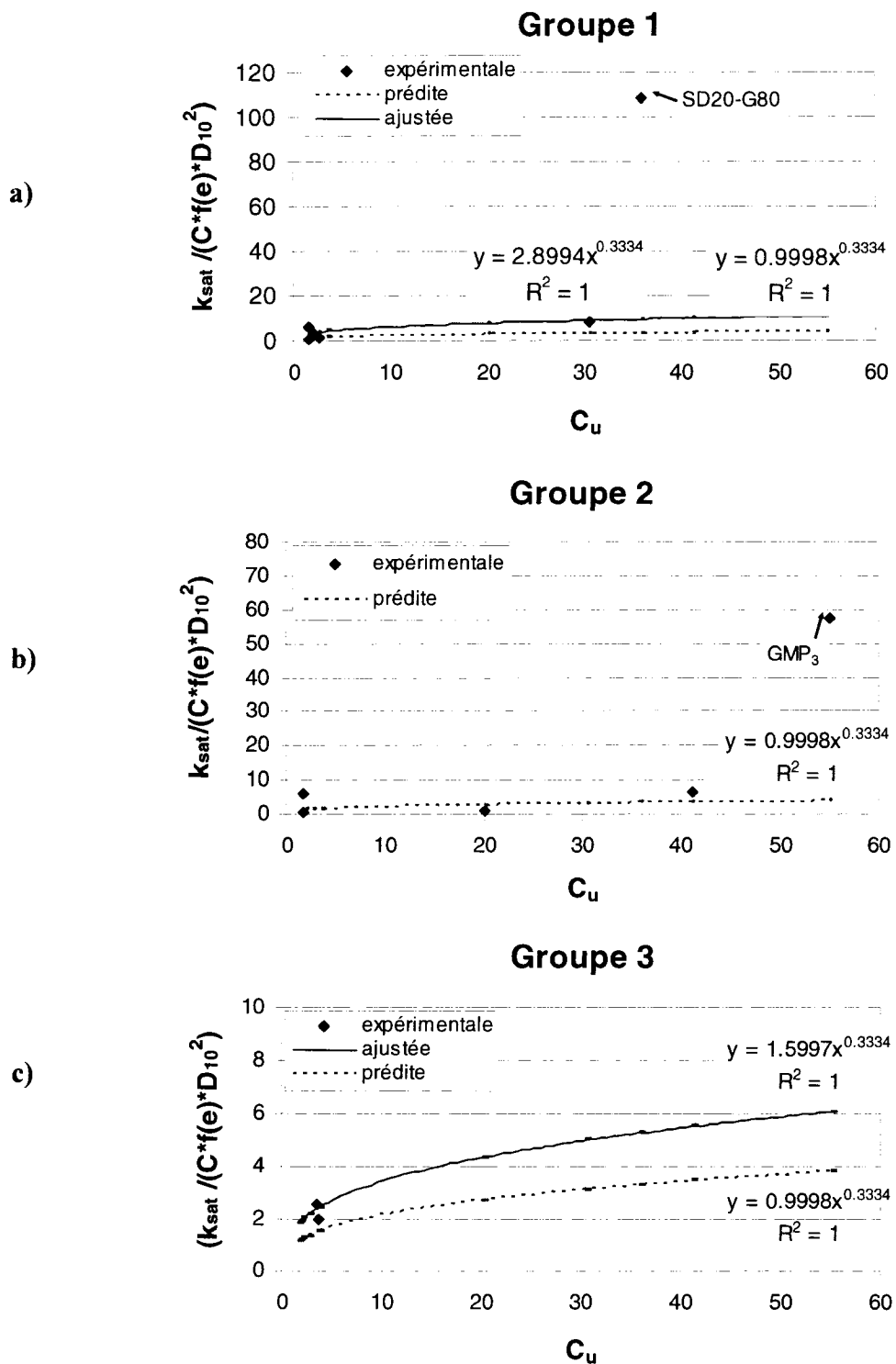


Figure 4.10 Conductivité hydraulique normalisée obtenue à partir des données expérimentales et selon le modèle KCM, en fonction du coefficient d'uniformité.

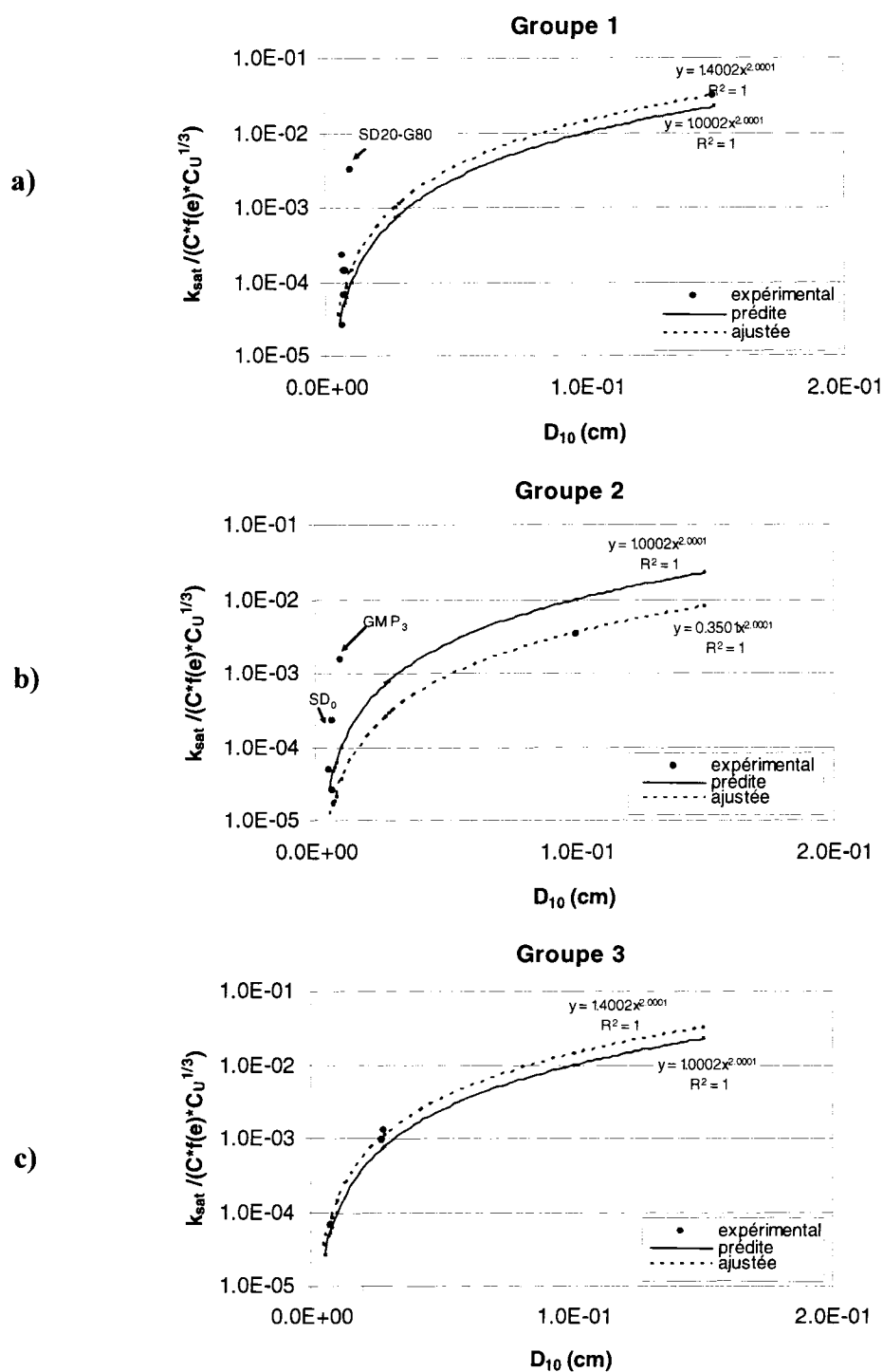


Figure 4.11 Conductivité hydraulique normalisée en fonction du D_{10} obtenue à partir des données expérimentales et du modèle KCM.

Les résultats présentés dans cette section montrent donc que les deux modèles prédictifs étudiés représentent assez bien la valeur de k_{sat} et l'effet des paramètres de base. Toutefois, certaines différences observées font supposer que les modèles pourraient être améliorés (ou que certains résultats d'essais ne sont pas représentatifs, en raison de problèmes expérimentaux surtout à cause des problèmes de ségrégation et du déplacement des particules fines en fonction du temps).

4.3. Courbes de rétention d'eau (CRE)

La CRE mesurée au laboratoire permet de définir certains paramètres d'importance pour chaque matériau analysé. Le tableau 4.5 présente une définition des termes et symboles utilisés pour une meilleure compréhension de résultats présentés dans cette section.

Le Tableau 4.5 présente une définition des termes, symboles et méthodes utilisées pour l'analyse des CRE. La figure 4.12 illustre la méthode pour décrire sur la CRE selon la méthode graphique.

Dans ce qui suit, $\psi_{a\text{-graphique MK}}$ signifie que la valeur de ψ_a obtenue selon la méthode d'intersection des tangentes avec le modèle MK. L'AEV ainsi obtenu doit typiquement être multiplié par 0.87 pour obtenir l'AEV expérimental (Aubertin et al. 2003).

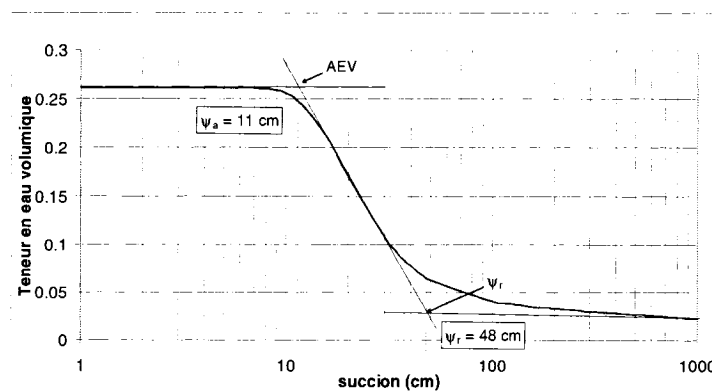


Figure 4.12 Illustration de la méthode graphique pour l'obtention des paramètres selon l'intersection des lignes.

Tableau 4.5 Rappel des termes, symboles et modèles utilisés pour les CRE.

<i>Symboles et Termes</i>	
$\psi_a \equiv \text{AEV}$	Pression d'entrée d'air (<i>Air Entry Value</i> ; $\text{AEV} \equiv 1/\alpha$ pour le modèle de van Genuchten, 1980)
ψ_r	Succion résiduelle
n_v	Paramètre de lissage de la CRE pour le modèle van Genuchten (1980)
$a_c = 0.01$	Paramètre du modèle prédictif MK
$m = 1/C_U$	Paramètre du modèle prédictif MK
TDR	Time domain reflectometry. Réflectométrie dans le domaine du temps. Technique qui permet de mesurer θ pour l'obtention de la CRE (selon la valeur de la constante diélectrique de l'eau)
θ	Teneur en eau volumique (à saturation $\theta = n$ = porosité)
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle
<i>Modèles</i>	
van Genuchten (1980)	Modèle de lissage de la CRE décrit au chapitre 1 (éqn. 1.13). Ce modèle est utilisé avec deux méthodes de régression selon le logiciel RETC (VG-R) et selon la feuille de calcul développée par Mbonimpa (VG-M).
Kovács Modifié (MK)	Modèle prédictif pour obtenir la CRE
Kovács Modifié Ajusté (KM_{aj})	Modèle MK avec paramètres ajustés
<i>Méthodes</i>	
Ajustée (MK_{aj}^*)	Modèle MK ajusté (l'ajustement est représenté par un *)
Graphique	Méthode d'obtention des paramètres des CRE selon l'intersection des lignes (voir la figure 3.13)

Les tableaux 4.6 et 4.7 résument les principales données expérimentales. Ces tableaux contiennent les valeurs du AEV (ou '*air entry value*' ; ψ_a) obtenues avec la méthode graphique (intersection des lignes) et les résultats obtenus avec les modèles utilisés. Les courbes basées sur les valeurs expérimentales ont été lissées selon le modèle de van Genuchten (1980) (équation 2.14), avec le logiciel RETC (van Genuchten et al. 1991) et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa (2003, non publiée) avec l'outil '*solveur*' de Excel®. Dans ce cas, le *solveur* détermine la valeur du moindre carré de la somme des différences entre les teneurs en eau expérimentales et théoriques (selon le modèle de van Genuchten). Les paramètres à ajuster sont α , n_v et la teneur en eau résiduelle (θ_r). L'AEV ($\psi_a \equiv 1/\alpha$) est alors déterminée visuellement.

Tableau 4.6 Paramètres de la CRE (ψ_a , ψ_r et n_v) déduites de la courbe ajustée avec RETC (van Genuchten et al. 1991).

Identification	Paramètre α Lissage Van Genuchten RETC (cm^{-1})	Paramètre n_v Lissage Van Genuchten RETC (-)	Paramètre θ_r Lissage Van Genuchten RETC (-)	AEV ($\psi_a \equiv 1/\alpha$) Lissage Van Genuchten RETC (cm)	AEV Lissage Van Genuchten RETC/graphique (cm)	Succion résiduelle (ψ_r) Lissage Van Genuchten RETC/graphique (cm)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux						
SD ₀	0.011	8.534	0.050	90.580	70.000	120.000
SD ₇	0.016	6.744	0.060	64.267	49.000	96.000
SD80-G20	0.019	11.670	0.078	53.763	45.000	71.000
SD60-G40	0.015	12.739	0.070	66.269	54.000	82.000
SD40-G60	0.017	6.420	0.050	62.000	45.000	82.000
SD20-G80	0.104	1.785	0.010	9.574	4.600	89.000
G ₃	1.112	2.544	0.034	0.899	0.420	3.200
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux						
SD ₀	0.011	8.534	0.050	90.580	70.000	120.000
SD ₇	0.016	6.744	0.060	64.267	49.000	96.000
GMT ₃	0.269	5.563	0.050	3.722	2.500	6.100
GMP ₃	0.126	1.938	0.080	7.939	3.600	54.000
SD50-GMP50	0.020	5.474	0.090	50.710	34.000	82.000
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario						
SOT	0.070	7.632	0.050	14.280	12.000	20.000
SOA	0.072	6.898	0.073	13.947	11.000	21.000

Le tableau 4.6 montre les résultats obtenus avec RETC et le tableau 4.7 montre ceux obtenus avec le fichier Excel développé par Mbonimpa (2003). Ces deux tableaux donnent les valeurs de ψ_a déduite avec la méthode du lissage, les valeurs de ψ_a et ψ_r obtenus graphiquement selon van Genuchten (1980) (méthode de l'intersection des tangentes), et la valeur de n_v calculée. Le tableau 4.7 inclut aussi la valeur de la teneur en eau résiduelle (θ_r) estimée par la feuille de calcul développée par Mbonimpa (2003).

Les CRE obtenues pour chaque colonne sont présentées dans ce qui suit (voir aussi annexe 3).

Tableau 4.7 Paramètres de la CRE (ψ_a , ψ_r et n_v) du modèle de van Genuchten (1980) déduits à l'aide des feuilles de calcul développées par Mbonimpa (2003).

Identification	Paramètre α Lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa (cm^{-1})	Paramètre n_v Lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa (-)	Teneur en eau résiduelle (θ_r) Lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa (-)	AEV ($\psi_a \approx 1/\alpha$) lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa (cm)	AEV Lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa/graphique (cm)	Succion résiduelle (ψ_r) Lissage Van Genuchten méthode Mbonimpa/graphique (cm)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux						
SD ₀	0.011	8.227	0.050	95.000	72.000	120.000
SD ₇	0.014	7.318	0.060	70.000	51.000	99.000
SD80-G20	0.018	10.195	0.070	55.000	46.000	71.000
SD60-G40	0.015	9.671	0.060	65.000	54.000	82.000
SD40-G60	0.015	7.300	0.050	65.000	49.000	89.000
SD20-G80	0.143	1.614	0.000	7.000	3.800	79.000
G ₃	1.667	2.145	0.031	0.600	0.100	10.100
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux						
SD ₀	0.011	8.227	0.050	95.000	72.000	120.000
SD ₇	0.014	7.318	0.060	70.000	51.000	99.000
GMT ₃	0.333	10.329	0.050	3.000	2.500	7.100
GMP ₃	0.200	1.924	0.080	5.000	4.700	39.000
SD50-GMP50	0.020	5.332	0.090	50.000	35.000	82.000
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario						
SOT	0.067	8.697	0.056	15.000	13.000	18.000
SOA	0.077	5.601	0.073	13.000	13.000	18.000

Les figures de 4.13 à 4.21 montrent les CRE du groupe 1, divisées en deux catégories (avec les lettres a et b). Les figures (a) montrent aussi la valeur de la porosité moyenne (par tranche) du matériau calculé selon la méthode des masses et la porosité moyenne de la colonne au complet avant le démontage. Elles montrent les valeurs θ - ψ obtenues expérimentalement en laboratoire, selon la mesure de la teneur en eau massique (w) utilisée pour obtenir la teneur en eau volumique (θ), ainsi que les relevés

au TDR non corrigés (pour les figures 4.13 à 4.16). Pour les figures 4.17 à 4.27, les valeurs au TDR ont été corrigées pour mieux représenter les mesures directes de w et n .

Rappelons que la mesure au TDR (« *time domain reflectometry* », ou réflectométrie en domaine du temps) générée par l'appareil (*Soil Moisture 6050x1*) donne une teneur en eau basée sur la relation entre K_a (constante dialectique du milieu, dominée par celle de l'eau) et θ . La relation utilisée ici pour corriger ces mesures est du type $K_a = a\theta - b$ (où a et b sont des constantes qui peuvent être ajustés pour obtenir de meilleurs résultats).

Les figures présentées en (b) montrent le lissage des résultats expérimentaux selon le logiciel RETC (van Genuchten et al. 1991) et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa (2003), selon les paramètres correspondants. L'ajustement de la CRE avec RETC est fait selon la porosité moyenne de la colonne obtenue au démontage (tranche par tranche – voir annexe 2 pour voir les calculs pour chaque colonne pour obtenir la porosité moyenne).

Rappelons que pour toutes ces figures, on a postulé que la colonne avant atteint la condition d'équilibre, i.e. la succion en un point déterminé correspond à la distance par rapport à la position de la sortie d'eau au bas des colonnes.

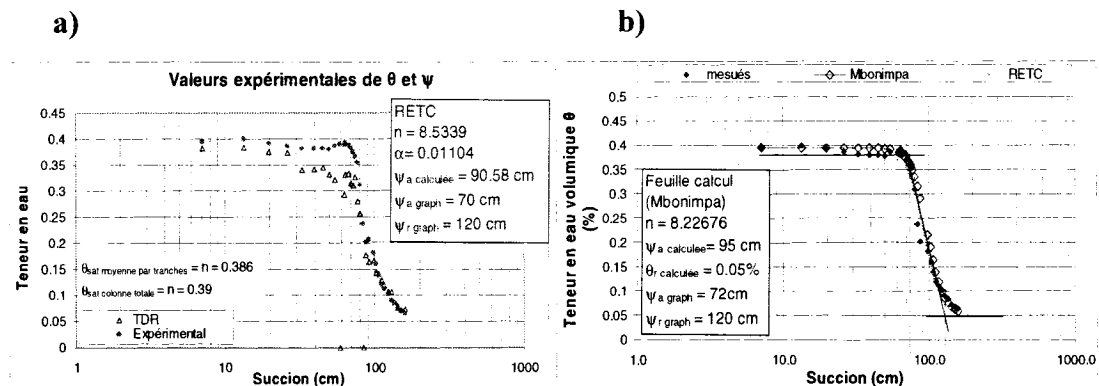


Figure 4.13 Courbes de rétention d'eau du matériau SD₀

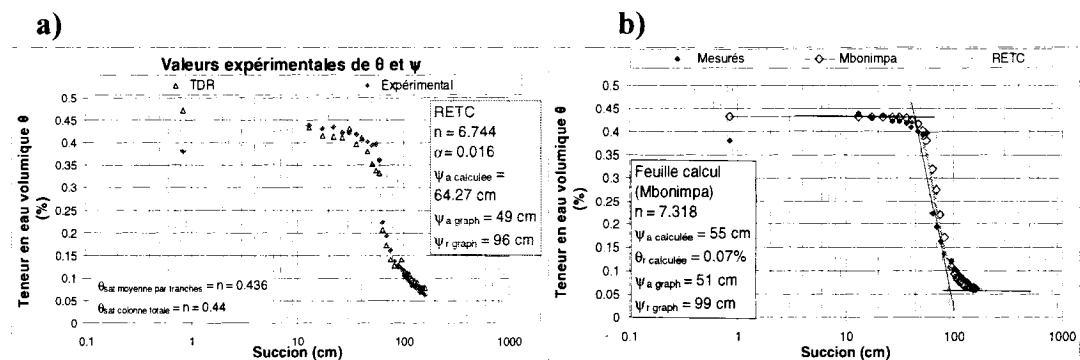


Figure 4.14 Courbes de rétention d'eau du sol SD₇

Les figures 4.13 et 4.14 montrent aussi les valeurs de ψ_a et ψ_r obtenues par la méthode graphique selon la courbe de lissage de RETC et celle de la feuille de Mbonimpa pour les sols SD₀ et SD₇ respectivement. Les résultats des deux méthodes sont presque identiques pour les deux sols. Par exemple, pour le sol SD₀ (figure 4.13), la valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est de 72 cm, avec la feuille (Mbonimpa) et de 70 cm avec RETC. La valeur de $\psi_{a\text{-calculée}}$ (où $\psi_a = 1/\alpha$) est de 95 cm avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa (2003) et de 91 cm avec RETC. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 120 cm avec les deux. Les résultats du paramètre de lissage n_v sont de 8.23 avec la feuille de calcul et de 8.53 avec RETC. Pour le sol SD₇ (figure 4.14), la valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est d'environ 50 cm pour les deux méthodes. La valeur de $\psi_{a\text{-calculé}} = (1/\alpha)$ est de 55 cm

avec la feuille de calcul, et de 64 cm avec RETC. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 99 cm pour la feuille de calcul et de 96 cm pour RETC. La valeur du paramètre de lissage n_v est de 7.32 avec la feuille de calcul et de 6.74 avec RETC.

Notons ici que la teneur en eau à saturation du sable Demers est quelque peu différente sur les figures 4.13 (SD_0) et 4.14 (SD_7), car n est égale à 0.39 et 0.44 respectivement. La figure 4.13 représente les résultats de la colonne de sable montée à sec, avec des couches de 2 cm d'épaisseur, tandis que la figure 4.14 montre les résultats obtenus pour la colonne de sable Demers humidifié à 7%, avec des couches de 3 à 4 cm d'épaisseur. Pour ces deux cas, les valeurs de θ obtenues avec le TDR sont pratiquement similaires à celles obtenues selon la méthode de la teneur en eau massique w (avec $\theta = w(1-n)D_r$).

On peut aussi mentionner que la teneur en eau volumique à saturation montrée à la figure 4.15 est presque semblable à celle obtenue par Pednault (2007, mémoire de maîtrise à soumettre) avec le même sable humidifié à 7%.

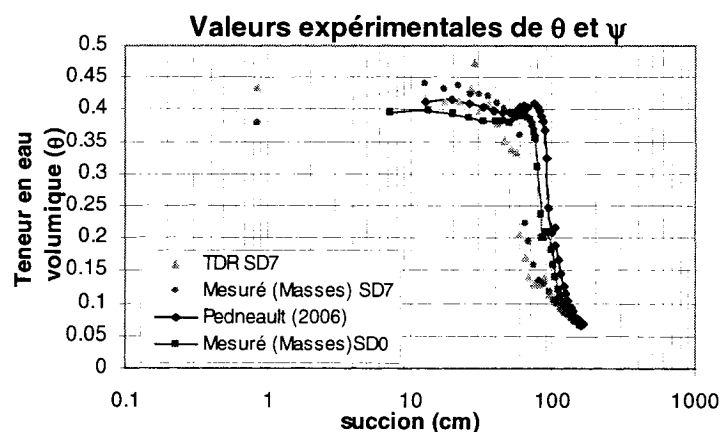


Figure 4.15 Valeurs observées sur le sable Demers pour les colonnes montées par Pednault (2007, mémoire de maîtrise) et par l'auteur.

La figure 4.16 montre la CRE du mélange du sol SD80-G20. Les valeurs de $\psi_{a\text{-calculée}}$, $\psi_{a\text{-graphique}}$ et $\psi_{r\text{-graphique}}$ obtenues avec le lissage de RETC et celui de la feuille de Mbonimpa sont presque identiques. La valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est d'environ 45 cm pour

les deux méthodes. La valeur de $\psi_{a\text{-calculé}} (\cong 1/\alpha)$ est d'environ 55 cm, et la valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est d'environ 70 cm, pour les deux méthodes. La valeur du paramètre de lissage n_v est de 10.20 avec la feuille de calcul et de 11.67 avec RETC. La teneur en eau à saturation (obtenue expérimentalement avec la méthode des masses pour la colonne totale avec la porosité moyenne) est de 0.39.

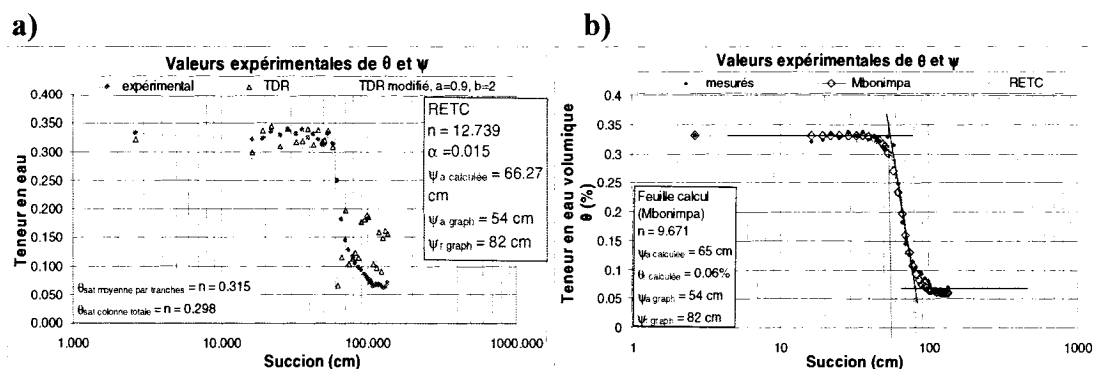


Figure 4.16 Courbes de rétention d'eau du sol SD80-G20

Contrairement aux résultats qui précèdent, les résultats montrés à la figure 4.17 indiquant que les valeurs de θ obtenues avec le TDR pour le sol SD60-G40 sont assez variables et pas toujours similaires aux valeurs obtenues avec la méthode de la teneur en eau massique. Cela peut être relié au pourcentage de gravier plus élevé. Dans ce cas, les dents des fourchettes de l'appareil TDR sont alors plus difficiles à insérer dans le sol. Lorsque le pourcentage de gravier est relativement élevé, ce type de mesure ne serait donc pas idéal pour mesurer les valeurs de θ . De plus, on a dû changer d'appareil de mesure TDR en cours de route car le premier semblait être endommagé (il a dû être réparé).

Les résultats au TDR peuvent aussi, être trop imprécis pour faire une modélisation inverse, tel que explique par Chiasson (1989).

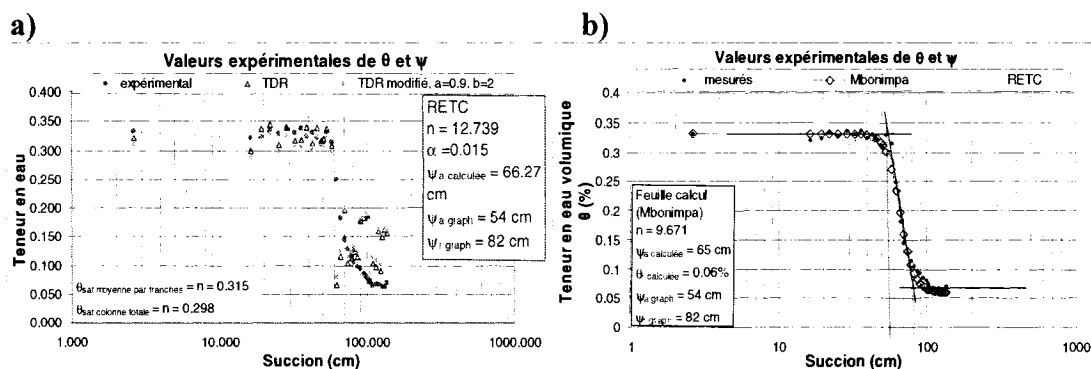


Figure 4. 17 Courbes de rétention d'eau du sol SD60-G40

La figure 4.17 montre les valeurs de $\psi_{a\text{-calculée}}$ selon RETC (66 cm), et selon la feuille de calcul développée par Mbonimpa (65 cm). Le paramètre n_v est de 12.74 avec RETC et de 9.67 avec la feuille de calcul. Les valeurs de $\psi_{a\text{-graphique}}$ sont de 54 cm et de 82 cm pour $\psi_{r\text{-graphique}}$ avec les deux méthodes.

Les figures 4.16 à 4.20 (aussi 4.22-23 et 4.25-26) montrent des valeurs obtenues au TDR qui ont dû être corrigées. Cette modification utilise les paramètres de la relation entre les données de la teneur en eau mesurées selon la méthode des masses et celles obtenues avec la sonde TDR. Rappelons que cette équation s'écrit

$\theta_{\text{TDR}} = a\theta_{w\text{-mass}} + b$. Les constantes a et b sont ajustées pour atteindre une relation le plus proche possible entre la teneur en eau obtenue selon la méthode des masses (au démontage, moyenne des tranches – voir annexe 2) et celle obtenue selon le TDR.

Pour le sol SD40-G60 (figure 4.18), la valeur de $\psi_{a\text{-calculée}}$ ($1/\alpha$) selon RETC est de 62 cm, et de 65 cm selon la feuille de calcul développée par Mbonimpa. La valeur de n_v est de 6.42 avec RETC et de 7.36 avec la feuille de calcul. Les valeurs de $\psi_{a\text{-graphique}}$ donnent 49 cm avec la feuille de calcul et 45 cm avec RETC. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 89 cm avec la feuille de calcul et de 82 cm avec RETC.

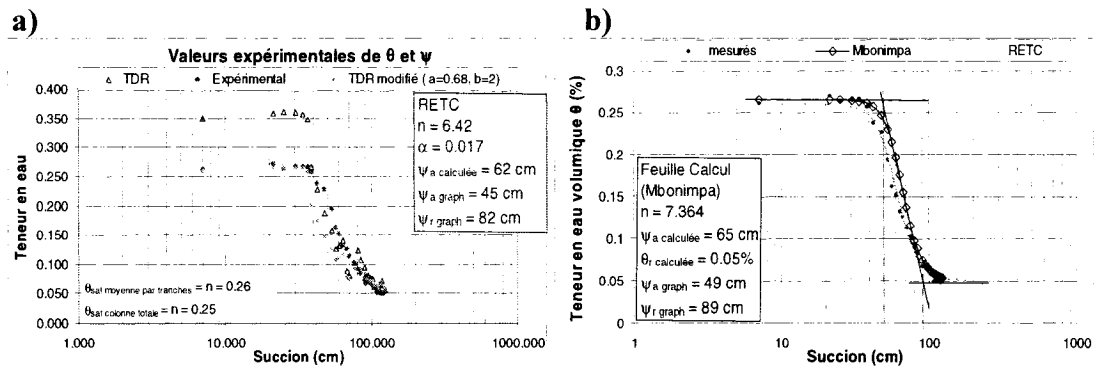


Figure 4.18 Courbes de rétention d'eau du sol SD40-G60

À partir d'une teneur en gravier de 40% à 60%, les valeurs de teneur en eau mesurées au TDR sont encore plus erratiques, avec des valeurs à saturation qui sont généralement bien plus grandes que la teneur en eau mesurée directement (selon $\theta_w = w(1-n)*D_r$). La différence entre les valeurs de TDR et de la teneur en eau mesurée peut-être due à l'insertion des fourchettes, et aussi au fait que l'eau s'accumule en bas de la colonne, de sorte que les dernières lectures montrent souvent une valeur plus grande que la porosité réelle. Cette différence peut aussi, être dû à la ségrégation des particules fines et/ou au déplacement des fins pendant l'écoulement de l'eau, tel qu'explique par Chiasson (1989)

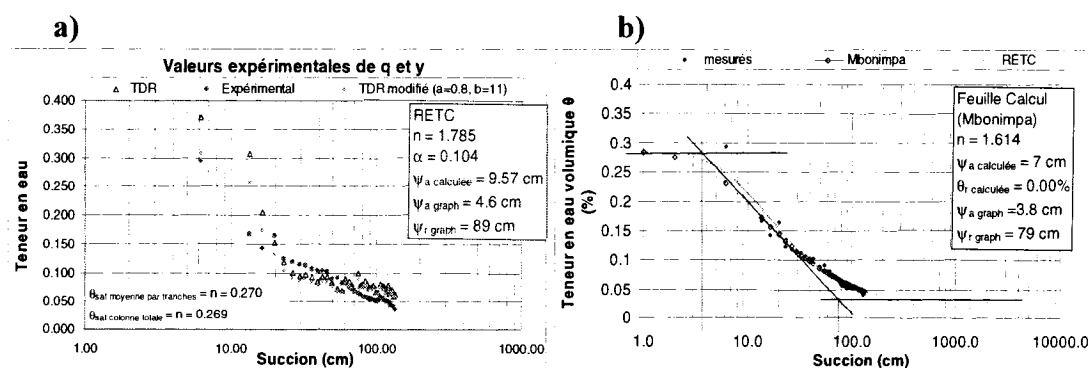


Figure 4.19 Courbes de rétention d'eau du sol SD20-G80

Pour le sol SD20-G80 (figure 4.19) la valeur de $\psi_{a\text{-calculé}}$ selon RETC est de 9.6 cm et de 7 cm avec la feuille de calcul. Le paramètre n_v obtenu avec RETC est de 1.79 et de 1.61 avec la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est de 4.6 cm et 3.8 cm selon RETC et la feuille de calcul respectivement. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 89 cm avec RETC et de 79 cm avec la feuille. Les valeurs des divers paramètres sont donc assez proches les uns des autres lorsque estimées selon ces deux méthodes.

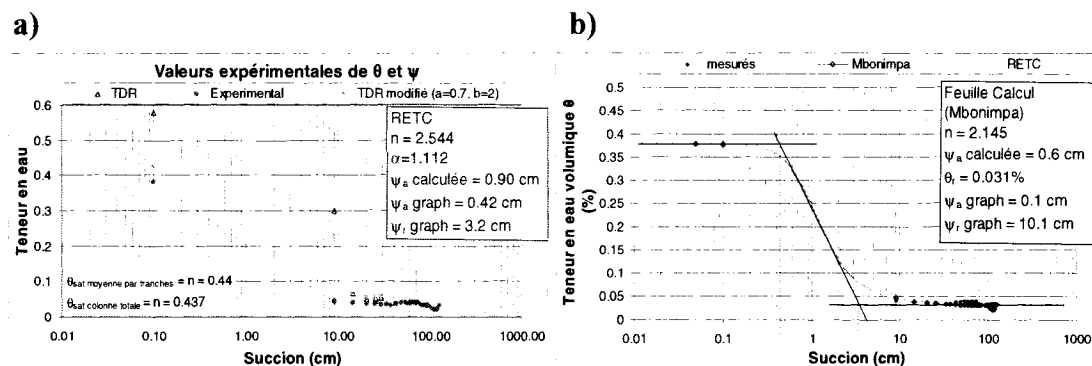


Figure 4.20 Courbes de rétention d'eau du sol G₃

Pour le sol G₃ (la figure 4.20), la valeur du paramètre n_v est de 2.54 selon RETC et de 2.15 selon la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{a\text{-calculé}}$ est de 0.90 cm avec RETC et de 0.60 cm avec la feuille de Mbonimpa et al. La valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est d'environ 0.42 cm avec RETC et de 0.10 cm avec la feuille de calcul. Les valeurs de $\psi_{r\text{-graphique}}$ sont de 3.2 cm et 10.1 cm selon RETC et la feuille de calcul respectivement. Les deux approches donnent donc des résultats un peu différents ici.

Les figures 4.21 à 4.24 montrent les CRE pour les sols du groupe 2 (SD₀, SD₇, GMT₃, GMP₃ et SD50-GMP50).

Pour le sol GMT₃ (figure 4.21), les résultats obtenus avec RETC et la feuille de calcul de Mbonimpa sont assez différents. Ceci est assez normal car il y a peu de points pour $\psi < \psi_r$. Ce sol contenait des particules de diamètre de 30 mm (dans une colonne de 30 cm de diamètre) et il était difficile à manipuler. En plus, le drainage rapide et la taille de grains ne nous ont pas permis d'obtenir des valeurs au TDR pour ce sol. Dans ce

cas, la valeur de $\psi_{a\text{-calculé}}$ est de 3.7 cm avec RETC et de 3 cm avec la feuille de calcul. La valeur du paramètre n_v est de 5.56 avec RETC et de 10.33 avec la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est de 2.5 cm avec les deux méthodes. Pour $\psi_{r\text{-graphique}}$, la valeur est de 6.1 cm avec RETC et de 7.1 cm avec la feuille de calcul.

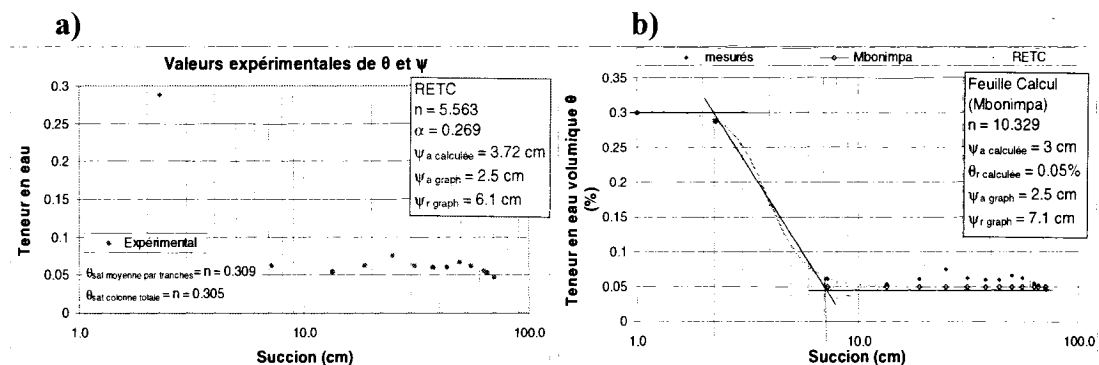


Figure 4.21 Courbes de rétention d'eau du sol GMT₃

La figure 4.22 représente la CRE du sol GMP₃. Ici, la taille maximale des grains ici est de 10 mm. La pente de la courbe de rétention d'eau en désaturation est plus douce que celle montrée à la figure 3.21 pour le sol SD0-GMT₃. La valeur du $\psi_{a\text{-calculé}}$ est de 7.9 cm avec RETC et de 5 cm avec la feuille de calcul. Une valeur de $n_v = 1.92$ est obtenue avec la feuille de calcul et de 1.93 avec RETC. Pour $\psi_{a\text{-graphique}}$, on obtient une valeur de 3.6 cm avec RETC et de 4.7 cm avec la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ obtenue selon RETC est de 54 cm et de 39 cm avec la feuille de calcul.

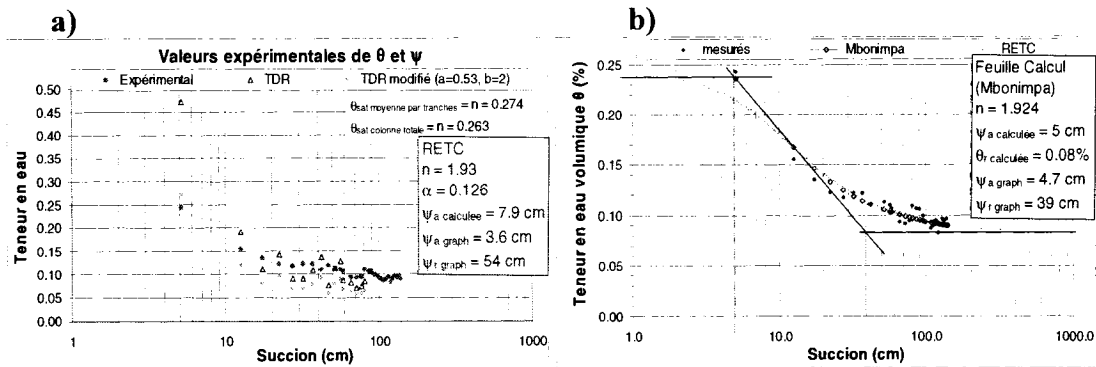


Figure 4.22 Courbes de rétention d'eau du sol GMP₃

La figure 4.23 (sol SD50-GMP50) montre les résultats obtenus sur un mélange (50-50) de sols GMP₃ (fig. 3.22) et SD₇ (fig. 4.14). La CRE pour ce mélange est assez semblable à la CRE des sols SD60-G40 (fig. 4.17) et SD40-G60 (fig. 4.18). Les courbes de rétention d'eau pour ces trois sols sont montrées à la figure 4.24. Rappelons que les mélanges SD60-G40 et SD40-G60 comportent le même sable que le sol SD50-GMP50 mais pas le même gravier. Au niveau de la CRE, les valeurs obtenues par le logiciel RETC sont assez semblables à celles obtenues par la feuille de calcul de Mbonimpa. Le $\psi_{a\text{-calculé}}$ ($1/\alpha$) est de 51 cm selon RETC et de 50 cm selon Mbonimpa. Le paramètre n_v prend une valeur de 5.31 avec la feuille de calcul et de 5.47 avec RETC. L'AEV obtenue par méthode graphique est de 34 cm selon RETC et de 35 cm avec la feuille de calcul. Le $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 82 cm avec les deux méthodes.

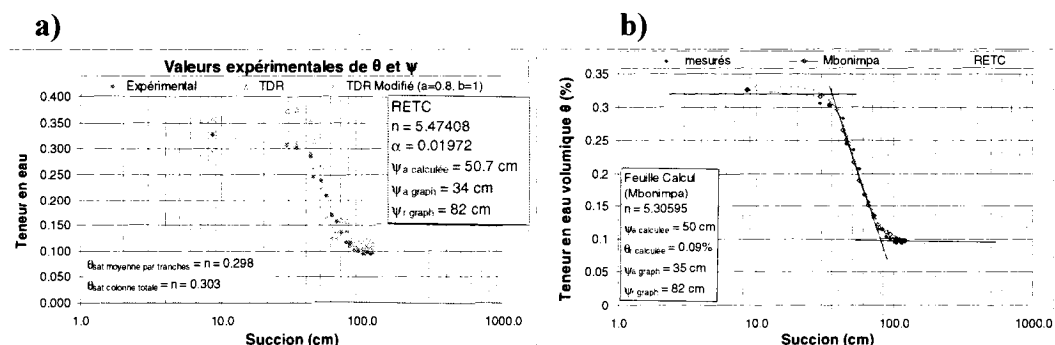


Figure 4.23 Courbes de rétention d'eau du sol SD50-GMP50

À titre comparatif, la figure 4.24 montre les CRE obtenues expérimentalement (à partir des valeurs massiques de w et n) pour les trois mélanges mentionnés précédemment (SD60-G40, SD40-G60 et SD50-GMP50). Cette figure montre que la teneur en eau à saturation ($\theta_{\text{sat}} = n$) tend à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de gravier. Toutefois, la pente des CRE semble assez semblable peu importe le pourcentage de gravier dans le sol. Nous reviendrons sur l'effet de ces divers facteurs au chapitre 4.

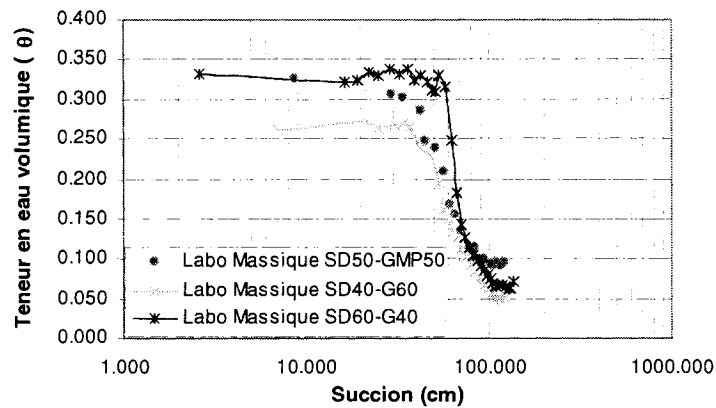


Figure 4.24 Comparaison des valeurs mesurées pour construire la CRE pour les sols S40-G60, SD50-GMP50 et SD60-G40

Les figures 4.25 et 4.26 montrent les CRE du groupe 3 (sols SOT et SOA). Ces sables ont une porosité semblable au gravier GMT₃, mais ils sont capables de retenir plus d'eau par succion, en général.

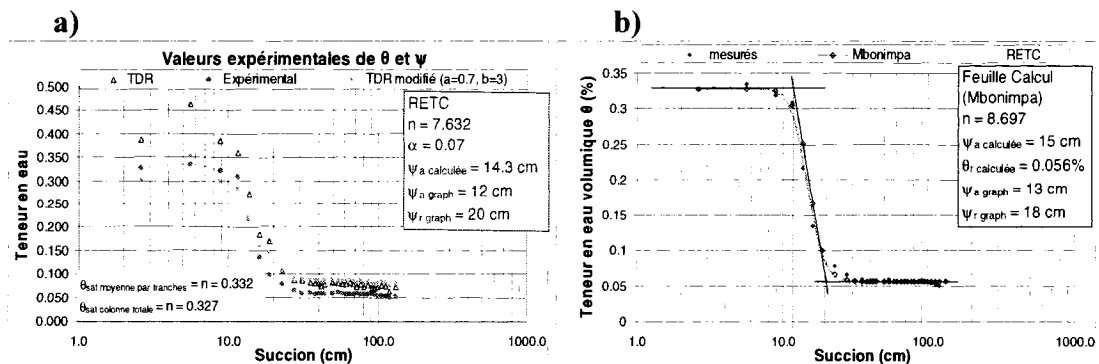


Figure 4.25 Courbes de rétention d'eau du sol SOT

Pour le sol SOT (figure 4.25), la valeur de $\psi_{a\text{-calculé}}$ ($= 1/\alpha$) est de 14 cm selon RETC et de 15 cm selon la feuille de calcul de Mbonimpa. Le paramètre n_v prend une valeur de 7.63 avec RETC et de 8.70 avec la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{a\text{-graphique}}$ est de 12 cm pour RETC et de 13 cm avec la feuille de calcul. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 20 cm pour RETC et de 18 cm pour la feuille de Mbonimpa.

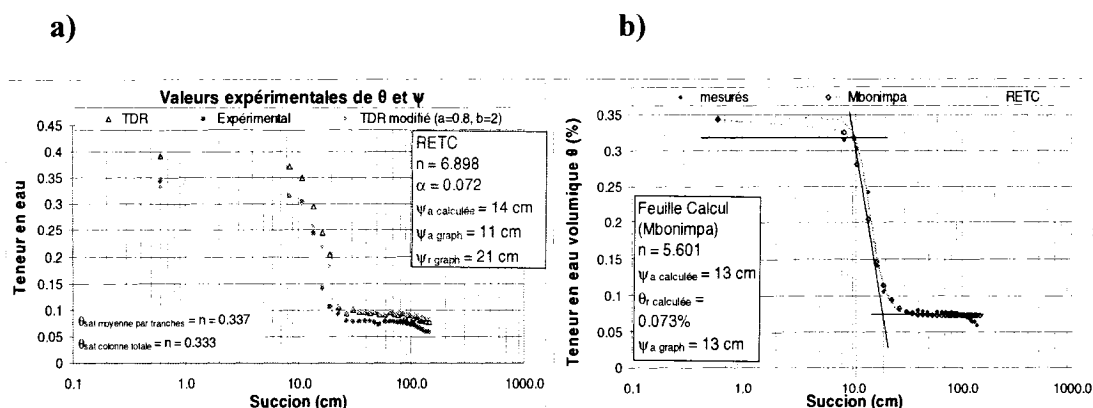


Figure 4.26 Courbes de rétention d'eau du sol SOA

Comme on peut le voir aux figures 4.25 et 4.26, les deux sables de l'Ontario (SOT et SOA) ont une CRE assez semblable. Pour le SOA (fig 4.26), la valeur de $\psi_{a\text{-calculé}}$ est d'environ 14 cm selon les deux méthodes. La valeur de n_v est de 6.90 selon RETC et de 5.60 selon la feuille de calcul. Le $\psi_{a\text{-graphique}}$ est de 11 cm pour RETC et de 13 cm selon la feuille de Mbonimpa. La valeur de $\psi_{r\text{-graphique}}$ est de 21 cm pour RETC et de 18 cm pour la feuille de calcul.

Les figures précédentes montrent donc que les paramètres du modèle van Genuchten (1980) obtenus avec le logiciel RETC et ceux calculées avec la feuille de calcul Excel développée par Mbonimpa (2003) sont presque semblables, et ce même pour les sols avec des forts pourcentages de gravier. Des différences non négligeables sont cependant observées lorsqu'il y a peu de points expérimentaux entre le ψ_a et le ψ_r .

4.3.1. Paramètres du lissage du modèle de Van Genuchten

On revoit ici les valeurs des paramètres du modèle de van Genuchten (1980) en fonction de divers facteurs d'influence.

- ***Pression d'entrée d'air (AEV)***

La figure 4.27 montre les valeurs de l'AEV (ψ_a) selon le pourcentage de gravier pour les divers sols. Chaque graphique montre quatre résultats. Deux valeurs de l'AEV ont été obtenues à partir des paramètres de lissage de la CRE expérimentale avec le modèle de van Genuchten (1980), soit une valeur selon le logiciel RETC (VG-R) et l'autre par la feuille développée par Mbonimpa (VG-M) avec $AEV = 1/\alpha$. Les deux autres résultats sont obtenus selon la méthode graphique à partir des courbes obtenues par ces deux lissages (RETC et feuille de Mbonimpa), tel que montré avec les CRE (section précédente).

La tendance observée indique que l'AEV semble diminuer lorsque la teneur en gravier passe de 0 à 20%. La valeur sur AEV augmenterait ensuite légèrement entre 20 et 60% (ou elle reste presque constante), puis elle chute assez rapidement. Ces données seront analysées plus en détail au chapitre 5.

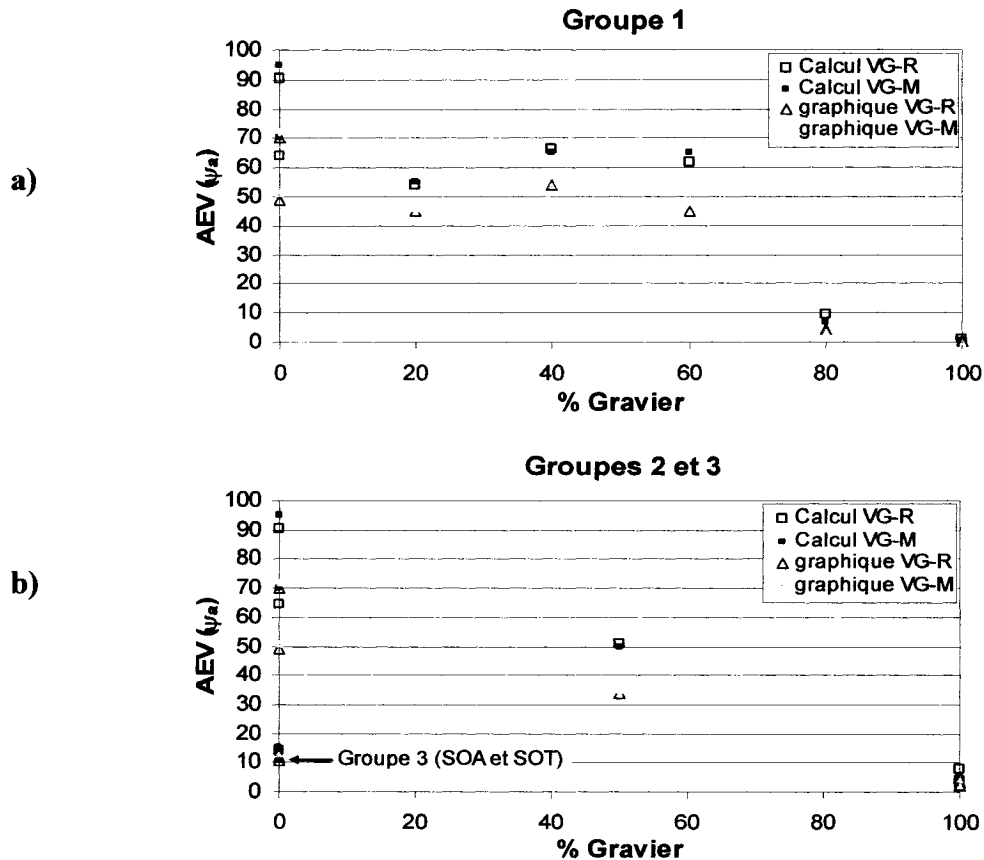


Figure 4.27 Valeurs de l'AEV en fonction du pourcentage de gravier pour les trois groupes de sol étudiés. Les valeurs sont obtenues suite au issage avec le modèle de van Genuchten (1980) avec RETC et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa.

▪ *Succion résiduelle (ψ_r)*

La figure 4.28 montre les valeurs de la succion résiduelle (ψ_r) estimée selon le pourcentage de gravier pour chaque groupe de sol étudié. La valeur de ψ_r a été obtenue selon la méthode graphique appliquée sur la CRE lissée selon le logiciel RETC et selon la feuille de calcul développée par Mbonimpa.

La figure 4.28 indique que la succion résiduelle (ψ_r) montre de façon générale des tendances assez semblables à celles du AEV. La chute du ψ_r à autour d'une teneur de 80% gravier serait toutefois moins marquée que pour ψ_a . Les résultats ont été obtenus par méthode graphique avec vanGenuchten (1980) selon RETC (VG-R) et selon Mbonimpa (VG-M).

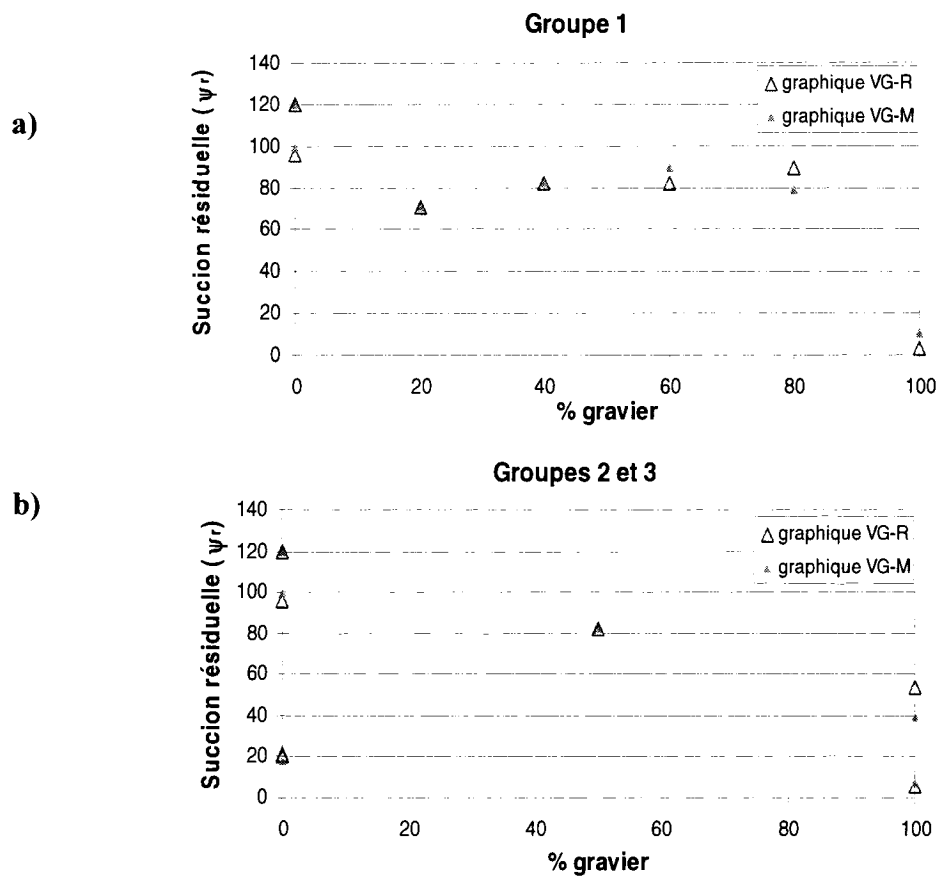


Figure 4.28 Valeurs de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage gravier pour chaque groupe de sol étudié. Les valeurs sont obtenues par méthode graphique sur la courbe lissée avec RETC et avec la feuille de calcul développée par Mbonimpa.

4.3.2. Paramètres de la CRE analysées selon le modèle MK

Cette section inclue les résultats obtenus avec le modèle de prédiction Kovács Modifié (MK) de Aubertin et al (2003). Le tableau 4.8 montre les paramètres de la CRE prédite avec le modèle Kovacs Modifié (MK) pour chaque sol. On y montre quatre paramètres, soit deux paramètres d'entrée du modèle (a_c et m), et deux paramètres de sortie (ψ_r et ψ_a) déduits des courbes calculées. Les paramètres d'entrée incluent les valeurs du départ ($a_c = 0.01$ et $m = 1/C_U$) et la valeur de m ajustée pour obtenir une courbe semblable aux données expérimentales. Le paramètre a_c n'a pas été ajusté car les résultats obtenus lors de son ajustement (non montrées dans ce mémoire) ont données des valeurs irréalistes pour le modèle. De la même façon, les paramètres de sortie du modèle auront des valeurs initiales (selon l'équation 2.25 et 2.26 respectivement et selon la méthode des tangentes) et des valeurs ajustées (notées avec * - voir tableau 4.5). Les valeurs de ψ_a et ψ_r calculées ne sont pas affectés lorsque m est ajusté parce que les équations n'utilisent que la valeur de n (porosité) ajustée pour calculer les valeurs respectives. Les valeurs de ψ_a et ψ_r montrées sur les figures sont les valeurs de l'AEV et de la succion résiduelle obtenues par la méthode des tangentes pour la CRE selon MK et ajustées par 0.87 pour obtenir l'AEV expérimental selon Aubertin et al., (2003).

Les figures incluses dans cette section sont divisées en deux : celles identifiées par la lettre (a) montrent les résultats initiaux (paramètres MK non ajustés) et celles identifiées par la lettre (b) montrent les résultats selon MK ajusté (paramètre m ajustés aux données expérimentales). Dans ce dernier cas, la valeur de m est ajustée visuellement. Sur chaque graphique, on trouve aussi les valeurs de la teneur en eau volumique obtenues expérimentalement (selon la teneur en eau volumique mesurée tranche par tranche de matériau), une CRE lissée selon le modèle de van Genuchten (1980) avec RETC (selon les données expérimentales) et une CRE obtenue selon le modèle MK. La teneur en eau en saturation pour chaque matériau est calculée selon les mesures de poids et de volume moyennes. L'élévation est calculée par rapport à la sortie d'eau de la colonne. Le milieu de la couche de matériau enlevé de la colonne est

utilisée pour définir la position et la succion correspondant à la condition d'équilibre
i.e. $\psi = h$)

Tableau 4.8 Résultats obtenus pour les paramètres de la CRE selon le modèle MK (voir texte pour explications).

Identification	Succion Résiduelle MK selon équation 2.25 (ψ_r) (cm)	Succion Résiduelle MK graphique (ψ_r) (cm)	Succion Résiduelle MK Ajustée graphique (ψ_r) (cm)	AEV MK selon équation 2.26 (ψ_a) (cm)	AEV MK graphique (ψ_a) (cm)	AEV MK Ajustée graphique (ψ_a) (cm)	Paramètre m MK selon équation 2.21 (-)	Paramètre m MK Ajustée (-)
GROUPE 1 - Sable Demers, Gravier et mélanges des deux								
SD ₀	329.04	160.00	170.00	39.80	48.72	56.55	0.613	0.900
SD ₇	256.37	120.00	130.00	33.70	38.28	35.67	0.613	0.500
SD80-G20	317.34	150.00	120.00	38.86	46.11	39.15	0.546	0.400
SD60-G40	360.73	160.00	160.00	42.32	48.72	46.11	0.488	0.500
SD40-G60	236.00	47.00	120.00	31.89	11.31	34.80	0.033	0.500
SD20-G80	145.07	32.00	37.00	23.06	6.18	4.09	0.028	0.013
G ₃	4.86	4.20	2.20	2.40	1.22	0.43	0.375	0.030
GROUPE 2 - Sable Demers, Gravier Mirabel et mélange 50% des deux								
SD ₀	329.04	160.00	170.00	39.80	48.72	56.55	0.613	0.900
SD ₇	256.37	120.00	130.00	33.70	38.28	35.67	0.613	0.500
GMT ₃	8.34	3.10	7.70	3.43	0.70	2.00	0.050	0.500
GMP ₃	129.85	26.00	18.00	21.42	4.52	2.78	0.018	0.005
SD50-GMP50	268.89	49.00	110.00	34.79	10.44	27.84	0.024	0.400
GROUPE 3 - Sable de l'Ontario								
SOT	56.55	35.00	--	12.30	8.35	--	0.280	--
SOA	56.85	29.00	--	12.35	8.18	--	0.270	--

La figure 4.29 (a) montre que la CRE obtenue avec le modèle de prédiction MK (basée sur les données au démontage) concorde relativement bien avec les données expérimentales et avec le lissage selon RETC (modèle de van Genuchten). Les valeurs de ψ_a et ψ_r obtenues graphiquement sont de 70 et 120 cm respectivement (sur la courbe CRE prédite). Les valeurs expérimentales obtenues par la CRE selon le modèle MK sont de 49 cm pour l'AEV et de 160 cm pour la succion résiduelle. La figure 4.29 (b) montre la CRE obtenue avec MK ajustée en modifiant certains paramètres (ici, la porosité n , et le paramètre m). La CRE avec MK ajusté concorde un peu mieux aux résultats expérimentaux en haut de la courbe (bas de la colonne), mais elle diffère néanmoins avec les autres valeurs mesurées expérimentalement (surtout au bas de la courbe). Le fait que la densité ne soit pas constante le long de la colonne pourrait ici causer des problèmes pour la comparaison avec le modèle. Les valeurs de ψ_a et ψ_r obtenus graphiquement selon la CRE MK sont de 57 et 170 cm. L'AEV a augmenté (proches des valeurs obtenus avec van Genuchten) tandis que la succion résiduelle avec l'ajustement s'éloigne des valeurs obtenues avec le lissage van Genuchten. Les valeurs de ψ_a et ψ_r calculées (eq. 2.25 et 2.26) selon les paramètres de MK ajusté* sont de 39 et 322 cm respectivement. Rappelons ici, que la seule variation entre les équations est l'ajustement de n .

La figure 4.30 montre les résultats obtenus pour le matériau SD₇. Sur cette figure la teneur en eau volumique moyenne calculée selon les mesures de poids et des volumes est de 0.44. Cette valeur est utilisée pour le calcul selon le modèle MK. Il n'y a pas une grande différence entre les valeurs calculées de ψ_a et ψ_r avec et sans ajustement des paramètres (ni graphiquement, ni calculées avec l'équation). Les valeurs prédites selon le modèle MK sont de 33.7 cm pour l'AEV et de 256.4 cm pour la succion résiduelle. Pour MK ajusté, les valeurs sont de 33.2 cm pour l'AEV et de 251.2 cm pour la succion résiduelle (rappelons que le changement de n était très petite de 0.436 à 0.44).

Avec la méthode graphique appliquée sur la CRE lissée selon van Genuchten, l'AEV est de 49 cm et la succion résiduelle de 96 cm. Selon MK (méthode graphique) les

valeurs obtenues pour l'AEV et la succion résiduelle sont de 38 cm et de 120 cm respectivement; avec l'ajustement du paramètre m , l'AEV est de 36 cm et la succion résiduelle est de 130 cm.

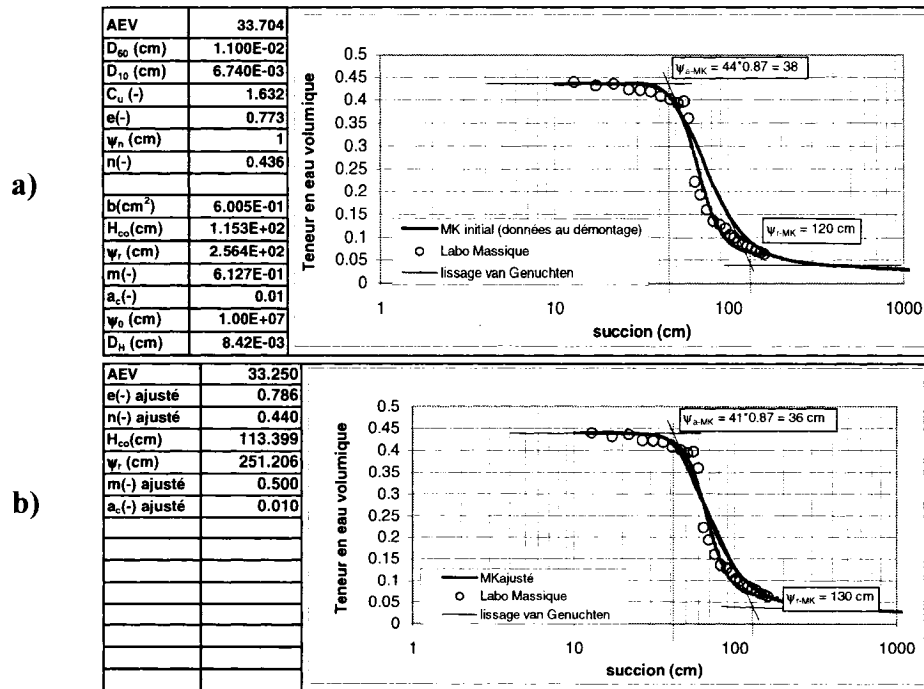


Figure 4.30 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD₇.

La figure 4.31 montre les résultats obtenus pour le matériau SD80-G20. Sur cette figure, la teneur en eau volumique moyenne calculée selon les mesures de poids et de volume par tranches est de 0.37 tandis que la porosité moyenne de la colonne (selon la teneur en eau volumique totale V_w/V_T) est de 0.39. La teneur en eau saturé utilisée pour le calcul selon le modèle MK ajusté* est de 0.38 (semblable aux résultats obtenus avec l'appareil TDR). La figure 4.31 ne montre pas une grande différence entre les valeurs calculés de ψ_a et ψ_r avec et sans ajustement des paramètres de MK. Les valeurs prédites par le modèle MK (éq. 2.25 et 2.26) sont de 39 cm pour l'AEV et de

317 cm pour la succion résiduelle. Selon MK ajusté les valeurs obtenues selon les équations sont de 38 cm pour l'AEV et de 301 cm pour la succion résiduelle. Par méthode graphique (selon van Genuchten) la valeur de l'AEV est de 45 cm et de 71 cm pour la succion résiduelle. Selon MK (méthode graphique) l'AEV est de 46 cm et la succion résiduelle de 150 cm; avec l'ajustement des paramètres m (et de n) la succion résiduelle (ψ_r) est de 130 cm et l'AEV de 39 cm.

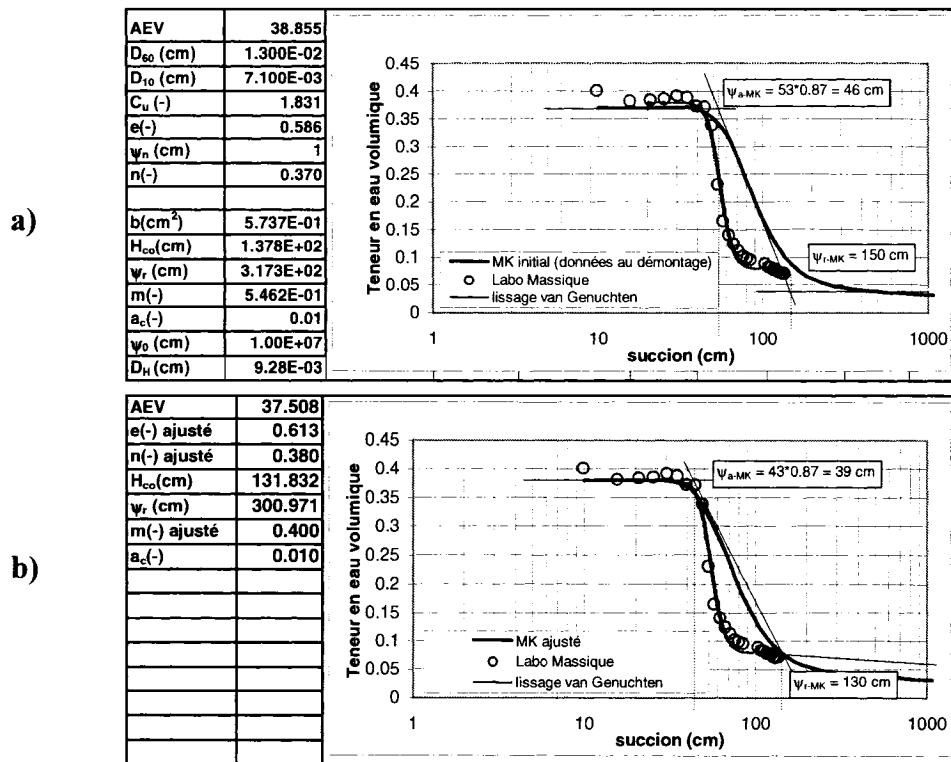


Figure 4.31 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD80-G20.

La figure 4.32 montre les résultats pour le matériau SD60-G40. La porosité (n) obtenue selon la moyenne des tranches de sol (valeur massique) est de 0.315; la valeur de 0.32 est utilisée pour le graphique de MK ajusté. Les différences entre les valeurs sont minimales. Selon le modèle MK, (équations 2.25 et 2.26) la valeur de l'AEV est d'environ 42 cm (MK ajusté et non ajusté). La valeur de la succion résiduelle est de 361 cm avec le modèle MK et 351 cm avec MK ajusté. Pour la courbe lissée selon van

Genuchten, la valeur de l'AEV est de 54 cm et de 82 cm pour la succion résiduelle par méthode graphique. Selon MK (non ajusté), la valeur de l'AEV est de 49 cm et la succion résiduelle est de 160 cm. Pour le modèle MK ajusté, la valeur de l'AEV est de 46 cm et la succion résiduelle est de 170 cm (méthode graphique). Les résultats en haut de la courbe (bas de la colonne) sont en accord avec le modèle MK (l'ajustement aide peu à améliorer les résultats au bas de la colonne).

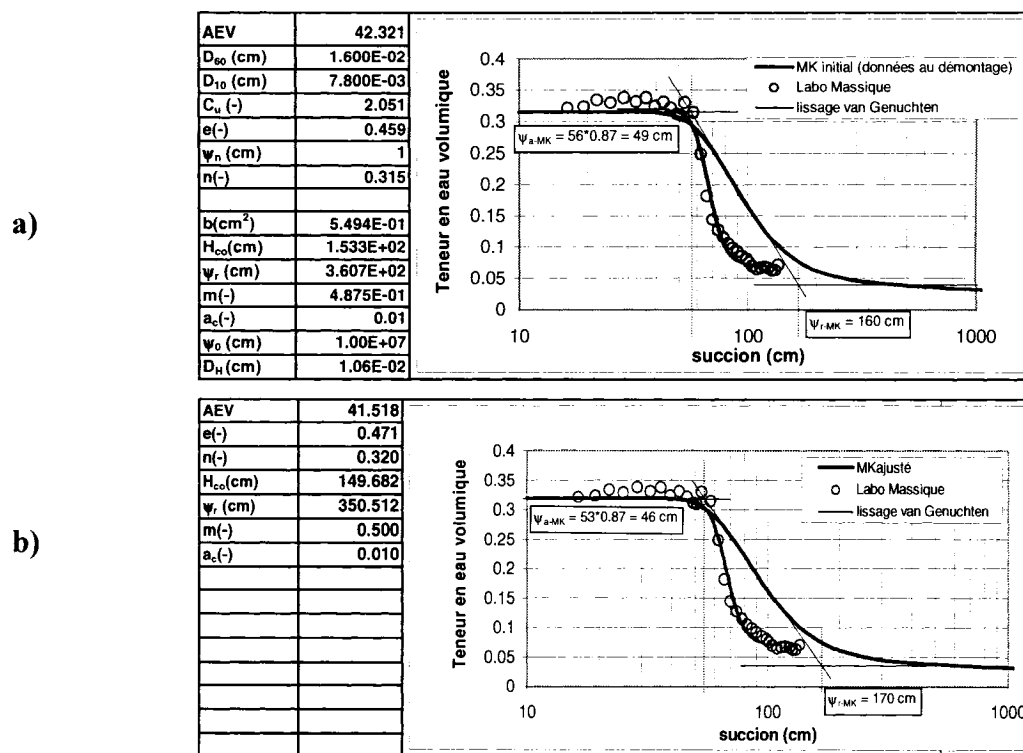
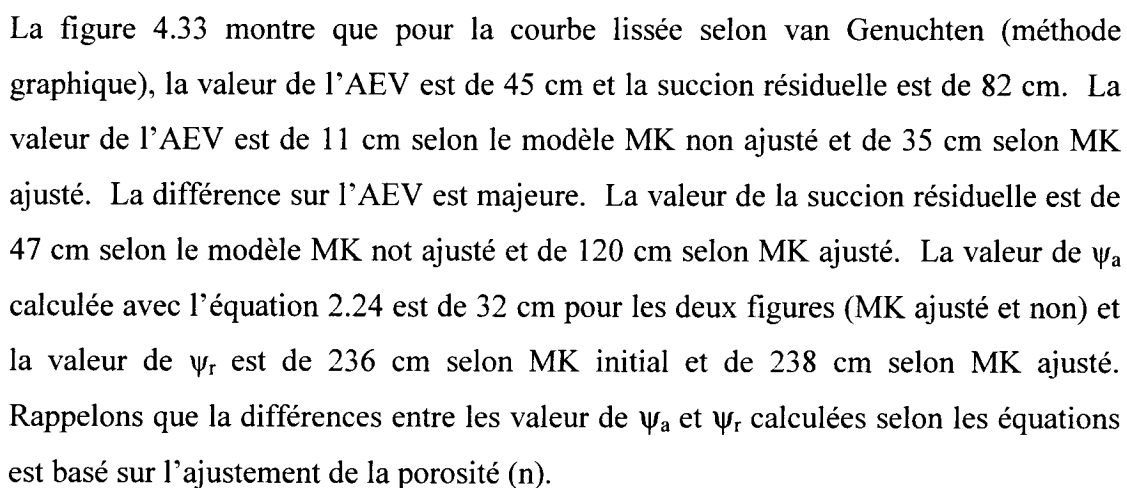


Figure 4.32 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial (a) et ajustée (b) pour le sol SD60-G40.

La figure 4.33, représentant les résultats du sol SD40-G60, montre une grande différence entre la courbe prédite et les valeurs expérimentales. Cette différence est réduite considérablement suite à l'ajustement du paramètre m . La valeur de la teneur en eau saturée selon la moyenne par tranches est de 0.26 et de 0.25 pour l'ensemble de la colonne. La valeur de 0.26 est utilisée dans les calculs de MK (semblable aux résultats de l'appareil au TDR).



La figure 4.34 montre les résultats obtenus pour le matériau SD20-G80. Sur cette figure, la teneur en eau saturée moyenne calculée par mesures de masses et volume moyenne (soit la moyenne de la porosité par tranches) donne 0.27. La teneur en eau volumique (V_w/V_T) pour le point dans le plateau de la courbe (en saturation) est de 0.29.

Les valeurs de ψ_a et ψ_r calculées avec les équations 2.25 et 2.26 (pour une valeur de n de 0.27) sont de 23 cm et de 145 cm respectivement. La valeur obtenue graphiquement sur la courbe lissée de van Genuchten est de 4.6 cm pour l'AEV et de 89 cm pour la succion résiduelle. La valeur obtenue graphiquement selon MK est de 6 cm pour l'AEV et de 32 cm pour la succion résiduelle. Pour MK ajusté (méthode graphique), la valeur de l'AEV est de 4 cm et de la succion résiduelle est de 20 cm. Selon les équations (avec une valeur de $n = 0.29$), $\psi_a = 22$ cm et $\psi_r = 133$ cm.

On suspecte que la teneur en eau résiduelle observée ici serait plus grande que la valeur réelle (en raison de la durée limitée de l'essai). Ceci expliquerait que la valeur de θ_r est élevée par rapport aux données prédites. Il faut noter que cette colonne peut aussi avoir eu un cas de ségrégation ce qui a pu affecter les valeurs mesurées et prédits (Chapuis et al., 1996).

La teneur en eau moyenne calculée selon la mesure des masses et volumes est de 0.27. Expérimentalement, la teneur en eau à saturation donne une valeur plus petite que celle observée selon les moyennes des masses et volumes, comme c'est le cas des graviers (figures 3.29 et 3.30). Les valeurs calculées de ψ_a et ψ_r selon les équations 2.26 et 2.25 sont de 21 et 130 cm respectivement; celles obtenues avec le paramètre n ajusté sont de 25 et 161 cm respectivement. Graphiquement, l'AEV pour la courbe lissée par van Genuchten est de 3.6 cm et la succion résiduelle de 54 cm. La courbe selon MK donne une valeur de l'AEV de 5 cm et de la succion résiduelle de 26 cm. Après ajustement des paramètres, la valeur de ψ_a est de 3 cm et ψ_r est de 62 cm.

La figure 4.38 montre les résultats pour le sol SD50-GMP50 (groupe 2). La teneur en eau à saturation moyenne obtenue selon la mesure des masses et volumes (par tranches) est de 0.30, et celle obtenue selon la teneur en eau volumique globale est de 0.33. Cette figure montre une tendance assez similaire au cas du sol SD40-G60 (figure 3.34). Le sol SD50-GMP50 montre une augmentation de l'AEV et de la succion résiduelle selon MK après l'ajustement graphique. Les valeurs augmentent de 10 cm (a) à 28 cm (b) pour l'AEV et de 49 cm (a) à 110 cm (b) pour la succion résiduelle. Les valeurs de ψ_a et ψ_r calculées avec les équations 2.25 et 2.24 sont de 35 et 269 cm respectivement; après l'ajustement de n , les valeurs sont de 31 et 225 cm respectivement.

On voit que l'ajustement de m (modèle MK) a permis d'obtenir une courbe calculée (fig. 3.38) presque identique à celle expérimentale à l'exception de la teneur en eau résiduelle (qui est plus petite avec le modèle MK), cette différence pourrait à nouveau être imputée au temps de drainage.

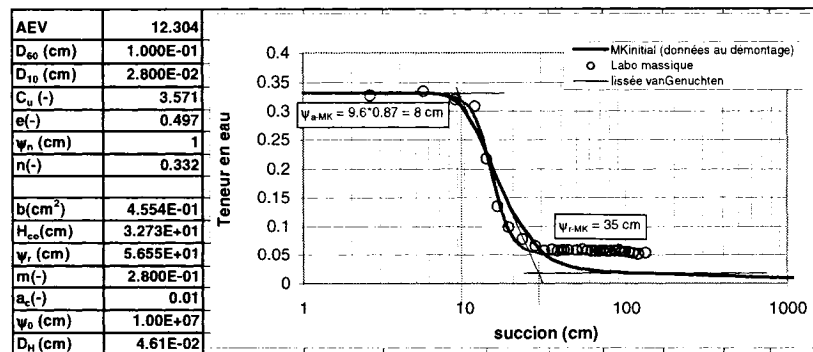


Figure 4.39 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial pour le sol SOT

La figure 4.40 montre les résultats obtenus pour le sol SOA. La courbe lissée selon van Genuchten (méthode graphique) donne des valeurs de l'AEV de 11 cm et de la succion résiduelle de 21 cm. Les résultats de ψ_a et ψ_r selon le modèle MK (méthode graphique) sont de 9.4 cm et 28 cm respectivement. Selon les équations 2.26 et 2.25 les valeurs de la succion résiduelle sont de 57 cm et de 12 cm pour l'AEV.

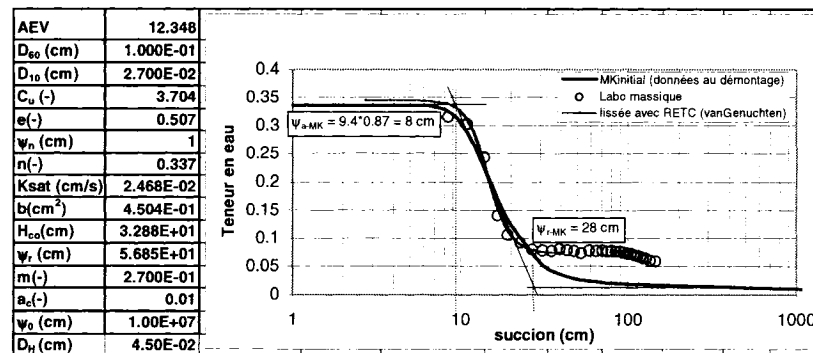


Figure 4.40 Données expérimentales, CRE lissées selon van Genuchten et CRE selon le modèle MK initial pour sol SOA.

Les courbes du modèle MK ont, en général une succion résiduelle plus élevée que celle expérimentale et une teneur en eau résiduelle plus petite que celle obtenue en laboratoire.

▪ *Analyses des données obtenues*

La figure 4.41 montre les valeurs de l'AEV pour chaque graphique représentant les groupes des sols analysés. Ceci inclut une valeur de l'AEV obtenue selon l'équation 2.25 pour la porosité moyenne calculée au démontage par la moyenne des masses et volumes; ces résultats sont représentés par des cercles pleins (MK calculé). La valeur de l'AEV calculée avec l'équation 2.26 après l'ajustement de n n'est pas représentée dans le graphique parce que les différences entre les valeurs (AEV calculé et ajusté) est minime. Les deux autres valeurs de l'AEV, sont obtenues par méthode graphique et sont représentés par des carrés, pour MK (carrés solides) et selon MK ajustée représentés par des carrés vides. Le graphique montre aussi l'AEV obtenu par méthode graphique selon le lissage de la courbe selon van Genuchten (1980) (triangle solide). Les résultats sont présentés en fonction du pourcentage de gravier total dans le sable.

Les résultats présentés sur la figure 4.41 montrent que l'AEV calculé par l'équation 2.26 du modèle MK change peu avec les modifications des paramètres m et n . L'AEV calculée par la méthode graphique des tangentes (visuellement) varie de façon plus marquée après l'ajustement. La figure 4.41 indique que l'AEV augmente légèrement (ou même reste constante) de 0 à 40% gravier, ensuite sa valeur semble chuter proportionnellement.

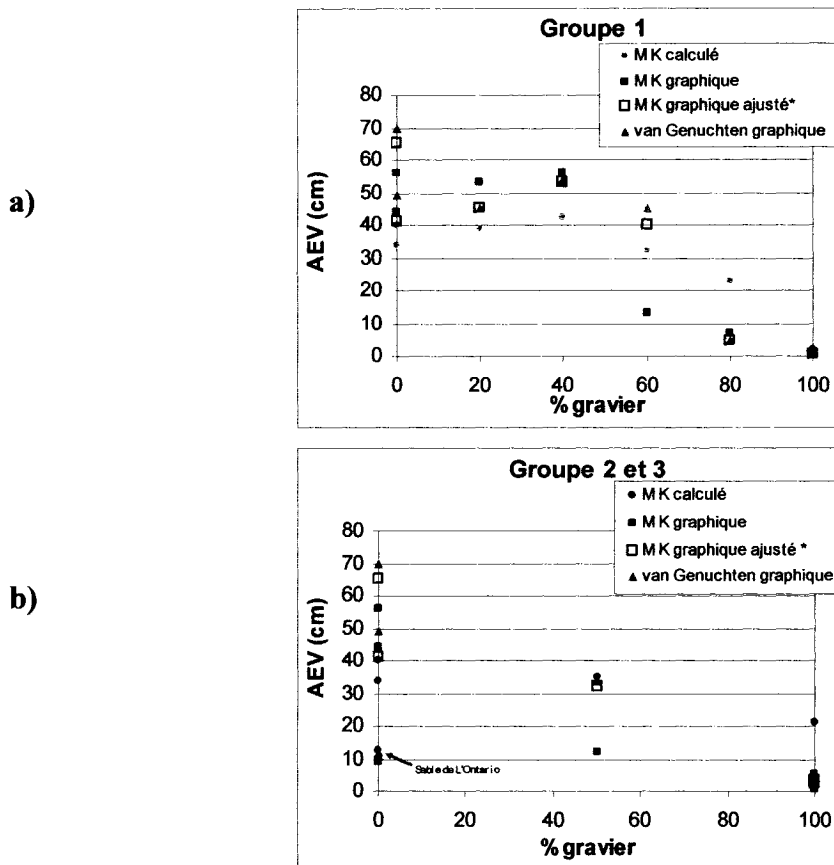
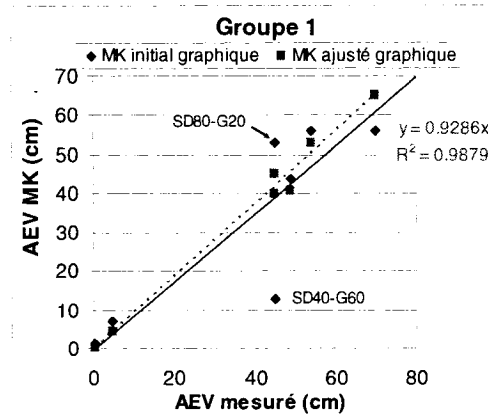


Figure 4.41 Valeurs de l'AEV obtenues selon le modèle MK calculé (Éqn. 2.26) et par méthode graphique (valeurs initiales et ajustés) en fonction du pourcentage de gravier total dans le mélange.

La figure 4.42 montre la relation entre les valeurs de l'AEV (méthode de tangentes) selon la CRE MK et celles mesurées (selon van Genuchten graphique). La ligne droite au milieu des graphiques montre une relation parfaite (1:1) entre les deux résultats. Cette figure montre que les valeurs de l'AEV obtenues avec le modèle MK sont généralement proches des valeurs obtenues expérimentalement (lissés selon van Genuchten - RETC). Les résultats du modèle MK ajusté sont pratiquement semblables aux données mesurées au laboratoire.

a)



b)

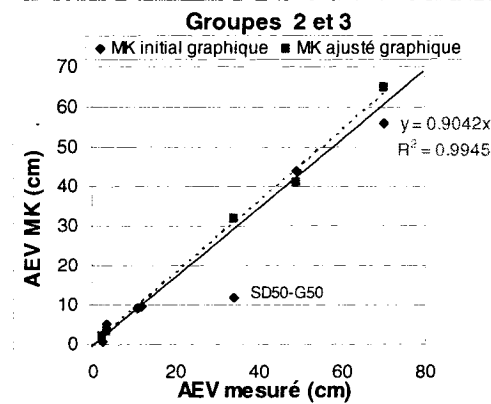


Figure 4.42 Valeurs de l'AEV obtenues selon le lissage van Genuchten (1980, avec RETC) et selon MK (ajusté et non ajusté) par méthode graphique.

La figure 4.43 montre les valeurs de la succion résiduelle en fonction du pourcentage gravier. Une valeur est obtenue selon l'équation 2.26 (cercles vides - MK équation); une autre selon l'équation 2.26 avec n ajusté (cercles pleins - MK éqn. ajustée*). Deux autres valeurs sont obtenues par méthode graphique selon le modèle MK (carrés vides; MK graphique) et MK ajusté (carrés pleins - MK graphe ajusté*). Le dernier point représente les valeurs de la succion résiduelle obtenues par méthode graphique selon le lissage avec van Genuchten (triangle solide).

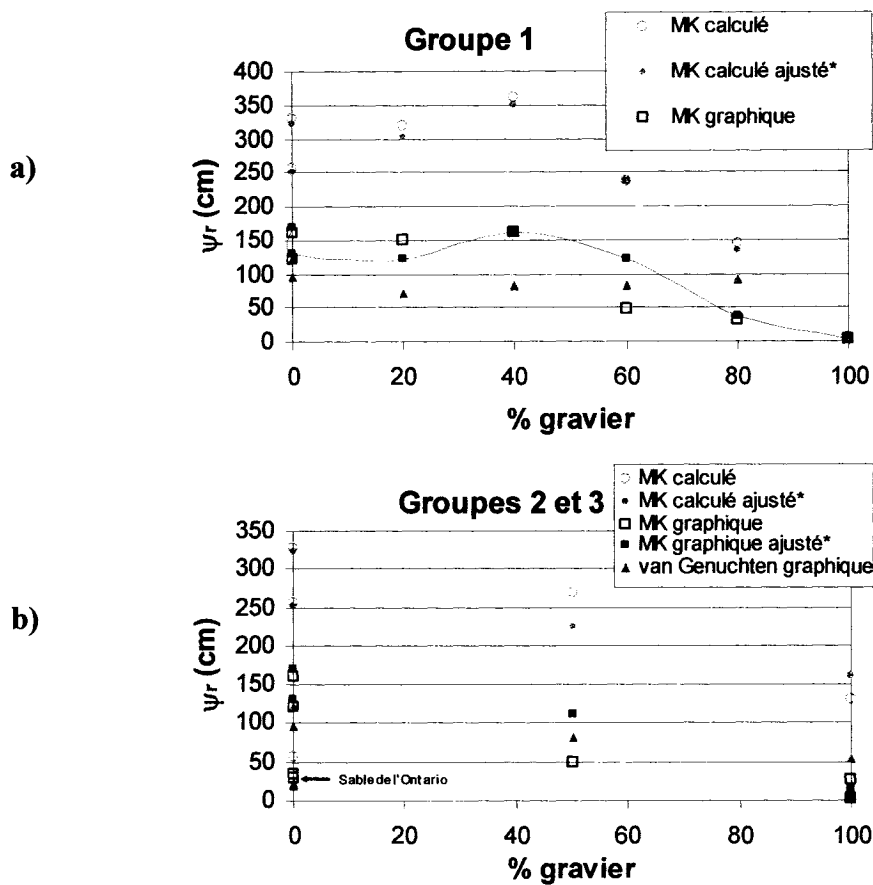


Figure 4.43 Valeurs de la succion résiduelle obtenues avec les modèles MK, MK ajusté et van Genuchten (1980) par méthode graphique et selon l'équation 2.26 en fonction du pourcentage de gravier.

La figure 4.43 montre qu'en général, la valeur de la succion résiduelle calculée avec l'équation 2.26 et obtenue par méthode graphique selon MK et MK ajusté ne suit pas la même tendance que l'AEV de la figure 2.28. Les valeurs de la succion résiduelle obtenue selon MK sont, généralement, plus grandes que celles obtenues par expérimentalement (selon van Genuchten 1980).

La figure 4.44 montre la succion résiduelle calculée en fonction des valeurs mesurées au laboratoire pour les trois groupes de sols étudiés. La droite au milieu des graphiques représente la relation parfaite (1:1) entre les deux types de valeurs. Les

valeurs mesurées sont obtenues des CRE lissées selon vanGenuchten (1980). Les valeurs calculées sont obtenues selon le modèle MK et MK ajusté.

La figure 4.44 indique qu'en général les valeurs de ψ_r prédites avec MK sont assez différentes des résultats expérimentaux, même avec MK ajusté. Ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle MK assume un drainage complet du matériau, tandis que les valeurs obtenues au laboratoire n'ont pas eu le temps d'accomplir ce temps d'atteindre cet état de drainage.

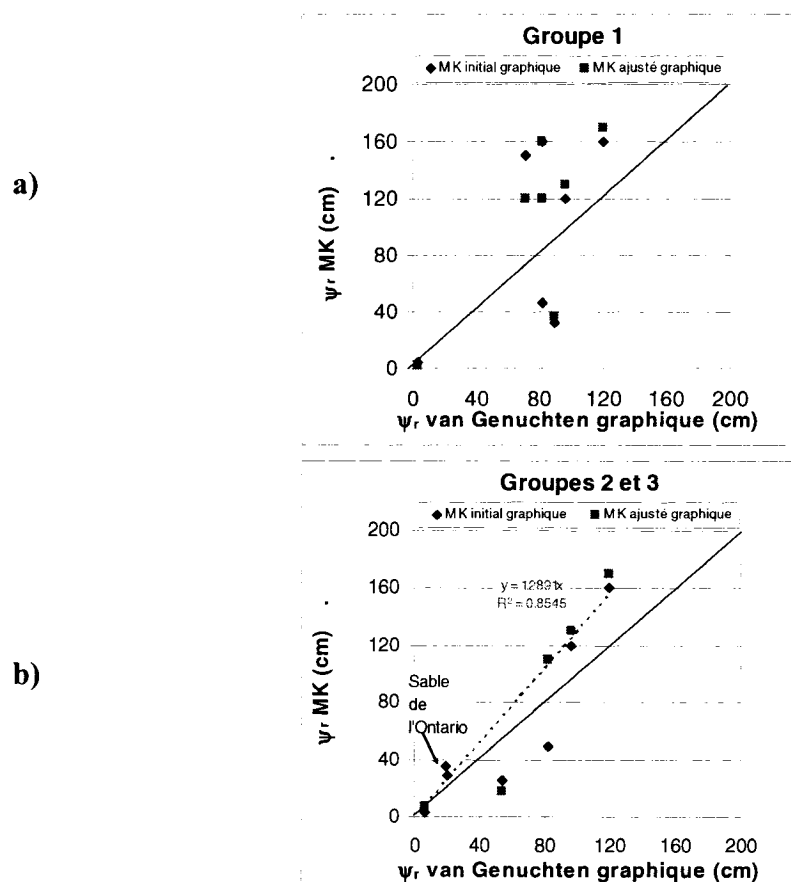


Figure 4.44 Valeurs de la succion résiduelle prédite avec MK et MK ajusté en fonction des valeurs mesurées (lissées van Genuchten 1980) pour chaque groupe de sol.

4.3.3. AEV en fonction de k_{sat}

On montrera à la figure 4.45 le lien qui pourrait exister entre les valeurs de l'AEV (obtenus graphiquement selon le lissage van Genuchten 1980) et la valeur de k_{sat} une telle relation a été identifiée de façon préliminaire par Ricard (1994) et par Mbonimpa et al (2007). Les valeurs de k_{sat} sont soit mesurées, soit calculées selon Kozeny-Carman (KC) et selon Kozeny-Carman modifié (KCM).

La figure 4.45 montre qu'il semble avoir une relation entre l'AEV et le k_{sat} . Cette relation n'est toutefois pas totalement établie à partir des résultats présentés ici.

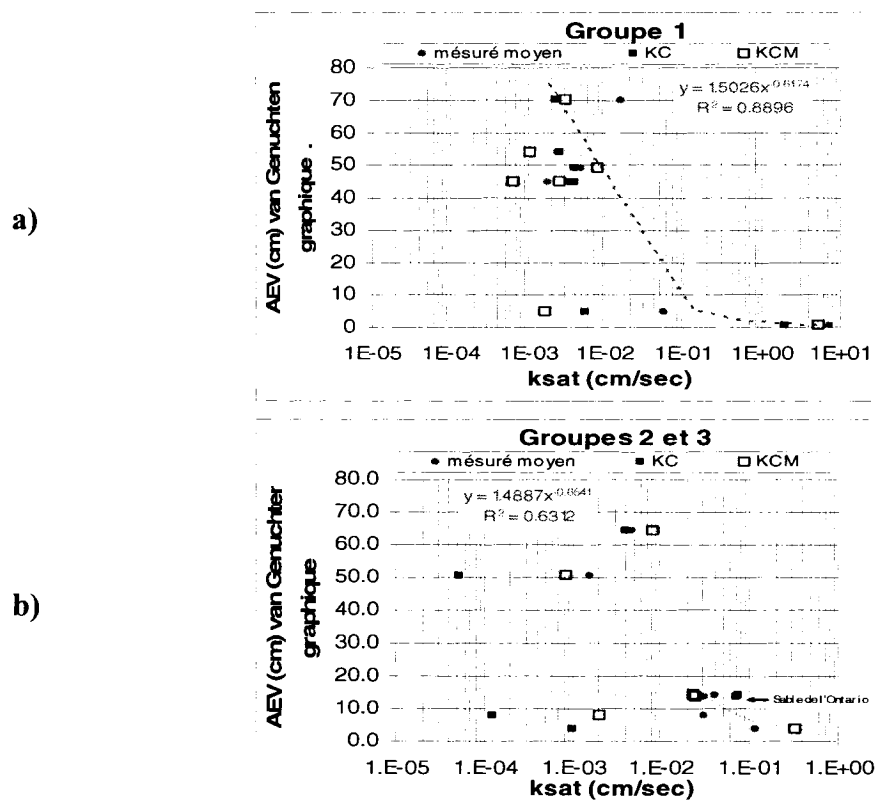


Figure 4.45 Valeurs de l'AEV selon van Genuchten (1980) avec le logiciel RETC par méthode graphique en fonction de k_{sat} mesuré au laboratoire (moyenne) et k_{sat} calculée selon Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM).

D'autres données expérimentales sont analysées et discutées dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 5. ANALYSE ET DISCUSSION

Ce chapitre présente une analyse des résultats expérimentaux obtenus et discute de la concordance entre les résultats des modèles prédictifs ou de lissage. La présentation qui suit comporte trois principales composantes:

- Les caractéristiques physiques des matériaux;
- La conductivité hydraulique (k_{sat});
- La courbe de rétention d'eau (CRE).

Par la suite des données tirées de la littérature sont également présentées et analysés selon les mêmes approches.

A travers ce chapitre, on tentera de faire ressortir les facteurs principaux qui influencent les propriétés hydriques des matériaux granulaires, selon les paramètres évalués dans ce travail.

5.1. Analyse des résultats obtenus

Tout au long de cette section, on fera référence aux résultats présentés au chapitre 3. Les aspects les plus importants liés à ces résultats seront ressortis.

5.1.1. *Caractéristiques physiques des matériaux*

Cette composante principale se divise en trois parties. La granulométrie, l'indice des vides et la surface spécifique.

▪ *Granulométrie*

On a présenté à la figure 4.1 les courbes granulométriques des sols étudiés. Les aspects importants à signaler sont :

- Les courbes composées de sols mélangés sont discontinues et comportent usuellement un plateau, selon le pourcentage du sol grossier ajouté. Par

exemple, le plateau du sol SD40-G60 se forme autour de 40 % passant. Cette allure des courbes granulométriques est en accord avec d'autres résultats présentés dans la littérature, qui montrent souvent une discontinuité lorsqu'il y a une grosse différence entre les diamètres moyens des deux sols mélangés (e.g. Holts et Kovacs, 1991; Wickland et al. 2006).

- Les courbes granulométriques du groupe 2 (figure 4.1 b) montrent que les graviers étudiés ont un très grand étalement, avec une très grande différence entre les diamètres maximum et minimum. La partie fine (passant 0.08 mm) des matériaux varie entre 5 et 10% de sa masse totale. Ce pourcentage des particules fines peut affecter la conductivité hydraulique, la rétention d'eau par capillarité et aussi le calcul de la surface spécifique.

▪ *Indice des vides (e)*

Une caractéristique physique importante pour l'analyse des propriétés hydriques des matériaux est l'indice des vides (e) ou la porosité (n). La figure 4.2 (a) montre la variation de l'indice des vides pour chaque groupe de matériaux en fonction du pourcentage de gravier (≥ 5 mm) utilisé. Ces résultats sont aussi en accord avec les résultats trouvés dans la littérature. Ainsi, l'indice des vides diminue d'abord avec l'augmentation du pourcentage de gravier jusqu'à un pourcentage d'environ 60% pour le groupe 1 et de 50% pour le groupe 2; ce point est défini selon l'indice des vides minimum. Au-delà de ce pourcentage, l'indice des vides augmente. Ce comportement peut-être expliqué par la théorie des mélanges, qui indique que les particules fines remplissent les espaces vides du sol plus grossier, ce qui diminue l'indice des vides. Mais lorsque la proportion de particules grossières augmente, le pourcentage des particules fines n'est plus suffisant pour remplir ces vides (Wickland et al. 2005, Milczareck et al. 2006). Morin et al. (2004) et Milczareck et al. (2006) ont observé que le pourcentage des particules grossières associé à l'indice des vides minimal serait de l'ordre de 70%. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que l'indice des vides diminue jusqu'à environ 60% de particules grossiers, et que e augmente ensuite.

Aubertin (2003; voir aussi Chapuis et Légaré 1992), l'équation découlant du modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) de Mbonimpa et al. (2002), et la représentation utilisée dans le modèle Kovács Modifié (MK) de Aubertin et al. (2003). Pour cette analyse, la valeur de S_s selon la KC est utilisée comme base de comparaison avec celles déduites des modèles KCM et MK. Les résultats présentés au chapitre 4 montrent que :

- Pour les sols du groupe 1 (figure 4.3 a), les relations entre les valeurs de la surface spécifiques sont linéaires. La pente est de l'ordre de 1.35 pour les graphiques de KC vs. KCM, ce qui indique que la valeur de S_s selon KC est un peu plus petite que celle selon KCM. La pente du graphique de S_s selon KC vs. MK est de 1.1; les valeurs de S_s selon MK sont presque égales à celles obtenues selon KC.
- Pour les sols du groupe 2, les résultats ne sont pas aussi bien corrélés. Les valeurs selon KC sont beaucoup plus grandes que celles obtenues pour les deux autres méthodes. Cela est partiellement dû au fait que les modèles MK et KCM négligent en grande partie la contribution des particules plus petites que le D_{10} (i.e. diamètre correspondent à 10% de la masse du sol). Dans certains cas, cette partie peut-être importante pour le calcul de la surface spécifique, ce qui explique que les valeurs de S_s sont plus petites lorsque calculées selon MK et KCM, en comparaison aux valeurs obtenues selon KC (qui prend mieux en compte l'effet des particules fines sur la valeur de S_s).

5.1.2. Conductivité hydraulique saturée (k_{sat})

La conductivité hydraulique est une propriété clé pour évaluer le comportement hydrogéologique et géotechnique des matériaux. Celle-ci a été mesurée lors d'essais en colonne sur les divers sols étudiés.

▪ Conductivité hydraulique mesurée et prédite

Deux modèles de prédiction ont été utilisés avec les sols étudiés : celui de Kozeny-Carman (KC, équation 2.7), présenté par Chapuis et Aubertin (2003), et celui de

Kozeny-Carman modifié (KCM, équation 2.9) développé par Aubertin et al. (1996) et Mbonimpa et al. (2000, 2002). Les résultats présentés aux figures 4.5 et 4.6 permettent de voir qu'en général, pour les conductivités hydrauliques moyennes (charges variables et constantes), les valeurs prédites sont assez proches (à moins d'un ordre de grandeur) des valeurs mesurées (à l'exception du sol SD20-G80 du groupe 1 et des graviers du groupe 2, GMP₃, GMT₃ et GMP50-SD50). Les essais réalisés sur les sols identifiés ici vont d'ailleurs revenir tout au long de cette discussion comme étant problématiques. La figure 4.6 montre aussi que selon la moyenne des résultats, il existe deux cas où les valeurs prédites selon MK sont beaucoup plus petites que celles obtenues expérimentalement, soient les sols GMT₃ et GMP₃. Certains résultats indiquent aussi que la mesure de la conductivité hydraulique expérimentale à l'aide d'essais en colonne de grande dimension sur ces sols granulaires grossiers peut favoriser un écoulement préférentiel ou une ségrégation qui affectent la valeur obtenue expérimentalement.

▪ *Conductivité hydraulique en fonction du pourcentage de gravier*

Un autre facteur qui affecte la conductivité hydraulique d'un sol est sa granulométrie. Dans le cas présent, le pourcentage de gravier (> 5 mm) constitue une variable contrôlée mais pour les mélanges, la conductivité hydraulique diminue légèrement avec l'augmentation du pourcentage de gravier total, jusqu'à un pourcentage d'environ 60% gravier (fig. 4.7(a)). Après cela, la conductivité augmente de façon marquée. Cette tendance est assez similaire à celle de l'indice des vides (ou de la porosité) en fonction du pourcentage de gravier. La figure 4.7 (a) montre aussi que la conductivité hydraulique pour les mélanges est assez semblable à la conductivité hydraulique du sol plus fin, et ce jusqu'à la porosité minimale. Pour une teneur en gravier élevée, la conductivité hydraulique semble surtout influencé par le sol grossier.

La conductivité hydraulique pour les sols du groupe 2 (figure 4.7 (b)) semble suivre la même tendance que celle du groupe 1, même si les valeurs entre GMP₃ et GMT₃ ne sont pas du tout semblables. On peut expliquer cette différence apparente selon la

nature des résultats. La figure 4.2 (b) montre le pourcentage de gravier total dans le mélange et non pas le pourcentage du retenu au tamis 5 mm (comme sur la figure 5.2). La figure 5.2 montre la conductivité hydraulique des sols du groupe 2 en fonction du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm dans le mélange. Cette figure montre que la conductivité hydraulique obtenue expérimentalement diminue jusqu'à environ 30% à 50% de gravier. Il y a augmentation de k_{sat} par la suite. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Milczarek et al. (2006) obtenus pour des mélanges assez similaires à ceux étudiés dans ce projet (ces résultats sont revus plus loin à la section 5.2).

Au chapitre 4, on a vu que la relation entre le pourcentage de gravier et l'indice des vides ou la conductivité hydraulique semble suivre la même tendance, du moins pour le groupe 1; l'indice des vides diminue jusqu'à environ 60 % gravier puis augmente ensuite, tout comme la conductivité hydraulique (voir figure 4.7). Ce n'est toutefois pas le cas pour les résultats du groupe 2, qui ne montrent pas la même tendance (voir figure 5.2). Les raisons brièvement évoquées plus haut peuvent expliquer cette différence apparente.

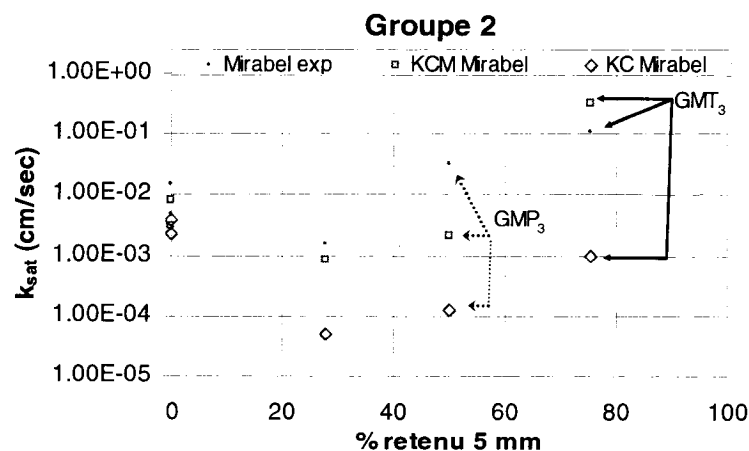


Figure 5.2 Conductivité hydraulique en fonction du pourcentage retenu au tamis 5 mm les sols étudiés du groupe 2.

▪ *Conductivité hydraulique normalisée*

Les prédictions de la conductivité hydraulique selon les deux modèles (KC et KCM), sont basées sur l'indice des vides (e) et la granulométrie. Le modèle KCM utilise le coefficient d'uniformité (C_U) et le diamètre des grains pour 10% passant (D_{10}) pour prédire la conductivité hydraulique saturée alors que le modèle KC utilise la totalité de la courbe granulométrique. Les valeurs de la conductivité hydraulique normalisée en fonction des diverses fonctions employées dans les modèles sont discutées dans ce qui suit:

▫ Fonction de l'indice des vides (e) :

Sur la figure 4.8, on remarque que les prédictions normalisées obtenues selon KCM suivent de près les résultats expérimentaux. La valeur obtenue du modèle de base devrait alors être corrigée par un facteur entre 0.5 et 2 pour obtenir une meilleure corrélation; même avec cette correction, il existe des sols problématiques qui sont hors des plages prédites (sols SD₀, SD20-G80, GMT₃ et GMP₃).

Le modèle de prédiction normalisé selon KC (figure 4.9) se rapproche bien des résultats expérimentaux, à l'exception des sols problématiques (sols SD₀, SD20-G80, GMT₃, GMP₃ et GMP50-SD50). Ici le facteur de correction varie aussi de 0.5 à 2 mais les différences sont plus grandes que selon KCM.

▫ Fonction du coefficient d'uniformité (C_U)

Les prédictions selon le modèle de KCM suivent d'assez près la dépendance prévue relativement au coefficient d'uniformité (même qu'il existe des sols problématiques). Les résultats expérimentaux pour le groupe 1 semblent suivre une fonction du type $f(C_U) = (C_U)^{0.3}$ (figure 4.11 (a)), sauf pour le sol SD20-G80. Pour le groupe 2, les résultats semblent aussi suivre le modèle du type $f(C_U) = (C_U)^{0.3}$, sauf pour le sol GMP₃. Pour le groupe 3, la fonction semble également suivre $f(C_U) = (C_U)^{0.3}$; il y a toutefois peu des points disponibles pour confirmer cette fonction.

Ces différences entre le modèle KCM et les résultats obtenus peut être expliquée en considérant que la fonction du C_U (avec D_{60} et le D_{10}) a été développée pour des sols naturels (sans plateau sur la courbe granulométrique) mais comme il s'agit de mélanges, les sols sont hétérogènes et la courbe granulométrique est ici souvent discontinue. Une correction de la fonction serait probablement requise pour de telles situations (possiblement en fonction du C_C).

▫ Fonction du D_{10}

À l'exception des sols problématiques (SD_0 , $SD20-G80$, GMT_3 et GMP_3), le modèle de KCM semble bien reproduire (à un facteur de 1.4 près) les résultats expérimentaux. Les graviers du groupe 2 ne suivent pas bien le modèle, peut-être en raison d'écoulements préférentiels et/ou du déplacement des particules fines.

5.1.3. La courbe de rétention d'eau (CRE)

Les CRE des sols étudiés ont été divisées en quatre groupes : celles obtenues par la méthode des masses (teneur en eau w); celles obtenues selon les lectures de l'appareil TDR (voir description au tableau 4.5); celles obtenues avec $\theta (= w (1-n) * D_r)$ ou S_r par lissage avec le modèle van Genuchten (1980); et celles obtenues selon la prédiction avec le modèle MK (dans ce cas, des courbes avec paramètres ajustés sont aussi présentées). Les diverses courbes sont comparées dans ce qui suit.

▪ w vs. TDR

Les sondes TDR sont utilisées pour mesurer les valeurs de la teneur en eau volumique θ du sol. Elles donnent des résultats semblables aux valeurs expérimentales déduites de w jusqu'à un pourcentage de 20% gravier (> 5 mm). À 40% gravier et plus, les résultats commencent à dévier des résultats obtenus par la méthode massique. Deux raisons principales peuvent expliquer cet écart :

- Il est difficile d'introduire les fourchettes de l'appareil TDR sans déplacer le sol lorsque le pourcentage de gravier augmente. Ceci crée des vides autour des

fourchettes, ce qui peut entraîner une déviation dans la mesure de la teneur en eau.

- Au bas de la colonne, l'accumulation d'eau d'égouttement des échantillons prélevés peut entraîner une teneur en eau plus grande (cet effet est plus marqué sur w).

Les résultats mesurés au TDR sont donc d'une utilité limitée pour certains des sols testés ici, du moins pour les procédures d'essais suivies ici.

▪ *Lissage avec van Genuchten (1980)*

Les données expérimentales de θ ($= w (1-n)D_r$) ont été lissées avec le modèle de van Genuchten (1980). Le lissage a été fait avec le logiciel RETC et aussi avec la feuille de calcul de Mbonimpa (voir description aux tableaux 4.6 et 4.7). Les deux méthodes de lissage donnent à peu près les mêmes résultats. Les courbes lissées suivent bien les données obtenues expérimentalement. Les courbes lissées permettent d'obtenir deux paramètres d'intérêt sur la CRE : le AEV (ψ_a) et la succion résiduelle (ψ_r) (voir figures 4.13 à 4.26)

Les figures 4.27 et 4.28 montrent les valeurs de ψ_a et ψ_r en fonction du pourcentage de gravier total dans le matériau. La tendance montre une légère diminution de l'AEV jusqu'à environ 20% de gravier; ensuite, l'AEV semble rester presque constant jusqu'à 60% gravier, pour ensuite chuter abruptement. La tendance est assez semblable pour la succion résiduelle ψ_r mais la chute entre 60% et 100% gravier n'est pas aussi marquée.

▪ *Le modèle MK*

Les prédictions de la CRE avec le modèle MK ne concordent pas toujours bien avec les résultats obtenus au laboratoire (pour θ et S_r déduits des mesures massiques). Néanmoins, la CRE obtenue du modèle peut être ajustée aux résultats expérimentaux. Un premier ajustement implicite se fait au niveau de la teneur en eau à saturation (reliée à la porosité totale du sol). Lorsque requis, le paramètre de lissage m (obtenu

initialement par l'équation $m = 1/C_U$) peut être ajusté. Ici, la valeur de a_c n'a pas été ajustée en raison de l'incertitude qui existe sur la valeur de θ_r , selon les mesures dans les colonnes. L'amélioration de la CRE calculée par rapport aux données expérimentales se fait surtout sentir sur la partie supérieure de la courbe (à forte teneur en eau). L'ajustement du paramètre m du modèle MK permet usuellement d'obtenir une valeur de ψ_a semblable aux données expérimentales (voir figure 4.42).

Rappelons ici que les données mesurées pour des valeurs correspondant à la succion résiduelle dans les colonnes ne sont usuellement pas des valeurs réalistes (ou représentatives). En pratique, pour obtenir les valeurs réelles de teneur en eau dans cette zone, il faudrait attendre beaucoup plus longtemps pour terminer complètement le drainage (et atteindre θ_r).

Dans nos analyses, la correction utilisée pour ajuster la CRE obtenue avec le modèle MK passe donc essentiellement par une modification de la valeur du paramètre m . La figure 5.3 montre la relation entre les valeurs du paramètre m calculé selon $m = 1/C_U$ et, obtenue pour MK ajusté, en fonction de la valeur du C_U pour les sols étudiés excepté pour le groupe 3 (qui n'a pas été ajusté).

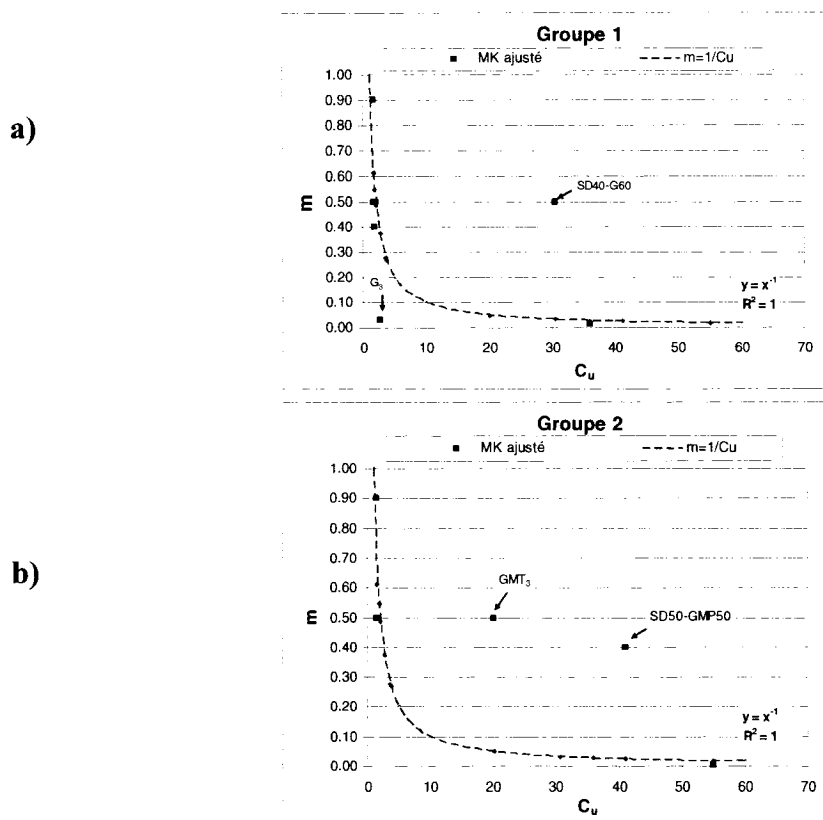


Figure 5.3 Valeurs du paramètre m (de base et ajusté) du modèle MK en fonction du coefficient d'uniformité C_u pour les groupes 1 et 2.

Pour la figure 5.3, à l'exception de quatre cas, les données sont assez proches de la fonction de base $m = 1/C_u$. Ces exceptions ne semblent pas suivre une tendance spécifique. Dans le groupe 1 (figure 5.3 a), il y a deux matériaux qui ne suivent pas la fonction de base, soient SD40-G60 et G_3 . Pour le groupe 2 (fig. 5.3 b), les matériaux GMT₃ et SD50-GMP50 ne suivent pas la fonction de base. Rappelons ici que les mélanges SD40-G60 et SD50-GMP50 ont des pourcentages de gravier assez similaires (60 et 50% de gravier respectivement) et que leurs CRE sont aussi presque semblables. Les courbes de ces deux derniers sols ont présenté la plus grande différence (avant l'ajustement du paramètre m) entre les pentes des valeurs mesurées au laboratoire (pour les teneurs en eau volumiques).

La figure 5.4 montre la relation entre m ajusté/ m prédit en fonction de C_U .

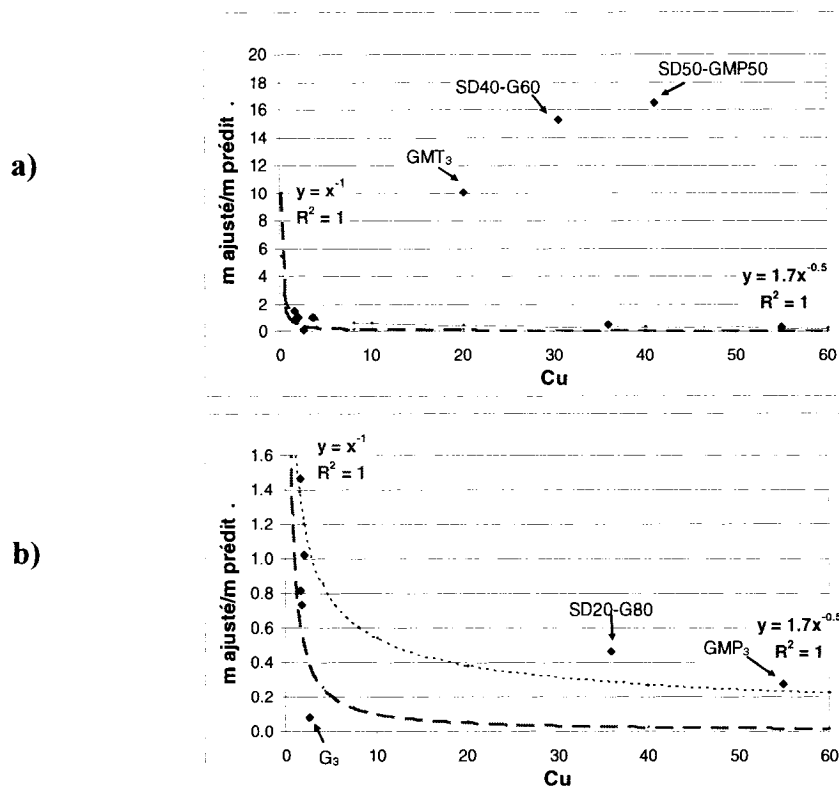


Figure 5.4 Rapport entre la valeur de m ajusté sur m de base (modèle MK) en fonction du coefficient d'uniformité C_U pour les groupes 1 et 2.

La figure 5.4 (a) montre les résultats de tous les sols étudiés. La fonction semble suivre une loi de puissance de l'ordre de $m \propto (C_U)^{-0.5}$ à l'exception des sols SD40-G60, GMT₃ et SD50-GMP50. La figure 5.4 (b) montre les résultats des sols étudiés exceptant les valeurs des sols problématiques de la figure 5.4 (a), soient SD40-G60, GMT₃ et SD50-GMP50. Deux courbes sont montrées dans la figure, celle de la fonction de base $m = 1/C_U$ et une autre fonction du type $m \propto (C_U)^{-0.5}$ qui semble (selon la figure 5.4 b) suivre de plus proche les données obtenues (à l'exception des sols SD20-G80 et G₃).

Donc, les résultats de la figure 5.4 semblent montrer que la relation entre m ajusté et m prédit ne suit pas une relation spécifique.

Par ailleurs, la figure 5.5 illustre le lien qui pourrait exister entre le rapport m ajusté sur m prédit (du modèle MK) en fonction du coefficient de courbure $C_C (= D_{30}^2/D_{60}D_{10})$.

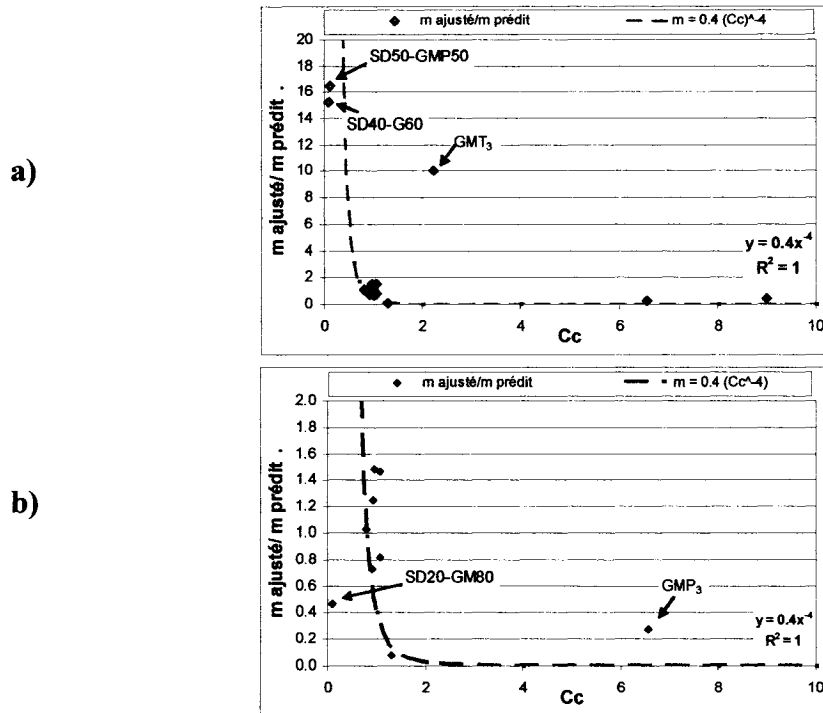


Figure 5.5 Rapport m ajusté/ m prédit (modèle MK) en fonction du coefficient de courbure C_C pour chaque groupe de sols.

La figure 5.5 (a) montre que la tendance apparente semble suivre une fonction de puissance du type $m \propto 0.4(C_U)^4$ (à l'exception des sols SD40-G60, SD50-GMP50 et GMT₃), mais il n'y a pas suffisamment de points pour valider cette tendance. Les mêmes sols problématiques de la figure 5.4 sont encore revenus pour la figure 5.5.

La figure 5.6 présente les deux fonctions obtenues pour l'ajustement de m selon C_U et C_C .

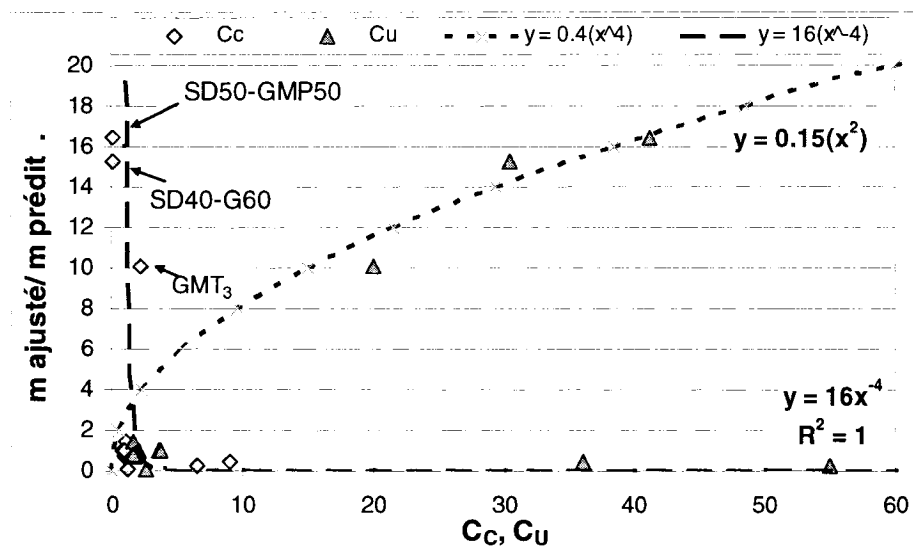


Figure 5.6 Rapport m ajusté/ m prédit (modèle MK) en fonction du coefficient de courbure C_c et coefficient d'uniformité C_u .

5.2. Analyses de résultats additionnels

Pour compléter l'évaluation et confirmer (ou non) les tendances identifiées à partir de nos résultats, quelques résultats expérimentaux tirés de la littérature et des données complémentaires sont analysés dans ce qui suit.

5.2.1. Présentation des données d'autres études.

Quelques études récentes se sont intéressées aux caractéristiques hydriques des sols granulaires hétérogènes ou mélangés. Les analyses présentées dans cette section montrent les résultats de quatre études différentes.

- Roches stériles avec fractions séparées de gravier (retenu 5 mm) et de sable (Milczarek et al. 2006); section 5.2.2.
- Mélanges résidus miniers et roches stériles (Wikland et al. 2006); section 5.2.3.
- Mélanges silt et sable (Ouangrawa, 2007); section 5.2.4.

- Roches stériles (essais complémentaires réalisés à la Chaire industrielle à l'École Polytechnique); section 5.2.5.

A nouveau, les résultats montrés portent sur les caractéristiques physiques des matériaux, la conductivité hydraulique saturée, et la CRE. Les caractéristiques physiques incluent la granulométrie des sols, l'indice des vides (en fonction du pourcentage total des particules grossières dans le mélange) et la surface spécifique. La conductivité hydraulique inclue une comparaison des résultats obtenus au laboratoire avec les valeurs prédites par les modèles KC et KCM, en fonction du pourcentage total des particules grossières dans le mélange. La section sur la CRE présente aussi les valeurs de ψ_a et ψ_r obtenues expérimentalement et celles prédites avec le modèle MK (et MK ajusté).

5.2.2. Étude de Milczarek et al. (2006)

Cette étude utilise cinq mélanges préparés à partir d'un sable (S) et d'un gravier (G) dont les grains ont un diamètre minimal de 5 mm (et qui contient de gros cailloux typique des roches stériles). Les mélanges incluent 30, 40, 50, 60 et 80 % de gravier.

▪ *Caractéristiques de base des matériaux*

▫ Granulométrie

La figure 5.7 montre les courbes granulométriques des mélanges préparés pour cette étude. La courbe granulométrique du 100% gravier a été calculée par l'auteure avec les données des mélanges.

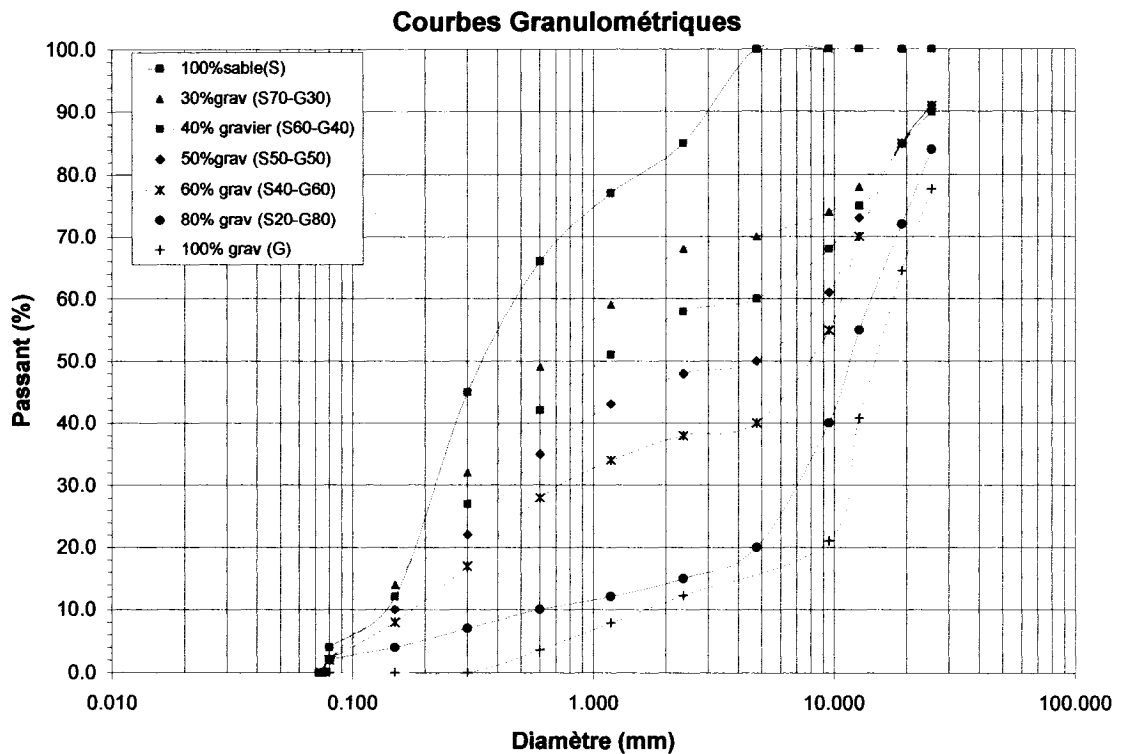


Figure 5.7 Courbes granulométriques des mélanges étudiés par Milczarek et al. (2006).

La figure 5.7 montre une similitude avec les courbes présentées au chapitre 4 de ce mémoire. On remarque par exemple qu'il se forme un petit plateau à peu près au même pourcentage que la proportion du gravier ajoutée au sable. Toutefois, cette discontinuité n'est pas aussi marquée que celle de sols étudiés ici (au chapitre 4).

▫ Indice des vides et porosité

La figure 5.8 montre les valeurs de l'indice des vides de l'étude de Milczarek et al. (2006) en fonction du pourcentage de gravier total au retenu 5 mm dans les mélanges. Les valeurs sont obtenues selon les équations

$$n = 1 - (\rho_d / D_r) \quad (5.1)$$

$$e = n / (1 - n)$$

(5.2)

Les résultats montrés sur la figure sont la moyenne des valeurs obtenues lors des analyses au laboratoire (l'annexe 4 montre les résultats de l'indice des vides et la moyenne calculée pour l'étude de Miczarek et al. 2006).

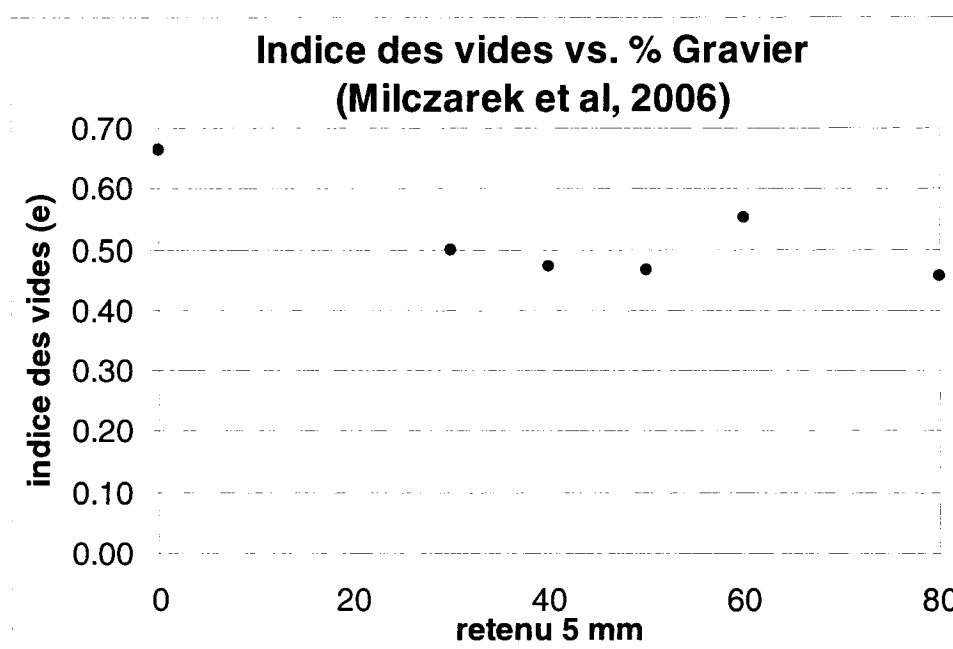


Figure 5.8 Indice des vides en fonction du pourcentage gravier (données tirées de Milczarek et al. 2006)

Sur la figure 5.8 on voit que la tendance ressemble aux résultats de la figure 5.1 et aux tendances identifiées dans la littérature. L'indice des vides semble diminuer à mesure que le pourcentage de gravier augmente, jusqu'à un indice de vides minimal ($e_{\min}$); pour cette étude, le pourcentage de gravier à $e_{\min}$ serait de l'ordre de 50 %. L'indice des vides augmente ensuite à 60% gravier, puis il semble diminuer ensuite à 80% (ce qui est un peu surprenant). Malheureusement l'étude ne montre pas les résultats pour 100% gravier. On ne précise pas si les valeurs ont été obtenues au montage ou au démontage.

▫ Surface spécifique

La figure 5.9 montre la relation entre la surface spécifique calculée selon les équations des modèles KC, KCM et MK. Le calcul a été fait par l'auteure avec les données granulométriques fournies (à la figure 5.6). Notons toutefois que la granulométrie de cette étude n'inclus pas la sédimentométrie, de sorte que les résultats se limitent au tamis 0.08 mm; ceci peut donc influencer les calculs pour obtenir la surface spécifique (surtout avec le modèle KC).

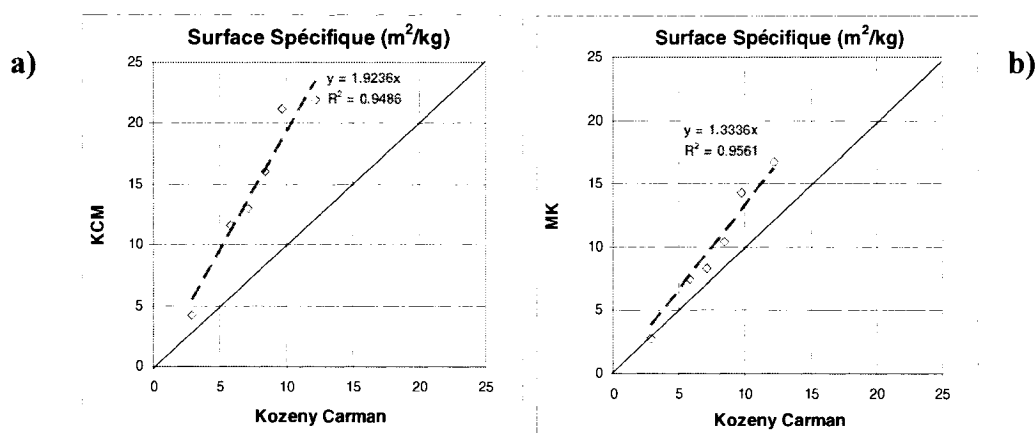


Figure 5.9 Surfaces spécifiques calculés selon les modèles KCM (a) et MK (b) en fonction de celle découlant du modèle KC (données tirées de Milczarek et al. 2006)

Sur la figure 5.9 (a) on voit que le modèle KCM donne des valeurs de la surface spécifique plus grandes (presque le double selon la régression montrée) que les valeurs calculées avec le modèle KC. Avec le modèle MK (figure 5.9 b), les valeurs de S_s obtenues sont proches de celles du modèle KC. On voit ici que les valeurs de S_s , bien que différentes selon les méthodes, sont linéairement reliées.

Ces données sont assez similaires à celles obtenues au chapitre 4, sauf que le facteur de proportionnalité entre KC et KCM n'était pas aussi grand. Ce résultat peut être dû au fait qu'on n'a pas les données de la sédimentation pour les matériaux de l'étude de

Milczareck et al. (2006); les valeurs de S_s selon KC sont donc plus petites que selon les autres méthodes (KCM et MK).

▪ *Conductivité hydraulique saturée (k_{sat})*

▫ Valeurs mesurées et prédites

La figure 5.10 montre la relation entre les valeurs mesurées de k_{sat} (selon les résultats de Milczarek et al., 2006) obtenues à charge constante selon la méthode du MOSA, (1989; « *Methods of Soil Analysis* » – « Soil Science Society of America », volume 1 method 28.4.1) et celles prédites par les modèles KC et KCM (calculées par l’auteure avec les courbes granulométriques). La ligne au milieu du graphique représente une corrélation parfaite, les lignes tiretées représentent une amplitude d’un ordre de grandeur de chaque côté.

Sur la figure 5.10 on voit que les résultats obtenus par les deux modèles de prédiction sont usuellement à moins d’un ordre de grandeur des résultats obtenus expérimentalement, sauf pour deux mélanges, soit le sable à 100% (S) et le mélange de 30% gravier (S70-G30).

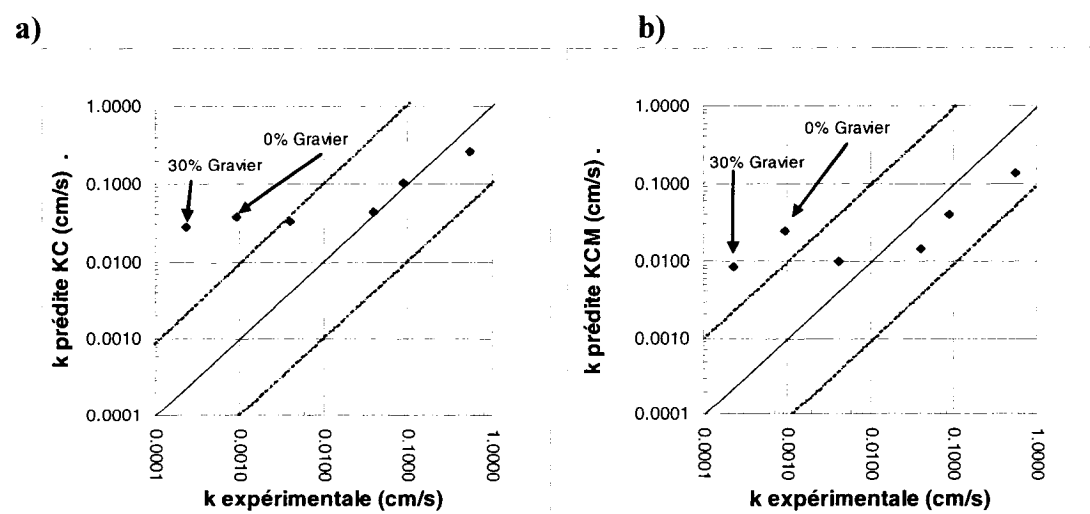


Figure 5.10 Valeurs de k_{sat} prédite avec les modèles KC (a) et KCM (b) en fonction de la valeur de k_{sat} mesurée (données tirées de Milczarek et al. 2006)

Pour le modèle de KC cette différence pourrait être causée en partie par l'absence de la sédimentométrie qui affecte le calcul de S_s et les valeurs deviennent beaucoup plus petites spécialement pour les sols à bas pourcentage de gravier. Dans ce cas, l'effet des particules fines (plus petites que 0.08 mm) est mal représenté dans les calculs, ce qui augmente la valeur de k_{sat} prédite par rapport à celle obtenue expérimentalement. Les écarts observés pour le modèle KCM sont plus difficiles à expliquer. Dans ce cas les valeurs de k_{sat} mesurées sur le sable et le mélange à 30% gravier sont faibles; ceci pourrait être lié à la procédure expérimentale utilisée (effet du degré de saturation ou du tassement par exemple).

▫ Effets du pourcentage gravier

La figure 5.11 montre les résultats obtenus pour la conductivité hydraulique saturée (prédite et mesurée) en fonction du pourcentage gravier total dans le sol.

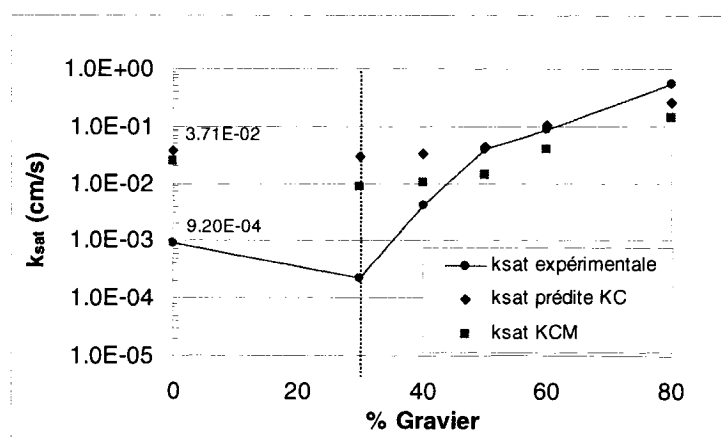


Figure 5.11 Valeurs de k_{sat} (mesurées et prédites) en fonction du pourcentage gravier (données tirées de Milczarek et al. 2006)

On constate que la conductivité hydraulique expérimentale saturée diminue jusqu'à 30% gravier environ, pour ensuite augmenter assez rapidement. Cette tendance, bien

que plus marquée ici, est assez similaire aux données de notre étude présentée au chapitre 4. Dans ce cas toutefois, la conductivité hydraulique saturée mesurée ne semble pas suivre tout à fait la tendance liée à l'effet de l'indice des vides (en fonction du pourcentage gravier), contrairement aux résultats du groupe 1 de notre étude. Ceci pourrait être lié aux valeurs de k_{sat} obtenues expérimentalement qui sont plus petites que les valeurs prédites par les deux modèles pour des pourcentages de gravier de 40% et moins.

▪ *Courbes rétention d'eau*

▫ CRE Expérimentales, lissées et prédites

Les valeurs de D_{10} , D_{60} et n utilisées pour calculer la CRE avec le modèle MK sont montrées au tableau 5.1. On présume ici que la porosité n'a pas changé durant l'essai. Les auteurs ne précisent pas si le n est obtenu au démontage ou au montage.

Tableau 5.1 Valeurs de D_{10} , D_{60} et porosité (n) utilisées pour prédire la CRE avec le modèle MK (données tirées de Milczarek et al. 2006); d'autres paramètres sont aussi inclus dans le tableau.

Identification	Pourcentage de gravier dans le sol (%)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	C_u (-)	C_c (-)	D_r (-)	porosité (n) (-)
Sable	0	0.1400	0.4800	0.2200	3.43	0.720	2.5	0.399
S70-G30	30	0.1300	1.2000	0.2800	9.23	0.503	2.47	0.333
S60-G40	40	0.1400	4.8000	0.3500	34.29	0.182	2.46	0.321
S50-G50	50	0.1500	9.0000	0.4600	60.00	0.157	2.46	0.317
S40-G60	60	0.1800	11.0000	0.7100	61.11	0.255	2.44	0.356
S20-G80	80	0.6000	10.5000	7.0000	17.50	7.778	2.43	0.313

La figure 5.12 montre l'ensemble des CRE pour tous les sols étudiés par Milczarek et al. (2006) selon leurs résultats expérimentaux. Ils ont obtenu la CRE par la méthode des essais en colonnes (« hanging column method ») qui a été utilisée jusqu'à une pression de -100 cm, et par des essais en cellules de pression (« tempe cell plates ») jusqu'à -1000 cm de charge (selon la méthode 3.2.2 du MOSA, 2002). Trois points

additionnels ont été obtenus avec le WP-4 (*water activity meter*, Decagon WA) pour les pressions entre -100 000 et -120 000 cm (pour la fraction < 4.75 mm); dans ce cas, la valeur de la teneur en eau volumique est estimée pour la portion avec gravier, en postulant que les particules de gravier ne contiennent pas d'eau (la teneur en eau diminue alors en proportion au pourcentage de gravier).

La figure 5.12 montre les données et les courbes du modèle van Genuchten (1980) obtenues avec le logiciel RETC. On montre aussi les CRE prédites avec MK selon les données granulométriques et la valeur de n donnée par Milczareck et al. (2006). Sur la figure 5.12, les points carrés représentent les données expérimentales. La courbe lissée qui suit ces points est obtenue avec le code RETC de van Genuchten et al. (1991). Les points en forme de losanges représentent les résultats prédits par le modèle MK.

À la figure 5.12, les valeurs de n (porosité) étaient ajustées pour que la courbe selon le modèle MK suive la courbe obtenue selon van Genuchten (1980) obtenue avec RETC. Les résultats montrent une grande différence entre les données expérimentales et ceux prédits par le modèle MK. La différence se manifeste surtout au niveau de la pente descendante de la courbe et au niveau de la succion résiduelle et de la teneur en eau résiduelle. Ceci pourrait être dû, en partie, aux essais en colonnes qui n'ont pas duré assez longtemps pour attendre l'équilibre. La méthode utilisée pour estimer la porosité et la teneur en eau (de façon indirecte) à l'état résiduel pourrait aussi engendrer une partie de l'écart. Il est également possible que le modèle MK ne soit pas bien adapté pour décrire le comportement de ce genre de matériau.

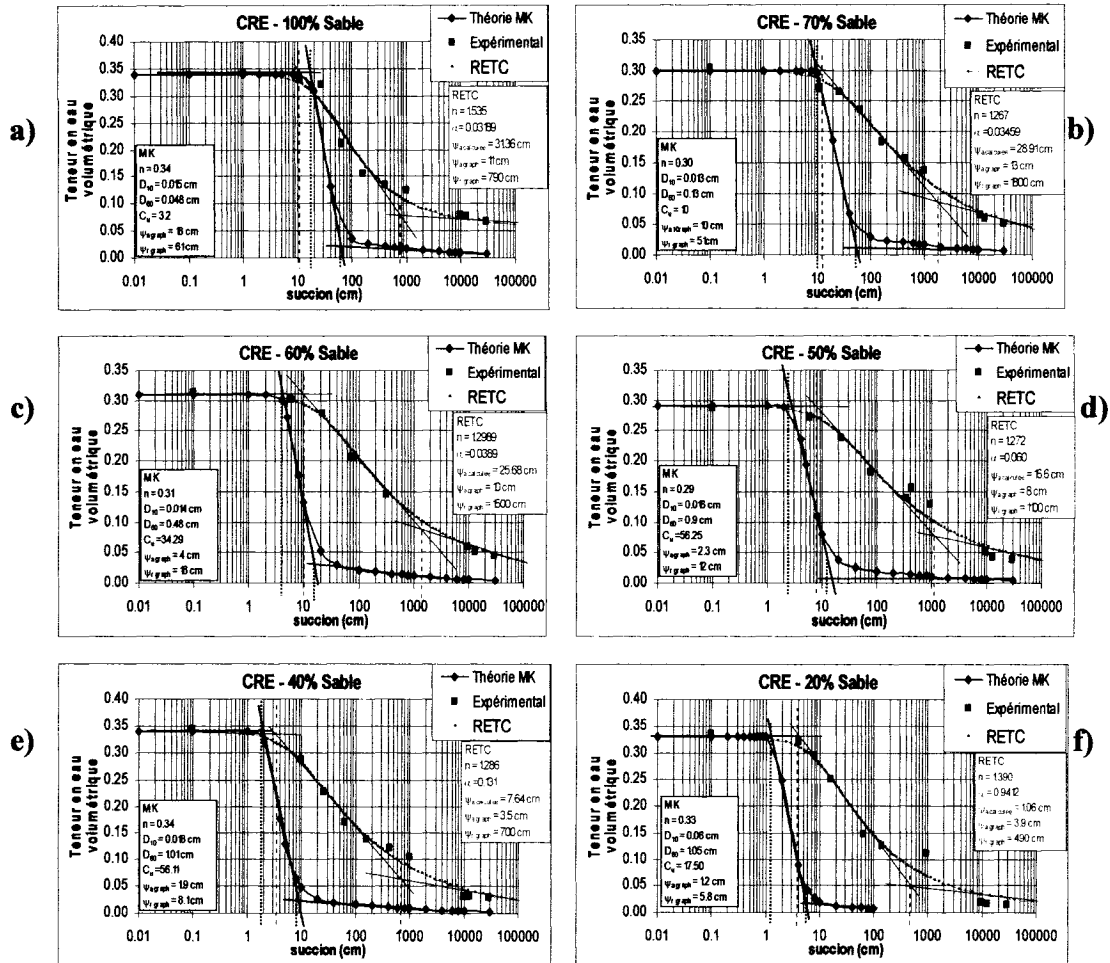


Figure 5.12 CRE expérimentales pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006); CRE lissées selon le code RETC (van Genuchten et al. 1991), et les courbes prédites selon le modèle MK.

- Ajustement des courbes obtenues avec MK et avec RETC.

Le tableau 5.2 montre les valeurs des paramètres m et a_c ajustés (et prédits) avec la porosité n basée sur les mesures de teneur en eau volumique (à faible suction). La porosité a été ajustée par l'auteure en utilisant le dernier point (à saturation).

Tableau 5.2 Valeurs de la porosité n et des paramètres a_c , m pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).

Identification	porosité (n) (-)	Paramètre a_c MK selon équation 1.20 (-)	Paramètre m MK selon équation 1.21 (-)	porosité (n) ajustée (-)	Paramètre a_c MK ajusté (-)	Paramètre m MK ajusté (-)	porosité (n) ajusté (-)
S100-G0	0.399	0.010	0.292	0.340	0.070	0.050	0.340
S70-G30	0.333	0.010	0.108	0.300	0.070	0.100	0.300
S60-G40	0.321	0.010	0.029	0.314	0.090	0.100	0.314
S50-G50	0.317	0.010	0.017	0.287	0.090	0.060	0.287
S40-G60	0.355	0.010	0.016	0.340	0.105	0.040	0.340
S20-G80	0.313	0.010	0.057	0.332	0.200	0.300	0.332

Les CRE ajustées sont montrées à la figure 5.13, pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006), et lissées selon le modèle de van Genuchten (1980) ou obtenues avec le modèle MK. On voit sur la figure 5.13 que le modèle MK ajusté permet de bien reproduire les résultats expérimentaux. Les valeurs de l'AEV et de la succion résiduelle obtenues par méthode graphique pour la courbe MK ajustée sont aussi montrées sur le graphique.

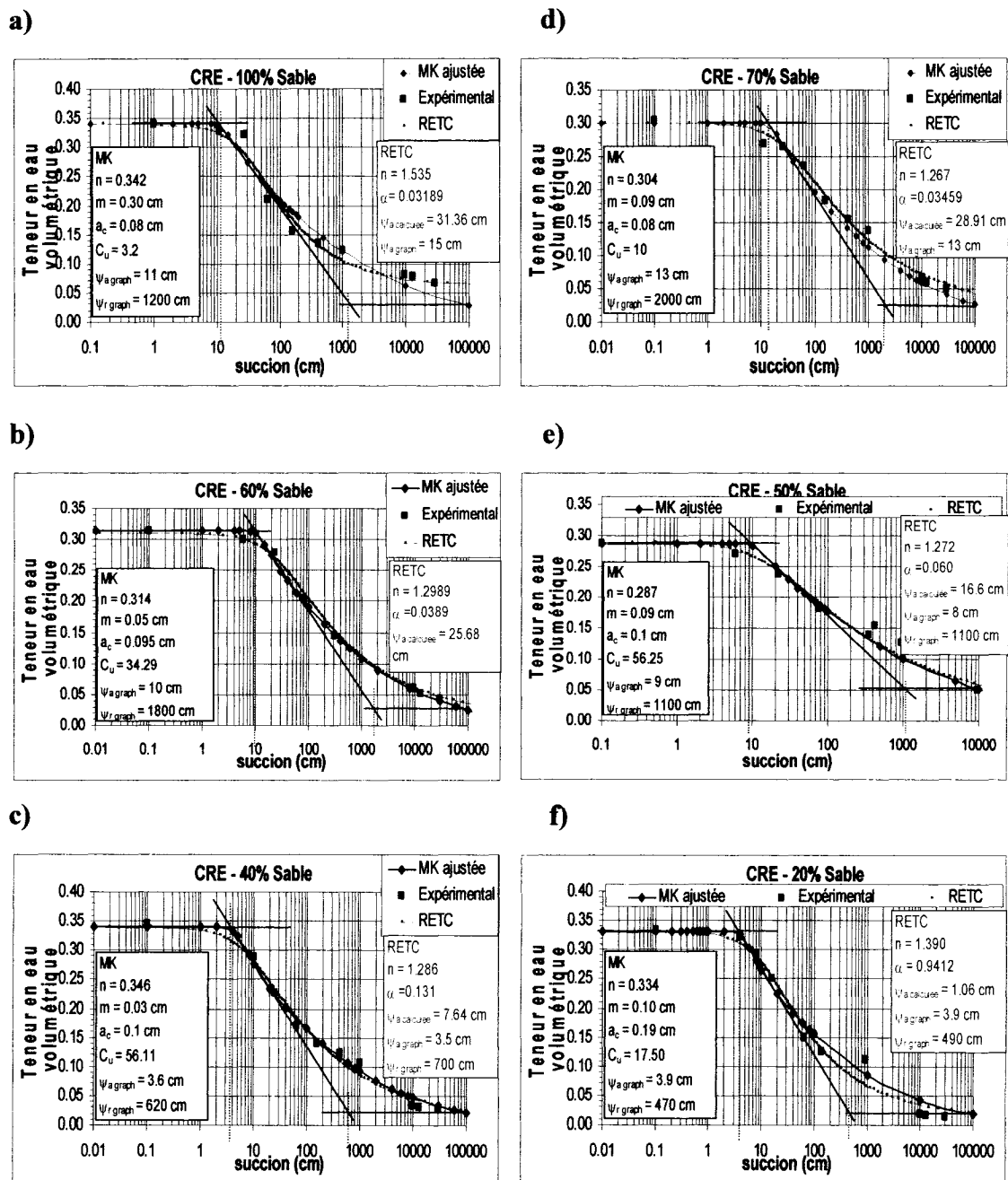


Figure 5.13 Données expérimentales et CRE lissées selon van Genuchten (1980) et selon MK (ajusté) pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).

▫ ψ_a et ψ_r en fonction du pourcentage gravier

Les figures 5.14 et 5.15 montrent respectivement les valeurs du AEV (ψ_a) et de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage gravier. Les valeurs ont été obtenues par méthode graphique sur les CRE expérimentales (basées sur le modèle de van Genuchten (1980; voir figure 5.12), prédites par MK, et selon MK ajusté.

La figure 5.14 montre que l'AEV découlant des données expérimentales reste constant ou augmente légèrement entre 0% à 30% gravier. Ensuite, l'AEV diminue en fonction du pourcentage de gravier, jusqu'à 60% gravier. À 80% gravier l'AEV semble augmenter légèrement. On constate aussi que le modèle MK prédictif tend à sous estimer la valeur du AEV découlant de ces courbes lissées (sauf pour le sable à 100%).

Les tendances expérimentales sont un peu différentes de celles obtenues sur les mélanges analysés au chapitre 3 (surtout à 60 à 80% gravier).

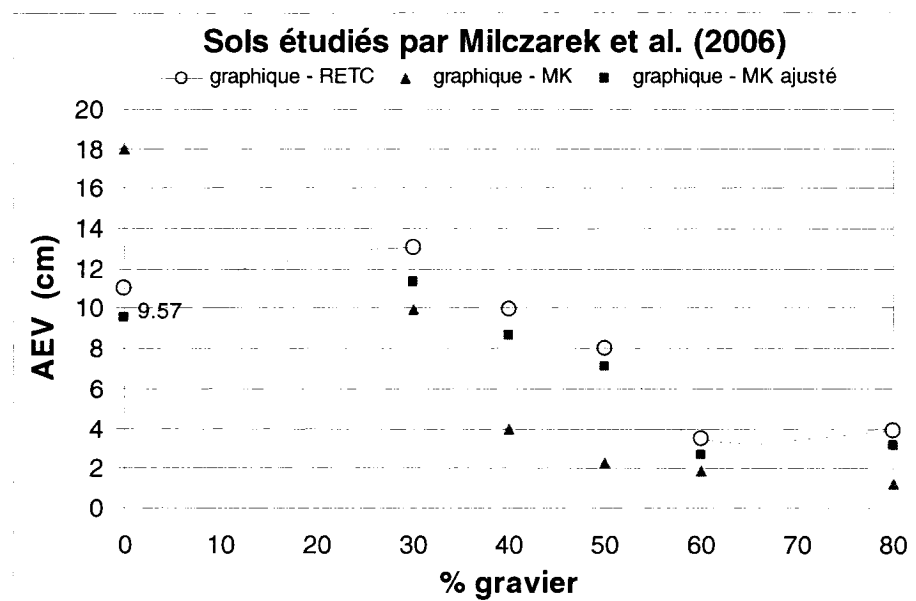


Figure 5.14 Valeurs du AEV obtenues selon les résultats expérimentaux (lissées selon van Genuchten (1980), selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté, pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006).

La figure 5.15 porte sur la valeur de ψ_r . Cette figure ne montre pas la même tendance que le $\psi_a \equiv (AEV)$ de la figure 5.14. La succion résiduelle (ψ_r) semble ici augmenter substantiellement en fonction du pourcentage de gravier jusqu'à 30% gravier, puis, elle semble diminuer en fonction du pourcentage de gravier entre 30 et 80% gravier. Les valeurs obtenues avec le modèle MK prédictif sont très différentes des données expérimentales. L'ajustement de m et a_c n'aide pas beaucoup à améliorer la concordance. A ce point-ci, il est difficile d'expliquer de si grandes différences. On peut toutefois penser que certains points (à succion élevée) de l'essai en colonne pourraient tendre à surestimer la teneur en eau en raison d'une période d'essai trop courte pour attendre l'équilibre hydrostatique (d'où une succion résiduelle surestimée par les mesures).

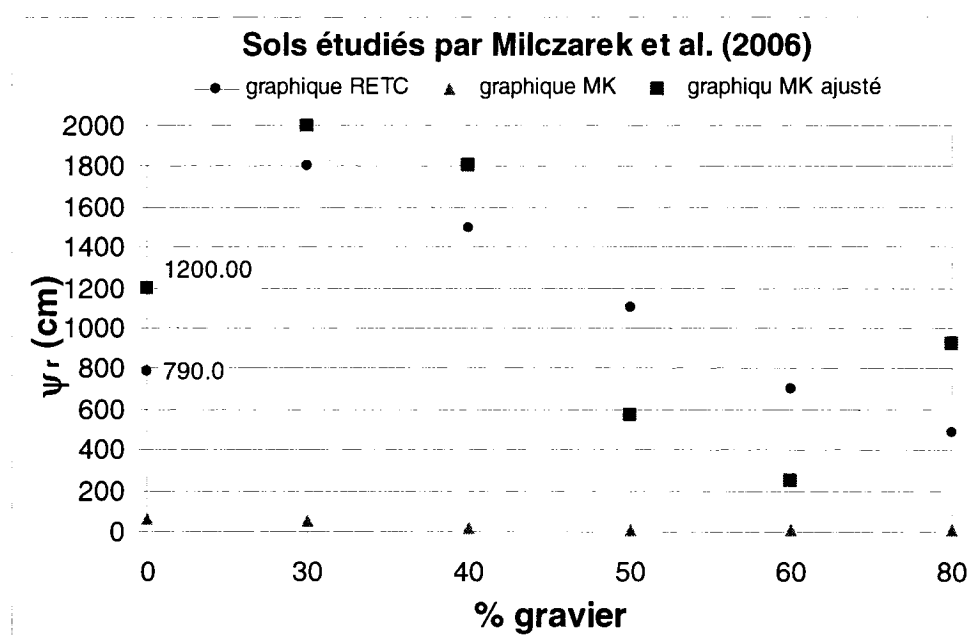


Figure 5.15 Valeurs de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage gravier selon les résultats expérimentaux, selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006)

La figure 5.16 montre la relation obtenue entre la teneur en eau résiduelle (déterminée par méthode des tangentes graphiques) et le pourcentage de gravier pour l'étude de Milczarek et al. (2006). De façon générale θ_r diminue avec le pourcentage de gravier jusqu'à atteindre un plateau. La valeur de θ_r obtenue à 50% gravier est un peu surprenante, mais l'écart par rapport à la tendance peut être due aux imprécisions expérimentales.

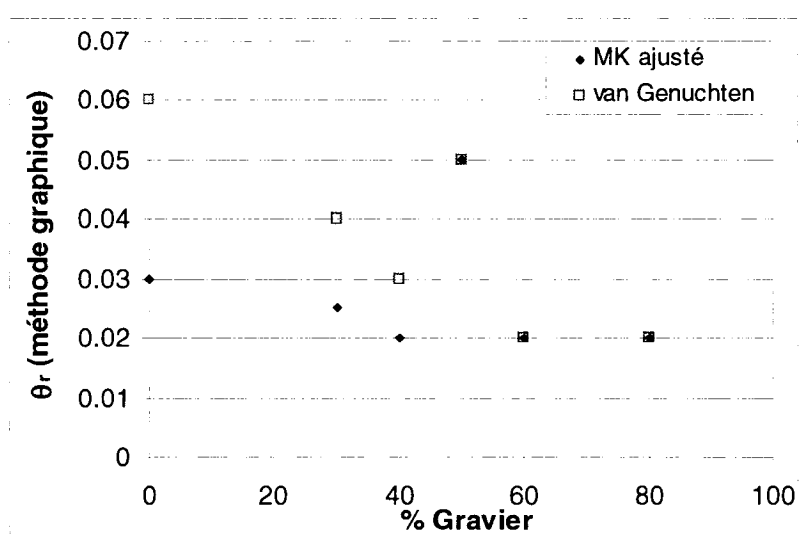


Figure 5.16 Valeurs de la teneur en eau résiduelle (θ_r) en fonction du pourcentage gravier selon les résultats expérimentaux, selon le modèle MK prédictif et selon MK ajusté pour les sols étudiés par Milczarek et al. (2006)

▫ Paramètres m et a_c ajustés (modèle MK)

La figure 5.17 montre la valeur du paramètre a_c ajusté en fonction du C_U et du C_C des sols étudiés par Milczarek et al. (2006). On voit que le rapport (a_c ajusté/ a_c prédit) en fonction du C_U (figure 5.17 a) est proche de 9, sauf par le sol S20-G80 (qui correspond à un pourcentage de gravier problématique, comme pour l'étude du chapitre 4). La figure 5.17 (b) montre la relation entre a_c et C_C . Il est difficile de statuer sur le rôle de C_C .

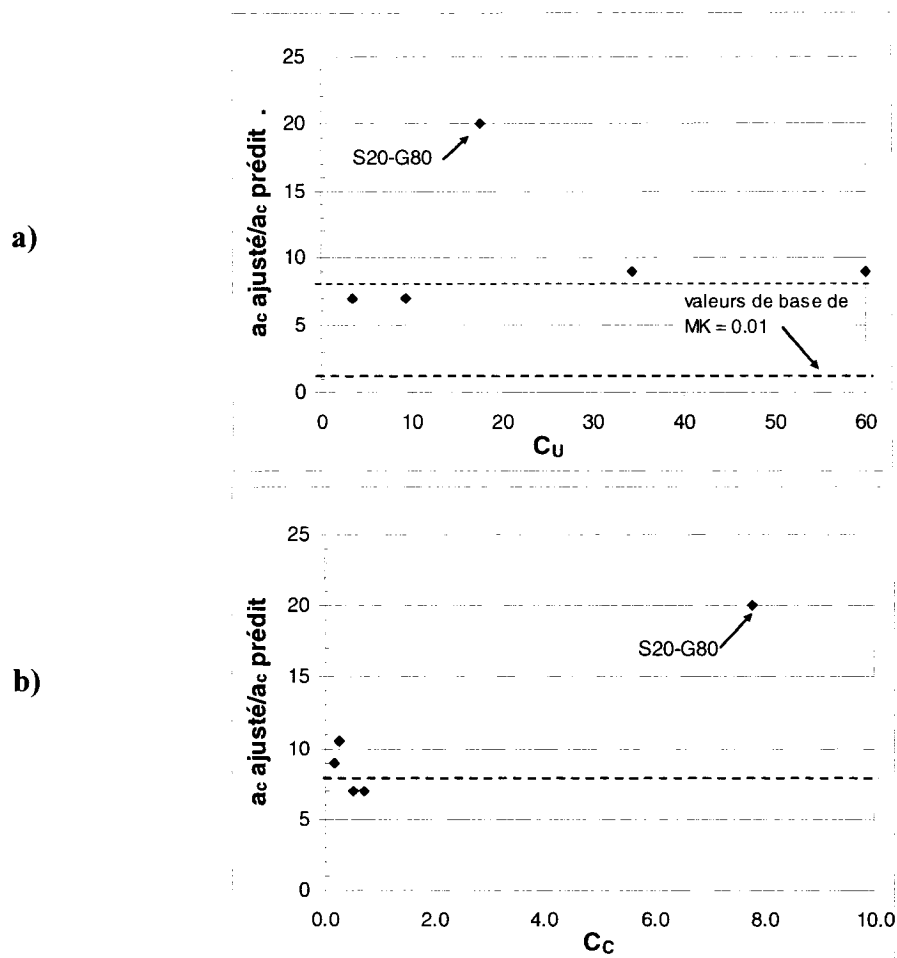


Figure 5.17 Valeurs du paramètre a_c ajusté/ a_c prédit (modèle MK) en fonction du C_U (a) et du C_C (b) pour les sols étudiées par Milczarek et al. (2006)

La figure 5.18 (a) montre le rapport (m ajusté/ m prédit) en fonction du C_U , et la figure 5.18 (b) montre les résultats obtenus pour le rapport (m ajusté/ m prédit) en fonction du C_C . On voit sur la figure 5.18 (a) que la valeur de m ajusté en fonction du C_U ne suit pas le modèle original ($m = 1/C_U$). Cette tendance est assez semblable aux données observées pour les matériaux étudiés au chapitre 4. À la figure 5.18 (b) les données semblent indiquer que m varie selon C_C .

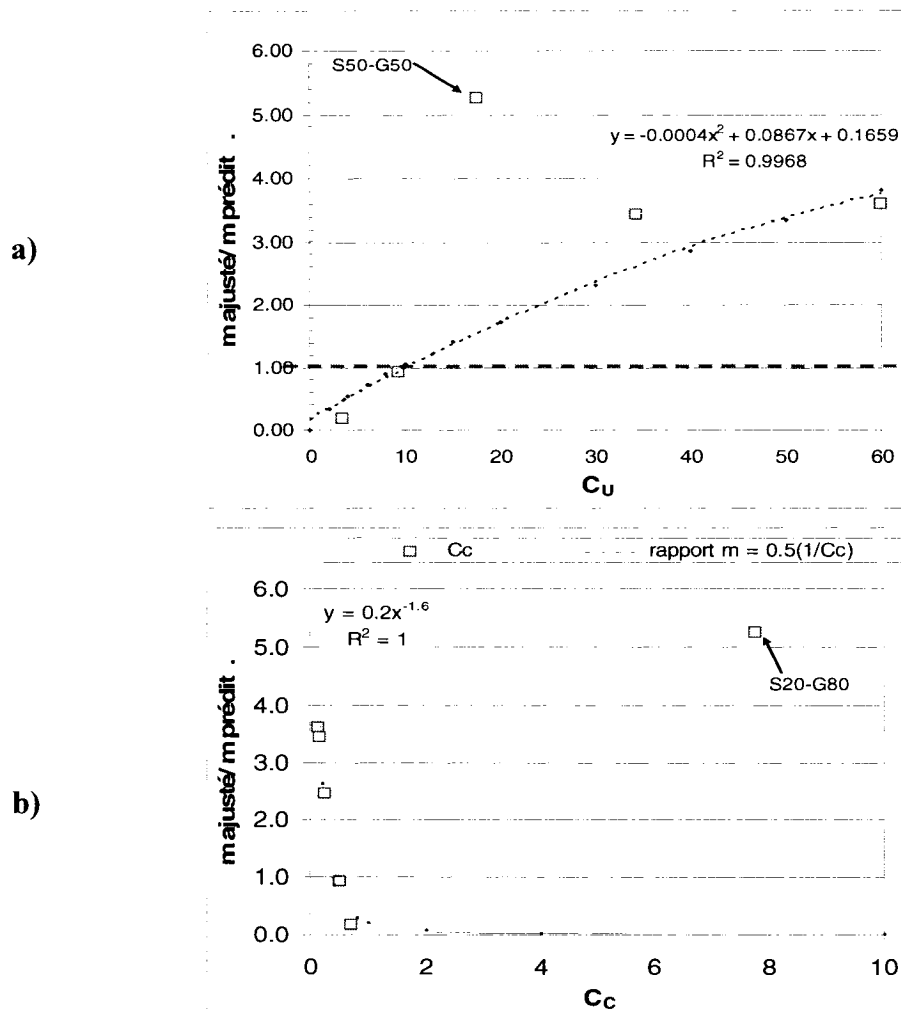


Figure 5.18 Valeurs du m ajusté/ m prédit en fonction du C_u (a) et en fonction du C_c (b) pour les sols étudiées par Milczarek et al. (2006)

5.2.3. Étude de Wickland et al. (2006) sur des mélanges de stériles et résidus miniers.

L'étude de Wickland et al. (2006) (voir aussi Wickland 2006) combine une série d'essais à grande échelle et à petite échelle.

À grande échelle, les essais ont été menés dans des colonnes avec des mélanges de roches stériles et de résidus (« meso-scale column » – voir figure 5.19). Ces essais

avaient comme but d'étudier le tassement et le drainage des mélanges. Les valeurs de la pression étaient aussi obtenues par des piézomètres et tensiomètres installés dans quelques unes des grandes colonnes (1 m de diamètre et 6 m de hauteur). La conductivité hydraulique a été estimée selon l'essai de drainage pour les colonnes à grande échelle. Dans une colonne (# 4), on a mené un essai à charge constante pour mesurer directement la conductivité hydraulique. Les courbes de rétention d'eau ont été obtenues par des essais conduits au laboratoire (à petite échelle avec un essai de consolidation au laboratoire) et seulement pour un mélange (colonne 1). La figure 5.18 montre les colonnes des sols mélanges comportant des proportions 5:1, 6:1, 7:1 et 1:0 de roches stériles : résidus miniers.

Un échantillon obtenu de la décharge du camion dans la colonne 1 (au moment où la colonne était pleine à 2.75 m de hauteur) a été utilisé pour mener des essais de consolidation à petite échelle (au laboratoire). La proportion du la mélange obtenu lors de la décharge, une fois mesurée au laboratoire, est de 4.4:1 de roche stérile : résidus miniers (masse sèche). Donc, le pourcentage du mélange utilisé sur les essais au laboratoire et celui de la grande colonne n'est pas tout à fait le même. Plusieurs autres essais ont été menés au laboratoire pour des rapports de 4.1:1, 4.2:1, 4.3:1, 4.4:1 et 4.8:1. Ici, seulement les résultats du mélange 4.4:1 sont montrées. La conductivité hydraulique et la courbe de rétention d'eau ont aussi été mesurées lors des essais de consolidation. Ces essais utilisent une cellule de consolidation de diamètre interne de 30.8 cm et les spécimens peuvent avoir une hauteur jusqu'à 25 cm. Un poids vertical est appliqué au spécimen; la pression varie entre 0 à 320 kPa. Les CRE pour la roche stérile et le mélange à proportion 4.4:1 ont aussi été obtenues avec des cellules de pression (*pressure plates*) de 15 cm de diamètre interne; pour les résidus, une Tempe cell standard a été utilisée.

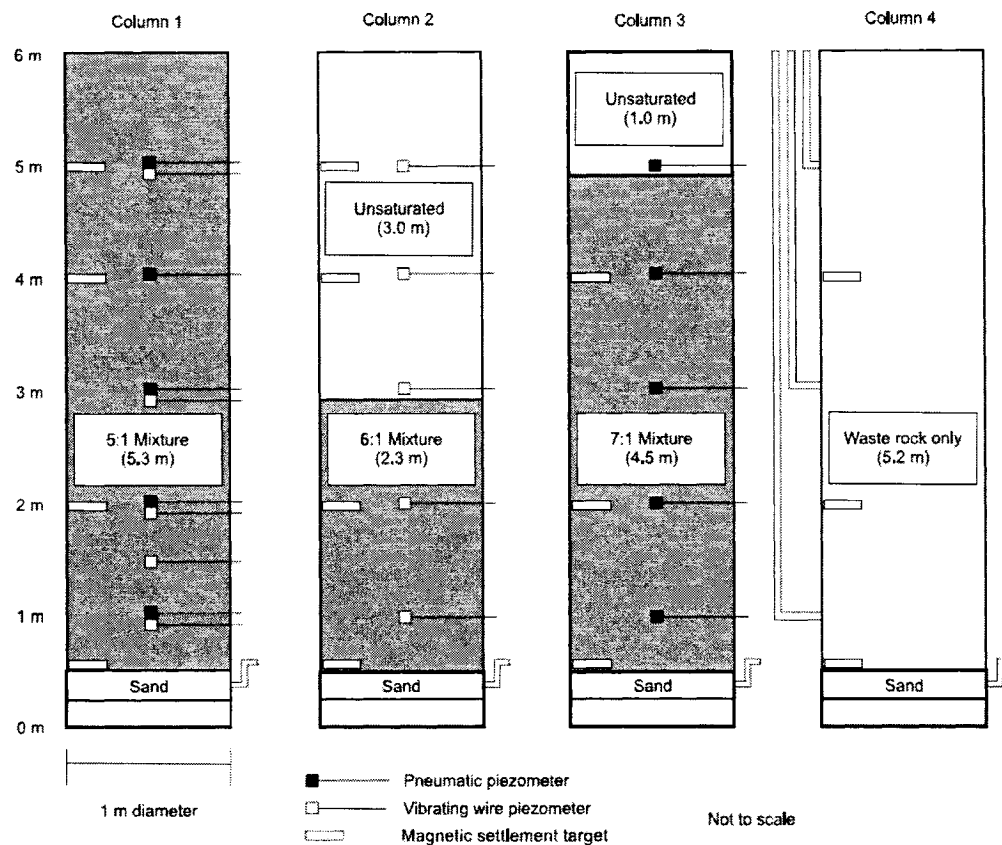


Figure 5.19 Dimensions et proportion des mélanges tel que conçus pour les essais en colonne de Wickland (2006).

Les résultats montrés ici sont tirés de la thèse de Wickland (2006) et des articles qui y correspondent. Certains résultats sont utilisés ici afin d'évaluer les tendances découlant de ces travaux.

▪ *Caractéristiques de base des matériaux*

▫ *Granulométrie*

La figure 5.20 (a) montre les courbes granulométriques de chaque matériau utilisé pour faire les essais dans la colonne 1 au laboratoire et in-situ.

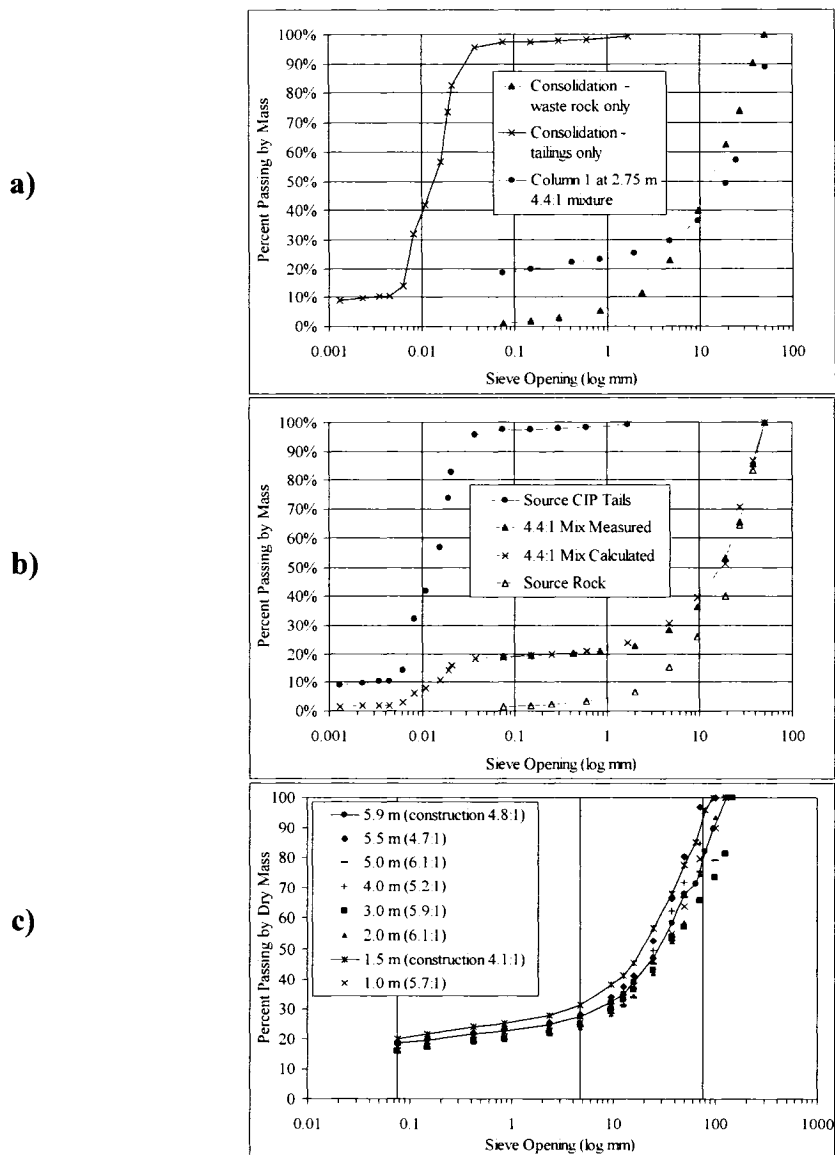


Figure 5.20 Granulométries du résidu, de la roche stérile et du mélange à proportion 4.4:1 (colonne 1 et celle préparée au laboratoire) selon l'étude de Wickland et al. (2006).

Les matériaux présentés à la figure 5.20 sont des résidus miniers, du sable et de la roche stérile. La figure 5.20 (b) montre les mélanges préparés au laboratoire. La courbe de mélange à proportion 4.4:1 (roches stériles: résidus) forme une discontinuité (plateau) à environ 20% du pourcentage passant. Ce plateau est en

accord avec les résultats montrés au chapitre 4 de ce mémoire. La figure 5.20 (c) montre la courbe granulométrique obtenue pour la colonne 1, à grande échelle, lors du démontage.

La figure 5.21 montre que la roche stérile sédimentaire noire a une granulométrie similaire à celle de la roche stérile de l'étude de Wickland et al. (2006). Le Black sedimentary waste rock a pu être substitué à la roche stérile parce que leurs courbes granulométriques sont presque similaires.

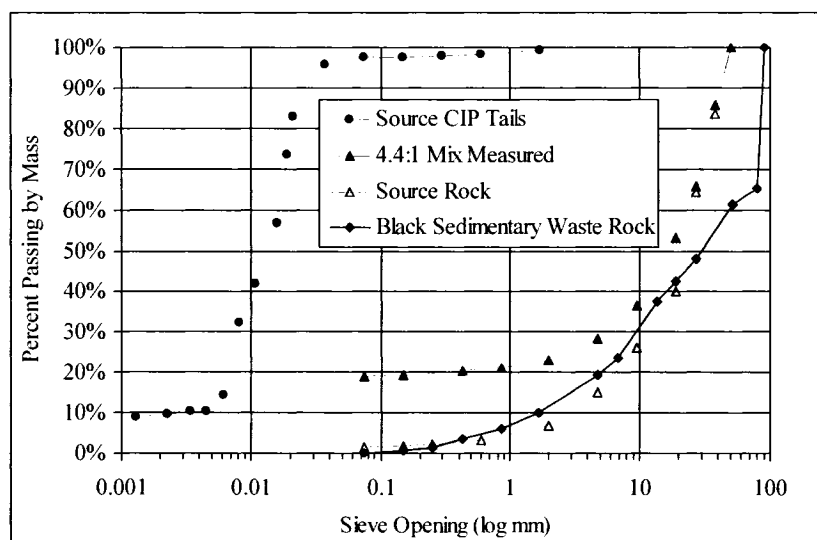


Figure 5.21 Courbes granulométriques de résidus miniers, le mélange de la colonne 1, la roche stérile et la roche stérile « *Black Sedimentary* ». Tirées de Wickland (2006).

Le tableau 5.3 identifie les différents mélanges utilisés pour les essais. Le mélange à proportion 4.4:1 (colonne 1) a été utilisé pour l'essai de consolidation d'où on a obtenu les valeurs de l'indice des vides et de la conductivité hydraulique. Ce mélange (à proportion 4.4:1) a aussi servi pour obtenir la courbe de rétention d'eau (CRE).

Tableau 5.3 Liste des mélanges et des types d'essais menés par Wickland (2006)

Specimen
Test: Consolidation
4.4:1 mixture
4.8:1 mixture
6.1:1 mixture
6.4:1 mixture
waste rock only
CIP tailings only
Test: Hydraulic conductivity
4.2:1 mixture
4.3:1 mixture
CIP tailings only
Test: Rheology
CIP tailings
Test: SWCC
4.4:1 mixture
CIP tailings
CIP tailings (mill sample)

▫ Porosité

Le tableau 5.4 montre les valeurs de l'indice des vides (e) initial pour le résidu, le mélange à proportion 4.4 :1 et la roche stérile. Ces résultats ont été obtenus lors des essais de compressibilité.

Tableau 5.4 Valeurs de l'indice des vides pour le résidu, la roche stérile et la mélange à proportion 4.4 :1 (de la colonne 1).

	Void Ratio at 0 kPa	% Strain at 320 kPa
CIP Tailings	3.2	50.3
Waste Rock	0.71	4.7
4.4:1 Mixture	0.49	7.5

La figure 5.22 montre les résultats obtenus lors de l'essai de consolidation (ou compressibilité) pour la colonne 1.

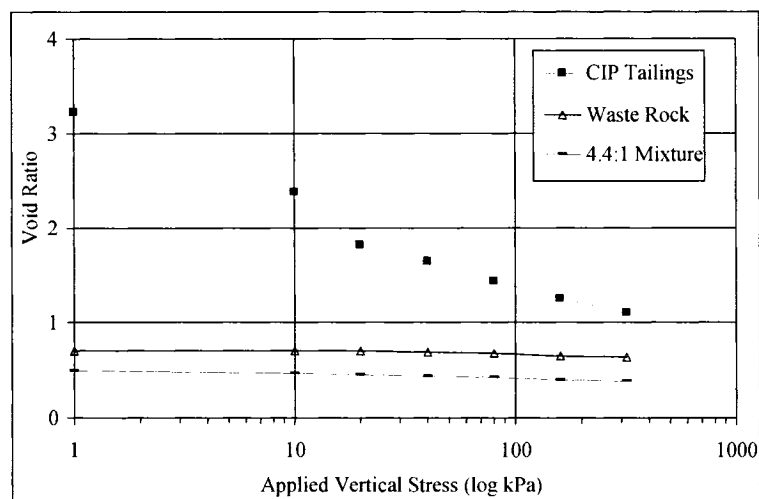


Figure 5.22 Indice des vides mesurés lors de l'essai de consolidation au laboratoire pour la roche stérile, le résidus et le mélange à proportion 4.4 :1 de roche stérile et résidus.

▪ Conductivité hydraulique

Le tableau 5.5 montre les valeurs de la conductivité hydraulique (k_{sat}) obtenues pour le résidu minier et le mélange de la colonne 1 (à proportion de 4.4:1). Les résultats ont été obtenus lors de l'essai de consolidation. La valeur moyenne de la conductivité hydraulique obtenue pour la grande colonne 1 est aussi montrée au tableau pour une pression de 58 kPa.

Tableau 5.5 Valeurs de la conductivité hydraulique en fonction de la pression (pré consolidation) pour le résidus et le mélange 4.4:1. Tirées de Wickland (2006)

Nominal Pressure	CIP Tailings	4.4:1 Mixture	Column 1 (average)
kPa	k (m/s)	k (m/s)	k (m/s)
0 to 10	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$7.3 \cdot 10^{-9}$	
10 to 20	$4.2 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	
20 to 40	$8.8 \cdot 10^{-9}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	
40 to 80	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$	
80 to 160	$3.0 \cdot 10^{-9}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	
160 to 320	$1.8 \cdot 10^{-9}$	$1.9 \cdot 10^{-8}$	
58			$3.9 \cdot 10^{-8}$

Le tableau 5.6 montre les valeurs de la conductivité hydraulique obtenues lors des essais de consolidation et de drainage pour les colonnes à grande échelle. Seule la colonne 4 (roche stérile à 100%) a été l'objet d'un essai direct de conductivité hydraulique (à charge constante); la valeur obtenue pour k_{sat} est aussi montrée dans le tableau.

Tableau 5.6 Valeurs de la conductivité hydraulique pour les colonnes à grande échelle. (Tirées de Wickland, 2006)

Column	Mixture Ratio	k consolidation (m/s)	k drainage (m/s)
1	5:1	$3.9 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$ $1.2 \cdot 10^{-8} \dagger$
2	6:1		$5.4 \cdot 10^{-8}$
3	7:1		$1.3 \cdot 10^{-7}$
4	1:0		$0.3 \dagger \dagger$

$\dagger$ SeepW simulation, $\dagger \dagger$ constant head test

La tendance entre la moyenne des conductivités hydrauliques et le mélange des colonnes est montrée à la figure 5.23. Ici, la conductivité hydraulique tend à rester constante pour les résidus à 100 % jusqu'à une proportion de 5 :1 (colonne 1). Ensuite la conductivité hydraulique tend à augmenter en proportion de l'augmentation de roche stérile (proportions de 6 :1 et 7 :1). L'augmentation de la conductivité hydraulique est très marquée pour la roche stérile. Cette tendance est assez similaire à celle de notre étude, qui montre une diminution (légère) de k_{sat} avec l'augmentation du pourcentage de gravier jusqu'à environ 50% ou 60 %. Ensuite, k_{sat} augmente avec le pourcentage gravier.

La figure 5.23 montre aussi les valeurs de k_{sat} calculées selon KCM seulement pour les résidus miniers, la roche stérile et le mélange 4.4:1. Les autres résultats ne peuvent être utilisés ici car les courbes granulométriques n'ont pas de valeurs jusqu'à 10% passant. Aussi, les données granulométriques ne sont pas assez bien connues pour calculer la surface spécifique; donc les calculs selon KC ne sont pas réalisés. Les valeurs de k_{sat} calculées selon KCM sont plus grandes que celles obtenues expérimentalement au laboratoire. Les écarts sont peut-être dues aux valeurs de $e = 3.2$ (pour la roche stérile) et de $C_U = 1250$ (pour le mélange, $D_{10} = 0.016$ cm et $D_{60} = 2$ cm).

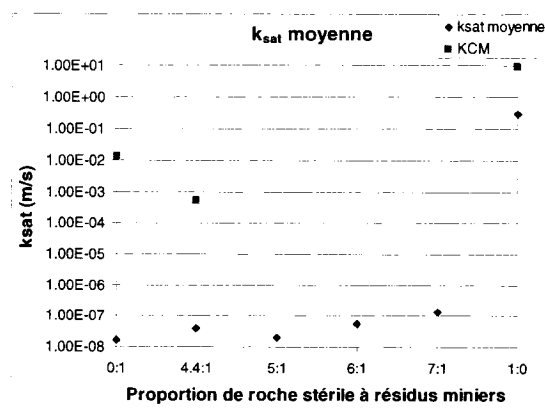


Figure 5.23 Conductivité Hydraulique en fonction des proportions de roche stérile à résidus minier. Tirées de Wickland (2006).

▪ *Courbe de rétention d'eau*

Les CRE obtenues par Wickland et al. (2006) sont montrées à la figure 5.24. Il s'agit des courbes des résidus miniers (CIP Tailings, identifiée par les triangles), de la roche stérile (Black sedimentary waste rock, identifiée par les carrés) et de la colonne 1 (mélange 4.4 :1, identifiée par les rhomboïdes).

La CRE a été obtenue à l'aide d'un essai à la plaque de pression de 15 cm de diamètre. Le volume total est posé constant durant l'essai. La CRE de la roche stérile n'a pas été mesurée, mais un essai a été fait sur un autre stérile (montré sur la figure 5.24).

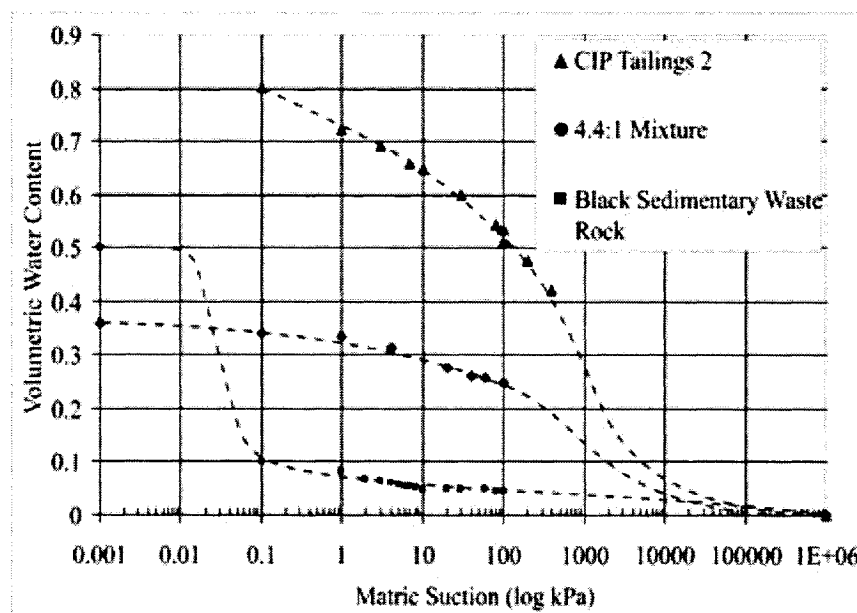


Figure 5.24 CRE pour les résidus, la roche stérile et le mélange 4.4:1 des roches stériles et résidus (données de Wickland et al. 2006).

Les CRE montrent qu'il y a une diminution de la teneur en eau volumique saturée ($\theta_s = n$) pour les mélanges. Il n'y a toutefois pas assez de données pour développer d'avantage sur l'influence du pourcentage des particules fines sur la porosité des mélanges. Notons néanmoins que cette diminution de la teneur en eau volumique

saturée semble en accord avec l'étude des mélanges présentée au chapitre 4 de ce mémoire.

5.2.4. Étude de Ouangrawa (2007)

Les résultats obtenus incluent ici trois matériaux distincts et leur mélange. Il s'agit d'un résidu minier silteux (LOU), deux matériaux sableux (SIG et SAB), et deux mélanges : un mélange entre LOU et SIG à 34% et 66% (en poids) respectivement (LOU34-SIG66), et un mélange entre LOU et SAB à 40% et 60% respectivement (LOU40-SAB60).

- *Caractéristiques de base des matériaux*

- Granulométrie

La figure 5.25 montre la courbe granulométrique pour chaque matériau étudié par Ouangrawa (2007). La courbe granulométrique du mélange LOU40-SAB60 montre une discontinuité au pourcentage passant correspondant à la proportion de résidu fins (LOU) dans le mélange. Les courbes granulométriques de 2 matériaux sources sont continues et homogènes. La courbe granulométrique du résidu SIG montre une discontinuité autour de 25% passant. La courbe granulométrique du mélange LOU34-SIG66 montre aussi une légère discontinuité, mais pas tout à fait au pourcentage de résidu dans le mélange.

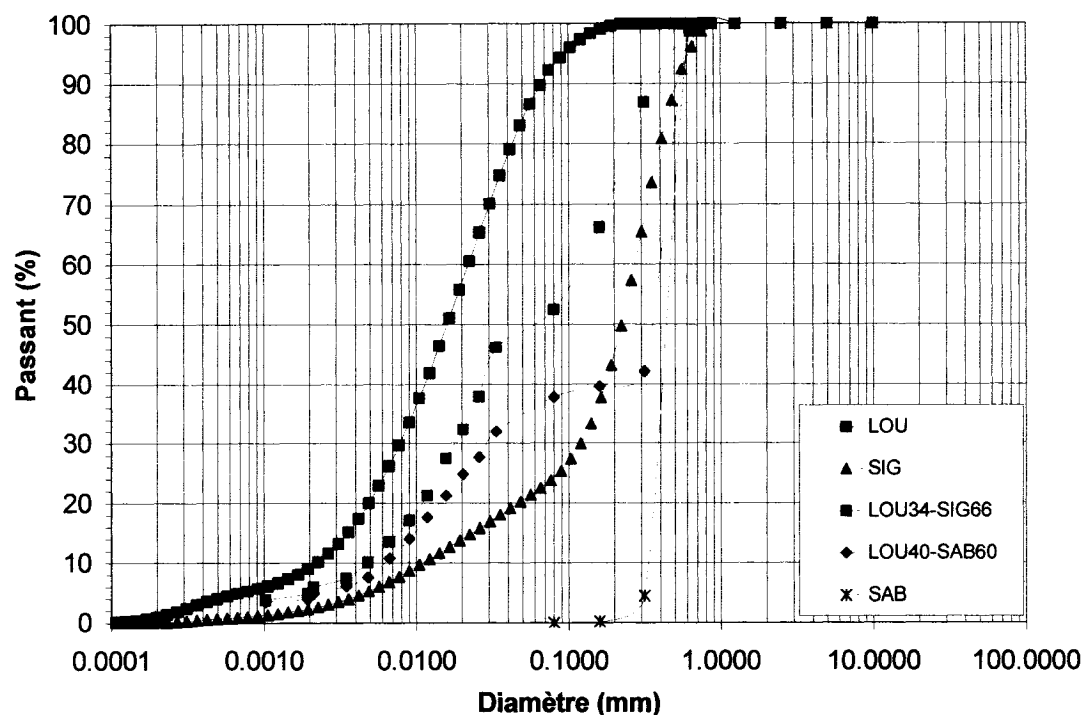


Figure 5.25 Courbes granulométriques des résidus miniers et des mélanges (Ouangrawa, 2007).

Le tableau 5.7 montre les caractéristiques des matériaux obtenus des courbes granulométriques.

Tableau 5.7 Valeurs des caractéristiques granulométriques des matériaux pour les données de Ouangrawa (2007)

Identification	Pourcentage de sable dans le sol (retenu 0.08 mm) (%)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	D _r (-)
LOU	9	0.0022	0.0220	0.0078	10.00	1.26	3.51
SIG	76	0.0110	0.2700	0.1300	24.55	5.69	2.82
LOU34-SIG66	48	0.0049	0.1300	0.0180	26.53	0.51	3.02
LOU40-SAB60	61	0.0063	0.4000	0.0290	63.49	0.33	2.94
SAB	100	0.3300	0.4700	0.3900	1.42	0.98	2.66

▫ Indice des vides

La figure 5.26 montre la valeur de l'indice des vides selon le pourcentage de matériau sableux (retenu 0.08 mm). L'indice des vides montré sur la figure est la moyenne des valeurs de l'indice des vides obtenus par Ouangrawa (2007). Sur cette figure, on voit que l'indice des vides tend d'abord à diminuer avec une augmentation du pourcentage de particules sableuses, puis il remonte. La diminution de l'indice des vides en fonction du pourcentage de particules grossières est observée pour les deux mélanges analysés ici. En comparant les résultats avec les nôtres, on voit que le pourcentage de particules grossières associé au point e_{min} est le même que pour les mélanges étudiés au chapitre 4 (surtout pour le groupe 1).

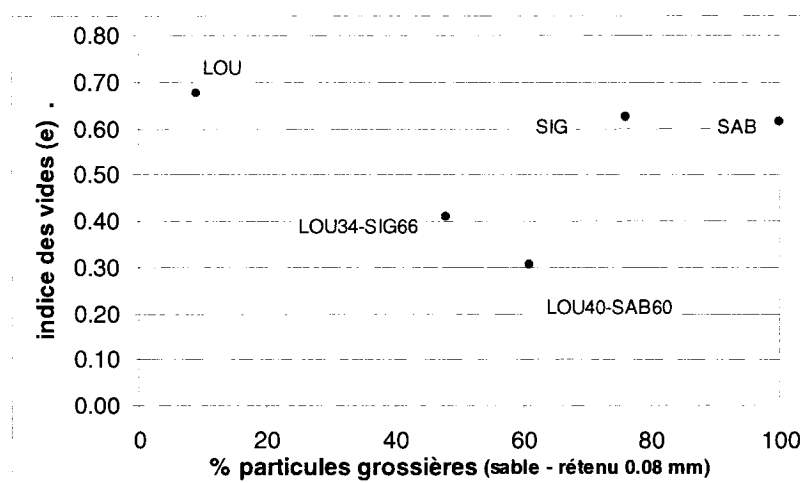


Figure 5.26 Valeurs de l'indice des vides en fonction du pourcentage de particules grossières (données de Ouangrawa, 2007)

▫ Surface spécifique

À partir des courbes granulométriques fournies par Ouangrawa (2007), l'auteure a calculé la surface spécifique selon les modèles KC, KCM et MK. Le tableau 4.8 montre les valeurs de S_s obtenues selon les modèles utilisés.

Tableau 5.8 Valeurs de S_s selon modèles KC, KCM et MK

Identification	Surface Spécifique (S_s) Kozeny-Carman (KC)	Surface Spécifique (S_s) Kozeny-Carman Modifié (KCM)	Surface Spécifique (S_s) Kovac's Modifié (MK)
	Eqn. 1.28	Eqn. 1.30	Eqn. 1.31
	(m^2/kg)	(m^2/kg)	(m^2/kg)
LOU	367.41	881.52	596.27
SIG	152.58	188.97	122.66
LOU34-SIG66	262.47	391.04	253.33
LOU40-SAB60	218.59	269.94	173.41
SAB	7.47	10.74	9.66

La figure 5.27 montre la comparaison entre les valeurs obtenues. Sur la figure 5.27 (a et b) on voit que le matériau LOU montre une différence par rapport à la tendance. Pour les mélanges (figure 5.26 c et d) les tendances sont assez similaires aux résultats montrés au chapitre 4.

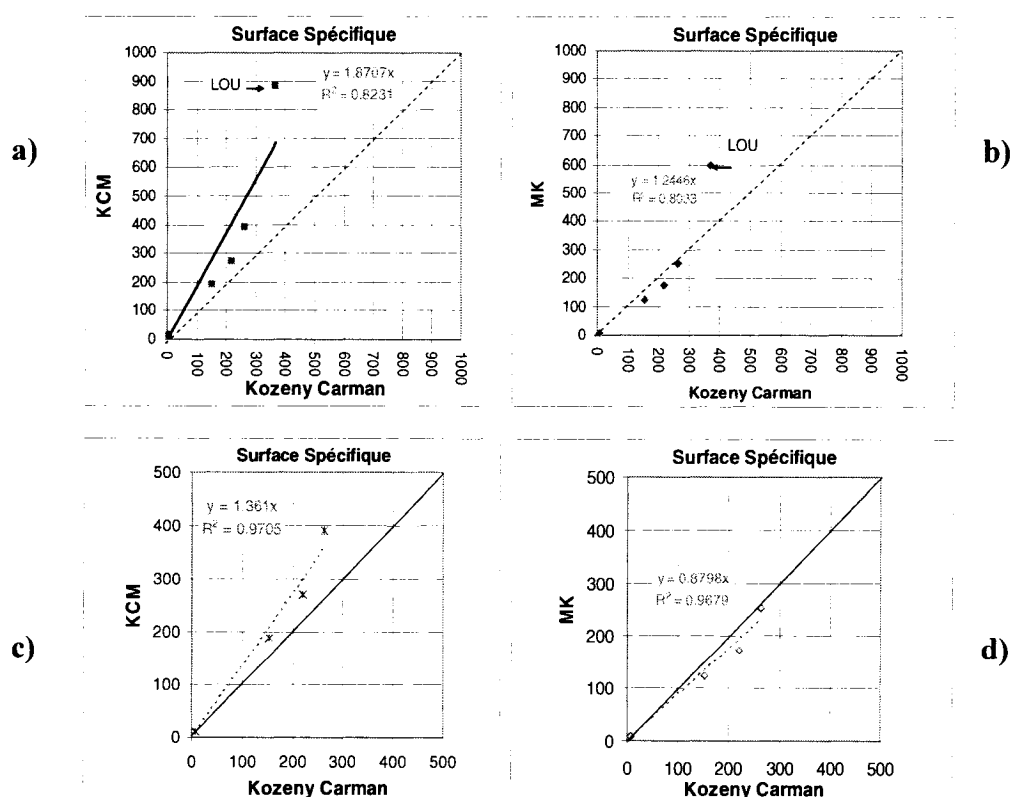


Figure 5.27 Surface spécifique calculée selon les modèles KCM, MK et KC (données tirées de Ouangrawa 2007).

Les valeurs de la surface spécifique montrées à la figure 5.26 sont pour la plupart en accord avec les résultats des autres études. La S_s calculée selon MK et selon KC est souvent très proche (à l'exception du matériau LOU ici). Avec le modèle KCM, les valeurs de S_s calculées sont plus grandes que les valeurs obtenues selon KC.

▫ Conductivité hydraulique saturée

La figure 5.28 montre les valeurs de k_{sat} prédites par les modèles KC et KCM et les valeurs de k_{sat} mesurées au laboratoire. Les valeurs de k_{sat} mesurées sont les valeurs obtenues par la moyenne de la conductivité hydraulique selon l'essai triaxial et la moyenne des essais à charge variable et constante.

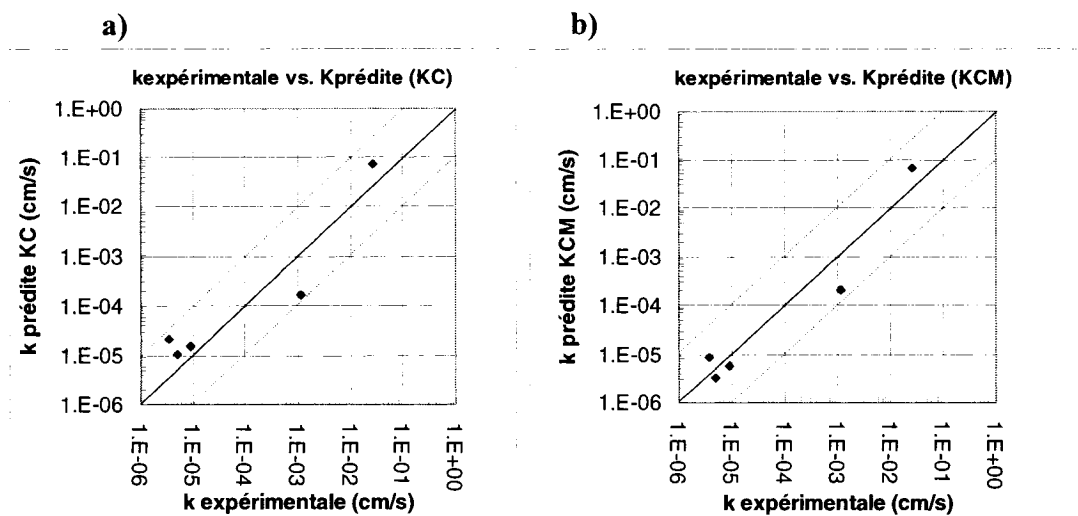


Figure 5.28 Valeurs de k_{sat} prédites et mesurées (données de Ouangrawa 2007).

Ces résultats montrent que les prédictions se rapprochent des résultats expérimentaux (à +/- 1 ordre de grandeur).

La figure 5.29 montre les valeurs de k_{sat} prédites et mesurées en fonction du pourcentage des particules grossières (sablonneuses – retenues au tamis 0.08 mm).

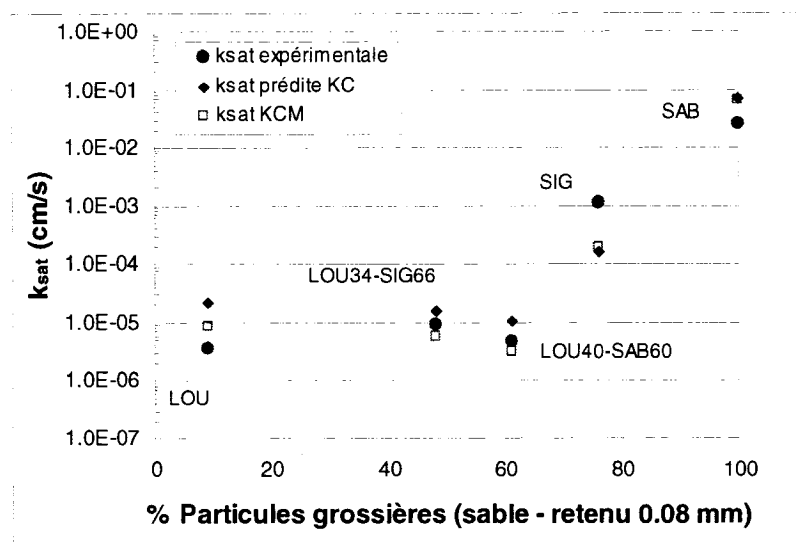


Figure 5.29 Conductivité hydraulique en fonction de la proportion de particules retenues au tamis 0.08 mm (données de Ouangrawa 2007).

La figure 5.29 montre que la conductivité hydraulique mesurée pour le silt (LOU) est plus petite que celle prédite par les deux modèles (KC et KCM). Cette figure montre aussi que la conductivité hydraulique mesurée est presque constante (similaire à celle du matériau LOU) jusqu'à un pourcentage des particules grossières ($\geq 80\mu\text{m}$) d'environ 60%. Ensuite, la conductivité hydraulique tend à augmenter avec le pourcentage de particules grossières jusqu'à un maximum de k_{sat} à 100% des particules grossières.

Cette tendance semble qualitativement en accord avec les résultats de notre étude présentés au chapitre 4, qui montrent que la conductivité hydraulique diminue légèrement jusqu'à un certain pourcentage de particules grossières ajoutées aux mélanges (plus grossières dans notre cas). Ensuite, k_{sat} augmente avec le pourcentage de matériau plus grossier. La même tendance est obtenue dans l'étude de Milczarek et al. (2006) qui montre une légère diminution (jusqu'à un pourcentage de 30% gravier environ) suivie d'une hausse de k_{sat} .

▫ Courbes de rétention d'eau

▪ *Modèles van Genuchten et MK.*

La figure 5.30 montre les CRE mesurées et lissées avec le modèle de van Genuchten (1980) selon le code RETC, et les CRE prédites par le modèle de MK.

Le tableau 5.9 donne les valeurs des paramètres correspondants à ces courbes. La porosité pour quelques matériaux a été ajustée pour obtenir une teneur en eau similaire aux courbes expérimentales (à faible succion).

Tableau 5.9 Valeurs des paramètres des modèles van Genuchten (1980 selon RETC) (a) et MK (méthode graphique sur CRE prédites) (b). Données de Ouangrawa (2007)

(a)

Identification	porosité (n) (-)	AEV lissage Van Genuchten RETC ($\psi_s = 1/\alpha$) (cm)	AEV lissage Van Genuchten RETC/graphique (ψ_s) (cm)	Succion résiduelle Lissage Van Genuchten RETC/graphique (ψ_r) (%)	Paramètre n, Lissage Van Genuchten RETC (-)	Paramètre α Lissage Van Genuchten RETC
LOU	0.415	917.43	450	3200	2.604	0.001
SIG	0.412	37.48	21	85	3.589	0.027
LOU34-SIG66	0.255	1250.00	600	3100	2.957	0.001
LOU40-SAB60	0.209	970.87	450	5800	2.095	0.001
SAB	0.401	17.00	17	25	--	0.059

(b)

Identification	Succion Résiduelle MK selon équation 2.24 (ψ_r) (cm)	AEV MK selon équation 2.25 (ψ_s) (cm)	Paramètre a_c MK selon équation 2.22 (--)	Paramètre m MK selon équation 2.21 (--)	Succion Résiduelle MK graphique (ψ_r) (cm)	AEV MK graphique (ψ_s) (cm)
LOU	8879.80	358.13	0.01	0.100	3200	392
SIG	1105.49	89.29	0.01	0.052	220	44
LOU34-SIG66	6375.52	287.15	0.01	0.038	4300	209
LOU40-SAB60	5324.67	254.66	0.01	0.016	6000	113
SAB	48.41	11.09	0.01	0.702	37	11

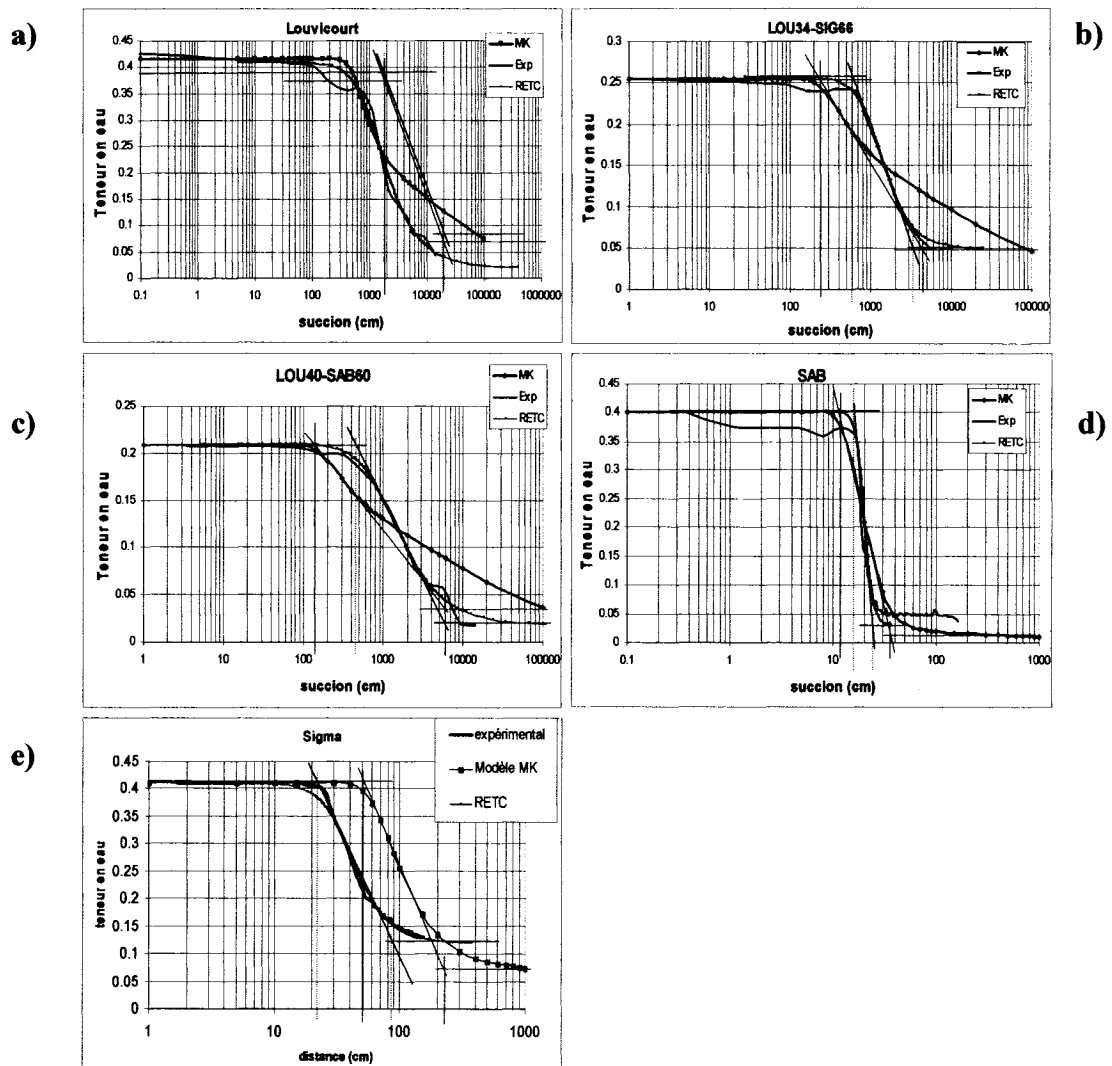


Figure 5.30 CRE expérimentales, lissées avec le modèle van Genuchten (1980) et prédites selon MK (données tirées de Ouangrawa 2007).

La figure 5.30, montre les données expérimentales, les courbes lissées avec RETC et la les courbes représentant la CRE prédite par le modèle MK (les termes sont définis aux tableaux 3.5 et 3.6). La courbe prédite pour le matériau LOU est assez proche de celle obtenue au laboratoire. Les autres montrent une différence assez marquée pour justifier l'ajustement des paramètres m et a_c .

▪ *Modèles MK avec ajustement de m et a_c .*

L'ajustement des CRE calculées avec MK a été réalisé en modifiant les paramètres m et a_c pour les données de Ouangrawa (2007). On voit les courbes ajustées à la figure 5.31. Le modèle MK montre des valeurs de succion résiduelle plus petites que la courbe lissée avec van Genuchten (1980). Les valeurs de m et a_c ajustées sont données au tableau 5.10. Le seul matériau qui n'a pas demandé d'ajustement est le matériau LOU parce que la courbe initiale selon MK est proche de la courbe expérimentale.

Tableau 5.10 Valeurs des paramètres ajustés du modèle MK. Données de Ouangrawa (2007)

Identification	Succion Résiduelle MK Ajusté selon éq. 2.24 (ψ_r) (cm)	AEV MK Ajusté selon éq. 2.25 (ψ_a) (cm)	Paramètre a_c Ajusté (–)	Paramètre m MK Ajusté (–)	Succion Résiduelle MK Ajusté selon graphique (ψ_r) (cm)	AEV MK Ajusté selon graphique (ψ_a) (cm)
LOU	8879.80	358.13	0.010	0.100000	4700.00	348.00
SIG	1041.30	85.80	0.012	0.009000	110.00	18.27
LOU34-SIG66	6375.52	287.15	0.006	0.600000	3100.00	522.00
LOU40-SAB60	5324.67	254.66	0.009	0.300000	4500.00	348.00
SAB	48.41	11.09	0.007	1.300000	40.00	13.05

La figure 5.31 montre que l'ajustement de m et a_c donne des courbes proches des valeurs mesurées.

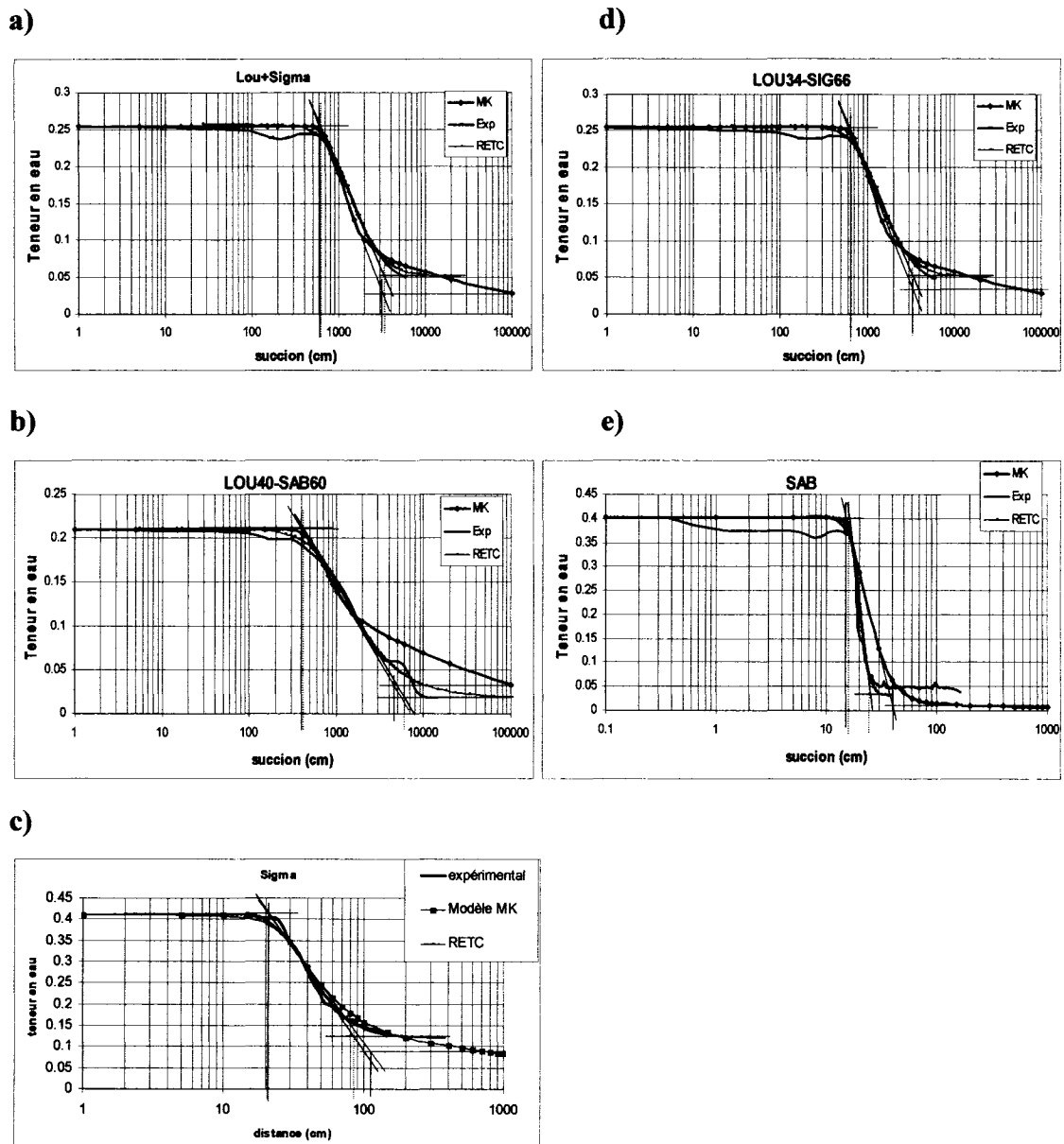


Figure 5.31 CRE expérimentales, lissées avec van Genuchten (1980) et obtenues avec MK selon des paramètres ajustés (données de Ouangrawa, 2007)

La figure 5.32 montre les valeurs du AEV et de ψ_r en fonction du pourcentage de particules grossières (sable – retenu 0.08 mm). Ces valeurs de ψ_a et ψ_r ont été obtenues par méthode graphique (méthode des tangentes) sur les CRE montrées aux figures 5.30 et 5.31. La figure 5.32 (a) montre que l'AEV mesuré semble augmenter

en fonction du pourcentage de particules grossières jusqu'à environ 40 à 50%; ensuite l'AEV baisse jusqu'à environ 70% de particules grossières, puis il reste ensuite constant (et très faible). L'augmentation de l'AEV en fonction du pourcentage de particules grossières est assez semblable à la tendance présentée au chapitre 4. Toutefois la chute subséquente de l'AEV semble plus marquée ici (par rapport au chapitre 4). D'autre part, la figure 5.32 (b) montre que la succion résiduelle ψ_r évolue de façon assez similaire au AEV. Elle augmente de 0 à 50-60% sable. Ensuite, elle chute rapidement. Cette tendance est assez similaire aux autres graphiques présentés, incluant ceux du chapitre 4.

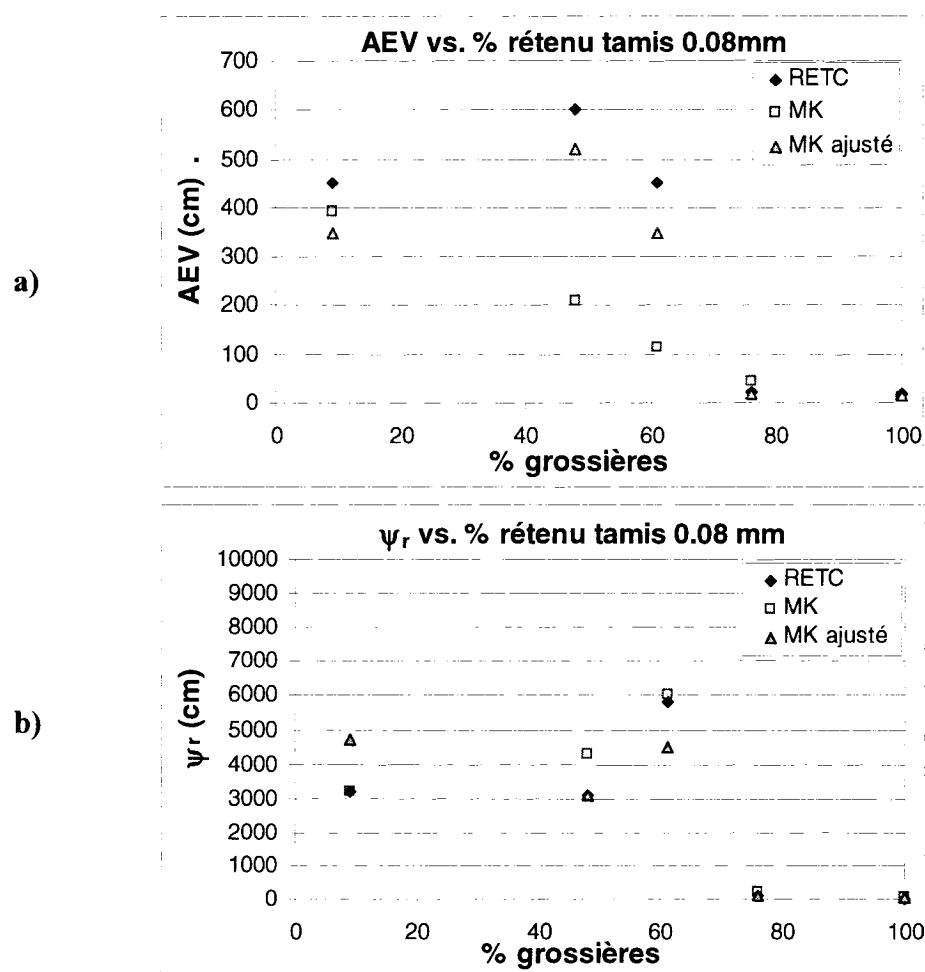


Figure 5.32 Valeurs de l'AEV (a) et de ψ_r (b) en fonction de la proportion des particules grossières (≥ 0.08 mm) (données de Ouangrawa 2007).

▫ Paramètres m et a_c ajustées

La figure 5.33 montre les valeurs du rapport (a_c ajusté/ a_c prédit) en fonction de C_U (figure 5.33 a) et C_C (figure 5.33 b). Les résultats montrent que a_c ajusté/ a_c prédit demeure assez constante (proche de 1) à l'exception du matériau SAB (le matériau le plus grossier de l'étude de Ouangrawa, 2007) et du matériau LOU-SIG (matériau à 66% des particules plus grossières).

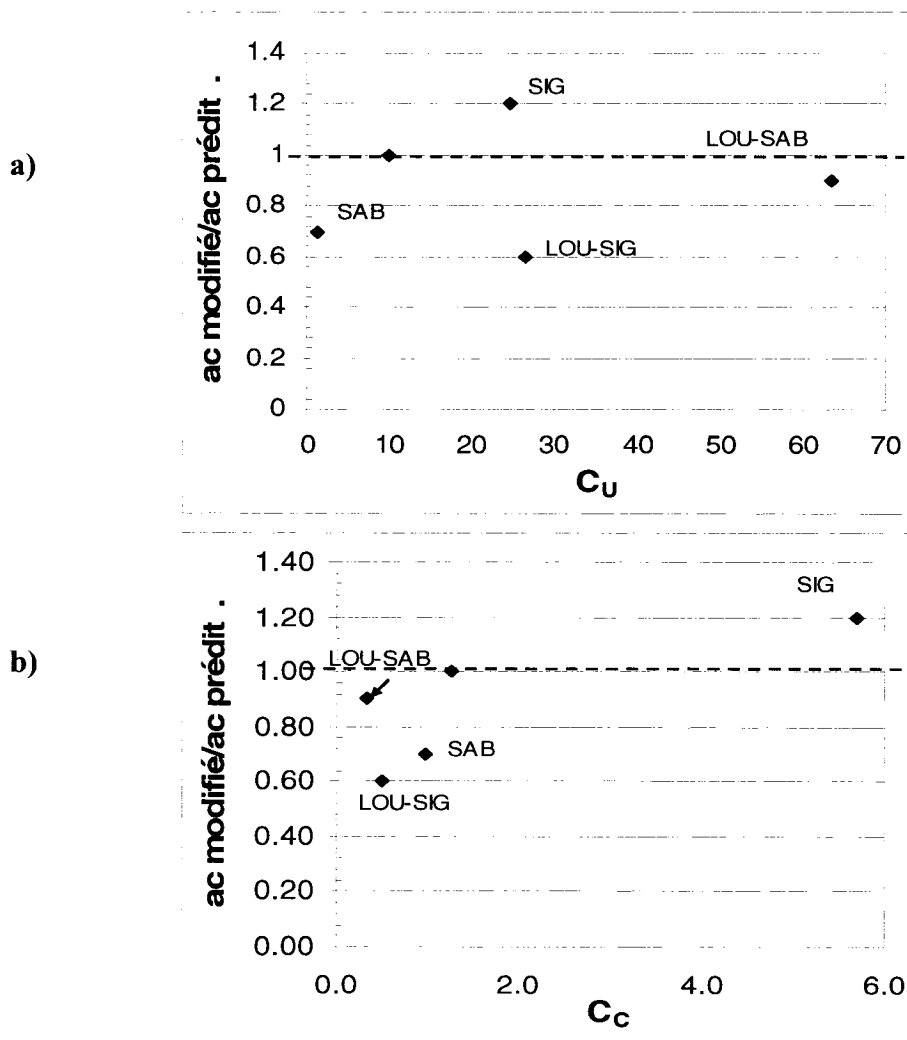


Figure 5.33 Valeurs de a_c ajusté/ a_c prédit en fonction de C_U (a) et de C_C (b).

La figure 5.34 (a) montre le lien entre le paramètre m et le coefficient d'uniformité (C_U). La figure 5.34 (b et c) montre la rapport (m ajusté/ m prédit) selon le coefficient d'uniformité (C_U) et selon le coefficient de courbure (C_C).

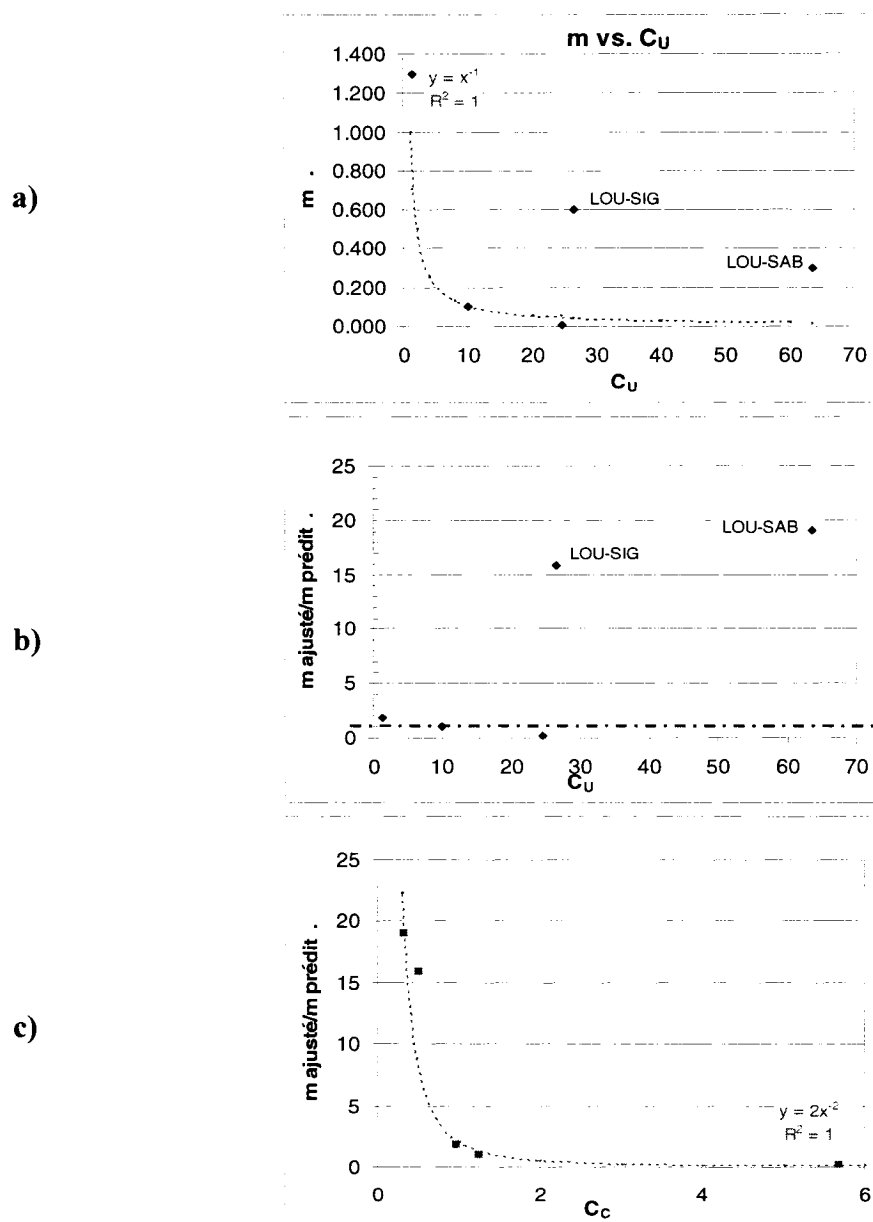


Figure 5.34 Valeurs du paramètre m ajusté en fonction du C_U (a), du rapport m ajusté/ m prédit en fonction de C_U (b) et du rapport m ajusté/ m prédit en fonction du C_C (c).

La figure 5.34 (a) montre que les résultats semblent suivre la relation $m = 1/C_U$ de MK à l'exception de LOU-SIG (48% retenu au tamis 0.08 mm) et LOU-SAB (61% retenu au tamis 0.08 mm). La figure 5.34 (b) montre que la valeur m ajusté/ m prédit est plutôt constante pour tous les mélanges, à l'exception du LOU-SIG et LOU-SAB. La figure 5.34 (c) montre que l'influence de C_C se manifeste au niveau de la valeur de m (comme pour les résultats obtenus au chapitre 4 et ceux de Milczareck et al. 2006).

5.2.5. Autres mesures sur des roches stériles.

On présente ici des résultats additionnels d'essais en laboratoire sur les roches stériles prélevées au site de la mine Laronde (LARON). Ces essais incluent des matériaux avec différents diamètres maximaux. L'analyse se fait selon le pourcentage retenu sur le tamis 5 mm. Les essais ont été réalisés dans des colonnes de 95 cm de hauteur et 30 cm de diamètre (selon le protocole décrit au chapitre 3). Le tableau 5.11 identifie les matériaux testés.

Tableau 5.11 Identification des matériaux (Roches stériles à granulométrie tronquée).

Nom du matériau	Description
LARON-ORG	Matériau original (passant 200 mm)
LARON-56	Matériau passant le tamis 56 mm
LARON-28	Matériau passant le tamis 28 mm
LARON-20	Matériau passant le tamis 20 mm
LARON-5	Matériau passant le tamis 5 mm

▪ Caractéristiques de base des matériaux

▪ Granulométrie

La figure 5.35 montre les courbes granulométriques des matériaux étudiées. Le rejet LARON-ORG est le matériau de référence; la granulométrie du matériau original a servi à préparer les autres après le tamisage. Aucun essai en colonne n'a été réalisé sur ce rejet à cause de la taille maximale de ses particules (qui est trop grande).

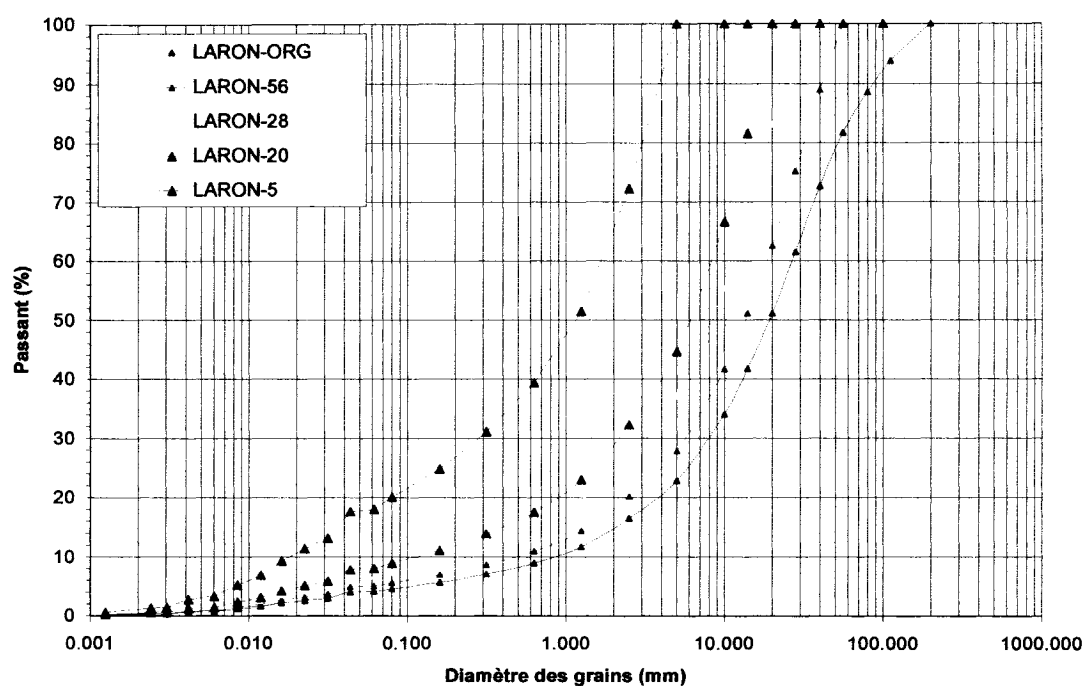


Figure 5.35 Granulométrie des matériaux servant à l'étude sur la roche stérile.

Ces essais de laboratoire visent à analyser l'évolution des caractéristiques hydrogéologiques des stériles selon la taille maximale des particules (et selon le pourcentage de particules retenues au 5 mm). Tous les matériaux étudiés venaient d'une même source et ont été tamisés selon un diamètre maximum. Le numéro à la fin du nom de chaque matériau représente la grandeur correspondant à 100% passant (en mm). On voit sur la figure 5.35 que toutes les courbes granulométriques sont continues avec une assez longue queue de particules fines.

▫ Indice des vides

La figure 5.36 montre la valeur de l'indice des vides selon le pourcentage retenu sur le tamis 5 mm (à l'exception du matériau LARON-ORG). Notons ici que la même énergie de mise en place a été utilisée pour chaque matériau.

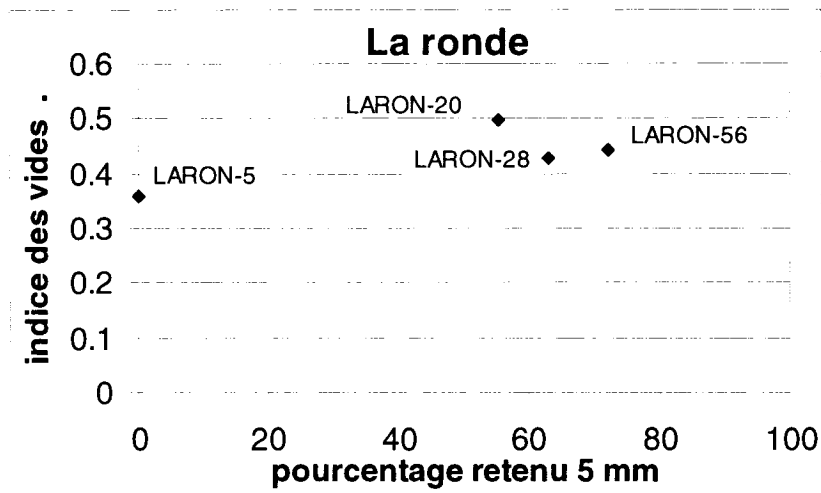


Figure 5.36 Indice des vides en fonction du pourcentage retenu au tamis 5 mm.

La figure 5.36 montre que l'indice des vides augmente un peu de 0% à environ 50% retenu au tamis 5 mm. Ensuite, l'indice des vides diminue jusqu'à environ 60%, puis il augmente un peu (ou même reste constant). Cette tendance semble assez différente des résultats présentés auparavant, qui montrent typiquement une diminution de l'indice des vides entre 0% et 50% (retenu au tamis 5 mm) suivi d'une certaine augmentation. Ici toutefois, il n'y a pas de données entre 0 et 50% de sorte que la tendance ne peut pas être vérifiée.

▫ Surface Spécifique

La figure 5.37 montre les valeurs de la surface spécifique obtenues avec les modèles KC, KCM, et MK. Le tableau 5.12 donne les valeurs de S_s obtenues selon ces

modèles. On constate que les valeurs selon KC sont en général plus grandes que celles selon KCM ou MK, sauf pour le matériau LARON-5.

Tableau 5.12 Valeurs de S_s obtenus selon KC, KCM et MK pour le rejet de LaRonde

Identification	Surface Spécifique (S_s) Kozeny-Carman (KC) Eqn. 2.27 (m^2/kg)	Surface Spécifique (S_s) Kozeny-Carman Modifié (KCM) Eqn. 2.29 (m^2/kg)	Surface Spécifique (S_s) Kovac's Modifié (MK) Eqn. 2.31 (m^2/kg)
LARON-ORG	16.123	2.45	1.579
LARON-5	44.873	96.17	62.035
LARON-56	19.721	3.88	2.497
LARON-28	21.129	8.34	5.359
LARON-20	31.511	15.61	10.036

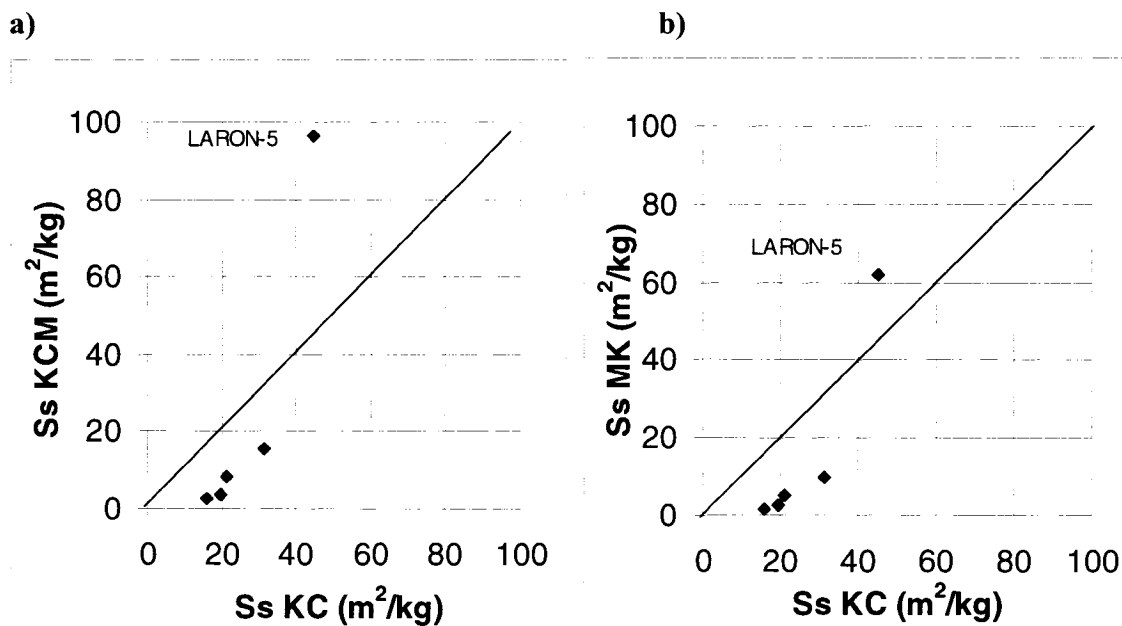


Figure 5.37 Surface spécifique selon les modèles KC et KCM (a) et KC et MK (b) pour la roche stérile.

La figure 5.37 (a et b) montre qu'à l'exception d'un seul point, qui représente le matériau LARON-5, les valeurs de S_s suivent une droite (dans les plans KCM-KC et MK-KC). Les valeurs de S_s selon KCM et MK sont ici plus faibles que celles

obtenues avec KC. Ces résultats sont très semblables au groupe 2 de l'étude du chapitre 4. Les différences peuvent être dues au fait que KC utilise la granulométrie fine complète (sédimentométrie) pour calculer S_s tandis que les modèles KCM et MK utilisent le D_{10} (10% retenu de la granulométrie) et le D_{60} . Ces matériaux comprennent une longue queue des particules fines qui pourrait expliquer la différence entre les résultats.

▫ Conductivité hydraulique saturée

Le tableau 5.13 montre les valeurs de k_{sat} mesurées (à charge constante ou variable et la moyenne entre les deux) et obtenues avec les modèles KC et KCM.

Tableau 5.13 Valeurs de k_{sat} selon les modèles KC, KCM et mesurées au laboratoire (essais sur stériles de Laronde).

Identification du sol	k_{sat} variable (cm/sec)	k_{sat} constante (cm/sec)	k_{sat} moyenne* (cm/sec)	k_{sat} KC (cm/sec)	k_{sat} KCM (cm/sec)
LARON-ORG	--	--	--	--	--
LARON-5	6.16E-05	--	6.16E-05	4.14E-04	5.85E-05
LARON-56	4.05E-04	1.90E-03	1.15E-03	3.55E-04	1.64E-03
LARON-28	2.17E-02	2.82E-01	1.52E-01	3.01E-03	1.78E-02
LARON-20	1.73E-04	3.09E-02	1.55E-02	2.00E-03	1.00E-02

La figure 5.38 montre la relation entre la conductivité hydraulique mesurée à charge constante et à charge variable et la valeur de la conductivité hydraulique prédite avec les modèles KC et KCM. Notons ici que ces essais de conductivité hydraulique au laboratoire ont été particulièrement difficiles à faire à cause du grand étalement de la taille des grains. Des écoulements préférentiels et la ségrégation dans le matériau ont été observés pendant les essais.

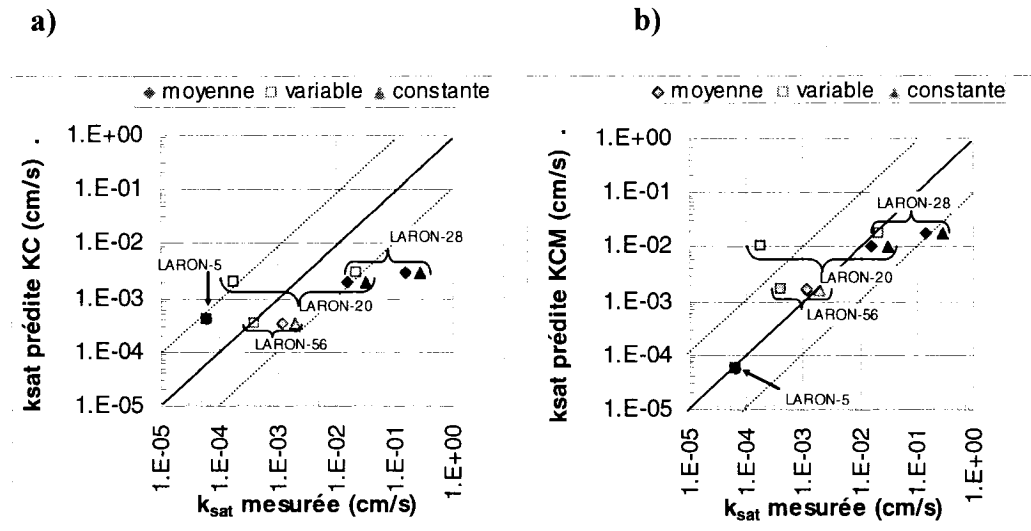


Figure 5.38 Valeurs de k_{sat} prédites par KC (a) et KCM (b) en fonction de k_{sat} mesurée (charge constante et variable) pour l'étude sur la roche stérile.

La figure 5.38 montre les résultats des essais effectuées sur les 4 matériaux : LARON-5, LARON-20, LARON-28, LARON-58. Les points définis par un triangle représentent les essais à charge constante, le carré correspond aux essais à charge variable et les losanges représentent la moyenne entre les deux. La couleur rose représente les valeurs de LARON-28, la couleur verte représente LARON-20, le violet LARON-56 et le bleu LARON-5. La valeur mesurée est usuellement à moins d'un ordre de grandeur selon KC et KCM. Certains résultats expérimentaux sont toutefois à plus d'un ordre de grandeur de différence des valeurs obtenues des modèles KC et KCM. Ces écarts observés pourraient être dû au fait que l'indice des vides est assez variable à l'intérieur des matériaux. Dans ce cas, la procédure d'essai n'est peut-être pas totalement adaptée pour obtenir la conductivité hydraulique de la roche stérile. Notons aussi que les grosses particules peuvent engendrer (comme observé) des écoulements préférentiels et de la ségrégation dans les colonnes.

- Valeur de k_{sat} en fonction du retenu au tamis 5 mm.

La figure 5.39 montre les valeurs de la conductivité hydraulique mesurées et prédites en fonction du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm pour chaque matériau. La tendance observée ici semble assez différente de celle des études présentées plus haut. Toutefois, il faut noter que cette étude n'inclut qu'un seul matériau avec moins de 50 % retenus 5 mm.

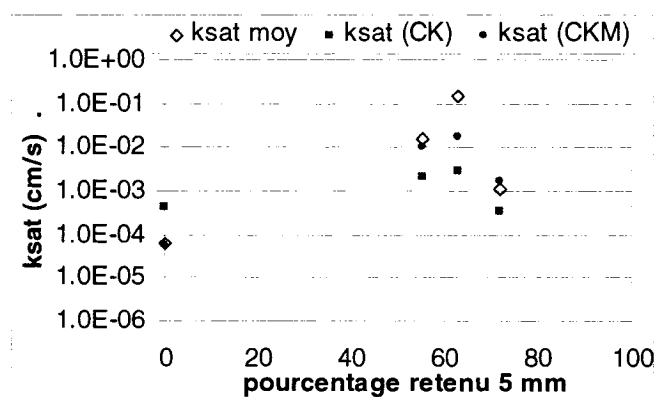


Figure 5.39 Valeurs de k_{sat} mesurées et prédites en fonction du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm pour l'étude sur la roche stérile.

- Courbes de rétention d'eau

Trois matériaux ont été testés pour obtenir leur courbe de rétention d'eau, soient LARON-56, LARON-28 et LARON-26. La figure 5.39 montre les CRE expérimentales, lissées selon van Genuchten (1980) avec RETC et celles prédites par le modèle MK. Le tableau 5.14 montre les valeurs des paramètres des courbes de rétention d'eau correspondantes.

Tableau 5.14 Valeurs des paramètres des CRE déterminées selon le modèle de van Genuchten (1980 - courbes lissée avec les modèles de RETC) (a) et pour le modèle de prédiction MK initial et ajusté (méthode graphique des tangentes)

a)

Identification	AEV lissage van Genuchten RETC ($\psi_a = 1/\alpha$) (cm)	AEV van Genuchten RETC/graphique (ψ_a) (cm)	Succion residuelle Lissage Van Genuchten RETC/graphique (ψ_r) (%)	Paramètre n_v Lissage Van Genuchten RETC (--)
LARON-56	14.63	11	18	16.58
LARON-28	19.21	12	39	3.92
LARON-20	12.68	8	28	3.14

b)

Identification	Succion Résiduelle MK graphique (ψ_r) (cm)	Succion Résiduelle MK ajusté graphique (ψ_r) (cm)	AEV MK graphique (ψ_a) (cm)	AEV MK Ajusté graphique (ψ_a) (cm)	Paramètre m MK selon équation 2.21 (--)	Paramètre m Ajusté (--)	Paramètre ac MK selon équation 2.22 (--)	Paramètre ac Ajusté (--)
LARON-56	5.50	28	0.90	10	0.028	0.45	0.010	0.030
LARON-28	9.10	39	2.10	12	0.020	0.70	0.010	0.070
LARON-20	12.00	25	2.90	8	0.013	0.06	0.010	0.030

La figure 5.40 montre que l'AEV et le ψ_r (et θ_r) de la CRE prédite selon MK sont plus petits que ceux des courbes expérimentales lissées avec le modèle de van Genuchten (1980). Cette différence est peut-être liée à la nature de l'essai en colonne qui ne permet pas toujours un drainage complet (à l'équilibre) du matériau. Dans ces essais, la teneur en eau volumique mesurée en haut de la colonne n'est pas nécessairement représentative de la teneur en eau résiduelle à cause du temps de drainage requis pour atteindre l'état hydrostatique. De plus, il est difficile de déterminer précisément θ dans le bas de la colonne, ce qui fait que la valeur de ψ_a est difficile à estimer. Néanmoins, les résultats montrés ici sont assez similaires à ceux de l'étude présentée du chapitre 4 (surtout pour le groupe 2).

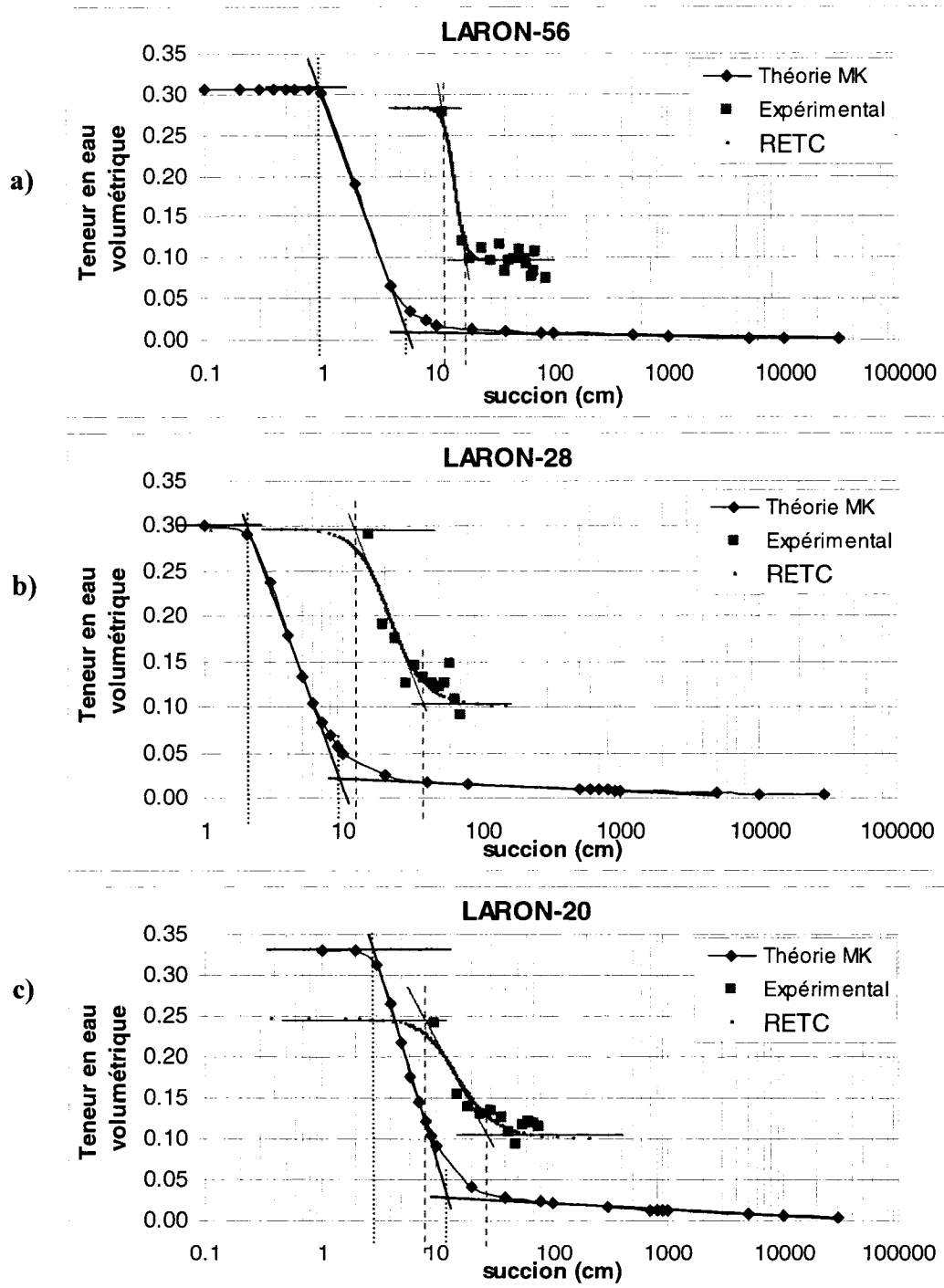


Figure 5.40 CRE expérimentales, lissées (van Genuchten, 1980) selon RETC et prédites selon MK pour les matériaux LARON-56 (a), LARON-28 (b) et LARON-20 (c).

La figure 5.41 montre les CRE avec le modèle MK pour des paramètres ajustés. En ajustant les paramètres m et a_c , on peut obtenir des courbes assez semblables à celles obtenues expérimentalement. Pourtant, même si les CRE sont semblables, la valeur de la teneur en eau résiduelle demeure souvent plus petite pour les résultats obtenus avec MK ajusté.

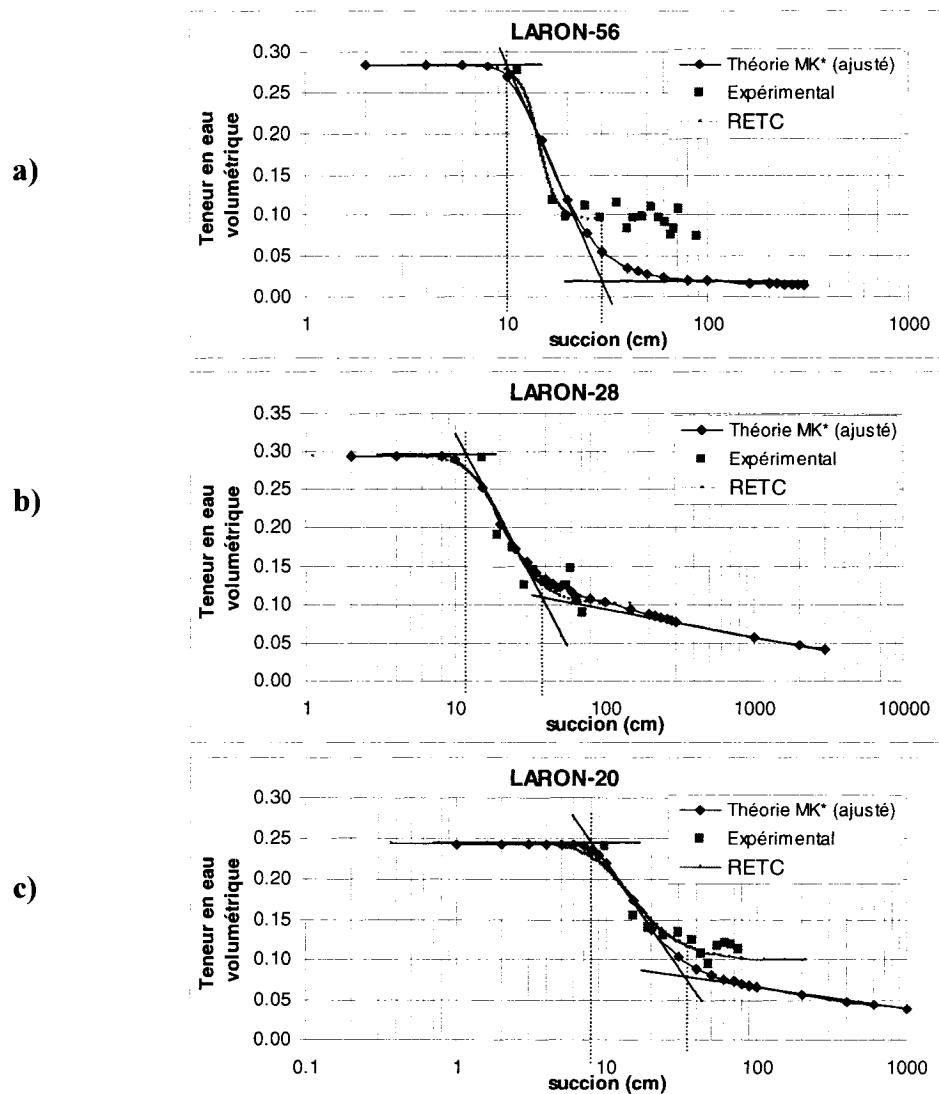


Figure 5.41 CRE obtenues avec MK ajusté (paramètres m et a_c), et valeurs expérimentales et lissées selon van Genuchten (1980 selon RETC) pour les matériaux LARON-56 (a), LARON-28 (b) et LARON-20 (c).

- AEV et ψ_r en fonction du pourcentage retenu sur le tamis 5 mm

La figure 5.42 montre les valeurs de l'AEV (ψ_a) et de la succion résiduelle (ψ_r) en fonction du pourcentage retenu 5 mm. Le AEV est obtenu par méthode graphique (intersection des tangentes) avec les CRE expérimentales lissées selon van Genuchten (1980) selon RETC, et les CRE prédites par MK et obtenues selon MK ajustée.

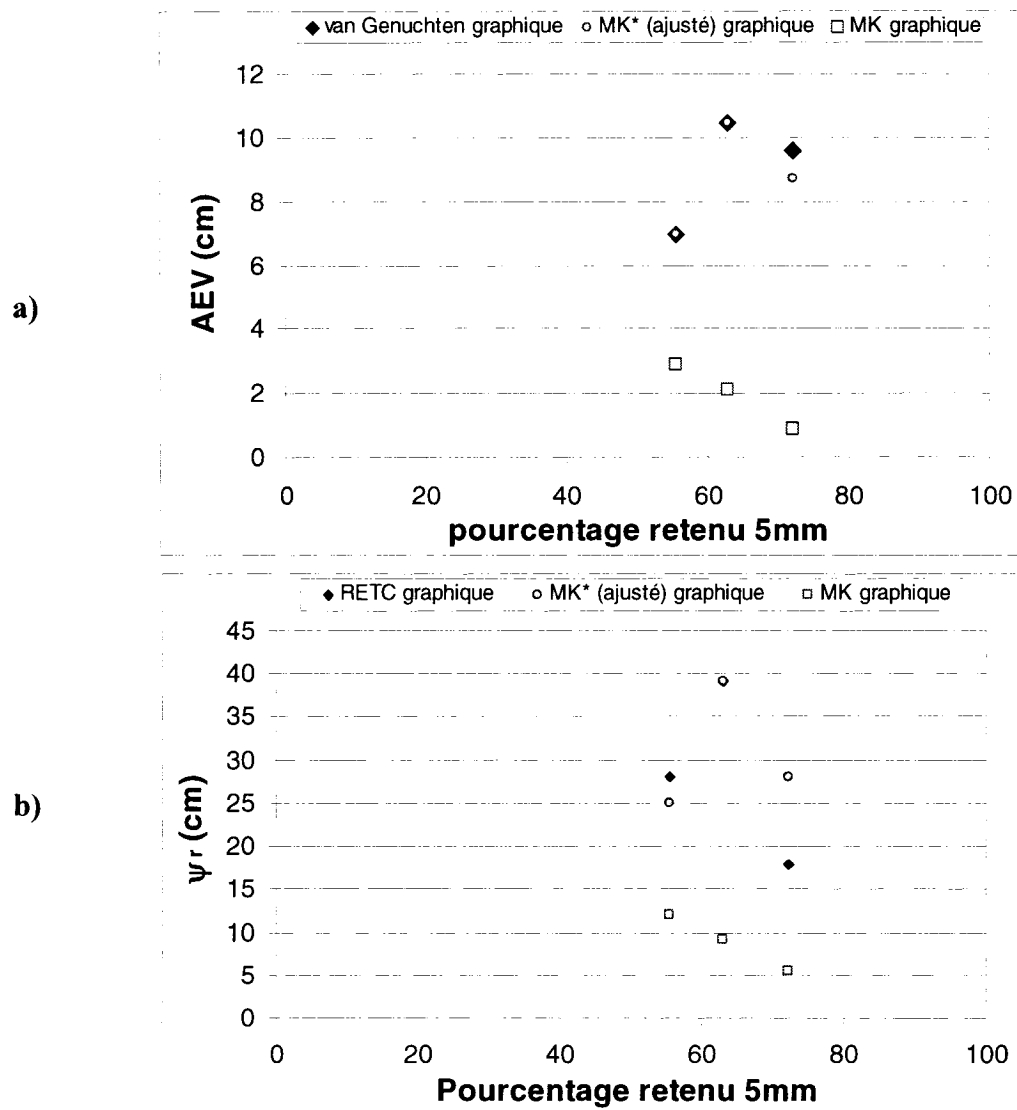


Figure 5.42 Relation entre l'AEV (a) et ψ_r (b) et le pourcentage retenu sur le tamis 5 mm pour les roches stériles

La figure 5.42 (a) montre que le ψ_a (AEV) expérimental varie peu entre 50 et 70% retenu sur le tamis 5 mm. Elle montre aussi que les valeurs d'AEV obtenues par le modèle de prédiction MK sont plus petites que celles obtenues expérimentalement. Lorsque le modèle est ajusté, les valeurs selon RETC et MK ajustée sont assez semblables.

La figure 5.42 (b) montre que la succion résiduelle augmente entre 50 et 60% pourcentage retenu sur le tamis 5 mm, ensuite elle diminue. Avec MK ajusté, les valeurs de ψ_r varient peu. Rappelons ici que la succion résiduelle obtenue avec les essais en colonnes n'est pas nécessairement représentative à cause du temps de drainage trop limité.

▫ Paramètres ajustés en fonction de C_C et C_U

La figure 5.43 montre le lien entre le paramètre m initial et ajusté (de MK) et les valeurs de C_C et C_U . Les résultats semblent montrer ici qu'il n'existe pas une relation définie entre m et C_U ou entre m et C_C .

À la figure 5.43, on voit que la valeur de a_c ajustée passe de 0.01 à 0.03 pour les matériaux de Laronde. Les rapports a_c ajusté/ a_c prédit sont autour de 3 à l'exception du sol LARON-28.

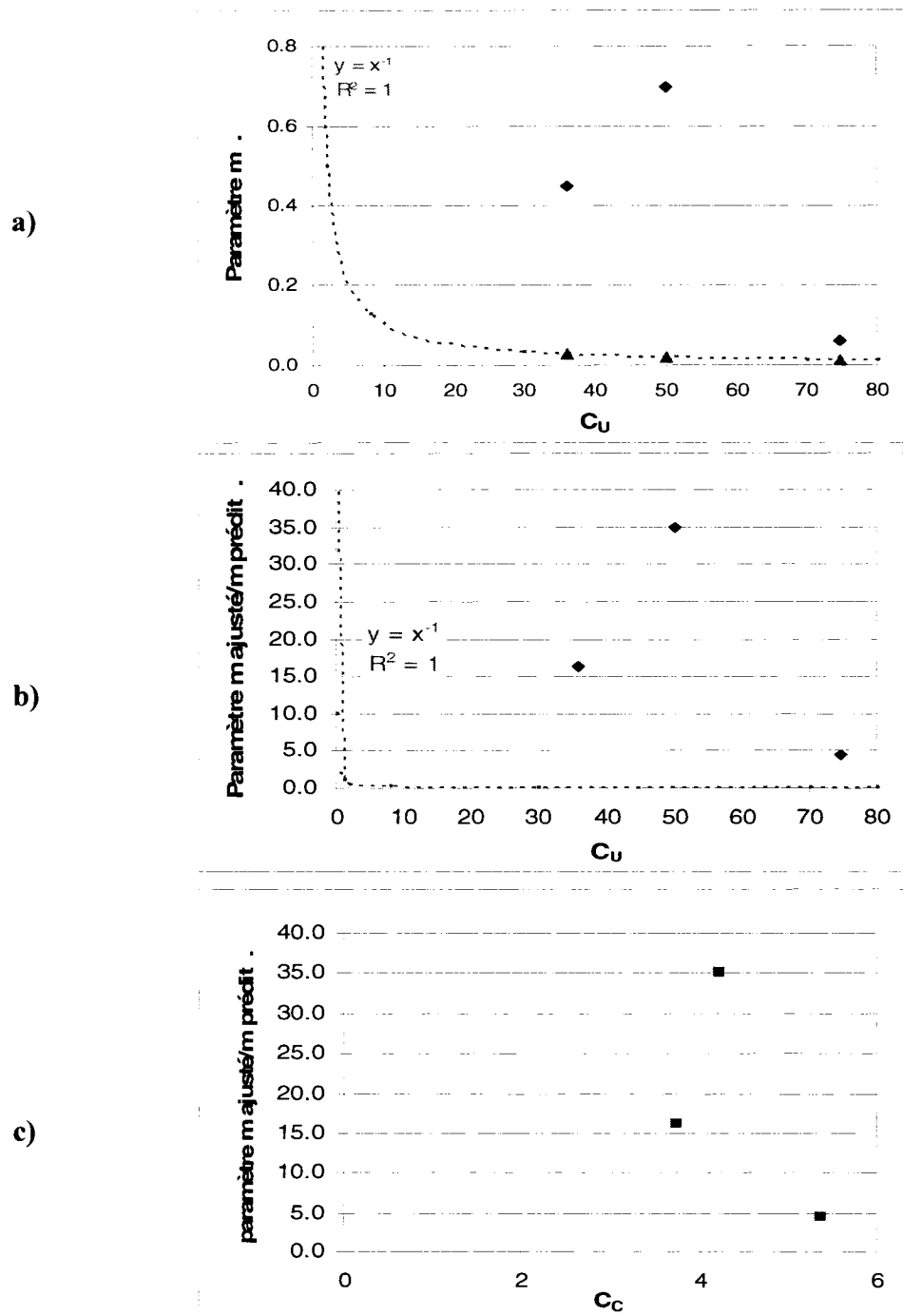


Figure 5.43 Valeurs du paramètre m en fonction de C_u (a); m ajusté/ m prédit en fonction de C_u (b); m ajusté/ m prédit en fonction de C_c (c) pour la de roche stérile.

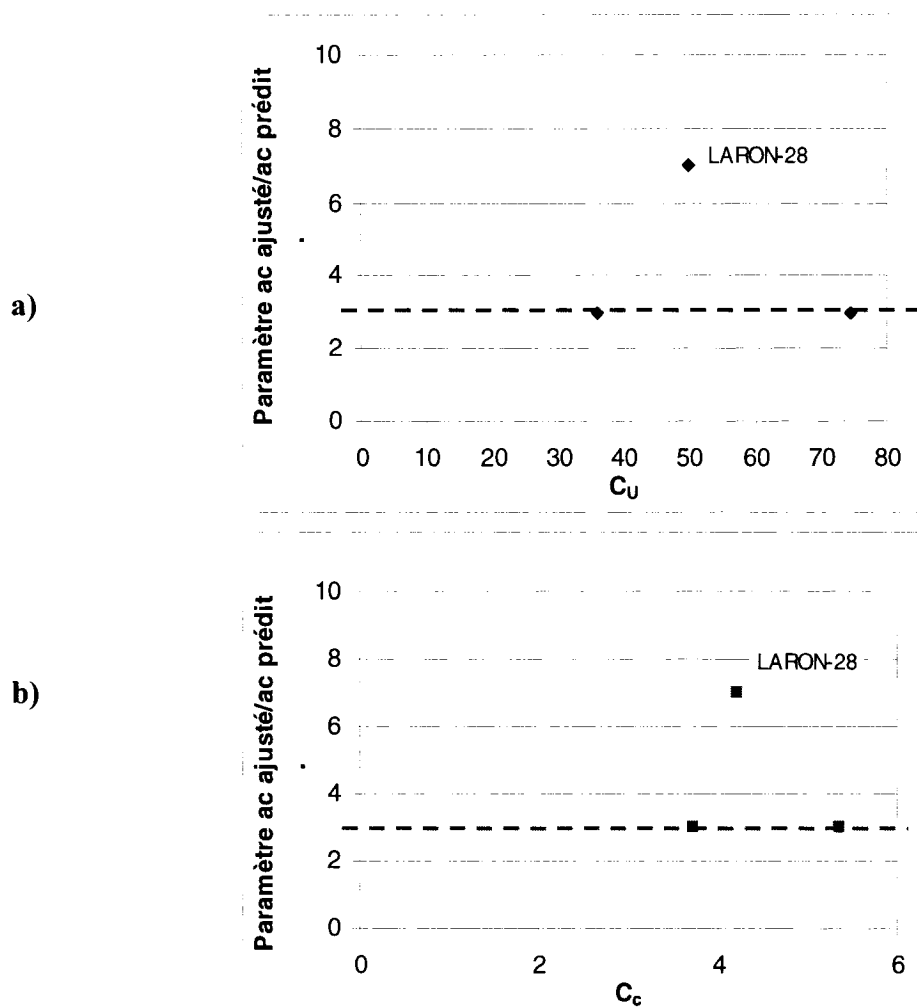


Figure 5.44 Valeurs du paramètre a_c ajusté/ a_c prédit en fonction du C_U (a) et C_c (b) pour la roche stérile.

5.3. Sommaire des résultats et remarques complémentaires

On présente ici une vue d'ensemble des principaux résultats et des tendances qui en découlent relativement au comportement hydrogéologiques de matériaux granulaires comprenant des proportions variables de matériaux grossiers (sable ou gravier).

5.3.1. Caractéristiques physiques des matériaux

▪ *Granulométrie*

Les mélanges composés de deux matériaux très différents peuvent montrer des courbes discontinues (avec un plateau située souvent proche du pourcentage du matériau grossier ajouté). Ceci est usuellement dû au fait qu'il existe une grande différence entre les tailles maximales et minimales des grains des deux matériaux (Holtz et Kovacs, 1991; Wickland et al. 2006). La granulométrie du mélange affecte la surface spécifique du matériau (tel qu'évaluée selon 3 méthodes) et l'indice des vides. Ce plateau est aussi connu pour être une cause de ségrégation et d'érosion interne sous écoulement et/ou vibration (Contant, 1993).

▪ *Indice des vides*

En général, l'indice des vides diminue avec l'ajout de particules grossières jusqu'à un indice de vides minimal $e_{\min}$. Ensuite, l'indice des vides augmente avec le pourcentage de matériau grossier. L'indice des vides minimal est atteint à diverses proportions du mélange. Au chapitre 4, on a obtenu un pourcentage de l'ordre de 50 à 60 % de particules plus grossières pour $e_{\min}$. Les résultats de Ouangrawa (2007) montrent aussi un $e_{\min}$ à environ 60% de particules grossières. Milczarek et al. (2006) ont plutôt obtenu un pourcentage de 50% pour $e_{\min}$ (tout comme l'étude de Eignenbrod, 2004). Selon les données de Wickland et al. (2005), le pourcentage des particules grossières pour obtenir un indice des vides minimal serait de l'ordre de 70%. L'indice des vides minimal serait donc atteint à des proportions variables de matériaux grossiers, selon la méthode du mélange et sa compaction.

▪ *Surface spécifique*

Dans cette étude, la surface spécifique n'a pas été mesurée directement. Elle a plutôt été estimée selon diverses approches basées sur la courbe granulométrique. Les méthodes de calcul de la S_s sont tirées des modèles KC, KCM et MK présentées dans le mémoire (au chapitre 2). En général, pour nos mélanges, on observe que le modèle

MK donne des valeurs de S_s assez similaires à celles de KC, alors que le modèle KCM usuellement donne des valeurs un peu plus grandes que KC. Ces tendances ne sont toutefois pas toujours observées, notamment pour les solides du groupe 2 de l'étude (chapitre 4) et les données des stériles de Laronde (chapitre 5). On note aussi que des divergences ont été observées quand le matériau montre une longue queue de particules fines (diamètre inférieure au D_{10}) sur la courbe granulométrique. Dans ce cas, le modèle KC donne usuellement des valeurs de S_s plus grandes en comparaison des deux autres modèles.

5.3.2. Conductivité hydraulique

▪ *Valeurs mesurées et prédites*

En général, les prédictions obtenues avec les modèles KC et KCM sont assez proches (à moins d'un ordre de grandeur près) des valeurs de k_{sat} mesurées. Des exceptions ont toutefois été observées. Elles peuvent être causées par :

- L'absence de données sur la sédimentométrie qui réduit l'influence des particules fines (cas de l'étude de Milczarek et al. 2006).
- Des particules fines pas assez abondantes pour remplir les vides dans le mélange; ceci peut causer des chemins préférentiels d'écoulement au moment de la mesure de la conductivité hydraulique (c'est le cas du sol SD20-G80 et GMP₃ dans notre étude); cela peut aussi engendrer la migration des particules fines.

On note aussi que les matériaux granulaires très grossiers causent plus de problèmes au niveau de la mesure de la conductivité hydraulique. Ce sont des matériaux qui montrent une différence très marquée entre le diamètre maximal des particules grossiers et le diamètre minimal.

▪ *Effet du pourcentage de particules grossières*

En général, nous avons pris ici le retenu 5 mm comme point de référence pour identifier le pourcentage des particules grossières. Toutefois, pour l'étude des données de Ouangrawa (2007), nous avons plutôt utilisé comme référence le retenu au tamis 0.08 mm (pourcentage des particules sableuses ajoutées à un silt).

Typiquement, on observe que k_{sat} diminue légèrement avec l'ajout de particules grossières jusqu'à k_{min} , avant de remonter. Pour l'étude présentée au chapitre 4 et pour les données de Ouangrawa (2007), le pourcentage de particules grossières pour k_{min} se situe entre 50 à 60%. La tendance de k pour ces deux études sont semblables aux tendances entre l'indice des vides et le pourcentage des particules grossières.

Pour les données de Milczarek et al. (2006), k_{min} survient à un pourcentage d'environ 30% de particules grossières. Les stériles de mine Laronde montrent des résultats surprenants puisque la conductivité hydraulique semble diminuer entre 50 à 80% gravier.

On a aussi noté que le pourcentage des particules grossières correspondant à k_{min} est souvent proche du pourcentage correspondant à e_{min} , mais il existe des exceptions. Par exemple :

- Pour les données de Milczarek et al (2006), le e_{min} se trouve autour de 70% gravier tandis que le k_{min} semble proche de 30% gravier.
- Les données de Wickland et al. (2006) sur le mélange de roches stériles et de rejets du concentrateur n'ont pas montré de diminution de k_{sat} . Ici, la valeur de k_{sat} augmente en fonction du pourcentage des particules grossières. Toutefois il faut dire que les proportions étudiées ne concordent pas avec la plage usuellement associée à k_{min} .
- L'étude sur la roche stérile de Laronde montre aussi que la conductivité hydraulique augmente en fonction du pourcentage des particules retenues au tamis 5 mm, jusqu'à environ 70 %. Ensuite, k_{sat} semble diminuer (ce qui

apparaît anormal et ce résultat devrait être confirmé par d'autres mesures). Ici, le $e_{\min}$ se trouve autour du 70% gravier.

5.3.3. Courbes de rétention d'eau

▪ *Lectures au TDR*

Au chapitre 4, on a vu que les lectures avec l'appareil TDR (Annexe 3) donnent des valeurs de θ similaires à celles de la méthode des masses jusqu'à un pourcentage d'environ 20% de particules grossières. Au-delà de cette proportion, les lectures au TDR donnent des valeurs peu fiables. Ceci est dû en partie à la difficulté d'insérer les fourchettes dans un matériau avec des particules grossières, ce qui entraîne des vides et une accumulation d'eau dans certains cas. D'autre part, l'accumulation d'eau notée au bas de la colonne au démontage engendre souvent une valeur de teneur en eau (θ) trop grande (quelques fois plus grande que la porosité), tant pour les mesures au TDR que pour les mesures massiques.

Pour les futurs essais on pourrait monter les colonnes avec les fourchettes TDR en place (lors du montage) pour pouvoir évaluer la teneur en eau plus facilement. L'eau qui s'accumule en trop au bas des colonnes devrait être enlevée (époncée) et ajoutée à la teneur en eau de la couche supérieure.

▪ *Mesures des CRE et lissage avec le modèle de van Genuchten (1980)*

Deux méthodes ont été utilisées dans notre étude pour le lissage avec le modèle van Genuchten (1980), soit le logiciel RETC (van Genuchten et al. 1991) et la feuille de calcul développée par Mbonimpa (voir description aux tableaux 4.5 et 4.6). Les deux approches donnent des résultats presque identiques dans la plupart des cas, sauf lorsque les données expérimentales sont incomplètes pour la plage envisagée.

- *AEV et ψ_r en fonction du pourcentage particules grossières*

La variation de l'AEV et de ψ_r en fonction du pourcentage des particules grossières varie selon le matériau. En général, les tendances montrent que l'AEV et la succion résiduelle augmentent jusqu'à un certain pourcentage de gravier, mais ce pourcentage varie selon le matériau. Par exemple, pour l'étude présentée au chapitre 3 et celle de Ouangrawa (2007), l'AEV maximum est obtenu à un pourcentage entre 50% et 60% de particules grossières, tandis que pour l'étude de Milczarek et al. (2006). Ce pourcentage est de 30%. Au delà, l'AEV (et ψ_r) diminue (dans certains cas très abruptement) avec l'augmentation du pourcentage de gravier.

- *Prédictions avec le modèle MK*

Le modèle MK donne des CRE assez proches des données expérimentales pour les sols relativement fins (i.e. silts et sable). Toutefois, plus le pourcentage des particules grossières augmente, plus la CRE prédite tend à dévier de la CRE expérimentale obtenue lors des essais en colonne. L'AEV et le ψ_r prédits sont en général, plus petits que ceux déterminés expérimentalement. Néanmoins, on note que les écarts sont souvent assez petits (quelques cm d'eau) de sorte que la précision de la mesure et le protocole expérimental pouvait aussi être mis en cause.

- *CRE avec MK ajusté*

Les paramètres utilisés pour ajuster la CRE avec le modèle MK sont m et a_c qui sont modifiés pour mieux lisser les courbes. Avec l'ajustement de ces deux paramètres, la CRE selon MK représente généralement bien la CRE expérimentale. Cependant, même avec l'ajustement, les valeurs de la succion résiduelle diffèrent souvent de celle déduite expérimentalement. Ceci pourrait être dû à des valeurs expérimentales de ψ_r (les essais en colonnes) qui ne sont pas totalement représentatives à cause du temps de drainage limité.

CHAPITRE 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'industrie minière contribue de façon importante à l'activité économique du Québec. Son développement est important, non seulement pour des raisons économiques mais aussi pour éviter que ses activités ne perturbent l'environnement. Comme déjà mentionné dans l'introduction, la gestion des rejets miniers est une problématique complexe. Les rejets miniers étudiés dans ce document sont les roches stériles déposées dans des haldes. Si ces rejets contiennent des minéraux sulfureux ils peuvent générer du drainage miner acide (DMA) lorsqu'en contact avec de l'air et de l'eau. Le drainage minier acide est une problématique actuelle qui peut engendrer des répercussions négatives pour la flore et la faune. Pour comprendre et contrôler la formation de DMA dans les haldes, il faut pouvoir caractériser le mouvement de l'eau, qui dépend des propriétés hydriques des matériaux.

L'objectif de l'étude présentée dans ce document est de développer une approche permettant d'évaluer le comportement hydrogéologique de roches stériles et de matériaux analogues, en se basant sur les valeurs mesurées de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et sur la courbe de rétention d'eau (CRE). L'évaluation a été réalisée sur divers matériaux granulaires incluant différents mélanges entre un sable et un gravier à différents pourcentages (à 20%, 40%, 60% et 80% gravier) et sur des roches stériles.

Les valeurs de la conductivité hydraulique obtenue au laboratoire par des essais à charge variable et à charge constante, sont comparées aux modèles prédictifs de Kozeny-Carman (KC; Chapuis et Aubertin, 2003) et de Kozeny-Carman Modifié (KCM; Mbonimpa et al. 2002). Les résultats de la mesure de la courbe de rétention d'eau (CRE) obtenus par la méthode massique lors d'essais en colonnes sont comparés avec les CRE prédites par le modèle de Kovács Modifié (MK; Aubertin et al. 2003). En plus des résultats expérimentaux obtenus par l'auteure, cette étude inclut aussi des résultats tirés de la littérature.

Les essais au laboratoire ont débuté par une caractérisation des propriétés de base du matériau (courbes granulométriques, densité relative des grains et indice des vides) On a aussi réalisé une série d'essais en colonne qui comprenaient la mesure de la conductivité hydraulique saturée, suivie d'une phase de drainage libre pour évaluer la courbe de rétention d'eau. Ces résultats ont été comparés aux modèles prédictifs précités. De façon globale, les modèles prédictifs représentent assez bien les résultats observés expérimentalement, bien que certaines exceptions aient été observées. C'est notamment le cas lorsque les courbes granulométriques montrent un étalement marqué des particules de faible diamètre (i.e. une longue queue dans la partie fine sur la courbe). Les modèles prédictifs sont également moins représentatifs pour les matériaux très grossiers.

Les principaux résultats obtenus montrent aussi, qu'en général, il semble avoir une relation entre l'indice des vides (e) et la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}). Ces deux valeurs montrent une évolution similaire en fonction du pourcentage gravier.

Habituellement, les valeurs de e et de k_{sat} baissent en fonction de la proportion de matériaux grossiers (gravier ou sable, selon le cas) jusqu'à un pourcentage limite (entre 30 et 60% typiquement), puis les valeurs de e et de k_{sat} augmentent lorsque la proportion s'approche de 100%. Une tendance inverse est observée pour les paramètres de la CRE : le AEV et le ψ_r varient inversement de la tendance observée pour la conductivité hydraulique. La valeur du coefficient d'uniformité C_U semble aussi affecter la CRE (surtout pour les sols entre 40 et 60% gravier).

L'analyse des divers résultats obtenus expérimentalement dans cette étude, et les données de la littérature n'ont cependant pas permis d'identifier les modifications requises pour améliorer les prédictions des modèles considérés ici. Ceci est dû, en partie, à l'incertitude qui existe sur la qualité de certaines données expérimentales, en raison de la nature même des matériaux (souvent instables) ou de la procédure expérimentale utilisée (qui ne permet pas d'atteindre un état résiduel complet par exemple) »

En qui concernent les recommandations pour des études futures, il serait utile d'ajuster les procédures pour mener les essais en colonnes (par rapport au protocole présenté au chapitre 2). Par exemple, pour les futurs essais on pourrait monter les colonnes avec les fourchettes TDR mis en place en même temps que les sols pour mesurer la condition d'équilibre. Des tensiomètres seraient aussi utiles pour évaluer la succion à diverses élévations. Lorsque les colonnes sont démontées, il faudrait enlever et peser l'eau qui surnage pour avoir une idée du surplus d'eau dans le bas de la colonne; cette quantité d'eau devrait s'ajouter à la couche supérieure.

Il faudra aussi faire les analyses granulométriques au long de la colonne lors du démontage et/ou essais de traceur (pour mesurer la ségrégation) et instrumenter la colonne pour mieux définir la condition résiduelle et faire des essais au temps cell.

Des essais en colonne sur des mélanges avec des pourcentages de gravier qui divergent des modèles prédictifs (40 %, 50% et 60% gravier) devraient être menés à nouveau afin d'analyser plus en détail leurs caractéristiques. A cet égard, des essais de traceur (avec du sel par exemple) permettraient d'évaluer la contribution des écoulements préférentiels. Un suivi de la granulométrie des matériaux permettrait d'autre part d'évaluer la migration des particules fines dans le milieu. Il s'agit d'un phénomène qui peut s'avérer important dans le cas des matériaux grossiers.

Il serait utile de mesurer la surface spécifique au laboratoire pour mieux la corrélérer avec les modèles de prédiction et avec les résultats expérimentaux. Aussi, compléter les analyses sur l'influence des particules fines sur les caractéristiques hydriques des matériaux grossiers.

Futurs essais en colonne doivent vérifier la migration et ségrégation des particules fines (0-20 mm) suivant les recommandations faites par Chapuis et al. (1996).

Des mélanges entre la roche stérile et les résidus pourraient se poursuivre au laboratoire sur des essais en colonne en prenant soin de toutes les considérations notés sur ce mémoire, en vérifiant les écoulements préférentiels sur la colonne et la

migration des particules fines (peut-être avec un colorant). Aussi, les résultats peuvent se comparer avec des méthodes numériques pour connaître la fonction de perméabilité.

RÉFÉRENCES

American Society for testing and materials (ASTM) 1997 *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter* Annual Book of ASTM Standards:USA 4:08 7p. D 5084-90

American Society for testing and materials (ASTM) 1994 *Standard test method for permeability of granular soils (Constant head)*. Annual Book of ASTM Standards:USA 4:08 5p. D 2434-68

American Society for testing and materials (ASTM) 1984 *Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate* Annual Book of ASTM Standards:USA 4:02 6p. C 128-84

American Society for testing and materials (ASTM) 1984 *Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate* Annual Book of ASTM Standards:USA 4:02 6p. C 127

American Society for testing and materials (ASTM) 1999 *Standard test method for specific gravity of soils* Annual Book of ASTM Standards:USA 4:08 4p. D 854-98

AUNG, K.K.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.C.; TOLL, D.G. (2001) Relationship between porosity measurement and soil-water characteristic curve for unsaturated residual soil. *Geotechnical and Geological Eng.* 19(3-4):401-416

ANDRINA, J.; WILSON, G.W; MILLER, S.; NEALE, A. (2006) "Performance of the acid rock drainage mitigation waste rock trial dump at Grasberg mine" *7th ICARD St.* Louis MO: ASMR published by ASMR

AUBERTIN, M., MBONIMPA, M., BOUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R. (2003) *Development of a model to predict the water retention curve using basic geotechnical properties* Montréal:École Polytechnique de Montréal 51p. EPM-RT-2003-01

AUBERTIN, M., MBONIMPA, M., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS R.P. (2003) A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties *Can. Geotech. J.* 40:1104-1122

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., BUSSIÈRE, B. (2002) Practical Pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering* 20(3):253-259

AUBERTIN, M., BENIER, L., BUSSIÈRE, B. (2000) *Environnement et gestion des rejets miniers. manuel sur cédérom*. Montréal: Presse internationale. École Polytechnique de Montréal.

AUBERTIN, M et SIMON, R. (1998) Un critère de rupture multiaxial pour matériaux fragiles (criterion of multiaxial failure of brittle materials). *Canadian Journal of Civil Engineering* 25(2) :277-290

AUBERTIN, M. et SIMON, R. (1997) Damage initiation criterion for low porosity rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34(3-4):554-559

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R.P. (1996) Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal.* 33(3), 470-482.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M., CHAPUIS R.P., CRESPO, R.J. (1996a) Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sol *Hydrogéologie* 1:3-13

AUBERTIN, M. (1995) *Évaluation en laboratoire des barrières sèches construites à partir des résidus miniers*. Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a.

AUNG, K.K., RAHARDJO, H., LEONG, E.C., TOLL, D.G. (2001) Relationship between porosimetry measurement and soil-water characteristic curve for an unsaturated residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*. 19: 401-416.

ATESHIAN, G.A., LIKHITPANICHKUL, M., HUNG, C.T., (2006) A mixture theory analysis for passive transport in osmotic loading cells. *Journal of Biomechanics* 39: 464-475

ARYA, L.M. et PARIS, J.F. (1981) A phisicoemperical model predict the soil moisture characteristics from particle-size distribution & bulk density data. *Soil Science of America Journal*. 45:1023-1030

ARYA, L.M, LEIJI, F.J., SHOUSE, P.J, van GENUCHTEN, M.Th. (1999) Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Sciene of America J*. 63:1063-1070.

BARBOUR, S.L, HENDRY M.J, SMITH J.L., BECKIE R.D, WILSON G.W. (2001) *Research partnership program in the mining industry for waste rock hydrology* NSERC, Cameco Corp, COGEMA Resources

BÉDARD, C. (2003) *Étude de laboratoire sur les propriétés hydriques non saturées de sols sableux*. 192p. Mémoire de maîtrise, Génie civil, géologique et des mines École Polytechnique de Montréal

BERNABE, Y., MOK, U., EVANS, B. (2003) Permeability-porosity relationship in rocks subjected to various evolution processes. *Pure and applied geophysics*, 160, 937-960

BOUWER, H. et RICE, R.C. (1976) A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating Wells. *Water Resources Research*, 12 (3), 423-28

BUSSIÈRE, B. (1999) *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modelisations physiques et numériques* 238p. Thèse de doctorat en génie civil, géologique et des mines École Polytechnique de Montréal

BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R., (2002) A laboratory set up to evaluate the hydraulic behavior of inclined capillary barriers *Physical Modelling in geotechnics* 90: 5809 389 1

BROOKS, R.H. et COREY A.T., (1964). Hydraulic properties of porous medium. *Hydrology Paper 3*, Colorado State University (Fort Collins), Colorado.

CHAPUIS, R. et AUBERTIN, M. (2003) *Prediction the coefficient of permeability of soils using the Kozeny-Carman equation*. Montréal:École Polytechnique de Montréal 30p. EPM-RT-2003-03

CHAPUIS, R. P. et AUBERTIN, M. (2003) On the use of Kozeny-Carman equations to predict the hydraulic conductivity of soils *Can. Geotech. J.* 40:616-628

CHAPUIS, R. P., CONTANT, A., BAASS, K. A. (1996) Migration of fines in 0-20 mm crushed base during placement, compaction and seepage under laboratory conditions *Can. Geotech. J.* 33:168-176

CHAPUIS, R. P., MASSE, I., MADNIER, B., AUBERTIN, M. (2005) A long column test for determining unsaturated properties of coarse material *Geotechnical Testing Journal*

CHAPUIS, R. P. et TOURNIER, J.P. (2006) "Simple graphical methods to assess the risk of internal erosion" *Barcelona*

CHAPUIS, R.P. et MONTOUR, (1992) Évaluation de l'équation de Kozeny Carman pour prédire la conductivité hydraulique. Proceedings, 45eme conference Canadienne de Géotechnique. *Québec, Canada.*

CHAPUIS, R., BAASS, K., DAVENNE, L. (1989) Granular soils in rigid wall permeameters: method for determining the degree of saturation *Can. Geotech. J.* 26:71-79

CHAPUIS, R.P et LEGARÉ, (1992) A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. *Soil Science* 117:311-314

CHIASSEON, M. (1993) *Étude géostatistique de la variable de la résistance au cisaillement du site de l'excavation de St. Hilaire.* 256p. Thèse de doctorat en génie civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal.

CHIN, D.A. (2000) *Water Resources Engineering*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hill.

CONTANT, A. (1989) *Amélioration de la longévité des chaussées souples par l'optimisation des propriétés hydrauliques des agrégats de la fondation*. 187p. Thèse de doctorat en génie civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal.

COUSSY, O., DORMIEUX, L., DETOURNAY, E. (1998) from mixture theory to biot's approach for porous media *Int. J. Solid Structures* 35:34-35 4619-4635

EIGENBROD, K.B, KJARTANSON, B.H, VANAPALLI, S. (2004) "Influence of silt content on the engineering properties of saturated and unsaturated granular soils" *57th Canadian Geotechnical conference, 5th joint CGS/IAH-CNC Conference Quebec*

FALA, O, MOLSON, J.W., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. (2005) Numerical simulations of flow and capillary Barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water and the environment*. 24(4):172-184.

FALA, O, AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. (2002) *Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques*. 295p. Mémoire de Maitrise. École Polytechnique de Montreal.

FREDLUND, D.G. et RAHARDJO, H., (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & son, inc., New York.

FREDLUND, D.G. et XING, A., (1994). Equations for the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical J.*, 31:521-532

GAMACHE-ROCHETE, A. (2004) *Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles*. 159p. Thèse de maîtrise, Génie civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal

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.

HAVERKAMP, R. et PARLANGE, J. Y. (1986) Predicting the water retention curve from particle-size distribution : 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science* 142 :325-339

HAVERKAMP, R. VAUCLIN, M., TOUMA, J., WIERANGA, P.J., VACHAUD, G. (1977) Comparison of numerical simulation models for one dimensional infiltration. *Soil Science Society of American Journal* 41:285-294

HAZEN, A. (1911) Discussion of dams on sand foundation, transactions. *American Science of civil Engineering* 73: 199-203

HERASYMUIK, G. M. (1996) *Hydrogeology of a sulphide waste rock dump*. 184p. Thesis for a Masters degree, Civil Engineering University of Saskatchewan

HILLEL, D., (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York.

HOLTZ, R. D. et KOVACS, W. D., (1991) *Introduction à la Géotechnique* École Polytechnique de Montréal:Quebec, Canada 808p. traduit par LAFLEUR, J.

JUNQUEIRA, F.F., WILSON, G.W., NICHOL, C., SHANNON, D. (2006) The influence of climate, vegetation, layer thickness and material properties for

performance of the cover systems at the golden sunlight mine. *7th annual conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* St. Louis, M.O: American Society of Mining and Reclamation (ASMR).

KABWE, L.K., WILSON, G.W., HENDRY J.M. (2006) Field measurements of surface gas fluxes and surface water conditions for mine waste rock management. *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)* St. Louis, M.O: American Society of Mining and Reclamation (ASMR).

KABWE, L.K et WILSON G.W (2005) "Measurements and Model predictions of the rate of drying with time at the surface of a waste rock pile after heavy rainfall events" *"The many Facets of mine reclamation". Proceedings of the twenty-ninth annual British-Columbia mine reclamation symposium.* British Columbia

KLUTE, A. et DIRKSEN, C. (1986) Hydraulic Conductivity and Diffusivity : laboratory methods. *Methods of Soil Analysis. Part I, 2nd ed.* Aklute (ed), Agron. Monogramme 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 687-734

KOVÁCS, G., (1981). *Seepage hydraulics*, Elsevier Scientific Pub.

KRISHNAN, J. M. et RAO, C. L. (2000) Mechanics of air voids reduction of asphalt concrete using mixture theory. *Int. J. of Engineering Science*, 38:1331-1354

KUMAR, V. (2004) Compaction and permeability study of Pond Ash Amended with locally available soil and hardening agent *IE (I) Journal – CV 85:May 31-35*

LAM, D.C.C. (1998) Packing model for bimodal particle packing with aligned fibers *Journal of Materials Processing Technology* 79:170-176

LAMBE, T.W et WHITMAN, R.V. (1979) *Soil Mechanics, SI version*. NY:John Wiley and Sons

LEIJ, F.J, RUSSEL, W.B. et LESCH, S.M. (1997) Closed-form expressions for water retention and conductivity data. *Groundwater* 35:848-858

LEONG, B.C., et RAHARDJO, H., (1997). Permeability functions for unsaturated soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, 123(2): 1118-1126.

LEONG, B.C., et RAHARDJO, H., (1997a). Review of soil-water characteristics curve equations. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* 123): 1106-1117.

LOBO-GUERRERO, S. (2002) *The elastic moduli of soils with dispersed oversize particles*. Master's Thesis, Engineering University of Pittsburg

MALLON, A.J, SWARBRICK, R.E., KATSUBE, T.J., (2005) Permeability of fine-grained rocks: New evidence from chalks. *Geologic Society of America*, 33(1), 21-24.

MAQSoud, A., BUSSIÈRE, B., MBONIMPA, M., AUBERTIN, M. (2004) "Hysteresis effects on the water retention results and predictive models". *57th Canadian Geotechnical conference, 5th joint CGS/IAH-CNC Conference*. Quebec Session 3A, 8-15

MARTIN, V. (2003) *Étude des propriétés non saturées des stériles miniers*. 208p. Mémoire de maîtrise, Génie civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal

MBONIMPA, M, AUBERTIN, M, CHAPUIS, R.P., BUSSIÈRE, B. (2006) Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic

geotechnical properties using the modified Kovacs (MK) Model and Statistical Models. *Canadian Geotechnical Journal* 43(8):7773-783

MBONIMPA, M., BÉDARD, C., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. (2004) "A model to predict the unsaturated hydraulic conductivity from basic soil properties" *57th Canadian Geotechnical conference, 5th joint CGS/IAH-CNC Conference*. Quebec Session 3A, p. 16-23

MBONIMPA, M., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P, BUSSIÈRE, B. (2002) Practical pedotransfer function for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geotechnical Eng.* 20:235-259

MBONIMPA, M, AUBERTIN, M, CHAPUIS R.P (2000) simple hydraulic functions using basic tailings properties. *Annual conference Abstracts – Canadian Society for Civil Engineering* p. 100

McCARTHY, D.F. (2002) *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics* (6th ed.). N.J: Pearson Education Inc, Prentice Hall.

MCKEOWN, R., BARBOUR, L., ROWLETT, D., HERASYMUIK, G. (2000) "Characterization of the grain-size distribution for waste rock from metal mines - a review of the existing data and an evaluation of the implications for hydrogeologic behavior." *Annual conference Abstract: Canadian Society of Civil Eng.* London, Ontario p.103

MILCZAREK, M. A., ZYL, D. V., PENG, S., RICE, R. C. (2006) "Saturated and Unsaturated Hydraulic properties characterization at mine facilities: are we doing it right?". *7th ICARD* St. Louis MO: ASMR published by ASMR

MONZON BOJ, M. 1998 *Étude en laboratoire des propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers utilisés comme barrière de recouvrement* 150p. Mémoire de maîtrise, Génie civil, géologique et des mines École Polytechnique de Montréal

MORIN, K.A. et HUTT, N.M. (2000) Bell Mine – Update of Environmental Geochemistry. Technical report for Noranda Inc., submitted for publication.

MORIN, R. H. (2006) Negative correlation between porosity and hydraulic conductivity in sand-and-gravel aquifers at Cape Cod, Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology*, 316 43-52

MORIN, R. H. (2004) "Contaminant transport behavior in sand and gravel aquifers based upon the interplay between porosity and hydraulic conductivity". *57th Canadian Geotechnical conference, 5th joint CGS/IAH-CNC Conference*. Quebec Session 3A, 32-35

MORRIS, C.E et STORMONT, J.C. (1997). Capillary barriers and Subtle D covers: estimating equivalency. *Journal of Environmental Engineering*, 123:3-10.

MORRIS, P.H et WILLIAMS, D.J. (2000) Porosity co-disposed coalmine wastes *International Journal of Surface Mining, reclamation and Environment*. 14(1):63-73

MOTA, M., TEIXEIRA, J.A, BOWEN, W.R, YELSHIN, A. (2003) Interference of coarse and fine particles of different shape in mixed porous beds and filter cakes. *Minerals Engineering*, 16:135-144

MOTA, M., TEIXEIRA, J. A., YELSHIN, A. (1998) Image analysis of packed beds of spherical particle of different sizes. *Separation and Purification Technology (Elsevier Science)* 15:59-68

OUANGRAWA, M (2007) *Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-geochimique des résidus minier sulfureux partiellement submergés*. PhD, CGM, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

RICARD, J.F. (1994) "Étude en laboratoire de la relation capillaire et de la conductivité hydraulique de résidus miniers". Mémoire M. Sc. A., Département de Génie Minéral École Polytechnique de Montréal, 207p.

RIJCK, G. D. et SCHREVEENS, E. (2001) Methodology to simultaneously optimize the Macroanion and the Macroanion composition of nutrient solutions using mixture theory. *J. Agric. Eng. Res.*, 78:1 89-97

SHAAP, M et van GENUCHTEN, M. T. (2006) A modified Mualem - van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone J.*, 5, 27-34.

SHEIDEGGER, A.E. (1974) *The physics of flow through porous media* 3rd ed. Toronto: University of Toronto Press.

SHEPHERD, R.G. (1989) Correlations of permeability and grain-size. *Ground Water* 27(5):633-638

SHIMKO, D.A, SHIMKO, V.F, SANDER, E.A., DICKSON, K.F., NAUMAN, E.A., (2004) Effect of porosity on the fluid flow characteristics and mechanical properties of tantalum Scaffolds. *Wiley Interscience*. Consulté le 1 Mai 2006, tire de www.interscience.wiley.com. DOI: 10.1002/jbm.b.30229

SMITH, L., LOPEZ D. L., BECKIE R., MORIN K., DAWSON R., PRICE W. A. (1995) *Hydrogeology of waste rock dumps project*. British Columbia ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources and CANMET:British Columbia 115p

[1] Soil Science Society of America, "Methods of Soil Analysis", *SSSA Book Series*, 1, 1989.

TIEJE, O. et HENNINGS, V. (1996) Accuracy of the Saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69:71-84

TONS, E. et GOETZ, W.H. (1968) Packing Volume concept for aggregates. *Highway Research Record*. 236:76-96

VALLEJO, L.E et MAWBY, R. (2000) Porosity influence on the shear strength of granular material - clay mixtures *Engineering Geology* 58:125-136

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.

van GENUCHTEN, M. Th., LEIJ, F.J, YATES, S.R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *Environmental Protection Agency*, EPA/600/2-91/065

VERVOOT, R.W. et CATTLE, S.R., (2003) Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore size distribution. *Journal of Hydrology* 272, 36-49.

VULKOVIĆ, M. et SORO, A. (1992) Determination of Hydraulic Conductivity of porous media from grain-size composition. Littleton, Colorado: Water Resources Publications

WICKLAND, B., WILSON, W., WIJEICKREME D., FREDLUND, D., (2006) Mixtures of Waste rock and tailings resistance to acid rock drainage. *7th International Conference on Acid Rock Drainage*, St. Louis, M.O: American Society of Mining and Reclamation (ASMR).

WICKLAND, B. E. (2006a) *Volume change and permeability of mixture of waste rock and fine tailings* 367p. Thèse de doctorat en philosophie University of British Columbia

WICKLAND, B. E. et WILSON, W. G. (2005) Research of co-disposal of tailings and waste rock. *Geotechnical News*, 23:3 35

WICKLAND, B. E., WILSON, W. G., WIJEWICKREME, D., KLEIN, B. (2005a) *Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings*. British Columbia: University of British Columbia, 45p

WICKLAND, B. E. et WILSON, Ward G. (2005b) Self-weight consolidation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Can. Geotech. J.* 42:327-339

WILLIAMS, D.J. (1998) Depositonal behaviour of coal tailings co-disposed: Coal washery wastes and loose dumped coarse reject. *Australian Institute of Minign and Metallurgical Publication Series* 1:341-346

WILLIAMS, D.J et KUGANATHAN, V (1993) *Proceedings of the conference on geotechnical management of waste and contamination*. P. 485.

WILSON, W., MISKOLCZI, J., DAGENAIS, A. M., LEVESQUE, I., SMITH Q., ANTEIGNE, L., HULETT, L., LANDRIAULT, D. (2006) "The application of blended waste rock and tailings for cover systems in mine waste management". *7th ICARD* St. Louis MO: ASMR published by ASMR

WILSON, W.G. (2001) Co-disposal of tailings and waste rock. *Geotechnical News* 19(2):44-49

YAZDANI, J. (1995) *Soil water characteristic curve for mine waste rock containing coarse material* 89p. Report for Masters Degree, Civil Engineering University of Saskatchewan

YAZDANI, J., BARBOUR, L., WILSON, W. (2000) "Soil water characteristic curve for mine waste rock containing coarse material". *CSCE Annual Conference*, London, Ontario p. 198-202

ZHANG, L. et FREDLUN, D.G., (2003) Characteristics of water retention curves for unsaturated fractured rocks. [en ligne] Disponible: www.soilvision.com