

Titre: Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire
Title: [stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire](#)

Auteur: Anna Peregoedova
Author: [Anna Peregoedova](#)

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Peregoedova, A. (2012). Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/983/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/983/>
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/983/>

Directeurs de recherche: Michel Aubertin, & Bruno Bussière
Advisors: [Michel Aubertin](#), [Bruno Bussière](#)

Programme: Génie minéral
Program: [Génie minéral](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES DES
ROCHES STÉRILES À UNE ÉCHELLE INTERMÉDIAIRE DE
LABORATOIRE

ANNA PEREGOEDOVA

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)

OCTOBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES DES ROCHES
STÉRILES À UNE ÉCHELLE INTERMÉDIAIRE DE LABORATOIRE

Présenté par : PEREGOEDOVA Anna

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

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

M. CHAPUIS Robert P., D.Sc.A., président

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

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. MBONIMPA Mamert, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de recherche, le professeur Michel Aubertin de m'avoir accueilli dans son laboratoire. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son encadrement et son soutien constant à toutes les étapes de ce projet de maîtrise. Outre ses grandes compétences scientifiques et professionnelles, je tiens à le remercier pour ses qualités humaines et sa constante bienveillante écoute. Je voudrais aussi remercier le professeur Bruno Bussière qui a agit à titre de codirecteur. Il m'est agréable de souligner l'ambiance conviviale du laboratoire. Je tiens à remercier en particulier Noura El-Harak et Nicolas Pepin pour leur soutien technique et moral ainsi les étudiants Papy Kikiessa Kisaka, Frédéric L.-Bolduc et Etienne Piché pour leur aide au laboratoire pendant les essais. Merci aussi à tous les étudiants de la Chaire pour leur support et leur amitié. Je me souviens en particulier du travail en équipe avec Faustin Saleh Mbemba et Mustapha Jaouhar lors de la préparation pour les examens de géotechnique minière. Les pauses-café et les déjeuners en commun avec l'ensemble des étudiants resteront pour moi un souvenir inoubliable.

RÉSUMÉ

Les grandes quantités de stériles miniers générées annuellement par l'industrie minière représentent des risques pour l'environnement. Le stockage des roches stériles dans les haldes peut conduire à de graves problèmes causés par le drainage minier acide (DMA) ou le drainage neutre contaminé (DNC). Par conséquent, des études systématiques sur les stériles miniers sont nécessaires afin d'élaborer des méthodes de stockage écologiques et sécuritaires.

Le projet de recherche présenté dans ce mémoire avait pour objectif d'étudier les principales caractéristiques hydrogéologiques de stériles miniers à partir d'une approche expérimentale à l'échelle intermédiaire en laboratoire. Le but spécifique du projet était la détermination de la conductivité hydraulique saturée des échantillons de roches stériles et de leur courbe de rétention d'eau. On a aussi évalué l'effet du déplacement des particules fines, lors de l'écoulement de l'eau, sur les propriétés hydriques des stériles.

Les essais ont été réalisés sur les échantillons prélevés sur une des haldes à stériles de la mine Lac Tio (RTFT, Havre-Saint-Pierre, Québec). Selon le système unifié (ou ASTM) de classification des sols, les échantillons testés (diamètre ≤ 50 mm) correspondent à un sable bien gradué (SW), avec diverses proportions de particules fines, de gravier et de cailloux.

Les propriétés hydrogéologiques de ces stériles ont été déterminées à l'aide d'essais de perméabilité, de traceur, d'infiltration et de rétention d'eau dans des grandes colonnes instrumentées. Ces essais ont été menés sur des échantillons (spécimens) dont la granulométrie a été tronquée à des dimensions présélectionnées (de 5 à 50 mm). Les résultats des essais en colonne ont montré que la conductivité hydraulique saturée des stériles, mesurée en laboratoire à échelle intermédiaire, est peu influencée par la présence de différents pourcentages de graviers et de cailloux. La valeur de k_{sat} des stériles varie autour de 10^{-1} cm/s pour les diverses fractions granulométriques testées. Les valeurs obtenues expérimentalement ont aussi montré qu'à l'échelle du laboratoire, la conductivité hydraulique saturée des stériles n'est pas influencée significativement par la migration des particules, qui se produit surtout pour des gradients hydrauliques élevés ($i \geq 2-3$).

La comparaison des résultats des essais avec les valeurs de k_{sat} obtenues de modèles prédictifs a montré des écarts significatifs, avec des valeurs prédites beaucoup plus faibles que les valeurs expérimentales. Ces divergences pourraient être expliquées par le fait que la conductivité

hydraulique saturée des stériles semble surtout contrôlée par un système de macropores interconnectés qui représentent des voies d'écoulement préférentiel. La présence de telles voies d'écoulement préférentiel dans les stériles a été confirmée (en partie) par les résultats d'essais de traceur et d'essais d'infiltration. Des modèles alternatifs sont considérés ici afin de prédire la valeur de k_{sat} des roches stériles.

La présence des macropores dans la matrice poreuse des stériles suggère que la roche stérile se comporte comme un milieu à double porosité. Dans les conditions saturées en eau, la conductivité hydraulique des stériles semble alors contrôlée par la macroporosité. Dans des conditions non saturées, la conductivité hydraulique décroît rapidement à l'application d'une faible succion. Dès que les macropores se vident, ils ne peuvent plus servir de voies rapides d'écoulement.

Ce comportement se traduit par une courbe de rétention d'eau (CRE) bimodale, typique pour un milieu à double porosité. La fonction de perméabilité qui en découle montre aussi deux régimes pour l'écoulement de l'eau. Les courbes de rétention d'eau obtenues expérimentalement montrent une pression d'entrée d'air ($\psi_a = AEV$) faible (< 10 cm) et une teneur en eau volumique résiduelle (θ_r) relativement élevée (0,06 – 0,08). Ces résultats ont permis de proposer des modifications au modèle prédictif MK (Aubertin et al. 2003) qui permettent de mieux représenter l'effet de la fraction fine des stériles sur la teneur en eau résiduelle. Il a ainsi été proposé d'utiliser la méthode de Chapuis et Légaré (1992) pour évaluer le diamètre équivalent des grains D_H , qui est utilisé dans le modèle prédictif MK pour le calcul de la rétention d'eau due au phénomène d'adhésion (qui contrôle la valeur de θ_r). Des données tirées de la littérature ont été utilisées afin de démontrer que les modifications apportées au modèle MK fonctionnent bien pour d'autres roches stériles et pour d'autres matériaux grossiers à granulométrie très étalée.

Les résultats de la présente étude peuvent être utiles pour des travaux qui portent sur la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles. Ils sont donc d'intérêt pour aider à développer des méthodes optimales pour la construction des haldes afin de réduire les risques géo-environnementaux qui y sont associés.

ABSTRACT

The mining industry produces large quantities of waste rock which are usually stored in piles on the surface. Waste rocks often contain reactive minerals that may give rise to a contaminated effluent. It is essential to define the hydrogeological properties of these wastes to assess the environmental risks associated with surface disposal.

The main purpose of this project was to assess the hydrogeological properties of waste rocks by means of intermediate scale laboratory tests. More specifically, the project aimed to determine the saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) and the water retention curve (WRC) of waste rock samples. The effect of fine particles displacement that may occur when water percolates through widely graded materials was also evaluated. The tests were conducted on samples taken from one of the waste rock piles at the Lac Tio mine (RTFT, Havre-Saint-Pierre, Quebec). The samples (diameter ≤ 50 mm) correspond to widely graded sand with diverse proportions of fine particles, gravel and pebbles.

The hydrogeological properties of the waste rocks were determined by means of permeability, tracer, infiltration and drainage tests in large instrumented columns. The tests were conducted on samples having a particle size that was truncated to the preselected maximum sizes (from 5 to 50 mm). The results of the tests showed that the saturated hydraulic conductivity k_{sat} of the waste rocks, measured in the laboratory, is not significantly influenced by the presence of various percentages of gravels and pebbles. The value of k_{sat} varies around 10^{-1} cm/s for the samples with different particle size distributions. At the laboratory scale, the experimental values of k_{sat} is not significantly influenced by the movement of fine particles, which often occurs at high hydraulic gradients ($i = 2-3$).

The comparison of the test results with k_{sat} values obtained from predictive models showed significant differences; the measured values are much larger than the latter. The saturated hydraulic conductivity of waste rocks seems to be controlled by a system of interconnected macropores, which act as preferential water flow paths. The presence of such preferential paths in the waste rocks was partially confirmed by the results of tracer and infiltration tests. Alternative models are proposed to predict the value of k_{sat} for these waste rocks.

The water retention curves obtained experimentally show low air entry values ($AEV < 10$ cm) and a relatively high value for the residual volumetric water content ($\theta_r = 0,06 - 0,08$). The

obtained results have lead to modifications of the predictive MK model (Aubertin et al., 2003) that enable the model to better reflect the effect of the finer fraction on the residual water content. Data taken from the literature were used to demonstrate that the modifications of the MK model work well with other waste rocks and with other widely graded materials.

The presence of macropores suggests that waste rocks may behave as a double porosity medium. Under water-saturated conditions, the hydraulic conductivity of the waste rock appears to be controlled by macroporosity. Under unsaturated conditions, the hydraulic conductivity decreases rapidly with an increase in matrix suction. As soon as macropores are empty, they do not contribute to water flow. This behavior can be represented by a bimodal water retention curve. The permeability function can also be characterized by a two-phase water flow.

The results of this investigation can be used in numerical modelling studies of water flow through waste rocks piles. These can be useful in developing optimal pile configurations to reduce the geo-environmental risks related to surface disposal of waste rocks.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXI
LISTE DES ANNEXES.....	XXV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Principales caractéristiques des haldes à stériles.....	4
2.1.1 Propriétés géotechniques de base des stériles miniers	4
2.1.2 Caractéristiques hydrogéologiques des haldes	6
2.2 Concepts théoriques sur l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux	11
2.2.1 Loi de Darcy.....	11
2.2.2 Conductivité hydraulique saturée	13
2.2.3 Propriétés de rétention d'eau	17
2.2.4 Fonction de perméabilité	23
2.2.5 Écoulement d'eau dans un milieu à double porosité.....	25
2.3 Étude expérimentale de laboratoire des propriétés hydriques des stériles miniers	26
2.3.1 Essais en colonnes instrumentées.....	26
2.3.2 Essais de traceur	28
2.3.3 Essais d'infiltration.....	32

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES D'ESSAIS.....	36
3.1 Méthodologie expérimentale	36
3.2 Matériaux étudiés	37
3.3 Caractérisation des propriétés de base.....	39
3.3.1 Analyses granulométriques	40
3.3.2 Densité relative des grains.....	41
3.3.3 Masse volumique sèche, indice des vides et porosité	42
3.4 Mesures des propriétés hydriques	44
3.4.1 Préparation du matériau.....	45
3.4.2 Montage des colonnes instrumentées	45
3.4.3 Essais de perméabilité	48
3.4.4 Essais de traceur	54
3.4.5 Essais de drainage libre	56
3.4.6 Essais d'infiltration.....	56
3.4.7 Démontage des colonnes et caractéristiques de rétention d'eau	58
3.4.8 Déplacement de particules fines.....	59
CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE.....	61
4.1 Caractéristiques des matériaux	61
4.1.1 Granulométrie.....	61
4.1.2 Minéralogie	67
4.1.3 Densité relative des particules solides.....	68
4.1.4 Porosité des matériaux dans les colonnes expérimentales	70
4.2 Migration des particules fines dans la matrice de la roche stérile.....	73
4.3 Mesures de la conductivité hydraulique saturée.....	80

4.4	Résultats des essais de traceur et interprétation préliminaire	86
4.5	Résultats des essais d'infiltration	91
4.6	Essai combiné « infiltration/traceur » en condition saturée	98
4.7	Résultats des essais de drainage et CRE	100
CHAPITRE 5 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....		108
5.1	Conductivité hydraulique des stériles.....	108
5.1.1	Valeurs mesurées et prédites	108
5.1.2	Comparaison avec les résultats d'études antérieures	119
5.1.3	Effet de la migration des particules sur la conductivité hydraulique	123
5.2	Macroporosité des stériles	126
5.3	Courbes de rétention d'eau des stériles	130
5.4	Prédiction de la courbe de rétention d'eau	132
5.5	Modifications du modèle MK	139
5.5.1	Paramètres d'influence	139
5.5.2	Modification du diamètre équivalent D_H	147
5.5.3	Application du modèle MK _s	150
5.5.4	Application du modèle MK _s à d'autres matériaux	154
5.6	Courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité d'un milieu à double porosité	159
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		164
BIBLIOGRAPHIE		169
ANNEXES		181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Liste des essais et mesures en colonne.	45
Tableau 4.1 : Paramètres granulométriques initiaux des stériles; les courbes granulométriques sont montrées à la figure 4.1.	62
Tableau 4.2 : Paramètres granulométriques moyens.	66
Tableau 4.3 : Composition minéralogique des stériles de la mine Lac Tio ; analyses réalisées par DRX pour différentes fractions granulométriques.	68
Tableau 4.4 : Densité relative (D_r) moyenne des différentes fractions granulométriques des stériles testés.....	69
Tableau 4.5 : Porosité (n) moyenne des stériles dans les colonnes expérimentales.	71
Tableau 4.6 : Composition minéralogique des particules fines entraînées lors des essais de perméabilité en colonne sur les stériles QIT1, obtenue par analyse de diffraction aux rayons X (DRX).	75
Tableau 4.7 : Résultats des mesures de la conductivité hydraulique saturée des stériles lors des essais en colonne (échantillon QIT1_P28_f).	81
Tableau 4.8 : Compilation des résultats des essais de perméabilité sur les stériles, incluant les valeurs moyennes de k_{sat} considérées comme représentatives des échantillons.	82
Tableau 4.9 : Conductivité hydraulique des stériles telle que déduite des mesures piézométriques à l'intérieur des colonnes expérimentales.	84
Tableau 4.10 : Comparaison des valeurs de la conductivité hydraulique (k_{sat}) obtenue dans les essais en colonne avec les valeurs de k_{sat} déterminées dans les perméamètres à parois rigides de dimension standard.	86
Tableau 4.11 : Conditions et résultats de l'essai de traceur.	86
Tableau 4.12 : Estimation de paramètres d'advection-dispersion selon la méthode de Sauty (1980).	89
Tableau 4.13 : Principales conditions de réalisation de l'essai « infiltration/traceur » (QIT1_P50_lache).	98

Tableau 4.14 : Temps requis pour atteindre l'équilibre hydrostatique dans les colonnes drainées.	103
Tableau 4.15 : Propriétés de rétention d'eau des stériles et paramètres de la CRE ajustée avec le code RETC (de van Genuchten et al., 1991).	107
Tableau 5.1 : Surface spécifique évaluée selon les modèles KC, KCM et MK.	115
Tableau 5.2 : Valeurs de la conductivité hydraulique mesurée et prédite par l'équation de Shepherd (1989).	117
Tableau 5.3 : Valeurs de la conductivité hydraulique k_{sat} mesurée et prédite par l'équation de Taylor (1948).	119
Tableau 5.4 : Valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des stériles de la mine Tio, mesurées et prédites dans les études antérieures.	121
Tableau 5.5 : Valeurs mesurées de k_{sat} des stériles et d'autres matériaux, selon des travaux antérieurs, comparées aux valeurs prédites selon l'équation de Shepherd (1989) (éq. 5.1).	122
Tableau 5.6 : Valeurs mesurées de k_{sat} des stériles et d'autres matériaux, selon des travaux antérieurs, comparées aux valeurs prédites selon l'équation de Taylor (1948) (éq. 5.2).	123
Tableau 5.7 : Estimation de l'effet du déplacement des particules fines sur la valeur de k_{sat} des stériles pour la colonne QIT1_P50_f2 (basée sur le modèle KC, équation 2.7).	125
Tableau 5.8 : Valeurs de la dispersivité longitudinale α_L des stériles obtenues dans la présente étude et les études antérieurs.	127
Tableau 5.9 : Eléments utilisés pour estimer la porosité "effective" des macropores d'après les résultats de l'essai combiné «infiltration/traceur» pour la colonne QIT1_P50_lâche.	129
Tableau 5.10 : Paramètres des CRE obtenus à partir du modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon la courbe granulométrique représentative des échantillons (voir tableau 4.2 pour les valeurs du D_{10} et du C_U utilisées).	137
Tableau 5.11 : Valeurs du coefficient a_c ajusté pour obtenir une meilleure représentation des données expérimentales avec le modèle MK (voir figure 5.13); les paramètres granulométriques moyens utilisés sont présentés dans le tableau 4.2.	141

Tableau 5.12 : Propriétés de base des échantillons de roches stériles de la mine Laronde (Hernandez, 2007).....	156
Tableau 5.13 : Propriétés de base des échantillons du gravier Mirabel (Hernandez, 2007).....	158
Tableau 5.14 : Données d'entrée et paramètres ajustés avec le code RETC pour la CRE et la fonction de perméabilité.....	161

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schématisation d'une courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques AEV ($\equiv\psi_a$, pression d'entrée d'air) et WEV ($\equiv\psi_r$, pression d'entrée d'eau); ici, la succion est exprimée en terme de charge de pression [L] sur une échelle semi-logarithmique.	18
Figure 2.2 : Exemple de CRE avec l'apport de la saturation capillaire S_c et de la saturation d'adhésion S_a selon le modèle MK (éq. 2.14) (Aubertin et al., 1998, 2003).	20
Figure 2.3 : Schéma général de la variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la teneur en eau du milieu (Musy et Soutter, 1991).	24
Figure 2.4 : Obtention de la courbe de rétention d'eau à l'aide des essais de drainage en colonne.	28
Figure 2.5 : Schématisation de la courbe de concentration du traceur obtenue au cours d'un essai de traceur en fonction du temps, avec le temps d'arrivée du traceur t_{arr} et le temps d'arrivée du front advectif t_{adv} ; C est la concentration du traceur à la sortie de l'échantillon au temps t ; C_o est la concentration initiale du traceur dans l'eau injectée dans l'échantillon (adapté de Domenico et Schwartz, 1997).	29
Figure 2.6 : Schéma de l'évolution du taux d'infiltration dans un sol en fonction du temps (Fetter, 2001).	33
Figure 2.7 : Régimes d'infiltration en fonction du degré de compaction de la couche superficielle de sol (Musy et Soutter, 1991).	34
Figure 3.1 : Identification des échantillons testés dans la présente étude.	39
Figure 3.2 : Séparateur de laboratoire.	40
Figure 3.3 : Colonne instrumentée utilisée pour réaliser les essais de perméabilité et de drainage.	47
Figure 3.4 : Vitesse de Darcy (V_{Darcy}) en fonction du gradient hydraulique (i) lors des essais de perméabilité à charge constante pour les matériaux: a) QIT1_P50_f2 et b) QIT1_P28_f....	52
Figure 3.5 : Diagramme de calibration du conductimètre qui mesure la conductivité électrique de l'eau en fonction de la teneur en sel (NaCl).	55

Figure 4.1 : Courbes granulométriques initiales des roches stériles placées dans les colonnes pour les divers essais.....	62
Figure 4.2 : Exemples de courbes granulométriques des stériles déterminées après les essais en colonne : a) courbes complètes et b) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P19_f (passant 19 mm) ; c) courbes complètes et d) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P50_f2 (passant 50 mm)	64
Figure 4.3 : Courbes granulométriques des stériles déterminées par l'analyse à l'hydromètre et par l'analyse au laser : a) courbes complètes et b) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P10_f ; c) courbes complètes et d) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P5_f	65
Figure 4.4 : Variation de densité relative D_r des stériles de la mine Lac Tio (QIT1) en fonction de la granulométrie (i.e. taille maximale des particules).....	70
Figure 4.5 : Variation de la porosité des stériles à l'intérieur des colonnes sélectionnées (pour les diverses couches mises en place et au démontage).....	72
Figure 4.6 : Illustration de la turbidité élevée de l'eau récupérée à la sortie de la colonne QIT1_P50_f2 pendant un essai de perméabilité (deux chaudières de droite).....	74
Figure 4.7 : Résultats des analyses granulométriques au laser des particules en suspension dans l'eau récupérée à la sortie des colonnes (voir texte pour les détails sur les mélanges # 1 et # 2).....	76
Figure 4.8 : Résultats des analyses granulométriques au laser des particules retenues par le géotextile au fond des colonnes expérimentales.	77
Figure 4.9 : Résultats des analyses granulométriques de la fraction passant au tamis 5 mm de l'échantillon initial de la roche stérile QIT1 avant les essais au laboratoire.....	79
Figure 4.10 : Résultats des analyses granulométriques des matériaux après le démontage des colonnes QIT1_P50_f2 et QIT1_P28_f	79
Figure 4.11 : Conductivité hydraulique saturée (k_{sat} à 20°C) des stériles selon le type d'essai (noir – essais à charge constante ; gris – essais à charge variable ; i – gradient hydraulique).	83

Figure 4.12 : Valeurs de la conductivité hydraulique (k_{sat}) moyennes mesurées lors des essais en fonction des paramètres granulométriques D_{10} et D_{60} des stériles.....	85
Figure 4.13 : Courbes d'apparition du traceur à la sortie: a) colonne QIT1_P5_f; b) colonne QIT1_P50_lâche.....	87
Figure 4.14 : Mesures du débit d'eau à la sortie lors de l'essai de traceur pour la colonne: a) QIT1_P5_f, b) QIT1_P50_lâche.....	88
Figure 4.15 : Courbes types calculées pour le cas d'une injection continue du traceur dans un champ uni-dimensionnel, selon la méthode de Sauty (1980).....	88
Figure 4.16 : Superposition des courbes mesurées durant les essais de traceur (C_r vs <i>log temps</i>) aux courbes types selon la méthode de Sauty (1980).....	89
Figure 4.17 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration sur le matériau QIT1_P10_f : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique; c) début de l'essai présenté en détail sur une échelle arithmétique.	93
Figure 4.18 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration sur le matériau QIT1_P50_lâche : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique; c) début de l'essai présenté en détail sur une échelle arithmétique.....	93
Figure 4.19 : Débit d'eau récoltée au bas de la colonne QIT1_P10_f en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique pour le début de l'essai.....	94
Figure 4.20 : Débit d'eau récoltée au bas de la colonne QIT1_P50_lâche en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique.	95
Figure 4.21 : Taux d'infiltration I en fonction du temps t pour l'essai d'infiltration dans la colonne QIT1_P10_f.....	96
Figure 4.22 : Taux d'infiltration I en fonction du temps t pour l'essai d'infiltration dans la colonne QIT1_P50_lâche.....	97
Figure 4.23 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai « infiltration/traceur » sur le matériau QIT1_P50_lâche.	99

Figure 4.24 : Courbe d'apparition de traceur lors de l'essai «infiltration/traceur» dans la colonne QIT1_P50_lâche saturée : a) conductivité électrique de l'eau drainée en fonction du temps; b) C/C_o de l'eau drainée en fonction du temps (où C_o = concentration initiale du traceur ; C = concentration du traceur récupéré au temps t).....99

Figure 4.25 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P50_f : a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); e) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; f) V_{eau} récupérée/ V_{eau} total (dans la colonne) en fonction du temps ; t_1 = temps requis pour que le drainage passe à un régime « goutte à goutte », avec un débit inférieur à 10 mL/min ; t_2 = temps requis pour que le matériau atteigne l'équilibre hydrostatique.....101

Figure 4.26 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P10_f : a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); e) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; f) V_{eau} récupérée/ V_{eau} total (dans la colonne) en fonction du temps ; t_1 = temps requis pour que le drainage passe à un régime « goutte à goutte » avec un débit inférieur à 10 mL/min ; t_2 = temps requis pour que le matériau atteigne l'équilibre hydrostatique.....102

Figure 4.27 : Courbes de rétention d'eau (CRE) : données expérimentales (au démontage) et courbes lissées (les valeurs de ψ_a et ψ_r sont déduites par la méthode graphique des tangentes sur les courbes lissées).105

Figure 5.1 : Conductivité hydraulique mesurée k_{sat} (Labo, voir tableau 4.8) et conductivité hydraulique prédictive par les modèles de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) pour les courbes granulométriques obtenues des diverses analyses sur les échantillons.....109

Figure 5.2 : Relation entre l'indice des vides e et la conductivité hydraulique mesurée pour les différentes fractions granulométriques des stériles (k_{sat} Labo, tableau 4.8) : a) on montre aussi la conductivité hydraulique prédictive selon les modèles de Kozeny-Carman (KC) et

Kozeny-Carman modifié (KCM) pour les granulométries moyennes complète de ces stériles;	
b) on montre aussi la conductivité hydraulique prédictive selon le modèle Kozeny-Carman (KC) et la courbe granulométrique sans les particules fines mobiles ($d \leq 250 \mu\text{m}$).	111
Figure 5.3 : Valeurs de la porosité moyenne mesurée en fonction du pourcentage de gravier dans les échantillons de stériles soumis aux essais en colonne.	113
Figure 5.4 : Conductivité hydraulique k_{sat} mesurée (labo) et prédictive selon les modèles Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM).	114
Figure 5.5 : Comparaison de la surface spécifique (S_s) des stériles calculée avec les modèles Kozeny-Carman (KC) selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992) (éq. 2.9), Kozeny-Carman modifié (KCM) (éq. 2.11) et Kovács modifié (MK) (éq. 2.12).....	116
Figure 5.6 : Comparaison des valeurs de k_{sat} (mesurées et prédictives) obtenues dans la présente étude avec les résultats d'études antérieurs (voir tableau 5.4 et annexe 10 pour plus d'information).	120
Figure 5.7 : Relation entre l'indice des vides e et la conductivité hydraulique des stériles de la mine Tio, selon les valeurs prédictives (modèles KC et KCM) et mesurées lors d'études antérieures; on montre aussi les résultats de la présente étude (voir tableau 4.4).	121
Figure 5.8 : Lien entre la dispersivité longitudinale α_L et l'échelle des essais de terrain (tiré de Gelhar et al., 1992).....	127
Figure 5.9 : Valeurs de la pression d'entrée d'air ψ_a ($\equiv AEV$) et de la succion résiduelle ψ_r obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales, en fonction du D_{10} des matériaux testés (voir détails à l'annexe 11).....	131
Figure 5.10 : Comparaison des courbes de rétention d'eau mesurées et prédictives selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon les données granulométriques disponibles pour les différentes couches des stériles dans les colonnes expérimentales. Les CRE sont présentées dans un plan semi-log (en haut) et arithmétique (en bas). Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre. Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et par analyse laser au Malvern.....	134

Figure 5.11 : Comparaison des valeurs du AEV et de la succion résiduelle ψ_r obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales (modèle de van Genuchten, 1980) et des valeurs prédictes selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) à partir des courbes granulométriques moyennes (tableau 4.2).	138
Figure 5.12 : Comparaison des valeurs de la succion résiduelle ψ_r prédictes selon l'équation 2.21 (modèle MK; Aubertin et al., 2003) et des valeurs mesurées obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales.	138
Figure 5.13 : Courbes de rétention d'eau des stériles obtenues du modèle MK (Aubertin et al., 2003) avec le coefficient a_c de base ($a_c = 0,01$) et ajusté (les données utilisées sont présentées dans le tableau 4.2).	140
Figure 5.14 : Valeurs du coefficient a_c ajustées sur la CRE en fonction du D_{10} des stériles (selon toutes les courbes granulométriques disponibles); on montre aussi quelques valeurs du coefficient a_c ajustées pour les matériaux fins ($D_{10} \leq 0,014$ cm) qui ont servi à déduire la valeur de base ($a_c=0,01$) du modèle MK (selon Aubertin et al., 2003).....	142
Figure 5.15 : Valeurs du coefficient a_c ajusté sur les CRE en fonction du D_{10} des échantillons de roches stériles.	143
Figure 5.16 : Valeur du coefficient a_c (ajusté sur les CRE) en fonction du C_U des stériles pour toutes les courbes granulométriques disponibles.	144
Figure 5.17 : Valeur du coefficient a_c (ajusté sur les CRE) en fonction de la surface spécifique S_s des stériles (calculée selon Chapuis et Légaré, 1992) pour toutes les courbes granulométriques disponibles.....	144
Figure 5.18 : Effet d'angle de mouillage β sur l'allure des CRE prédictes avec le modèle MK; on montre aussi les valeurs mesurées au laboratoire (en drainage).	146
Figure 5.19 : Comparaison des valeurs de la surface spécifique calculées selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003), équation 2.12, et selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992), équation 2.9.	148
Figure 5.20 : Relations entre le rapport des diamètres caractéristiques (D_H/D_{10}) calculé selon différentes méthodes, et le coefficient d'uniformité C_U	149

Figure 5.21 : Courbes de rétention d'eau des stériles de la mine Tio obtenues avec le modèle MK _s selon les courbes granulométriques disponibles pour chaque échantillon ; les CRE identifiées comme «MKs_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre ; les CRE identifiées comme «MKs_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et au laser.	151
Figure 5.22 : Comparaison des courbes de rétention d'eau des stériles de la mine Tio prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et le modèle MK _s pour des distributions granulométriques complètes et tronquées à 80 µm.	154
Figure 5.23 : Granulométrie des échantillons de roches stériles de la mine Laronde caractérisés au laboratoire par Hernandez (2007).....	155
Figure 5.24 : Données expérimentales (Hernandez, 2007) et CRE prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et le modèle MK _s (présente étude) pour différentes fractions granulométriques des roches stériles de la mine Laronde.	156
Figure 5.25 : Granulométrie des échantillons du gravier Mirabel (Hernandez, 2007).	157
Figure 5.26 : Valeurs expérimentales (Hernandez, 2007) et CRE prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et MK _s (présente étude) pour les échantillons de gravier Mirabel. .	158
Figure 5.27 : Courbes de rétention d'eau lissées avec RETC (van Genuchten et al., 1991) selon les résultats des essais en colonne sur la fraction passant 50 mm des stériles de la mine Tio (à gauche – en échelle arithmétique, à droite – en échelle logarithmique) : a) QIT1_P50_f2 (lâche, avec macropores); b) QIT1_P50_f1 (dense, matrice sans effet des macropores); c) QIT1_P50 (combinaison macropores+matrice).	160
Figure 5.28 : Fonction de perméabilité des stériles QIT selon les résultats des essais en colonne sur la fraction passant 50 mm : en fonction de la teneur en eau volumique à gauche; en fonction de la succion à droite.....	163
Figure 5.29 : Fonction de perméabilité pour un milieu à double porosité sur la base des essais sur la fraction passant 50 mm des stériles QIT : a) échelle semi-log; b) échelle arithmétique..	163

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	surface perpendiculaire à l'écoulement [L^2]
AEV	pression d'entrée d'air (Air Entry Value, ψ_a) [L]
$ASTM$	American Society for Testing and Materials
a	facteur de forme [-]
a_c	coefficient d'adhésion dans le modèle Kovács Modifié [-]
b	paramètre du modèle Kovács Modifié (Équation 2.18)
C	constante du modèle Kozeny-Carman (Équation 2.7)
C_C	coefficient de courbure [-]
C_r	concentration normalisée [-]
CRE	courbe de rétention d'eau
C_d	constante du modèle Kozeny-Carman modifié (Équation 2.11)
C_G	constante du modèle Kozeny-Carman modifié (Équation 2.8)
C_U	coefficient d'uniformité [-]
C_ψ	paramètre du modèle Kovács Modifié (Équation 2.20)
D	coefficient de dispersion hydrodynamique [L^2/T]
D_c	coefficient de dispersion cinématique [L^2/T]
D_d	coefficient de diffusion moléculaire [L^2/T]
D_e	coefficient effectif de diffusion [L^2/T]
D_L	coefficient de dispersion longitudinale (dans la direction principale de l'écoulement) [L^2/T]
D_{10}	diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [L]
D_{30}	diamètre des particules correspondant à 30% passant sur la courbe granulométrique [L]
D_{50}	diamètre des particules correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique [L]
D_{60}	diamètre des grains correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique [L]
D_H	diamètre équivalent des grains [L]
D_{H_CL}	diamètre équivalent calculé à partir de la surface spécifique selon la méthode de Chapuis et Légaré [L]
D_r	densité relative des grains solides [-]

D_{min}	diamètre minimal mesuré des grains [L]
d	diamètre moyen des pores ou diamètre des grains [L]
d_{eq}	diamètre des grains utilisé dans la méthode de Chapuis et Légaré (Équation 2.10) [L]
e	indice des vides [-]
g	accélération gravitationnelle [L/T ²]
h_A	charge amont [L]
h_B	charge aval [L]
Δh	variation de la charge hydraulique [L]
h_{co}	remontée capillaire équivalente [L]
I	taux d'infiltration [L/T]
I_c	capacité d'infiltration [L/T]
i	gradient hydraulique [-]
KC	modèle Kozeny-Carman
KCM	modèle Kozeny-Carman Modifié
k	coeffcient de perméabilité de Darcy, ou conductivité hydraulique [L/T]
k_{sat}	conductivité hydraulique saturée [L/T]
k_{unsat}	conductivité hydraulique non saturée [L/T]
$k(\theta)$	fonction de perméabilité ou conductivité hydraulique non saturée [L/T]
L	distance [L]
MK	modèle Kovács Modifié
MK_s	modèle Kovács Modifié ajusté pour les stériles
m	constante d'ajustement du modèle de van Genuchten
n	porosité [-]
n	constante d'ajustement du modèle de van Genuchten
n_{eff}	porosité effective [-]
Q	débit d'eau [L ³ /T]
Pe	nombre de Peclet [-]
$RTFT$	Rio Tinto Fer et Titane
Re	nombre de Reynolds [-]
S_a	degré de saturation due à l'adhésion [-]
S_c	degré de saturation due à la capillarité [-]

S_{n-1}	écart type
S_r	degré de saturation [-]
S_s	surface spécifique des grains solides [L^2/M]
t_{adv}	temps de transport par advection [T]
t_{arr}	temps de la première arrivée du traceur [T]
t_r	temps normalisé [-]
V	vitesse du fluide [L/T]
V_{Darcy}	vitesse de Darcy [L/T]
V_x	vitesse réelle de l'eau dans les pores [L/T]
V_v	volume des vides (ou pores) [L^3]
V_t	volume total [L^3]
V_s	volume des grains solides [L^3]
WEV	pression d'entrée de l'eau (Water Entry Value) [L]
w	teneur en eau massique [%]
Z	élévation au-dessus de la nappe libre [L]
α_L	dispersivité longitudinale (dans la direction principale de l'écoulement) [L]
α_v	paramètre du modèle Kovács Modifié [L^{-1}]
β_w	angle de mouillage [°]
μ	viscosité dynamique du fluide [FT/L^2]
μ_w	viscosité dynamique de l'eau [FT/L^2]
ρ	masse volumique du fluide [M/L^3]
ρ_d	masse volumique sèche [M/L^3]
ρ_s	masse volumique des grains solides [M/L^3]
ρ_w	masse volumique de l'eau [M/L^3]
γ_w	poids volumique de l'eau [M/L^3]
γ_d	poids volumique sec [M/L^3]
σ_w	tension de surface de l'eau [F/L]
ν	viscosité cinématique du fluide [L^2/T]
θ	teneur en eau volumique [-]
θ_r	teneur en eau volumique résiduelle [-]
θ_s	teneur en eau volumique à saturation [-]

ψ	succion matricielle [L]
ψ_a	succion d'entrée d'air [L]
ψ_n	paramètre de normalisation dans le modèle Kovács Modifié (Équation 2.19)
ψ_r	succion à teneur en eau volumique résiduelle θ_r [L]
τ	facteur de tortuosité (Équation 2.25) [-]
x	paramètre du modèle Kozeny-Carman Modifié (Équation 2.8)
\bar{x}	moyenne arithmétique des valeurs mesurées
x_i	valeur individuelle mesurée

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Protocole expérimental pour le montage et le démontage des colonnes pour les essais visant à mesurer la conductivité hydraulique et la courbe de rétention d'eau (en conformité avec les recommandations de Chapuis et al. (2006), Gaillot (2007) et Hernandez (2007)	181
ANNEXE 2 : Vérification du degré de saturation des matériaux lors des essais en colonne selon la méthode de Chapuis et al. (2007).....	185
ANNEXE 3 : Valeurs individuelles des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes.	
.....	186
ANNEXE 4 : Résultats des essais de perméabilité.....	190
ANNEXE 5 : Exemple de calcul de la conductivité hydraulique pour les échantillons stratifiés.	
.....	195
ANNEXE 6 : Courbes granulométriques des roches stériles et données granulométriques détaillées.....	196
ANNEXE 7 : Courbes granulométriques des matériaux supplémentaires (mélange Sigma-Demers et sable filtrant)	202
ANNEXE 8 : Résultats des essais de drainage.....	204
ANNEXE 9 : Courbes de rétention d'eau expérimentales.	210
ANNEXE 10 : Résultats des études préliminaires.	212
ANNEXE 11 : Données sur les courbes de rétention d'eau prédites selon le modèle MK.....	222
ANNEXE 12 : Estimation de l'effet du déplacement des particules fines sur la valeur de k_{sat} des stériles pour la colonne QIT1_P50_f2 (exemple du calcul).....	225

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, l'exploitation des ressources minérales a produit de grandes quantités de rejets, principalement parce qu'il faut enlever le mort-terrain et la roche hôte autour des gisements, c'est-à-dire la roche stérile, pour accéder au mineraï. Selon la définition d'Environnement Canada (2009) : «Un "stérile" est une roche qui est retirée au cours de l'exploitation minière pour pouvoir accéder aux minerais et il n'est pas traité davantage pendant l'année de déclaration». Souvent, le volume de stériles approche ou même excède le volume de mineraï extrait, surtout dans les cas d'exploitations à ciel ouvert. Les compagnies minières doivent alors gérer de forts volumes de stériles. La méthode de stockage des stériles miniers la plus courante est le déchargement sur une surface plane ou à flanc de collines, dans des empilements appelés «haldes à stériles» (Aubertin et al., 2002a). Les sites d'entreposage de stériles peuvent s'étendre sur plusieurs centaines d'hectares avec des haldes s'élevant à plus de 300 m de hauteur (McCarter, 1990). L'instabilité de ces ouvrages peut occasionner de graves dommages à l'environnement et aux infrastructures avoisinantes. Des problèmes environnementaux encore plus importants peuvent être liés à une éventuelle contamination des eaux de surface et des eaux souterraines à proximité des zones d'entreposage de stériles par des eaux de drainage minier acides (DMA) ou de drainage neutre contaminées (DNC), chargées de métaux nocifs (Morin et al., 1991; Pepin, 2009; Plante, 2010).

Un élément clé de la formation des eaux contaminées au sein d'une halde est la présence de minéraux réactifs dans les stériles miniers. Par exemple, exposés à l'eau et l'oxygène de l'atmosphère, les minéraux sulfureux peuvent s'oxyder et produire de l'acide sulfurique qui est un composant principal du DMA (Ritchie, 1994). La teneur en métaux dans les effluents miniers est alors élevée puisque la plupart des métaux se dissolvent plus facilement dans les eaux présentant un faible pH. Dans certains cas, la lixiviation des métaux se produit même en l'absence de drainage acide. Il s'agit de métaux tels que le nickel, le zinc, le cobalt, l'arsenic et l'antimoine, qui sont solubles à des pH près de la neutralité et qui produisent le DNC (Bussière et al., 2005, 2008, 2011; Plante, 2010).

Une prévision du comportement géochimique des stériles à court et long terme est nécessaire pour assurer une gestion écologique des sites d'entreposage. La caractérisation détaillée des

matériaux entreposés dans une halde à stérile s'avère indispensable pour prédire si la halde va générer un effluent contaminé et le temps requis pour la production de contaminants. Cette caractérisation interdisciplinaire devrait comprendre, entre autres, l'analyse des échanges hydriques d'une halde avec son milieu environnant (Morin et al., 1991), la détermination de la structure interne des matériaux entreposés dans la halde, la caractérisation des propriétés géochimiques et géotechniques des stériles et, bien évidemment, de leurs propriétés hydriques (Aubertin et al., 2008; Bussière et al., 2011).

Il est bien connu que la génération des effluents contaminés est fortement influencée par le degré de saturation des stériles. Une bonne connaissance de la distribution et du mouvement de l'eau dans une halde à stériles n'est pas possible sans information fiable sur les propriétés hydrogéologiques des stériles, telles que la conductivité hydraulique à saturation (k_{sat}) et les propriétés de rétention d'eau en conditions non saturées associées aux paramètres de la courbe de rétention d'eau (CRE). Les valeurs de k_{sat} et les CRE des stériles sont largement utilisés dans les simulations numériques des écoulements de l'eau dans les haldes (Fala et al., 2003, 2005, 2008; Molson et al., 2005; Dawood et al., 2011).

La présente étude vise à contribuer à une meilleure connaissance des propriétés hydriques des stériles miniers basée sur le cas des roches stériles de la mine Tio (RTFT, Québec). La mine Tio, située au nord de Havre St-Pierre au Québec, génère une grande quantité de roches stériles qui sont entreposées dans trois haldes principales. Ces stériles contiennent des quantités importantes d'oxyde de fer et de titane (FeTiO_3) et aussi des composés à base de soufre et de nickel. Ils produisent un effluent contaminé en nickel dont la concentration dépasse occasionnellement les normes environnementales (Poirier et al., 2005; Plante, 2010; Bussière et al., 2011). Afin de réduire les risques environnementaux associés au phénomène de DNC à la mine Tio, un vaste programme de recherche *in situ* et en laboratoire est mené par les chercheurs da la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique – UQAT en Environnement et gestion des rejets miniers (Aubertin et Bussière, 2011; Bussière et al., 2011). Réalisée dans le cadre de ce programme, la présente étude vise à déterminer les propriétés hydriques (hydrogéologiques) des stériles de la mine Tio à l'aide de différents essais à une échelle intermédiaire de laboratoire, y compris les essais de perméabilité, de traceur, d'infiltration, de drainage libre et de rétention d'eau effectués dans de grandes colonnes instrumentées.

Une partie du projet est consacrée au problème du déplacement des particules fines qui se produit lors de l’écoulement de l’eau à travers les stériles. Une des caractéristiques importantes des stériles miniers est leur étalement granulométrique lié à la présence de cailloux, gravier, sable et de fines particules silteuses (Smith et al., 1995; McKeown et al., 2000). Ce type de matériaux à granulométrie très étalée peut être sujet au phénomène de mise en mouvement des particules fines qui se déplacent dans la matrice, créant ainsi des voies d’écoulement préférentiel ou, au contraire, colmatant les pores interstitiels (Morin et al., 1991; Chapuis, 1992; Silliman, 1995; Smith et al., 1995; Alem et al., 2006). Dans ce projet, la possibilité de déplacement des particules fines dans la matrice de la roche stérile a été examinée lors des essais de perméabilité et de drainage. L’effet de la migration des particules fines sur les propriétés hydriques des stériles a aussi été étudié. Plus globalement, on a évalué l’influence de l’étalement granulométrique des stériles sur leurs propriétés hydrogéologiques.

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce projet ont été utilisés afin d’apporter des modifications à des modèles de prédiction qui permettent d’estimer les propriétés hydriques des matériaux granulaires à partir de leurs propriétés géotechniques de base (Mbonimpa et al., 2002; Aubertin et al., 2003). Les changements proposés ici permettent d’obtenir de meilleures prédictions dans le cas des stériles miniers et des matériaux à granulométrie étalée en générale.

Ce mémoire de maîtrise est organisé en six principaux chapitres. Après l’introduction, le deuxième chapitre revoit l’information de base essentielle à la bonne compréhension de ce travail. Nous rappellerons ainsi les caractéristiques propres aux stériles miniers et, plus globalement, à l’hydrogéologie d’une halde à stériles. Quelques concepts théoriques sur l’écoulement de l’eau dans un milieu poreux seront également présentés. La deuxième partie du chapitre 2 est consacrée à la description des modèles prédictifs et des méthodes de laboratoire disponibles à ce jour pour l’étude de l’écoulement de l’eau dans ces matériaux granulaires. Une description détaillée des méthodes expérimentales utilisées dans ce travail sera présentée dans le chapitre 3. Les chapitres 4 et 5 présentent respectivement les résultats expérimentaux obtenus et leur analyse. Le chapitre 4 contient également une description détaillée des matériaux étudiés. Dans le chapitre 5, les résultats de la présente étude seront comparés aux résultats des travaux antérieurs. Enfin, le chapitre 6 du mémoire expose les conclusions et la signification de ce travail dans un contexte de gestion environnementale des résidus miniers; on y présente également quelques recommandations pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de fournir l'information nécessaire pour une meilleure compréhension des objectifs, des méthodes et des résultats de la présente étude. Les caractéristiques générales des stériles miniers ainsi que quelques concepts théoriques sur l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux granulaire y seront présentés. Quelques méthodes développées pour la détermination des propriétés hydriques des stériles en laboratoire et des modèles qui ont été développés pour prédire ces propriétés seront aussi décrites.

2.1 Principales caractéristiques des haldes à stériles

Le volume de roches stériles extraites lors d'une exploitation minière peut être très grand, puisque les stériles représentent généralement entre 10 et 20 % du tonnage total extrait pour une mine souterraine, et jusqu'à 60 % (et même plus) pour une mine à ciel ouvert (Aubertin et al., 2008). En raison des quantités de stériles à stocker en surface, les haldes à stériles ont souvent des dimensions considérables. Il n'est pas rare que la hauteur des haldes atteigne plus de 100 m et que la superficie des empilements occupe plusieurs dizaines d'hectares.

2.1.1 Propriétés géotechniques de base des stériles miniers

Distribution granulométrique

Les stériles issus de l'exploitation d'une mine en roches dures sont composés principalement de fragments de roche dont la granulométrie est caractérisée par la présence de particules de taille très variable. On peut y retrouver une assez forte proportion de particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) mais également du sable, du gravier et des blocs rocheux de taille métrique (Nichols, 1987). Ainsi, une des principales caractéristiques des stériles miniers est leur étalement granulométrique. En règle générale, le coefficient d'uniformité (C_U) des stériles est supérieur à 10 mais il peut s'élever au-delà de 300 (McKeown et al., 2000; Barbour et al., 2001; Aubertin et al., 2002b). Rappelons que le coefficient d'uniformité qui caractérise l'étalement granulométrique des matériaux granulaires est défini par la relation :

$$C_U = D_{60}/D_{10} \quad (2.1)$$

où D_{60} – diamètre des grains correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique [L]
 D_{10} – diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [L]

McKeown et al. (2000) ont étudié la granulométrie des stériles de différents sites miniers. Selon les données compilées dans cette étude, les stériles miniers correspondent à des matériaux relativement grossiers avec un D_{60} et un D_{10} variant respectivement de 1 mm à 80 mm et de 0,02 mm à 3 mm. Durant les travaux de terrain à la mine du lac Tio (RTFT, Québec), Lessard (2011) a déterminé que les stériles produits par la mine (sans les blocs et les cailloux) sont constitués en moyenne de 33 - 37 % de gravier (5 - 20 mm), 59 - 62 % de sable (80 μm - 5 mm) et 4 - 5 % de particules fines ($< 80 \mu\text{m}$). À des fins de comparaison, mentionnons que les stériles de la mine Golden Sunlight contiennent des quantités assez similaires de particules fines (jusqu'à 5 % $< 0,08 \text{ mm}$) (Azam et al., 2007). Une plus grande proportion de particules fines (jusqu'à 10 %) a été observée dans les stériles de la mine Laronde (Anterrieu et al., 2010). La granulométrie des stériles serait surtout liée à la nature de la roche excavée (résistance, minéralogie, etc.) et, à un moindre degré, au type d'exploitation de la mine (souterrain ou à ciel ouvert) et aux techniques d'extraction utilisées.

Porosité et indice des vides

La porosité ($n\%$) du milieu poreux représente le rapport du volume des pores au volume total :

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times 100 \quad (2.2)$$

où V_v – volumes des vides (ou pores) [L^3]
 V_t – volume total [L^3]
 e – indice des vides ($e = V_v/V_s$) [-]
 V_s – volume des grains solides [L^3]

La porosité totale d'un matériau est influencée par la distribution granulométrique des grains solides, leur forme et le degré de compaction (Kezdi, 1979; Aberg, 1992). On peut distinguer plusieurs types de porosité (Musy et Soutter, 1991). La porosité résiduelle est composée de pores isolés du système poral, qui ne participent pas à l'écoulement. Les pores communiquant, qui participent aux processus hydrogéologiques, forment la porosité effective (n_{eff}). La porosité effective peut à son tour être subdivisée en deux parties, la macroporosité et la microporosité. On peut définir les macropores comme les pores "où les phénomènes de capillarité sont inexistant" (Musy, 2005), et où les processus d'écoulement sont de type gravitaire. Les micropores représentent une porosité capillaire dont la petite taille réduit l'écoulement gravitaire de l'eau. Dans le cas de sols naturels, le diamètre des pores de 30 - 60 µm est généralement admis comme le diamètre limite qui permet de distinguer la macroporosité de la microporosité (Musy et Soutter, 1991).

Typiquement la porosité totale des stériles se situe entre 30 % et 50 % (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a; Hernandez, 2007; Azam et al., 2007). A la mine Tio (RTFT, Québec), la porosité des stériles *in situ* (proche de la surface) pourrait varier de 41 % à 62 % dans des endroits lâches des haldes (Lessard, 2011).

2.1.2 Caractéristiques hydrogéologiques des haldes

Facteurs d'influence

Le comportement hydrogéologique d'une halde à stériles dépend de nombreux facteurs. Morin et al. (1991) ont identifié cinq paramètres comme facteurs déterminants:

1. Les conditions climatiques, particulièrement la quantité de précipitations et les proportions relatives entre les précipitations, l'infiltration, l'évapotranspiration et le ruissellement.
2. La conductivité hydraulique des matériaux à l'intérieur de la halde à stériles.
3. Le régime d'écoulement : laminaire ou turbulent.
4. Les charges hydrauliques, les gradients et la position de la nappe phréatique dans ou sous la halde à stériles.
5. Les facteurs géochimiques : l'oxydation et la dissolution des minéraux, la migration des éléments et la précipitation des minéraux secondaires.

Dans ce travail, nous nous intéressons en premier lieu aux propriétés hydriques (hydrogéologiques) des stériles. Les paramètres qui influencent la conductivité hydraulique des stériles en conditions saturées (k_{sat}) et non saturées (k_{unsat}) seront considérés en détail. Dans les haldes à stériles, les écoulements d'eau se font surtout en conditions non-saturées. Dans ces conditions, il existe une relation complexe entre la teneur en eau volumique, la succion et la conductivité hydraulique des stériles. Selon Morin et al. (1991), la conductivité hydraulique des stériles dans une halde est contrôlée par les facteurs suivants:

- 1) La structure interne de la halde, y compris la stratification et la présence des voies d'écoulement préférentiel.
- 2) La granulométrie de la roche stérile.
- 3) La teneur en eau à l'intérieur de la halde à stériles.
- 4) Les gradients hydrauliques dans la halde.

Structure interne d'une halde à stériles

Il est bien connu que la structure interne d'une halde à stériles dépend directement de la méthode de construction (Aubertin et al., 2002a, 2002b, 2008). Les différentes techniques de construction des haldes ainsi que les caractéristiques particulières de leur structure interne sont décrites dans plusieurs travaux (Morin et al., 1991; Fala, 2002; Aubertin et al., 2002a, 2008). En règle générale, les stériles sont déversés à l'aide de camions porteurs ou de buttoirs du haut de la pente de la halde, ou le long de sa surface avec un régalage et compactage consécutifs. La ségrégation des matériaux pendant la phase de construction s'ajoute à l'hétérogénéité naturelle des roches stériles et peut influencer d'une manière significative le mouvement de l'eau à l'intérieur des empilements. Ainsi, la formation de strates à granulométrie relativement fine, compactées par la machinerie lourde, ainsi que la présence de couches inclinées subparallèles aux pentes peuvent mener à une anisotropie marquée de la conductivité hydraulique à l'intérieur de la halde (Martin et al., 2004; Azam et al., 2007; Aubertin et al., 2008).

La structure interne des haldes à stériles peut être étudiée à l'aide des méthodes géophysiques (Aubertin et al., 2008). Par exemple, Intissar (2009) a utilisé des mesures de la résistivité électrique des stériles de la halde Petit Pas à la mine Tio pour mettre en évidence l'alternance en profondeur des couches conductrices et des couches plus résistives. Ces travaux indiquent que les

couches conductrices sont composées de stériles avec une granulométrie relativement fine permettant de retenir plus d'eau. Dans l'étude d'Anterrieu et al. (2010), les méthodes géophysiques ont également aidé à évaluer la structure interne de la halde à stériles de la mine Laronde (Québec). Une corrélation entre la teneur en eau, la granulométrie des stériles et leur conductivité électrique a permis de détecter la présence d'une structure en couches au centre de la halde et une stratification inclinée parallèle à la pente près des bords de la halde (sur au moins un côté).

Les variations de la teneur en eau dans différentes zones de la halde ont un impact sur la distribution des gradients hydrauliques et de la conductivité hydraulique. Deux autres facteurs influencent l'écoulement, soit la quantité des précipitations et la topographie locale aux environs de la halde (Morin et al., 1991).

L'hétérogénéité considérable des haldes à stériles complique l'analyse de l'écoulement de l'eau. Une autre difficulté vient du fait que le mouvement de l'eau dans les haldes à stériles se produit dans des conditions non saturées. La compréhension des processus d'écoulement en milieu non saturé demande une connaissance des propriétés de rétention d'eau des matériaux et de leur fonction de perméabilité. Rappelons que cette fonction de perméabilité est usuellement représentée par la conductivité hydraulique du matériau en fonction de son degré de saturation en eau. Les notions de base sur la théorie d'écoulement de l'eau applicables aux stériles miniers sont présentées brièvement dans la prochaine section; des détails supplémentaires ont été présentées dans Fala (2002) et Hernandez (2007).

Conductivité hydraulique des stériles miniers

Comme on l'a vu précédemment, l'écoulement de l'eau dans une halde à stériles est influencé par plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, la conductivité hydraulique de la roche stérile est un paramètre d'importance primordiale. Pour les stériles d'origines diverses, la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) peut varier de 10^{-7} cm/s jusqu'à 1 cm/s (Morin et al., 1991). Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée estimées suite à des essais d'infiltration sur une halde à stérile de la mine Tio sont de l'ordre de 4×10^{-3} à 3×10^{-1} cm/s (Lessard, 2011). Il est important de souligner qu'une seule valeur de la conductivité hydraulique ne peut pas présenter une halde en entier. À cause de l'hétérogénéité granulométrique des roches stériles, de différents degrés de

compaction et des caractéristiques structurales des haldes liées à leur mode de construction, il existe des endroits de plus faible perméabilité à l'intérieur de la halde ainsi que des fractures ou des zones très perméables qui forment des voies d'écoulement préférentiel. En plus, la conductivité hydraulique des stériles dépend beaucoup du degré de saturation en eau qui peut varier considérablement dans le temps et dans l'espace. En conséquence, la conductivité hydraulique globale des stériles dans une halde peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Divers scénarios décrivant le mouvement de l'eau à l'intérieur d'une halde à stériles sont présentés dans Morin et al (1991). Suite à une revue de la littérature détaillée, ces auteurs mentionnent que la présence des canaux préférentiels peut influencer considérablement la circulation de l'eau dans les haldes. En plus, l'eau qui circule à l'intérieur d'une halde peut entraîner les particules solides, surtout celles qui composent la fraction la plus fine des stériles (ou les produits de décomposition). Les particules déplacées peuvent boucher les canaux existants, ce qui peut conduire à une diminution locale de la perméabilité de la halde avec le temps (Whiting, 1981). Pour toutes ces raisons, il faut parler de l'intervalle des valeurs quand on parle de la conductivité hydraulique d'une halde à stériles.

Migration des particules dans les stériles miniers

Les propriétés hydriques des stériles peuvent évoluer dans le temps. Une des principales raisons de tels changements est la migration des particules fines à travers une halde à stériles. La migration des particules fines peut influencer d'une manière directe ou indirecte la formation des effluents contaminés. Par exemple, les particules transportées avec de l'eau peuvent causer une augmentation ou une diminution locale de la conductivité hydraulique. Les minéraux réactifs peuvent être transportés avec les particules dans les parties de la halde favorables à l'oxydation (Morin et al., 1991). Selon les observations de Whiting (1981), les particules déplacées peuvent boucher les passages préférentiels de l'eau à l'intérieur d'une halde ou bien former une couche de faible perméabilité à la base ou dans la halde. L'étude de Wadsworth (1981) a démontré que dans une halde remplie de roches magmatiques et métamorphiques, la porosité initiale s'élevait à 35-40% mais elle a diminué jusqu'à 25% suite à la densification, la migration des fluides et l'érosion interne engendrée par la migration des particules dans ces fluides.

Plusieurs études ont confirmé que les précipitations peuvent initier le lessivage des particules fines, surtout dans la couche superficielle des stériles où elles sont entraînées par les eaux de ruissèlement et les eaux s'infiltrant à l'intérieur de la halde (Ricca, 1979; Harries et Ritchie, 1983). Ainsi, la couche supérieure des stériles peut devenir relativement plus perméable, ce qui favorise l'infiltration de l'eau et de l'air à l'intérieur de la halde.

Plusieurs études ont également démontré le rôle important de la matrice granulaire et des conditions hydrauliques dans les processus d'arrachement et de transport des particules dans un milieu poreux (Silliman, 1995; Massei et al., 2002; Benamar et al., 2005; Alhaddad et al., 2008). Ainsi, un gradient hydraulique élevé et de fortes vitesses d'écoulement favorisent la migration des particules lors des essais en laboratoire. Si les particules arrivent à sortir de l'éprouvette, des passages préférentiels dans la matrice des matériaux testés peuvent se développer, ce qui augmente la conductivité hydraulique. Si les particules mises en mouvement sont coincées dans les pores et bloquent les voies de passages de l'eau, une réduction de la conductivité hydraulique est plus probable. Les voies d'écoulement préférentiel dues à l'érosion interne jouent un rôle déterminant dans l'avancée des particules mobiles à travers le milieu poreux (Harvey et al., 1993; Powelson et al., 1993; Silliman, 1995). Au cours des essais de perméabilité sur les stériles de la mine Tio, Bourrel (2008) a observé une migration des particules fines accompagnée d'une augmentation de la conductivité hydraulique saturée de 0,03 cm/s à environ 0,2 cm/s.

Il faut aussi souligner que l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles se produit essentiellement en condition non saturée, sous une pression d'eau négative ou nulle, au-dessus de la nappe phréatique. Une bonne connaissance des propriétés de rétention d'eau des stériles et de l'évolution possible de la conductivité hydraulique en fonction de la succion ou de la teneur en eau du milieu s'avère indispensable pour l'analyse et la prédiction du comportement hydrogéologique d'une halde à stériles. Les outils d'évaluation de ces paramètres, ainsi que les principaux concepts théoriques sur l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux sont présentés dans la prochaine section.

2.2 Concepts théoriques sur l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux

2.2.1 Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau dans un milieu poreux saturé est gouverné par la loi de Darcy (Fetter, 2001) :

$$Q = k \frac{h_A - h_B}{L} A = kiA \quad (2.3)$$

où Q – débit d'eau [L^3/T],

k – coefficient de perméabilité de Darcy, ou conductivité hydraulique saturée (aussi k_{sat}) [L/T]

L – distance [L]

A – surface de l'échantillon perpendiculaire à l'écoulement [L^2]

h_A – charge hydraulique amont [L]

h_B – charge hydraulique aval [L]

i – gradient hydraulique, $\frac{h_A - h_B}{L}$ [-]

Dans l'équation 2.3 le terme « ki » représente la vitesse de Darcy (aussi appelée débit spécifique), ou la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau :

$$V_{Darcy} = k \frac{\Delta h}{L} = ki \quad (2.4)$$

où V_{Darcy} – vitesse de Darcy [L/T]

Δh – variation de la charge hydraulique [L]

L'écoulement à travers un milieu poreux s'effectue par les pores interconnectés constituant la porosité effective. La vitesse réelle de l'écoulement de l'eau à travers les pores se calcule selon l'équation suivante (Todd et Mays, 2005):

$$V_x = \frac{V_{Darcy}}{n_{eff}} = \frac{k_x i_x}{n_{eff}} \quad (2.5)$$

où	V_x	—	vitesse réelle de l'eau dans les pores dans la direction x [L/T]
	n_{eff}	—	porosité effective ($n_{eff} = (V_v/V_t)_{eff}$ [-])
	V_v	—	volume des vides (ou pores) [L^3]
	V_t	—	volume total [L^3]
	k_x	—	conductivité hydraulique [L/T]
	i_x	—	gradient hydraulique [-]

La loi de Darcy est valide pour l'écoulement laminaire d'un liquide. Dans les matériaux très grossiers comme les stériles miniers, il y a une probabilité que localement, dans les grands pores ou les fractures, l'écoulement puisse devenir turbulent. On utilise le nombre de Reynolds (Re) pour déterminer si l'écoulement du fluide correspond à un régime laminaire ou turbulent. On définit le nombre Re de la manière suivante :

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu} \quad (2.6)$$

où	Re	—	nombre de Reynolds [-]
	ρ	—	masse volumique du fluide [M/L ³]
	V	—	vitesse du fluide [L/T]
	d	—	diamètre moyen des pores, pour un écoulement dans un milieu poreux [L]
	ν	—	viscosité cinématique du fluide [L ² /T]
	μ	—	viscosité dynamique du fluide [FT/L ²]

Typiquement, les valeurs de Re supérieures à environ 1 à 10 indiquent que l'écoulement devient turbulent dans un milieu poreux (Freeze et Cherry, 1979).

L'équation de Darcy s'applique également aux écoulements en milieu non saturé, mais la conductivité hydraulique des matériaux varie alors en fonction de leur degré de saturation en eau. Les principales équations reliées aux écoulements non saturés seront présentées plus loin dans ce chapitre.

2.2.2 Conductivité hydraulique saturée

Mesures de la conductivité hydraulique saturée

Il existe différentes techniques pour mesurer la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des matériaux granulaires. Au laboratoire, on utilise surtout les essais de perméabilité standardisés, incluant les essais à charge constante et à charge variable (ASTM, 2006, 2007a). Une description détaillée de ces essais est présentée dans le chapitre 3 de ce mémoire, qui porte sur les méthodes expérimentales utilisées dans la présente étude. Sur le terrain, on peut utiliser divers essais. Dans le cas des stériles miniers, on peut par exemple utiliser les essais d'infiltration (Lessard, 2011). Lors d'un essai d'infiltration, lorsque tous les pores se remplissent d'eau, la capacité d'infiltration des matériaux diminue jusqu'à une valeur minimale constante qui est environ égale à la conductivité hydraulique saturée k_{sat} (Hillel, 1998).

Prédiction de la conductivité hydraulique saturée

La connaissance de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} d'un sol est nécessaire pour la solution de plusieurs problèmes hydrogéologiques et géotechniques. Les méthodes directes d'évaluation de ce paramètre, telles que les essais sur le terrain et en laboratoire, sont assez coûteuses et, souvent, difficiles à accomplir avec grande précision. Les résultats de tels essais ne sont valables que pour le matériau dans un état donné. Les méthodes de prédiction (estimation) de k_{sat} à partir de caractéristiques géotechniques de base des matériaux s'avèrent particulièrement utiles pour compléter les résultats d'essais. Les équations prédictives permettent d'évaluer l'effet d'une variation de l'état du matériau, afin d'estimer l'influence de divers facteurs (tels la granulométrie et la porosité). Ces prédictions aident aussi à mieux planifier le programme d'essais en fonction des résultats anticipés. De nombreuses équations empiriques ont été développées depuis les premières tentatives d'estimer la valeur de k_{sat} des sols (Hazen, 1911) en se basant sur la distribution granulométrique des particules. Toutes ces formules ont des restrictions quant à l'applicabilité à différents types de sols (Chapuis et Aubertin, 2003; Chapuis, 2004, 2012). En règle générale, les variables qui contrôlent la valeur de la conductivité hydraulique saturée dans ces équations peuvent être subdivisées en trois groupes (Kovács, 1981) :

- 1) Les paramètres qui reflètent les caractéristiques de fluide.
- 2) Les paramètres qui représentent les propriétés des particules qui composent le milieu poreux, y compris la distribution granulométrique et la forme des grains solides.
- 3) Les paramètres qui représentent l'effet de la porosité.

Dans cette étude, nous allons employer les modèles de prédiction de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) qui sont les plus souvent utilisés pour estimer la valeur de k_{sat} des rejets miniers. Les équations développées dans le cadre de ces modèles sont présentées dans ce qui suit.

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

$$k_{sat} \text{ (cm/s)} = \frac{Cg}{\mu_w \rho_w S_s^2 D_r^2 (1+e)} \frac{e^3}{(1+e)} \quad (2.7)$$

où	k_{sat}	–	conductivité hydraulique saturée [cm/s]
	C	–	constante du modèle ($C = 0,2 \times 100$, selon unités de S_s)
	g	–	accélération gravitationnelle ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
	e	–	indice des vides du matériau [-]
	μ_w	–	viscosité dynamique de l'eau ($\mu_w \approx 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ à 20°C)
	ρ_w	–	masse volumique de l'eau ($\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$ à 20°C)
	S_s	–	surface spécifique des grains solides [m^2/kg]
	D_r	–	densité relative des grains solides [-]

Modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) (Aubertin et al., 1996; Mbonimpa et al., 2002):

$$k_{sat} \text{ (cm/s)} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{(1+e)} C_U \frac{1}{D_{10}}^2 \quad (2.8)$$

où	k_{sat}	–	conductivité hydraulique saturée [cm/s]
	C_G	–	constante du modèle ($C_G = 0,1$)
	γ_w	–	poids unitaire de l'eau ($\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$)
	μ_w	–	viscosité dynamique de l'eau ($\mu_w \approx 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ à 20°C)
	e	–	indice des vides du matériau [-]

x	-	paramètre de tortuosité du modèle ($x \approx 2$)
D_{10}	-	diamètre (taille) des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [cm]
C_U	-	coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$) [-]

Évaluation de la surface spécifique

La surface spécifique (S_s), employée directement dans le modèle prédictif de KC et indirectement dans le modèle KCM, est une propriété géométrique importante du milieu poreux qui influence la conductivité hydraulique saturée. Elle est usuellement définie comme la surface totale des particules par unité de masse de solides. Il existe diverses techniques pour mesurer la surface spécifique. Les méthodes les plus souvent utilisées sont la méthode BET basée sur l'adsorption de gaz, tel que l'azote (N_2), dans des conditions sèches et la méthode basée sur l'adsorption des liquides polaires tels que le bleu de méthylène (Santamarina et al., 2002). Il y a aussi plusieurs moyens d'évaluer la surface spécifique des matériaux granulaires à partir de données granulométriques. La méthode proposée par Chapuis et Légaré (1992) est couramment utilisée avec le modèle de prédiction KC (Chapuis et Aubertin, 2003). La méthode de Chapuis et Légaré (1992) permet de calculer la surface spécifique (S_s) des matériaux à partir de leur courbe granulométrique selon l'équation suivante :

$$S_s (m^2/kg) = \frac{\alpha}{\rho_s} \sum [(P_{NoD} - P_{Nod})/d] \quad (2.9)$$

où	α	-	facteur de forme ($\alpha \approx 6$) [-]
	ρ_s	-	masse volumique des grains solides [kg/m ³]
	$P_{NoD} - P_{Nod}$	-	pourcentage par masse de particules plus petites que le diamètre D et plus grandes que le diamètre d
	D et d	-	diamètre (taille) des grains [m]

Dans cette méthode, les particules plus petites que le diamètre minimal identifié par l'analyse granulométrique sont représentées par un diamètre équivalent défini par l'équation suivante :

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{D_{min}^2}{3}} \quad (2.10)$$

où d_{eq} – diamètre équivalent des grains [m]
 D_{min} – diamètre minimal mesuré [m]

La surface spécifique est également définie et utilisée indirectement dans le modèle KCM (Mbonimpa et al., 2002) :

$$S_s (m^2/kg) = \frac{100}{\rho_s} \left[\frac{1}{\sqrt{C_d C_U^{1/6} D_{10}}} \right] \quad (2.11)$$

où ρ_s – masse volumique des grains solides [kg/m³]
 C_d – constante ($C_d = 0,01$)
 C_U – coefficient d'uniformité [-]
 D_{10} – diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [cm]
 100 – facteur de conversion des unités

Une troisième méthode pour estimer la surface spécifique utilise le diamètre équivalent des grains D_H inclus dans le modèle Kovács Modifié (MK, présenté plus loin) pour prédire la courbe de rétention d'eau (Aubertin et al., 1998, 2003) :

$$S_s (m^2/kg) = \frac{a \times 100}{\rho_s D_H} \quad (2.12)$$

où a – facteur de forme ($a \approx 10$) [-]
 ρ_s – masse volumique des grains solides [kg/m³]
 D_H – diamètre équivalent des grains (voir éq. 2.17) [cm]
 C_U – coefficient d'uniformité [-]
 D_{10} – diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [cm]
 100 – facteur de conversion des unités

Rappelons que le diamètre équivalent D_H des grains représente le diamètre d'une particule sphérique qui, dans le cas d'un mélange homogène, donne la même valeur de la surface

spécifique que la courbe granulométrique complète (Kovács, 1981). Le modèle MK est présenté en détail dans la prochaine section.

2.2.3 Propriétés de rétention d'eau

Courbe de rétention d'eau

La caractérisation des propriétés hydriques d'un milieu poreux dans les conditions non saturées en eau est souvent effectuée à partir de la courbe de rétention d'eau (CRE), qui relie la teneur en eau volumique des matériaux (θ) et la succion matricielle (ψ). La succion ψ est définie comme la différence entre la pression atmosphérique (u_a) et la pression (négative) de l'eau (u_w) dans la zone non saturée des sols ($\psi = u_a - u_w$). La courbe de rétention d'eau dépend de nombreux facteurs tels la granulométrie, la porosité et la minéralogie de la phase solide, la tortuosité du système des pores et le sens de l'écoulement (en mouillage ou en drainage). Les particules fines, argileuses ou siliceuses, qui ont une surface spécifique très grande, ont aussi une dimension des pores interstitiels très petite. La capacité de rétention de l'eau d'un matériau est plus grande lorsque les pores sont de petite taille et que la surface spécifique, qui augmente les forces d'adsorption des particules solides, est grande.

Le CRE est caractérisée par la présence de trois zones : une zone de saturation (zone I sur la figure 2.1) où θ est égale à la teneur en eau à saturation θ_s (\approx porosité n), une zone transitoire (zone II) où θ diminue avec une augmentation de la succion et une zone résiduelle où θ est proche de la teneur en eau résiduelle θ_r (zone III sur la figure 2.1). Ces zones sont délimitées par des points caractéristiques, soient : AEV ($\equiv \psi_a$) « air entry value » et WEV ($\equiv \psi_r$) « water entry value » (Barbour, 1998). En drainage, l'application d'une succion à un matériau initialement saturé mène à une réduction de la teneur en eau à partir d'une valeur critique de la succion pour laquelle les pores les plus grands commencent à se vider. Cette valeur critique de la succion correspond au « point (ou pression) d'entrée d'air », AEV (ψ_a), des matériaux (figure 2.1). Le point (ou pression) d'entrée d'eau WEV est défini par une succion minimale (ψ_r) nécessaire pour atteindre la teneur en eau résiduelle θ_r . Dans la zone de transition II, la courbe de rétention d'eau est contrôlée par la distribution de la taille des pores. Si une petite augmentation de succion entraîne une désaturation marquée, c'est-à-dire que la pente de la CRE est assez forte, cela signifie usuellement que la distribution de la taille des pores du sol est relativement homogène.

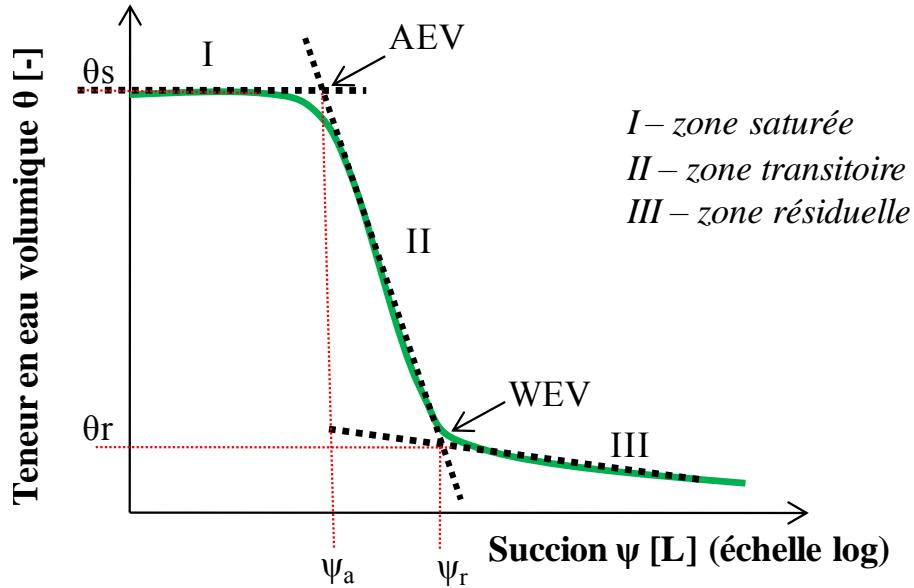


Figure 2.1 : Schématisation d'une courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques AEV ($\equiv \psi_a$, pression d'entrée d'air) et WEV ($\equiv \psi_r$, pression d'entrée d'eau); ici, la succion est exprimée en terme de charge de pression [L] sur une échelle semi-logarithmique.

Il existe plusieurs équations qui permettent de décrire la courbe de rétention d'eau à partir de données expérimentales (Gardner, 1958; Brooks et Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund et Xing, 1994). Le modèle de van Genuchten (1980) est le plus souvent utilisé pour sa simplicité et la possibilité de déduire une équation explicite de la conductivité hydraulique :

$$\theta = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^n]^m} \right) + \theta_r \quad (2.13)$$

- où θ – teneur en eau volumique [L^3/L^3]
 θ_s – teneur en eau volumique à saturation (\approx porosité n) [L^3/L^3]
 θ_r – teneur en eau volumique résiduelle [L^3/L^3]
 a – paramètre du modèle ($a \cong 1/AEV$) [L^{-1}]
 ψ – succion matricielle (charge de pression) [L]
 n – constante d'ajustement du modèle
 m – constante d'ajustement du modèle
(on utilise souvent $m = 1 - 1/n$ avec ce modèle)

Le modèle de van Genuchten (1980) ainsi que d'autres modèles cités ci-dessus sont introduits dans le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991) qui est couramment utilisé pour déterminer les paramètres de la courbe de rétention d'eau à partir de données expérimentales. Ces techniques expérimentales sont présentées dans divers ouvrages (Fredlund et Rahardjo, 1993; Dane et Topp, 2002). Le modèle de van Genuchten (1980) a été utilisé dans la présente étude.

Méthodes de prédiction de la courbe de rétention d'eau

Différents modèles ont été développés afin de prédire la courbe de rétention d'eau des matériaux à partir de leurs propriétés géotechniques de base (Arya et Paris, 1981; Haverkamp et Parlange, 1986; Aubertin et al., 1998). Ces modèles sont usuellement basés sur l'analyse de la distribution granulométrique qui est convertie à une distribution de la taille des pores ; la taille des pores est ensuite reliée à la teneur en eau et à la succion. Un modèle souvent utilisé pour les rejets miniers est celui de Kovács Modifié (MK) (Aubertin et al., 1998, 2003). Le modèle MK est utilisé dans ce projet.

Le modèle MK est représenté par une série d'équations qui ont été élaborées en considérant que l'eau est retenue dans les matériaux granulaires par des forces de capillarité, qui sont responsables pour la saturation capillaire (S_c), et des forces d'adhésion qui causent la saturation d'adhésion (S_a) (Kovács, 1981). Ainsi, selon le modèle MK, le degré de saturation des matériaux dépend de deux composante, S_c et S_a (Aubertin et al., 1998, 2003):

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - (1 - S_c)(1 - S_a) \quad (2.14)$$

- où θ – teneur en eau volumique [-]
 n – porosité totale du milieu poreux [-]
 S_c – degré de saturation dû à la capillarité [-]
 S_a – degré de saturation dû à l'adhésion [-]

La saturation capillaire agit principalement à faible succion. La saturation d'adhésion est usuellement prédominante dans les conditions de succion plus forte lorsque pratiquement toute l'eau capillaire est déjà drainée (tel qu'illustré à la figure 2.2). Dans le modèle MK, les deux composantes, S_c et S_a , sont définies à partir de propriétés géotechniques de base des matériaux,

incluant le diamètre effectif des grains D_{10} , le coefficient d'uniformité C_U , l'indice des vides e et la densité des grains solides ρ_s .

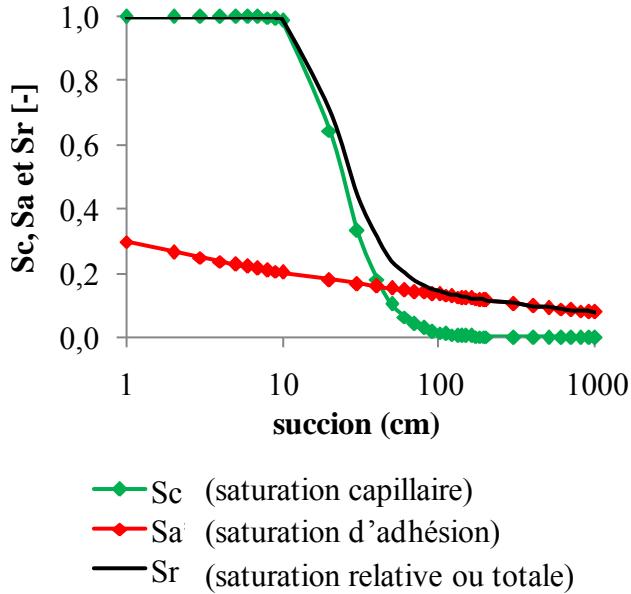


Figure 2.2 : Exemple de CRE avec l'apport de la saturation capillaire S_c et de la saturation d'adhésion S_a selon le modèle MK (éq. 2.14) (Aubertin et al., 1998, 2003).

La saturation capillaire est une fonction de la distribution statistique de la dimension des pores :

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m(h_{co}\psi)^2] \quad (2.15)$$

où h_{co} – remontée capillaire équivalente [L]
 ψ – succion matricielle [L]
 m – coefficient de la distribution de taille des pores [-]
 $(m \approx I/C_U$ pour les matériaux granulaires)

Dans le modèle MK, la remontée capillaire équivalente h_{co} est un paramètre clé. La définition de la remontée capillaire h_{co} a été développée en partant de la formulation bien connue utilisée pour calculer la hauteur de la remontée de l'eau dans un tube capillaire. Pour les matériaux granulaires, la valeur de h_{co} est définie par les équations suivantes :

$$h_{co} = \frac{\sigma_w \cos \beta_w}{\gamma_w} \frac{a}{eD_H} = \frac{b}{eD_{10}} \quad (2.16)$$

$$D_H = [1 + 1,17 \log(C_U)] D_{10} \quad (2.17)$$

$$b = 0,75 / (1,17 \log(C_U) + 1) \quad (2.18)$$

- où h_{co} – remontée capillaire équivalente [L]
 σ_w – tension de surface de l'eau [0,073 N/m à 20°C]
 β_w – angle de mouillage ou angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides [$\beta_w \approx 0$ en drainage]
 γ_w – poids volumique de l'eau [9,8 kN/m³ à 20°C]
 e – indice des vides [-]
 a – facteur de forme ($a \approx 10$) [-]

Ici, les valeurs de D_{10} et de D_H sont exprimées en cm.

La saturation d'adhésion (S_a), utilisée dans le modèle MK, est surtout due aux forces d'attraction électrostatiques entre la surface des grains et les molécules bipolaires de l'eau. Dans les conditions non saturées, ces forces conduisent à la formation d'une pellicule d'eau « résiduelle » autour des particules solides (et à leurs points de contact). Selon le modèle MK, la diminution progressive du degré de saturation (S_r) avec l'augmentation de succion conduit les matériaux vers un état complètement sec à de grandes succions ($\psi_o = 10^7$ cm). L'équation pour le calcul du degré de saturation d'adhésion prend la forme suivante :

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad (2.19)$$

- où C_ψ – variable du modèle qui amène la teneur en eau à zéro à une valeur de succion correspondant à un état sec des matériaux (selon Fredlund et Xing, 1994) :

$$C_\psi = 1 - (\ln(1 + \psi/\psi_r) / \ln(1 + \psi_0/\psi_r)) \quad (2.20)$$

- a_c – coefficient d'adhésion ($a_c = 0,01$ pour les matériaux granulaires, pour des paramètres de succion exprimés en cm) [-]

- ψ_n – paramètre de normalisation ($\psi_n = 1$ cm ou $\psi_n = 10^{-3}$ atm selon des unités utilisées pour exprimer ψ) [L]
- ψ_r – succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle (ou succion d'entrée d'eau) [cm]

La valeur de la pression d'entrée d'eau $WEV = \psi_r$ (figure 2.1) peut être évaluée sur la base de paramètres géotechniques des matériaux, selon l'équation suivante:

$$\psi_r = \frac{0,42}{(eD_H)^{1,26}} \quad (2.21)$$

Pression d'entrée d'air (AEV)

Le paramètre *AEV* (ou ψ_a) est une des principales caractéristiques des matériaux en milieu non saturé. Comme on l'a déjà mentionné, ψ_a correspond à la succion matricielle à partir de laquelle les plus grands pores commencent à se vider. Il y a plusieurs méthodes permettant d'évaluer la valeur du *AEV*. La première, et la plus utilisée, est la méthode des tangentes (figure 2.1) qui permet d'obtenir *AEV* à partir de la courbe de rétention d'eau (Fredlund et Xing, 1994). Quand la courbe de rétention d'eau est représentée sur une échelle semi-logarithmique, elle peut être idéalisée comme trois lignes étroites : horizontale pour la portion saturée de la courbe; inclinée pour la zone de transition; subhorizontale (de faible pente) pour la zone résiduelle. L'intersection entre des deux premières lignes donne la succion qui correspond au début de la désaturation, soit le *AEV*.

Une deuxième méthode consiste à estimer *AEV*, ou ψ_a , comme l'inverse du paramètre α du modèle descriptif de van Genuchten (1980), qui peut être obtenu par la procédure d'ajustement des points expérimentaux à la CRE théorique avec le logiciel RETC:

$$\psi_\alpha \cong \frac{1}{\alpha} \quad (2.22)$$

Les valeurs du *AEV* obtenues selon cette méthode sont souvent imprécises, car elles ne sont pas sensibles au changement de la pente des CRE des différents matériaux dans la zone transitoire de la courbe (Aubertin et al., 1998).

Il est aussi possible d'estimer *AEV* selon le modèle MK :

$$\psi_\alpha \cong \frac{b_1}{(eD_H)^{x_1}} \quad (2.23)$$

où b_1, x_1 – paramètres du modèle MK ($b_1 = 0,6; x_1 = 0,8$) (Aubertin et al., 2003)

Une autre méthode est basée sur l'hypothèse que lorsqu'on approche la succion correspondante à *AEV*, des canaux d'air interconnectés sont créés dans l'espace poreux du matériau. Ceci se produit quand le degré de saturation du matériau est autour de 90%. Partant de ce fait, Aubertin et al. (1998) ont proposé de déterminer le *AEV* comme la succion correspondant à 90% de saturation des matériaux.

2.2.4 Fonction de perméabilité

Lorsqu'un matériau poreux commence à se désaturer, des discontinuités apparaissent dans la trajectoire de l'eau interstitielle. Elles sont accompagnées de la formation de ménisques mettant en jeu les forces de rétention capillaire (Musy et Soutter, 1991). De plus, suite à la désaturation des matériaux, la disparition des zones de vitesses d'écoulement d'eau relativement élevées situées au centre des plus gros pores, oblige l'eau à circuler le long des parois des pores ce qui augmente la résistance à l'écoulement d'eau en milieu non saturé par l'intermédiaire des forces de frottement. L'eau est aussi obligée à circuler dans les pores plus petits et à contourner les grands pores qui sont déjà vides, ce qui augmente la tortuosité et la longueur de son parcours. Pour toutes ces raisons, la résistance globale à l'écoulement augmente rapidement avec la diminution du degré de saturation des matériaux, ce qui diminue la conductivité hydraulique du milieu non saturé. La variation de la conductivité hydraulique avec la teneur en eau des matériaux est habituellement appelée fonction de perméabilité $k(\theta)$ (ou $k(\psi)$). L'allure de la courbe caractéristique $k(\theta)$ (figure 2.3) indique que la conductivité est très faible au-dessous de la teneur

en eau résiduelle et quelle augmente progressivement jusqu'à la valeur maximale qui correspond à la conductivité hydraulique saturée k_{sat} (Musy et Soutter, 1991).

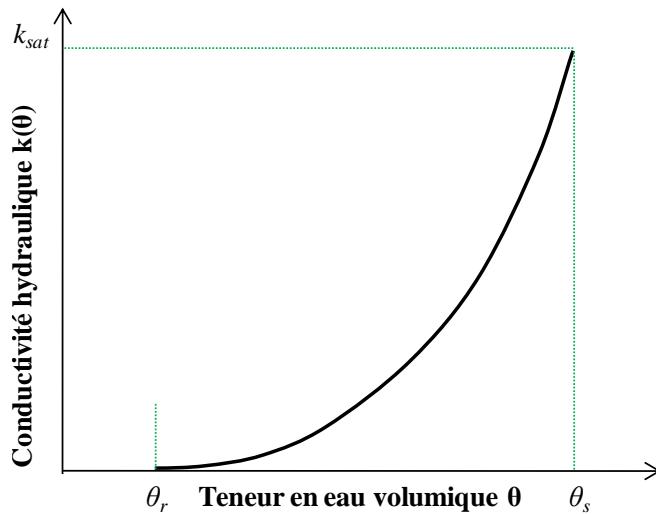


Figure 2.3 : Schéma général de la variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la teneur en eau du milieu (Musy et Soutter, 1991).

En milieu non saturé, la conductivité hydraulique est principalement contrôlée par la répartition de la taille des pores, tout comme la courbe de rétention d'eau (CRE). Il est possible d'évaluer la fonction de perméabilité d'un matériau à partir de sa courbe de rétention d'eau. À cet égard, il existe quelques expressions mathématiques permettant de déduire la fonction de perméabilité en utilisant les paramètres d'ajustement de la courbe de rétention d'eau. Parmi les plus utilisées, on peut mentionner les équations de Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980) et Mualem (1976), et de Fredlund et Xing (1994).

Dans la présente étude, on utilise le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991) et le modèle de van Genuchten (1980) et Mualem (1976) afin de prédire la fonction de perméabilité des roches stériles. Les résultats de ces modèles concordent assez bien avec les résultats expérimentaux, surtout quand les CRE utilisées sont ajustées aux valeurs expérimentales et $\psi \leq \psi_r$ (Mbonimpa et al., 2006). L'équation qui définit la fonction $k(\theta)$ selon ces modèles peut s'exprimer comme suit :

$$k(\theta) = k_{sat} \theta^{1/2} \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.24)$$

- où $k(\theta)$ – fonction de perméabilité ou la conductivité hydraulique non saturée [L/T]
 k_{sat} – conductivité hydraulique saturée [L/T]
 θ – teneur en eau volumique [-]
 m – constante d'ajustement utilisée pour la description de la courbe de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980) ($m = 1 - 1/n$)
 n – constante d'ajustement utilisée pour la description de la courbe de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980) (voir éq. 2.13)

2.2.5 Écoulement d'eau dans un milieu à double porosité

Les sols naturels et d'autres matériaux granulaires (tels que les stériles miniers) présentent souvent des hétérogénéités structurales causées, entre autres, par la présence de pores de tailles significativement différentes (i.e macropores *vs* micropores). La vitesse d'écoulement de l'eau peut être assez différente dans les macropores par rapport à celle dans la matrice plus fine (et plus serrée) des matériaux. Cette situation peut exister par exemple dans des sols agricoles (Beven et Germann, 1982), les roches fracturées (Wang, 1991), les terres diatomées (Burger et Shackelford, 2001), les sols agrégés et d'autres matériaux. L'écoulement accéléré de l'eau dans les macropores (surtout lorsqu'ils sont saturés) se traduit par l'apparition de voies d'écoulement préférentiel. La différence des propriétés hydrauliques des macropores (chemins préférentiels) et de la matrice poreuse (présentant une microporosité) est une propriété typique d'un milieu à double porosité. De telles caractéristiques des écoulements ont aussi été observées dans les haldes à stériles (Nichol et al., 2005; Eriksson et al., 1997).

De nombreux modèles ont été développés afin de représenter les mouvements de l'eau (ou d'un soluté) dans les matériaux à double porosité (Jarvis et al., 1991; Gerke et van Genuchten, 1993; 1996; Larsbo et al., 2005). L'approche utilisée dans ces modèles consiste à distinguer deux régions d'écoulement qui possèdent des propriétés hydrauliques différentes mais qui interagissent constamment entre elles. De nombreuses études ont également démontré que les matériaux avec une distribution bimodale des pores (incluant les sols et roches fracturés et d'autres matériaux à double porosité) sont caractérisés par des propriétés de rétention d'eau atypiques qui se

manifestent notamment par des courbes de rétention d'eau bimodales, comprenant deux paliers (à faible succion). Ces conditions engendrent deux régimes d'écoulement et de rétention d'eau : un écoulement quasi-saturé dominé par les voies d'écoulement préférentiel (à travers les macropores) et un écoulement matriciel non-saturé lié à la rétention d'eau dans les micropores et dans des endroits à granulométrie plus fine (Durner, 1994; Burger et Shackelford, 2001; Brouyère, 2006).

Comme on le verra plus loin, les résultats de la présente étude suggèrent la possibilité d'appliquer le concept de double porosité aux stériles miniers en conditions saturées et non-saturées.

2.3 Étude expérimentale de laboratoire des propriétés hydriques des stériles miniers

La mesure des propriétés hydriques (ou hydrogéologiques) des stériles miniers peut se faire à différentes échelles. Les essais qui reflètent mieux les conditions naturelles sont les essais menés à grande échelle dans les conditions contrôlées *in situ*. Cependant, ces essais sont difficiles à réaliser et interpréter et couteux, car ils nécessitent la construction de bassins d'infiltration (Gamache-Rochette, 2004; Aubertin et al., 2008; Smith et al., 2009; Lessard, 2011). Les essais menés à l'échelle intermédiaire en laboratoire dans de grandes colonnes instrumentées représentent également une source utile d'information sur les propriétés hydriques des stériles. Ce type d'essais a été utilisé avec succès pour l'étude des stériles provenant des différentes mines du Québec et pour d'autres matériaux grossiers à granulométrie étalée (Aubertin et al., 2005, 2008; Hernandez, 2007; Bourrel, 2008; Intissar, 2009). Les principes de base pour mener ces essais en colonnes sont présentés dans ce qui suit.

2.3.1 Essais en colonnes instrumentées

La technique des essais de drainage en colonne, appliquée à un gravier par Bussière (1999) et développée ensuite plus en détail pour des sables par Bédard (2003) et Chapuis et al. (2007) permet d'obtenir la courbe de rétention d'eau et la fonction de perméabilité non saturée de matériaux grossiers. Dans le cas des stériles miniers, la procédure de l'essai consiste à remplir

une colonne verticale avec les matériaux, saturer la colonne avec de l'eau désaérée, obtenir la valeur de la conductivité hydraulique saturée à l'aide d'essais de perméabilité, drainer la colonne en laissant l'eau s'écouler librement à la sortie au bas de la colonne et, finalement, retirer les matériaux par tranches à partir du haut de la colonne en mesurant la teneur en eau des matériaux retirés en fonction de l'élévation (Z) au-dessus de la nappe libre (Hernandez, 2007). La position de la nappe libre est fixée par la position du tuyau de sorti d'eau. A la fin du drainage, il faut s'assurer que la colonne ait atteint un équilibre hydrostatique (c.-à-d. $\psi=Z$, où la succion est évaluée par des capteurs de pression). La description détaillée de chaque étape de l'essai de drainage en colonne avec les équations et les exemples de calculs nécessaires pour vérifier le degré de saturation des matériaux à l'intérieur de la colonne sont présentés dans Chapuis et al. (2007) et Hernandez (2007). Puisque cette méthode est utilisée dans la présente étude, le protocole expérimental de ce type d'essais est présenté en détail dans le chapitre 3 de ce mémoire.

À la fin de cet essai, on peut obtenir la courbe de rétention d'eau avec la succion représentée par l'élévation au-dessus de la nappe libre et la teneur en eau des matériaux déterminée au démontage de la colonne (figure 2.4). La branche « saturée » de la CRE correspond aux matériaux qui se trouvent au bas de la colonne sous le niveau de la nappe et à quelques centimètres au-dessus de la nappe où les matériaux restent saturés à cause de la remontée capillaire de l'eau (pour $Z < \psi = AEV$). La teneur en eau volumique à saturation (θ_s) est théoriquement égale à la porosité (n) des matériaux. La distance entre la position de la nappe et le haut de la zone saturée dans la colonne représente la frange capillaire qui correspond à la succion (pression, point) d'entrée d'air AEV dont la valeur dépend principalement de la granulométrie et la porosité des matériaux testés. La position de la nappe libre au bas de la colonne est suffisamment profonde pour que la teneur en eau au sommet de la colonne atteigne θ_r (figure 2.4).

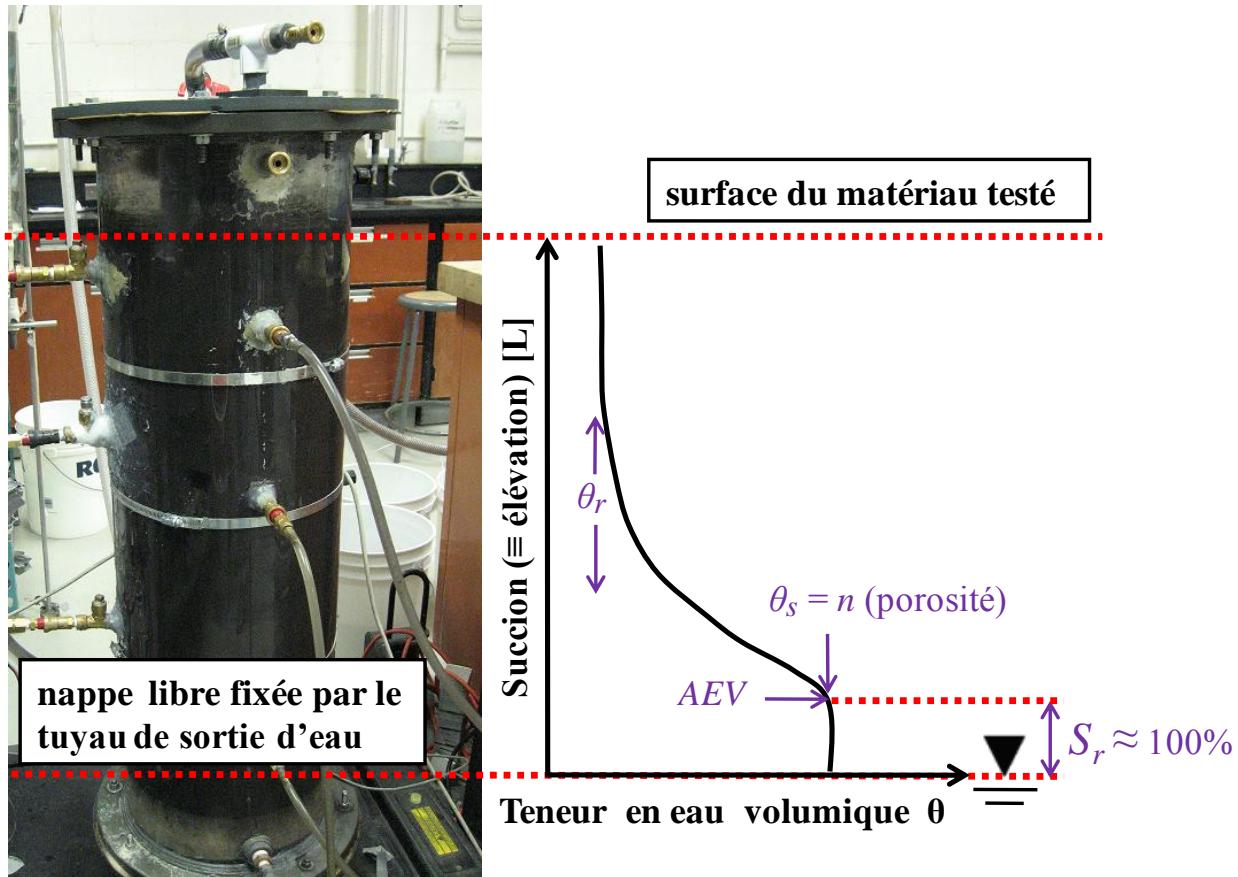


Figure 2.4 : Obtention de la courbe de rétention d'eau à l'aide des essais de drainage en colonne.

2.3.2 Essais de traceur

Les essais de traceur peuvent servir à évaluer la dispersion des éléments et la présence de voies d'écoulement préférentiel dans des matériaux testés, ainsi qu'à déterminer les paramètres d'advection et de dispersion. Le principe d'utilisation des essais de traceur est basé sur la théorie du transport d'un soluté dans un milieu poreux (Domenico et Schwartz, 1997). Les processus physiques qui gouvernent la migration d'un traceur (non réactif) ou d'un contaminant dans un milieu poreux sont bien connus. Il s'agit de l'advection, la dispersion cinématique et de la diffusion moléculaire. Brièvement, l'advection est le processus de transport d'un soluté dans la direction et avec la vitesse de l'eau interstitielle. La dispersion est un mécanisme d'avancement d'un soluté avec un mélange mécanique de l'eau propre, qui est liée à l'hétérogénéité des vitesses

et à la tortuosité. Ce phénomène de malaxage crée une zone de la concentration élevée juste devant le front d'advection du contaminant (zone de dilution). La diffusion moléculaire est un mécanisme de déplacement d'un soluté causé par un gradient de concentration. Dans le cas des essais de traceur sur les stériles miniers en colonne, la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment grande pour que le terme diffusif devienne pratiquement négligeable. Le transport d'un soluté dans les stériles lors des essais en colonne est donc régi principalement par l'advection et la dispersion cinématique.

Les essais de traceur permettent d'obtenir l'information nécessaire pour comprendre quel mécanisme de transport (l'advection, la dispersion cinématique ou la diffusion moléculaire) domine dans les matériaux étudiés.

Un essai de traceur en laboratoire consiste typiquement à injecter l'eau avec une concentration pré-déterminée de traceur à l'entrée de la colonne expérimentale. En mesurant le débit et l'évolution de la composition de l'eau à la sortie de la colonne à intervalles de temps contrôlés, on peut construire une courbe de concentration du traceur en fonction du temps, comme celle montrée à la figure 2.5.

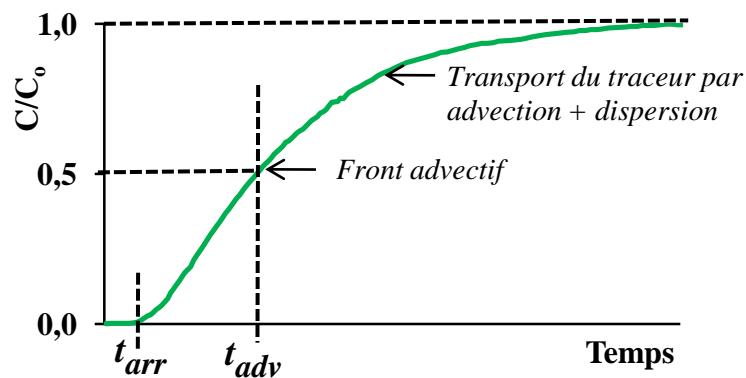


Figure 2.5 : Schématisation de la courbe de concentration du traceur obtenue au cours d'un essai de traceur en fonction du temps, avec le temps d'arrivée du traceur t_{arr} et le temps d'arrivée du front advectif t_{adv} ; C est la concentration du traceur à la sortie de l'échantillon au temps t ; C_0 est la concentration initiale du traceur dans l'eau injectée dans l'échantillon (adapté de Domenico et Schwartz, 1997).

Une analyse des courbes de concentration en fonction du temps peut apporter des informations sur la dispersion du traceur et sa vitesse d'avancement. La forme de la courbe ainsi que les « temps caractéristiques », définis plus loin, permettent d'évaluer l'apport des mécanismes d'advection et de dispersion lors de la migration d'un soluté dans le matériau testé. Dans le cas du déplacement du traceur par advection seule, il y aura un changement brusque de la concentration du traceur dans l'eau recueillie au point d'échantillonnage. En pratique, cela n'arrive jamais dans des matériaux naturels à cause du phénomène de dispersion du traceur.

Dans un milieu poreux, la dispersion cinématique est contrôlée par (Fetter, 2001) :

Les vitesses des différentes particules d'eau dans le système poreux selon leur trajectoire (la vitesse varie de l'état pratiquement immobile près de la surface des particules à une vitesse maximale au centre des pores).

La taille variable des pores et la présence de voies d'écoulement préférentiel (la vitesse est maximale dans les plus gros pores et dans les fractures).

La déviation des trajectoires à partir de la direction principale à cause de la tortuosité (la vitesse linéaire réelle selon la trajectoire est plus grande que la vitesse du front advectif).

On considère usuellement que deux mécanismes participent au processus de dispersion. Il s'agit de la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire. On peut donc quantifier la dispersion par le coefficient de la dispersion hydrodynamique selon l'équation suivante (Domenico et Schwartz, 1997) :

$$D = D_c + D_e \quad (2.25)$$

où D – coefficient de dispersion hydrodynamique [L^2/T]

D_c – coefficient de dispersion cinématique [L^2/T]

D_e – coefficient effectif de diffusion en milieu poreux [L^2/T] ;

$D_e = \tau D_d$ (où τ – facteur de tortuosité, D_d – coefficient de diffusion moléculaire [L^2/T]) (Fetter, 2001)

Afin d'évaluer l'apport relatif de la dispersion cinématique et de la diffusion moléculaire dans le transport d'un soluté, on peut utiliser le nombre de Peclet, qui est défini comme suit (Pfannkuch, 1962; Domenico et Schwartz, 1997):

$$Pe = \frac{V_x D_H}{D_e} \quad (2.26)$$

où V_x – vitesse linéaire d'écoulement interstitiel dans la direction principale x [L/T]

D_H – taille représentative ou diamètre effectif des grains [L]

On peut diviser les régimes de transport en quatre classes, selon le nombre de Peclet (Pfannkuch, 1962) :

- 1) $Pe < 0,01$ – La diffusion moléculaire est le mécanisme principal de transport par rapport à la dispersion cinématique.
- 2) $0,01 < Pe < 4$ – Les deux mécanismes, la diffusion moléculaire et la dispersion cinématique, participent au transport du soluté.
- 3) $4 < Pe < 10^4$ – La dispersion cinématique est le mécanisme principal de transport par rapport à la diffusion moléculaire.
- 4) $10^4 < Pe < 10^6$ – La dispersion cinématique est le seul mécanisme de transport, la diffusion moléculaire étant négligeable.

Dans les matériaux grossiers, tels que les stériles miniers, les vitesses d'écoulement sont tellement grandes que le processus de diffusion moléculaire devient pratiquement négligeable (c.-à-d. $D_e \ll D_c$). Le nombre de Peclet déterminé pour les stériles de la mine Tio serait de l'ordre de $Pe = 47,5$ selon Intissar (2009) et de $Pe = 107$, selon Bui (2007), ce qui classe ces matériaux dans la groupe où la dispersion cinématique est le mécanisme principal de transport par rapport à la diffusion moléculaire.

L'équation pour le calcul de la dispersion mécanique peut s'écrire comme suit (Domenico et Schwartz, 1997) :

$$D_L \approx D_c = \alpha_L V_x \quad (2.27)$$

où D_L – le coefficient de dispersion longitudinale (dans la direction principale de l'écoulement) [L^2/T]

D_c – le coefficient de dispersion cinématique [L^2/T]

α_L – la dispersivité longitudinale (dans la direction principale de l'écoulement) [L] : ce paramètre peut varier avec l'échelle du problème

V_x – la vitesse linéaire d'écoulement interstitiel dans la direction principale [L/T]

Comme on l'a mentionné auparavant, il existe quelques « temps caractéristiques » qui peuvent être déterminés lors d'un essai de traceur. Ceux-ci permettent d'estimer l'ampleur des processus de dispersion dans les matériaux testés. On évalue ainsi le temps de transport par advection t_{adv} (figure 2.5) qui est défini par l'équation:

$$t_{adv} = \frac{L}{V_x} \quad (2.28)$$

où L – la distance entre le point d'injection d'un soluté et le point de mesure (souvent la longueur de l'échantillon) [L]

V_x – la vitesse linéaire d'écoulement interstitiel dans la direction principale [L/T]

L'équation 2.28 peut servir également à calculer la vitesse d'écoulement V_x si l'on connaît le temps advectif t_{adv} . La vitesse V_x est liée à la vitesse de Darcy par l'équation 2.5. On évalue aussi le temps d'arrivée des premières molécules du traceur t_{arr} qui correspond à la vitesse maximale d'écoulement par les voies d'écoulement préférentielles (figure 2.5). Dans le cas de l'utilisation du sel (NaCl) comme traceur, le temps de la première arrivée du traceur peut être détecté assez facilement à partir des mesures de la conductivité de l'eau à l'aide d'un conductivimètre (voir chapitre 3).

2.3.3 Essais d'infiltration

Une autre technique pour caractériser l'écoulement de l'eau et pour estimer l'importance des écoulements préférentiels dans les stériles consiste à conduire les essais d'infiltration (Gamache-Rochette, 2004; Aubertin et al., 2008; Lessard, 2011). L'infiltration est définie comme le processus d'entrée d'eau à la surface des sols (Hillel, 1998). Le taux d'infiltration dépend des propriétés des sols, de leur degré de saturation et des conditions climatiques, particulièrement de l'intensité des précipitations (fonte des neiges, précipitations intenses et rapides). Le taux d'infiltration I est défini comme le volume d'eau pénétrant dans le matériau par unité de surface par unité de temps. Il est généralement exprimé en mm/h ($\text{mm}^3/\text{mm}^2/\text{h}$) ou en m/h ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) dans les conditions naturelles, ou en cm/s dans les essais en laboratoire. La valeur maximale de I qui représente la capacité d'infiltration I_c du sol correspond au taux maximum auquel le sol donné

peut absorber l'eau à travers sa surface. Au début d'une phase d'infiltration, le sol peut se trouver à un état pratiquement sec ou à un état de la saturation résiduelle, et sa capacité d'infiltration est très grande à cause de forts gradients hydrauliques. Dans le cas de précipitations prolongées, le sol se sature en eau et sa capacité d'infiltration diminue jusqu'à une valeur minimale qui correspond approximativement à la conductivité hydraulique saturée k_{sat} (figure 2.6) (Horton, 1940; Freeze et Cherry, 1979; Hillel, 1998).

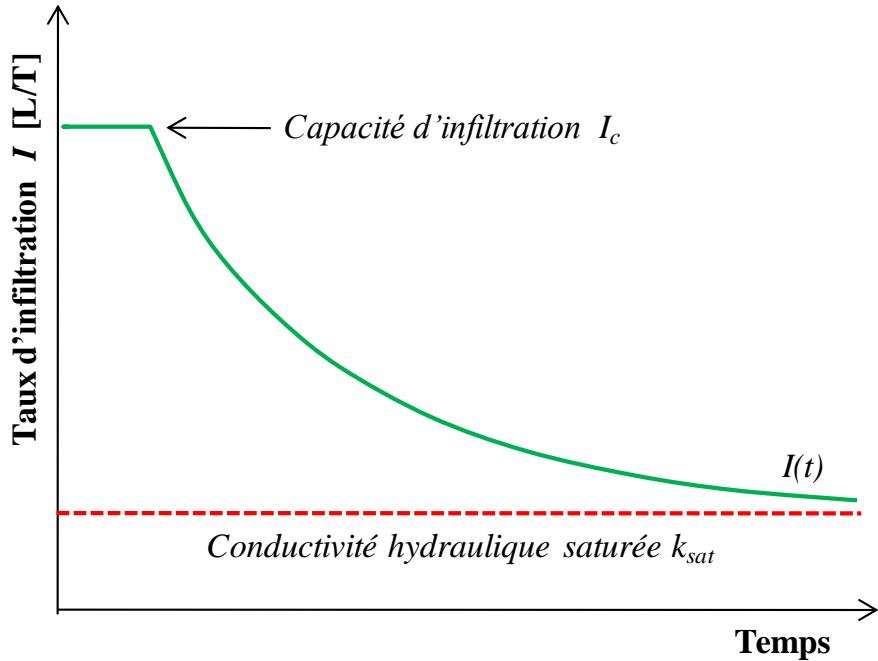


Figure 2.6 : Schéma de l'évolution du taux d'infiltration dans un sol en fonction du temps (Fetter, 2001).

La teneur en eau initiale du sol et sa conductivité hydraulique saturée représentent les principaux facteurs contrôlant le taux d'infiltration. Ces deux paramètres sont utilisés dans de nombreuses équations pour le calcul du taux d'infiltration. Les autres principaux facteurs d'influence incluent (Musy, 2005) :

- 1) Le type de sol, incluant sa texture, sa granulométrie et les anomalies de la structure qui influencent les forces de capillarité et d'adhésion et, par conséquent, les forces de succion qui en dépendent.

2) La porosité (n) et la compaction de la surface du sol qui, dans le cas des stériles miniers, serait due principalement à l'utilisation de machinerie lourde qui conduit souvent à la formation d'une couche dense, et moins perméable. La figure 2.7 montre schématiquement les différents types de régimes d'infiltration en fonction du temps selon la densité de la couche superficielle de sol.

Il existe plusieurs modèles théoriques et équations empiriques qui permettent de décrire le processus d'infiltration en fonction du temps et obtenir la variation spatiale et temporelle de la teneur en eau dans le sol au cours de l'infiltration.

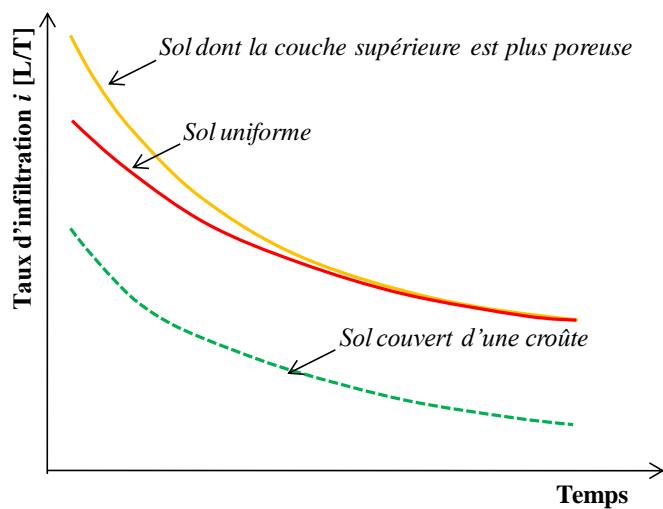


Figure 2.7 : Régimes d'infiltration en fonction du degré de compaction de la couche superficielle de sol (Musy et Soutter, 1991).

Les modèles de Green et Ampt (1911) et Philip (1957), les équations de Horton (1940) et Smith (1972) sont parmi les plus utilisés. Puisque les connaissances approfondies de la théorie d'infiltration et les détails des solutions analytiques au problème d'infiltration ne sont pas nécessaires dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, nous allons omettre la description des modèles et des équations citées ci-dessus; ils ont été décrits en détail dans le travail de Lessard (2011).

Dans le cas des stériles miniers, des essais d'infiltration ont été réalisés à grande et à petite échelle au cours de travaux de terrain de Gamache-Rochette (2004) et de Lessard (2011). Ces essais ont permis d'évaluer la capacité d'infiltration des stériles en appliquant une charge h sur une partie délimitée de leur surface. Pour cela, on a mesuré le flux d'alimentation nécessaire pour maintenir la charge à un niveau constant (méthode à charge constante), ou la variation du volume d'eau infiltré à chaque intervalle de temps (méthode à charge variable) (Musy, 2005).

Les principes à la base des essais d'infiltration en laboratoire sont les mêmes que pour les essais sur le terrain. Le protocole détaillé et les équations utilisées dans les essais d'infiltration effectués dans la présente étude sont présentés au chapitre 3 de ce mémoire.

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES D'ESSAIS

3.1 Méthodologie expérimentale

L'étude des caractéristiques hydriques (hydrogéologiques) des roches stériles à l'aide d'essais de laboratoire constitue une étape importante de l'analyse du comportement environnemental des haldes à stériles. Cette analyse requiert usuellement des résultats d'étude en laboratoire et sur le terrain, combinés avec des travaux théoriques afin de bien comprendre et prédire le comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles (Aubertin et al., 2005, 2008; Bussière et al., 2011). Les résultats de travaux expérimentaux peuvent notamment servir à développer et calibrer les modèles prédictifs développés aux fins d'évaluation des propriétés hydrogéologiques des matériaux (Aubertin et al., 1996, 1998, 2003; Mbonimpa et al., 2002; Chapuis et Aubertin, 2003). La plupart des modèles prédictifs existants ne sont toutefois pas adaptés aux matériaux ayant une granulométrie aussi étalée que les stériles miniers. Il existe, par conséquent, une forte demande pour des données expérimentales de bonne qualité afin d'établir une corrélation entre les propriétés hydrogéologiques des roches stériles, notamment leur conductivité hydraulique saturée ainsi que la courbe de rétention d'eau, et leurs caractéristiques géotechniques de base (comme la distribution granulométrique et la porosité). Aussi, les résultats des essais de laboratoire peuvent servir à constituer une base de données expérimentales pour aider à calibrer les modèles numériques utilisés ensuite lors des simulations des écoulements saturés et non saturés dans les haldes à stériles (Fala et al., 2003, 2005, 2008; Aubertin et al., 2005). La méthodologie développée dans ce projet a justement pour objectif principal l'étude systématique en laboratoire des propriétés hydriques de stériles miniers.

Il existe un certain nombre de protocoles d'essais de laboratoire qui ont été spécialement développés ou ajustés pour l'étude des propriétés hydriques des roches stériles (Hernandez, 2007; Gaillot, 2007; Bourrel, 2008) et de matériaux analogues (Bédard, 2003; Chapuis et al., 2007). Dans cette étude, nous allons utiliser une méthode d'essais en colonne qui permet de déterminer la conductivité hydraulique des matériaux relativement grossiers et d'établir leur courbe de rétention d'eau.

Les caractéristiques typiques des stériles rendent la réalisation et l'interprétation des essais de laboratoire assez compliqués, notamment en raison de leur granulométrie très étalée. En outre,

ces matériaux comportent des cailloux et des blocs rocheux dont la taille peut aller jusqu'à un mètre (ou plus). Toutefois, la taille maximale des grains qu'on peut inclure dans les essais en colonnes (diamètre ≈ 30 cm), sans contrevenir aux normes de l'ASTM, est de l'ordre de 50 mm. On devra donc limiter la granulométrie des échantillons à des tailles de grains inférieures à environ 50 mm.

L'étude de diverses fractions granulométriques des roches stériles peut aider à établir une corrélation entre les caractéristiques hydriques de ces matériaux et leurs propriétés physiques de base. Ces corrélations peuvent servir à extrapoler les résultats produits à l'échelle de laboratoire sur les fractions granulométriques tronquées, vers l'échelle plus large d'une halde à stériles dont la granulométrie comporte de particules beaucoup plus grossières.

Il existe une autre difficulté pour l'étude des caractéristiques des roches stériles en laboratoire, liée à la présence dans le même matériau de cailloux et de particules beaucoup plus fines dont les dimensions n'excèdent pas quelques microns (McKeown et al., 2000; Barbour et al., 2001; Aubertin et al., 2002a). Un tel étalement dans la distribution granulométrique contribue à la variabilité et à l'instabilité de la structure interne de la roche stérile, car les particules fines, entraînées par l'eau interstitielle, peuvent migrer dans la matrice (Gaillet, 2007; Aubertin et al., 2008). Ce déplacement de particules peut mener à la formation de voies d'écoulement préférentiel, et il peut aussi changer localement les propriétés du matériau. Des études préliminaires sur les stériles miniers ont établi qu'une migration de particules fines peut survenir lors des essais de perméabilité (Gaillet, 2007; Bourrel, 2008). Nous avons donc porté une attention particulière à ce phénomène et à son éventuelle influence sur l'évolution des propriétés hydriques des roches stériles.

Les matériaux et les différentes techniques expérimentales employées dans ce projet sont décrits dans ce chapitre.

3.2 Matériaux étudiés

La présente étude porte sur la réalisation d'essais en laboratoire sur des échantillons de roches stériles de la mine du lac Tio (Rio Tinto - Fer et Titane, RTFT) située au nord-est de Havre-Saint-Pierre (Québec). Ces stériles sont caractérisés par un grand étalement de la taille des particules,

l'angularité des grains et une composition minéralogique variable. Ces matériaux sont assez représentatifs des stériles miniers et des matériaux à granulométrie étalée en général. La masse totale des échantillons reçus de la mine était de 448 kg ; ceux-ci ont été prélevés sur une des haldes de la mine Tio à un endroit où l'on retrouve des roches stériles riches en ilménite (FeTiO_3). Ces matériaux sont identifiés comme stériles QIT1. Un autre type de stériles à la mine Tio (QIT2) est caractérisé par une composition plus riche en anorthite, c.-à-d. plagioclase calco-sodique ($(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$). Ces stériles QIT2 ont été caractérisés dans les travaux antérieurs de Gaillot (2007), Bourrel (2008) et Intissar (2009).

En laboratoire, le stérile QIT1 a été d'abord tamisé manuellement pour récupérer le passant au tamis 50 mm, en prenant soin de ne pas perdre les poussières (pour conserver la fraction fine de l'échantillon intacte). Séparée ainsi, la fraction < 50 mm a été homogénéisée manuellement et humidifiée à une teneur en eau massique w de 3% environ. La première colonne expérimentale a été préparée avec ce matériau. Ensuite, chaque fois qu'on démontait et remontait la colonne suivante, on enlevait les cailloux (à la main ou à l'aide de tamis), selon la granulométrie désirée. On a ainsi préparé différentes fractions granulométriques des stériles, soit les fractions passant aux tamis ayant une ouverture de 50, 28, 19, 10, 5 et 2 mm. On considère ces échantillons comme étant représentatifs du matériau reçu (pour la granulométrie tronquée).

Deux essais en colonne additionnels ont été réalisés avec des échantillons (QIT1) qui avaient déjà été utilisés auparavant dans plusieurs tests par Gaillot (2007) et Bourrel (2008). Ces échantillons ont été reconstitués à partir de différentes fractions granulométriques préalablement séparées. Le tamisage mécanique de ces échantillons peut avoir entraîné une perte de particules fines suite à la production de poussières (due aux fortes vibrations de l'appareil). De plus, ces échantillons reconstitués, qui ont été déjà soumis aux essais de perméabilité, peuvent avoir déjà perdu des particules fines par lessivage. On a étudié ici deux fractions granulométriques de ces échantillons «lessivés», soit les fractions passant aux tamis de 50 mm et celles passant au tamis 28 mm. Finalement, on a aussi monté une colonne supplémentaire avec le matériau QIT1 (intact) passant au tamis de 50 mm dans un état plus lâche, sans aucune compaction lors du montage de la colonne.

Le système de numérotation des échantillons testés dans cette étude est présenté à la figure 3.1.

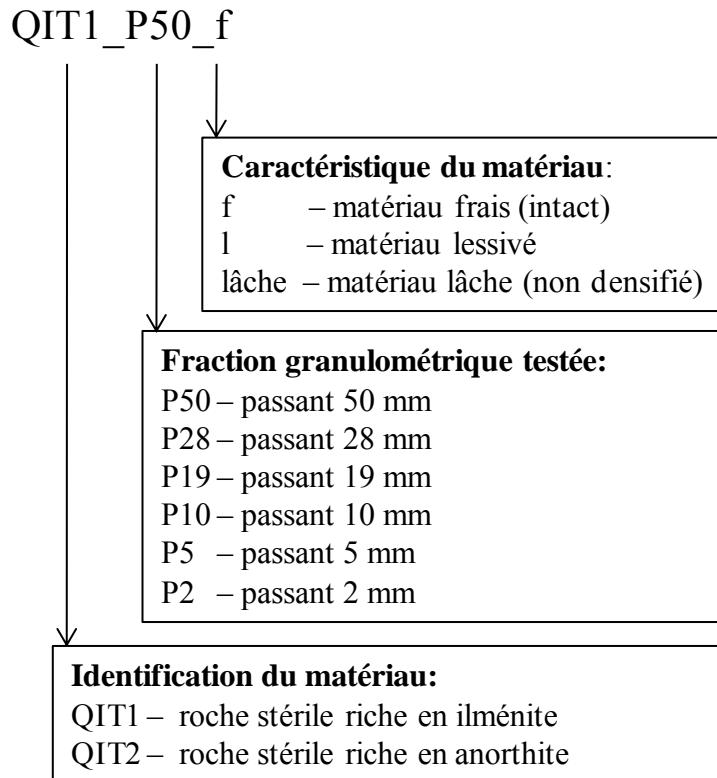


Figure 3.1 : Identification des échantillons testés dans la présente étude.

3.3 Caractérisation des propriétés de base

La caractérisation des propriétés physiques de base des échantillons de roches stériles inclut l'analyse granulométrique, la détermination de la densité relative des grains et de la masse volumique sèche, ainsi que l'évaluation de la porosité des matériaux testés dans les colonnes expérimentales. On a porté une attention particulière à la technique d'échantillonnage des matériaux étudiés. Dans la plupart des cas, on utilisait la technique de quartage manuel pour obtenir les échantillons en quantité nécessaire à l'essai et, en même temps, éviter la perte de particules fines (Germaine et Germaine, 2009). À certaines étapes d'échantillonnage, on utilisait également un séparateur de laboratoire qui permet de diviser uniformément un matériau granulaire en deux parties (figure 3.2). Dans ce cas, les échantillons ont été préalablement humidifiés pour réduire la formation de poussière.

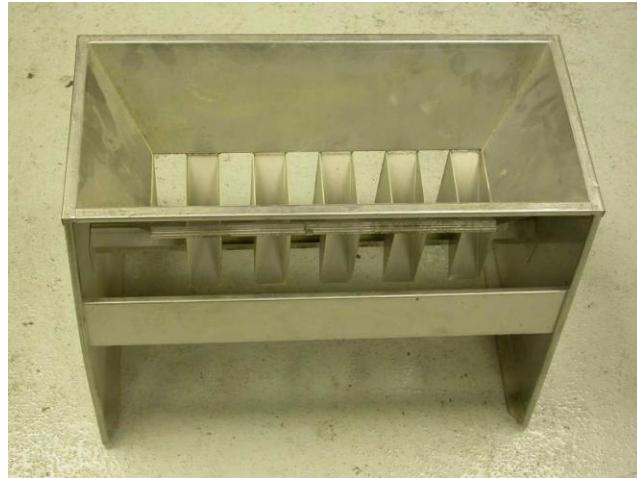


Figure 3.2 : Séparateur de laboratoire.

Les résultats des différents tests sont présentés sous forme de moyennes arithmétiques \bar{x} des valeurs individuelles mesurées. Afin d'évaluer l'étalement (dispersion) de certaines mesures, nous donnons également l'écart type (S_{n-1}) calculé selon l'équation suivante (Germaine et Germaine, 2009):

$$S_{n-1} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)} \quad (3.1)$$

où \bar{x} – moyenne arithmétique des valeurs mesurées
 x_i – valeur individuelle mesurée
 n – nombre des valeurs obtenues

3.3.1 Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques ont été réalisées selon la norme D422 de l'ASTM (2007b). Étant donné que les stériles sont des matériaux à granulométrie très étalée, cette analyse se fait en trois étapes. En un premier temps, on tamise l'échantillon au tamis de 5 mm. Les deux fractions du matériau ainsi séparées, soit les particules retenues au tamis de 5 mm et les particules passant au tamis de 5 mm, sont ensuite soumises au tamisage à travers deux séries de tamis différents, selon la norme D422. Ensuite, l'analyse à l'hydromètre de la fraction passant aux tamis de 2 mm est réalisée afin de déterminer la distribution granulométrique de la fraction fine (incluant les grains

de taille inférieure à 80 µm). L’analyse à l’hydromètre se fait selon la procédure décrite dans la même norme ASTM D422. Les résultats obtenus lors de ces trois étapes sont ensuite combinés et placés sur la même courbe granulométrique cumulative.

Analyse au laser

Pour les particules fines qui se sont déplacées à l’intérieur des colonnes lors des essais de perméabilité (récupérées à la sortie), la granulométrie a aussi été déterminée à l’aide d’un appareil laser de type Masterizer (Malvern). Comparée à l’analyse à l’hydromètre, cette méthode est plus rapide et elle permet de mieux quantifier la taille des particules fines (la taille minimale des particules pouvant être quantifiée par l’analyse au laser est de 0,05 µm et de 1,3 µm pour l’analyse à l’hydromètre). Les analyses au laser ont été effectuées au laboratoire analytique de l’UQAT (Rouyn-Noranda, Québec).

Paramètres de la courbe granulométrique

Divers paramètres ont été évalués pour la caractérisation des matériaux selon les courbes granulométriques (McCarthy, 2007):

D_{10} – diamètre des particules correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [L]

D_{30} – diamètre des particules correspondant à 30% passant sur la courbe granulométrique [L]

D_{50} – diamètre des particules correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique [L]

D_{60} – diamètre des particules correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique [L]

C_U – coefficient d’uniformité, défini par la relation : $C_U = D_{60}/D_{10}$ (équation 2.1)

C_C – coefficient de courbure, défini par la relation :

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.2)$$

3.3.2 Densité relative des grains

La détermination de la densité relative D_r des grains solides (*specific gravity Gs*) (Société Canadien de Géotechnique, 1994) a été effectuée selon deux méthodes normalisées. Pour la fraction passant au tamis 5 mm, on a utilisé la méthode du pycnomètre à eau, selon la norme

D854 de l'ASTM (2010). Pour les échantillons contenant des particules plus grosses que 5 mm, on a utilisé la méthode de la pesée hydrostatique des échantillons submergés selon la norme C127 de l'ASTM (2007c). En pratique, les stériles contenant des particules grossières ont été divisés au préalable en deux fractions: i) la fraction passant au tamis 5 mm qui a été analysée à l'aide du pycnomètre à l'eau; et ii) la fraction retenue au tamis 5 mm qui a été analysée par pesée hydrostatique. La densité relative moyenne de l'échantillon a été calculée selon l'équation suivante (ASTM, 2010):

$$D_r = \frac{1}{\frac{R}{100 \times D_r(R)} + \frac{P}{100 \times D_r(P)}} \quad (3.3)$$

où R – pourcentage des particules retenues au tamis 5 mm

P – pourcentage des particules passant au tamis 5 mm

$D_r(R)$ – densité relative de la fraction retenue au tamis 5 mm

$D_r(P)$ – densité relative de la fraction passant au tamis 5 mm

Quelques tests sur la fraction plus fine des stériles, plus précisément sur la fraction passant au tamis 1,25 mm, ont également été réalisés. Le but de ces mesures est d'évaluer si la valeur du paramètre D_r (liée à la composition minéralogique des roches stériles) varie en fonction de la granulométrie des échantillons. On voulait aussi évaluer si des variations de la densité du matériau se produisent à l'intérieur de la colonne lors d'éventuels déplacements des particules fines dans la matrice des stériles.

Trois échantillons pour chaque matériau testé ont été analysés selon la norme C127 de l'ASTM. L'écart type des valeurs obtenues (S_{n-1} , équation 3.1) ne devrait pas dépasser 0,005. Si c'était le cas, on cherchait la source d'erreur. Dans la plupart des cas, il était possible de régler le problème après une recalibration des pycnomètres. Sinon, on répétait les mesures afin d'améliorer sa reproductibilité.

3.3.3 Masse volumique sèche, indice des vides et porosité

La masse volumique sèche (ρ_d), l'indice des vides (e) et la porosité (n) sont évaluées pour chaque tranche des matériaux testés au montage et au démontage des colonnes expérimentales. On

calcule d'abord la masse volumique ρ_d et l'indice des vides e , en utilisant les données de montage (ou démontage) des colonnes, selon les équations suivantes:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_T} \quad (3.4)$$

$$\rho_d = D_r(1 - n)\rho_w = \frac{D_r\rho_w}{1+e} \quad (3.5)$$

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (3.6)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} = D_r\rho_w \quad (3.7)$$

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{M_s}{D_r\rho_w} \quad (3.8)$$

$$n(\%) = \left(\frac{e}{1+e} \right) \times 100 = \left(\frac{V_v}{V_t} \right) \times 100 = \left(\frac{V_t - V_s}{V_t} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_t - V_s}{V_s} = \frac{D_r\rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (3.10)$$

où M_s — masse des grains solides [M]

V_T — volume total de l'échantillon [L^3]

D_r — densité relative des grains [-]

n — porosité [-]

e — indice des vides [-]

g — accélération gravitationnelle [L/T^2]

V_s — volume des grains solides [L^3]

V_v — volume des vides [L^3]

γ_d — poids unitaire sec [F/L^3]

ρ_d — masse volumique sèche [M/L^3]

ρ_s — masse volumique des grains solides [M/L^3]

ρ_w — masse volumique de l'eau [M/L^3]

Dans les calculs suivants, les valeurs moyennes de e (et n) ont été déterminées pour la colonne entière. Il faut noter que lors du montage des colonnes, les matériaux ont été densifiés de façon identique afin d'avoir les indices des vides semblables pour toutes les couches et tous les essais. Cependant, la présence de cailloux dans les matériaux testés rendait cette tâche difficile. En règle

générale, la masse volumique sèche ρ_d , l'indice des vides et la porosité des matériaux testés variaient entre $2,9 - 3,3 \text{ g/cm}^3$, $0,25 - 0,4$ et $0,2 - 0,3$, respectivement. Les valeurs individuelles des caractéristiques de chaque couche sont présentées à l'annexe 3.

3.4 Mesures des propriétés hydriques

Les caractéristiques hydriques (hydrogéologiques) abordées dans ce projet comprennent la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et la courbe de rétention d'eau (CRE). On a aussi étudié la migration de particules fine dans la matrice de la roche stérile. L'analyse de la structure interne des stériles à l'échelle de laboratoire a aussi été effectuée selon leur hétérogénéité, la présence éventuelle de voies d'écoulement préférentiel et d'une double porosité. Pour chaque fraction granulométrique du matériau testé, la procédure expérimentale comprenait (par ordre d'exécution):

- 1) la préparation de l'échantillon;
- 2) le montage de la colonne instrumentée avec la mise en place du matériau par couche;
- 3) la saturation en eau des matériaux dans la colonne;
- 4) les essais de perméabilité en colonne;
- 5) l'essai de traceur (pour les échantillons QIT1_P50_lâche et QIT1_P5_f);
- 6) l'essai de drainage;
- 7) l'essai d'infiltration (pour les colonnes QIT1_P50_lâche et QIT1_P10_f);
- 8) le démontage de la colonne avec mesures de masses et de l'épaisseur de chaque couche pour évaluer la porosité et la teneur en eau massique (w) et volumique (θ) des matériaux;
- 9) l'analyse granulométrique et la détermination de la porosité (n) et de la densité relative (D_r) de trois échantillons par colonne démontée, soit de la couche du haut, du milieu et du bas de la colonne.

La liste des principaux essais et mesures réalisés dans le cadre de ce projet est présentée au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Liste des essais et mesures en colonne.

Identification	Essai de perméabilité		Essai de traceur	Essai d'infiltration	Courbe de rétention d'eau
	en colonne	au perméamètre			
QIT1_P50_1	X				X
QIT1_P50_f	X				X
QIT1_P50_f2	X				X
QIT1_P50_lâche	X		X	X	X
QIT1_P28_1	X				X
QIT1_P28_f	X				X
QIT1_P19_f	X				X
QIT1_P10_f	X	X		X	X
QIT1_P5_f	X	X	X		X
QIT1_P2_f		X			

3.4.1 Préparation du matériau

Pour le montage de chaque colonne, il fallait préparer environ 200 kg de matériau. La préparation consistait à une séparation de la fraction granulométrique désirée, l'humidification du stérile ($w \approx 3\%$) et son homogénéisation (à l'aide d'une pelle sur le plancher). Ensuite, le matériau était couvert d'une pellicule plastique et laissé au repos pendant au moins 24 heures afin d'uniformiser la teneur en eau.

3.4.2 Montage des colonnes instrumentées

Dans la présente étude, des colonnes de plexiglas transparentes préfabriquées ont été utilisées ; les dimensions sont 29 cm de diamètre intérieur sur 1 mètre de hauteur. Selon la norme ASTM régissant les essais de perméabilité (D 2434, ASTM, 2006), le diamètre maximal des particules testées dans les colonnes de 29 cm de diamètre devrait être d'environ 24 à 36 mm, pour une taille 8 à 12 fois inférieure au diamètre de la colonne. Dans nos essais, le diamètre des colonnes utilisées est donc au moins 10 fois plus grand que la taille de la plus grande particule présente dans les fractions des stériles passant de 28 à 5 mm, ce qui est en accord avec la norme ASTM D 2434 (2006). Les essais sur les fractions plus grossières des stériles, QIT1_P50_f1,f2,l et QIT1_P50_lâche (avec une taille atteignant 50 mm), ne répondent pas strictement à l'exigence de la norme car le diamètre de la colonne représente dans ce cas-là seulement 5,8 fois la taille de la plus grande particule. Dans ces conditions, des empilements désordonnés de gros cailloux à

l'intérieur de la colonne pourraient augmenter artificiellement l'hétérogénéité des matériaux. Pour cette raison, des précautions ont été prises pour réduire l'effet de la présence de gros cailloux sur le régime d'écoulement à l'intérieur des colonnes. Ainsi lors du montage de ces colonnes, les plus grosses particules ont été déposées manuellement une à une afin d'éviter qu'elles ne se touchent et qu'elles ne touchent les parois de la colonne en formant des ponts qui peuvent créer des vides. Pour ces échantillons, la proportion de ces cailloux dont la taille dépasse la taille maximale permise par la norme (i.e. 3,7 cm pour les essais en colonne de 29 cm de diamètre) est inférieure à 7%, ce qui est relativement bas et ne devrait pas affecter le régime d'écoulement à l'intérieur de la colonne.

Le choix de la hauteur minimale de la colonne expérimentale est basé sur la remontée capillaire jusqu'à la valeur résiduelle de teneur en eau (θ_r) tel qu'expliqué dans Hernandez (2007). Dans cette étude, on a utilisé une colonne de 1 m, sauf pour l'essai QIT1_P5_f où elle était d'environ 2 mètres (diamètre de 10 cm).

Les protocoles de montage et de démontage des colonnes expérimentales ont été décrits en détail dans plusieurs travaux (Hernandez, 2007; Gaillot, 2007; Bourrel, 2008). Leur description détaillée est présentée à l'annexe 1. En règle générale, on a suivi les protocoles précités. Cependant, quelques modifications ont été apportées à la procédure de montage. On a ajouté une couche d'environ 8 cm de sable filtrant au fond de colonnes QIT1_P19_f et QIT1_P10_f afin de retenir les particules fines entraînées par l'eau lors des essais de perméabilité sur les stériles.

Après avoir rempli la colonne, on procédait à sa saturation avec de l'eau distillée et désaérée. Contrairement à la procédure d'essai de drainage pour les matériaux plus uniformes décrit par Chapuis et al. (2007), on ne mettait pas la colonne sous succion (sous vide) pendant la saturation afin d'éviter le déplacement des particules fines. Rappelons que la migration des particules fines dans la matrice des stériles est relativement facile en raison de la distribution granulométrique très étalée et de l'hétérogénéité de la structure.

La saturation a été effectuée par mouillage du bas vers le haut de la colonne avec un gradient très faible (débit d'eau entrant faible) en vue d'éviter la migration des particules fines. Étant donné que la succion n'était pas appliquée, le processus de saturation par écoulement d'eau désaérée pouvait prendre jusqu'à 2 semaines. Le degré de saturation dans la colonne a été calculé selon la procédure décrite par Chapuis et al. (2007). La description détaillée de ces calculs et les résultats

sont présentés à l'annexe 2. Une fois que le degré de saturation en eau atteint 95% ($\pm 2\%$) ou plus, les capteurs de pression et les piézomètres sont installés et les essais de perméabilité peuvent démarrer. Des capteurs de pression, modèle Omega PX240 avec plages de mesure de pression de 2,5 à 250 psi (17 – 1700 kPa), ont été utilisés. Ces capteurs ont été calibrés au préalable à 8V à l'aide de colonnes d'eau avec une hauteur contrôlée. Les piézomètres sont conçus avec des tubes verticaux transparents branchés aux parois de la colonne expérimentale (figure 3.3).

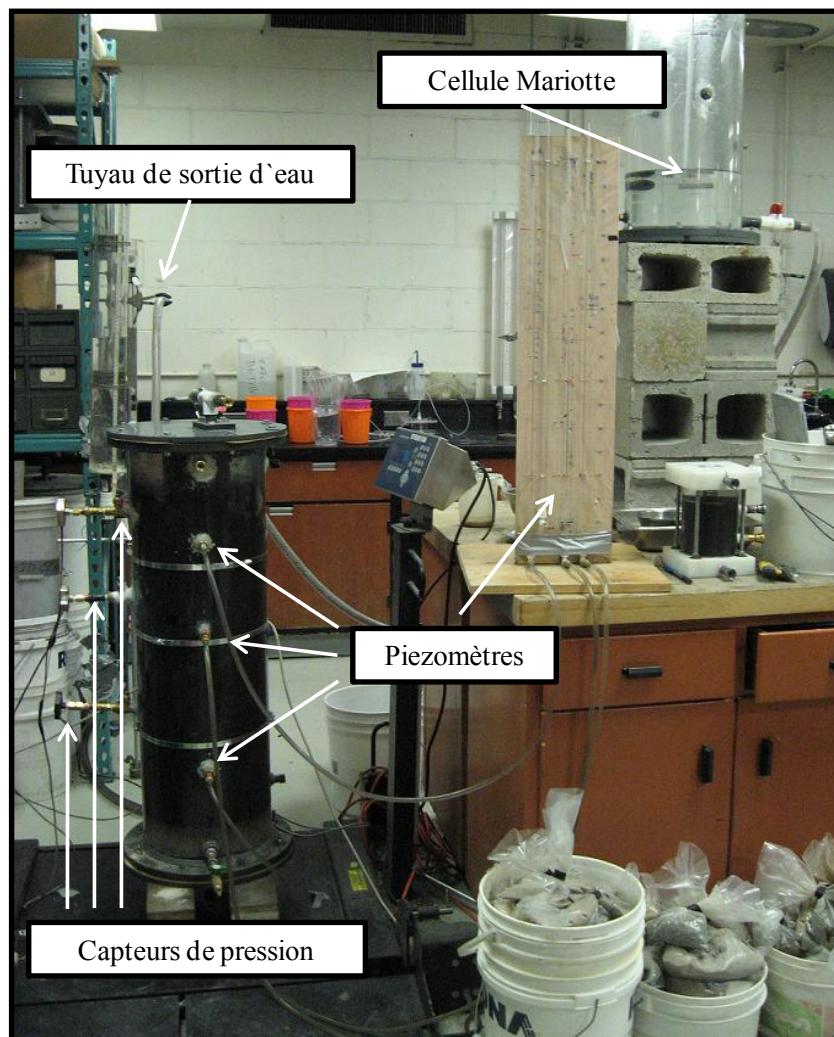


Figure 3.3 : Colonne instrumentée utilisée pour réaliser les essais de perméabilité et de drainage.

3.4.3 Essais de perméabilité

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des roches stériles a été déterminée à l'aide d'essais de perméabilité à charge constante ou à charge variable, dans les grandes colonnes (pour les fractions passant aux tamis de 5 mm à 50 mm) et dans des perméamètres standards (pour les fractions passant aux tamis de 2 mm, 5 mm et 10 mm).

La description des grandes colonnes a été présentée dans la section précédente (section 3.4.2). Les perméamètres standards (10 cm de diamètre intérieur et 17 cm de hauteur) ont des parois rigides fabriqués de plexiglas. Ils sont équipés de deux piézomètres à tube de 7,6 mm de diamètre intérieur.

Les essais de perméabilités dans les grandes colonnes ont été menés selon l'ordre dans lequel ils sont énumérés ci-dessous :

- 1) trois essais à charge constante avec un gradient hydraulique faible, soit $i (= \frac{\Delta h}{\Delta L})$ d'environ 0,2 , suivis par un essai à charge variable;
- 2) trois essais à charge constante avec un gradient $\frac{\Delta h}{\Delta L} = 1$, suivis par un essai à charge variable;
- 3) huit essais à charge constante avec des gradients $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ variant de 1,5 à 2,9, suivis par un essai à charge variable;
- 4) un essai à charge constante à faible gradient hydraulique $\frac{\Delta h}{\Delta L} = 0,2$.

Au total, entre 15 et 20 essais de perméabilité ont été réalisés pour chaque matériau testé. Les résultats détaillés de ces essais sont fournis au chapitre 4 et à l'annexe 4. Mentionnons que les essais de perméabilité à gradient hydraulique élevé ($>>1$) ne sont pas réalistes par rapport aux conditions naturelles typiques pour les haldes à stériles. Le but de ces essais était d'inciter les particules fines à se déplacer à l'intérieur de la colonne expérimentale. Ce nombre relativement élevé de mesures a été nécessaire afin d'évaluer si la conductivité hydraulique changeait avec le temps suite à l'éventuelle migration de particules fines. Cependant, le nombre de ces essais a été réduit progressivement, car il est devenu évident que, bien qu'il ait eu un déplacement des particules fines dans les matériaux étudiés, ceci n'affectait pas significativement leur conductivité hydraulique qui demeurait stable durant toute la séquence expérimentale.

Pour chaque essai, la valeur de k_{sat} obtenue à la température ambiante T a été corrigée pour obtenir la valeur normalisée à 20°C selon l'équation suivante (Germaine et Germaine, 2009):

$$k_{sat}(20^\circ C) = k_{sat}(T) \times \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ C}} \quad (3.11)$$

où $k_{sat}(20^\circ C)$ – conductivité hydraulique saturée à 20°C [L/T]
 $k_{sat}(T)$ – conductivité hydraulique saturée à la température du test [L/T]
 μ_T – viscosité de l'eau à la température du test [Pa·s]
 $\mu_{20^\circ C}$ – viscosité de l'eau à 20°C ($=10^{-3}$ Pa·s)

Dans l'interprétation, les colonnes QIT1_P19_f et QIT1_P10_f au fond desquelles nous avions placé une couche de sable filtrant ont été considérées comme des systèmes stratifiés. Ainsi, le calcul de la conductivité hydraulique verticale dans la couche de stériles placée sur la couche de sable se faisait en utilisant l'équation suivante (Domenico et Schwartz, 1997):

$$k_{eq} = \frac{z_{stériles} + z_{sable}}{\frac{z_{stériles}}{k_{stériles}} + \frac{z_{sable}}{k_{sable}}} \quad (3.12)$$

où k_{eq} – conductivité hydraulique équivalente verticale pour le sol stratifié
 $(\equiv k_{sat}$ mesurée lors de l'essai en colonne)
 $z_{stériles}$ – épaisseur de la couche de stériles [L]
 z_{sable} – épaisseur de la couche de sable [L]
 $k_{stériles}$ – conductivité hydraulique dans la couche de stériles [L/T]
 k_{sable} – conductivité hydraulique dans la couche de sable [L/T]

En sachant les valeurs de k_{eq} et le k_{sable} ($k_{sable} = 0,1$ cm/s ; obtenue des mesures au perméamètre), il est possible de déterminer la valeur de $k_{stériles}$. Des exemples de calculs sont présentés à l'annexe 5. Le sable filtrant utilisé lors des essais en colonne QIT1_P19_f et QIT1_P10_f serait en mesure de capturer les particules dont la taille est d'environ 350 µm et plus (pour une porosité du sable $n = 0,45$).

Essais à charge constante

Ces essais ont été réalisés sous une différence de charge maintenue constante à l'aide d'une cellule de Mariotte selon la norme D2434 de l'ASTM (2006) (figure 3.3). Le montage expérimental comporte en général une colonne avec trois piézomètres et trois capteurs de pression branchés dans les parois de la colonne à des élévations différentes. On règle d'abord la charge de la cellule de Mariotte et le tuyau d'eau afin d'obtenir le gradient hydraulique ($\frac{\Delta h}{\Delta L}$) désiré. On laisse ensuite l'eau s'écouler à travers le matériau testé du haut vers le bas et on prend les mesures du volume d'eau recueilli en fonction du temps. Avant de prendre des mesures, il est très important de laisser l'eau s'écouler suffisamment longtemps pour permettre aux piézomètres et aux capteurs de pression d'atteindre la stabilité. Pour cette raison, la durée de l'essai pouvait aller jusqu'à 2 heures, surtout pour de faibles gradients hydrauliques ($0,02 \leq \frac{\Delta h}{\Delta L} \leq 0,2$). Le mouvement de l'eau dans le matériau testé se fait du haut vers le bas lors des essais de perméabilité.

Le calcul de la valeur de la conductivité hydraulique saturée, k_{sat} , se fait selon deux méthodes. Premièrement, on fait le calcul en utilisant la différence entre la charge à l'entrée de la colonne et la charge à la sortie de la colonne. Dans ce cas, toute la longueur de l'échantillon est prise en compte dans le calcul:

$$k_{sat} (\text{cm/s}) = \frac{QL}{A(h_{\text{entrée}} - h_{\text{sortie}})} \quad (3.13)$$

- où Q – débit d'eau [cm^3/s]
 L – longueur de l'échantillon testé [cm]
 A – surface de la section de la colonne, perpendiculaire à l'écoulement [cm^2]
 $h_{\text{entrée}}$ – charge amont donnée par la cellule de Mariotte [cm]
 h_{sortie} – charge aval donnée par l'élévation de l'eau dans le tuyau de sortie [cm]

Cette méthode d'interprétation est acceptable lorsque les pertes de charge aux extrémités (plaques et géotextiles, tuyaux et valves du montage en haut et en bas de l'échantillon) sont négligeables par rapport à la perte de charge dans le matériau testé. Dans le prochain chapitre, nous allons montrer que cette condition est respectée dans les essais à faible gradient.

On détermine aussi la perte de charge dans le matériau testé selon les mesures de la charge à différentes élévations directement à l'intérieur de l'échantillon (à l'aide de piézomètres). Le calcul de k_{sat} se fait alors comme suit (ASTM D2434, 2006; McCarthy, 2007):

$$k_{sat}(\text{cm/s}) = \frac{QL_{1-2}}{A(h_1 - h_2)} \quad (3.14)$$

où L_{1-2} – distance entre la prise des deux piézomètres [cm]

h_1 et h_2 – charges mesurées aux deux points à l'aide de deux piézomètres [cm]

Puisque chaque colonne testée comporte trois piézomètres (et trois capteurs de pressions), on avait la possibilité de comparer les valeurs de k_{sat} et de détecter s'il y avait des conditions d'écoulements différentes entre chaque paire de piézomètres et de capteurs. On a ainsi détecté la présence de voies d'écoulement préférentiel qui se sont manifestées par un gradient hydraulique différent d'un endroit à l'autre de l'échantillon. Dans les zones avec des écoulements "préférentiels", les valeurs de k_{sat} obtenues étaient supérieures à la moyenne (cet aspect sera revu plus loin).

Comme il a été mentionné ci-dessus, les essais à charge constante ont été réalisés avec différents gradients hydrauliques i , pouvant atteindre des valeurs assez élevées afin de provoquer le mouvement de particules fines à l'intérieur de la colonne. Cependant, il n'était pas possible d'utiliser les piézomètres et les capteurs de pression dans les essais à fort gradient. Dans ces essais, le volume de la cellule de Mariotte n'était pas assez grand pour fournir la quantité d'eau nécessaire pour un essai d'une durée suffisamment longue pour permettre aux piézomètres et les capteurs de pression d'atteindre la stabilité. Pour ces essais, le calcul de la valeur de la conductivité hydraulique saturée se fait en utilisant la différence entre la charge à l'entrée de la colonne (imposée par la position du haut de la cellule de Mariotte) et la charge à la sortie de la colonne (imposée par la hauteur du tuyau de sortie d'eau).

Les conditions d'écoulement laminaire lors des essais de perméabilité à charge constante ont été vérifiées à l'aide de diagrammes sur lesquelles les valeurs de vitesse de Darcy (V_{Darcy}) ont été tracées en fonction du gradient hydrauliques (i). La figure 3.4 montre des exemples de tels diagrammes qui mettent en évidence une corrélation linéaire entre V_{Darcy} et i pour les échantillons grossiers QIT1_P50_f2 et QIT1_P28_f (ce qui tend à valider l'application de la loi de Darcy lors de ces essais).

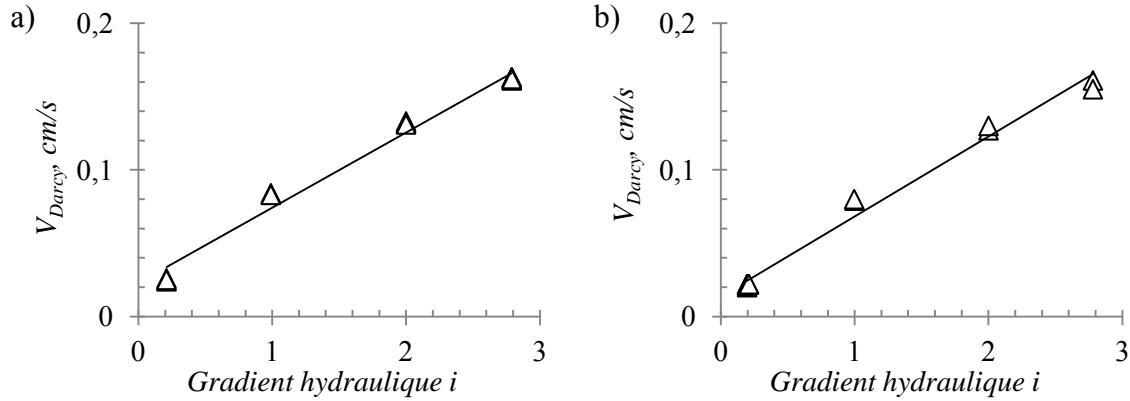


Figure 3.4 : Vitesse de Darcy (V_{Darcy}) en fonction du gradient hydraulique (i) lors des essais de perméabilité à charge constante pour les matériaux: a) QIT1_P50_f2 et b) QIT1_P28_f.

Essais à charge variable

Les essais de perméabilité à charge variable ont été effectués selon la norme D 5856 de l'ASTM (2007a). Au cours de cet essai, la charge hydraulique diminue avec le temps. Deux burettes sont branchées à la colonne expérimentale, soit la burette d'entrée en amont de la colonne et la burette de sortie en aval de la colonne. On laisse l'eau s'écouler d'une burette à l'autre à travers le matériau. On mesure la différence de charge à divers intervalles de temps, et on calcule ensuite la valeur de k_{sat} selon l'équation suivante (McCarthy, 2007) :

$$k_{sat}(cm/s) = \frac{a_{in}a_{out}L}{A(t_2-t_1)(a_{in}+a_{out})} \ln \left[\frac{\Delta h(t_1)}{\Delta h(t_2)} \right] \quad (3.15)$$

où L – longueur de l'échantillon [cm]

A – section de l'échantillon [cm^2]

a_{in} – section de la burette d'entrée [cm^2]

a_{out} – section de la burette de sortie [cm^2]

t_1, t_2 – temps 1 et 2 [s]

$\Delta h(t_1), \Delta h(t_2)$ – les différences de charge entre la burette d'entrée et la burette de sortie aux temps t_1 et t_2 [cm]

Précision des essais de perméabilité

Les normes de l'ASTM ne donnent pas de critères pour évaluer si les résultats obtenus lors d'un essai de perméabilité sont acceptables. Cependant, la norme ASTM D5856 (2007a), applicable si $k_{sat} \leq 10^{-5}$ m/s, précise que la loi de Darcy est réputée valable si les valeurs de k_{sat} mesurées à 3 gradients hydrauliques différents sont similaires dans les limites de 25%. On sait aussi que les valeurs de k_{sat} obtenues pour le même matériau dans le même laboratoire ne doivent pas différer de plus de 2 – 5 fois entre eux (Germaine et Germaine, 2009). Chapuis (2004) souligne qu'une bonne précision des essais de perméabilité (i.e. les valeurs de k_{sat} obtenues pour 3 échantillons similaires sont dans les limites $\pm 20\%$) peut être atteinte pour des matériaux homogènes (sables ou graviers) si deux conditions sont respectées : 1) les échantillons sont bien saturés en eau, avec une vérification selon la méthode de Chapuis et al. (1989), et 2) les matériaux testés ne sont pas prédisposés à l'érosion interne (Chapuis, 1992). Chapuis et Aubertin (2003) ont suggéré un facteur de 3 comme variation "acceptable" lors de la mesure et de l'estimation de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de modèles prédictifs.

Validation des résultats d'essais

Pour aider à valider les valeurs de k_{sat} obtenues à partir des essais en colonne, on a aussi testé dans la même colonne un sol dont la conductivité hydraulique était connue d'avance, et qui était différente de celle mesurée sur les stériles miniers. On a utilisé un mélange de résidus miniers Sigma (43%) et de sable Demers (57%) comme matériau de référence (déjà caractérisé au laboratoire de la chaire). On a donc mesuré la valeur de k_{sat} du mélange Sigma-Demers dans la grande colonne, et on a obtenu une valeur identique à celle déterminée auparavant sur un autre montage expérimental (rapport d'essais fourni par le technicien du laboratoire de l'École Polytechnique). Les résultats de ces essais sont présentés au chapitre 4.

De plus, on a aussi conduit des essais dans de petits perméamètres, à charge constante et à charge variable selon les normes de l'ASTM D2434 (2006) et D 5856 (2007a) respectivement, pour mesurer les valeurs de k_{sat} obtenues sur les mêmes échantillons testés dans les grandes colonnes. Il s'agit des échantillons QIT1_P10_f et QIT1_P5_f. La comparaison des résultats obtenus avec les différents montages expérimentaux est présentée au chapitre 4.

On a aussi réalisé un essai dans la colonne remplie d'eau seulement. Cet essai a permis d'évaluer la "conductivité hydraulique" de la colonne elle-même. On a constaté que la conductivité hydraulique équivalente de la colonne vide était plus de 3,5 fois supérieure à la plus grande valeur de k_{sat} mesurée dans cette étude sur les stériles miniers.

3.4.4 Essais de traceur

Les concepts théoriques sur le transport de solutés dans les milieux poreux et les essais de traceurs ont été présentés dans la revue bibliographique de ce mémoire (section 2.3.2). Dans cette étude, l'essai de traceur a servi essentiellement à identifier la présence éventuelle de voies d'écoulement préférentiel dans les stériles à l'intérieur des colonnes.

Les essais de traceur ont été réalisés sur les échantillons QIT1_P50_lâche et QIT1_P5_f. On a utilisé le sel alimentaire, NaCl, comme traceur pour sa disponibilité et facilité de manipulation. La concentration initiale de NaCl dans l'eau injectée à l'intérieur de la colonne expérimentale était de 10 g/L. Une telle teneur en sel a été choisie selon les recommandations faites dans des travaux précédents (Gaillot, 2007; Bourrel, 2008). La conductivité électrique de l'eau salée (μS , mS) utilisée comme traceur ainsi que la conductivité électrique initiale de l'eau interstitielle à l'intérieur de la colonne ont été mesurées avant l'essai à l'aide d'un conductimètre. La précision des mesures était de 1% pour chaque échelle des valeurs, soit les échelles de 0 à 19,99 μS , 0 à 199,9 μS , 0 à 1999 μS , et de 0 à 19,99 mS.

L'essai consiste en une injection continue d'eau salée en haut de la colonne sous des conditions de faible gradient hydraulique (soit $i \approx 0,2$), à charge constante. L'eau drainée est récupérée à la sortie de la colonne. La conductivité électrique de l'eau recueillie est mesurée à l'aide du conductimètre à chaque 15 secondes, à partir du début de l'injection d'eau salée en amont (haut) de la colonne. La conductivité électrique est linéairement proportionnelle à la concentration du sel dans l'eau, comme le montre le diagramme de calibration (figure 3.5), ce qui permet d'exprimer les résultats des essais de traceur directement en termes de concentration en NaCl. Les courbes des concentrations en sel en fonction du temps sont ainsi construites et interprétées en termes de temps caractéristiques, de vitesse de transport du traceur et de coefficient de dispersivité (voir chapitre 4).

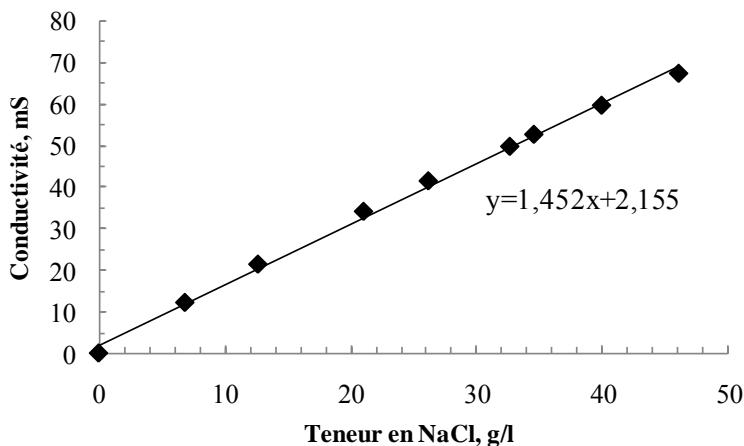


Figure 3.5 : Diagramme de calibration du conductimètre qui mesure la conductivité électrique de l'eau en fonction de la teneur en sel (NaCl).

Après un essai de traceur, on procède au rinçage (écoulement d'eau propre) de l'échantillon afin d'enlever le sel. Le rinçage est terminé quand la conductivité électrique de l'eau drainée correspond à la conductivité initiale de l'eau interstitielle à l'intérieur de la colonne (avant le début de l'essai de traceur).

Un essai de traceur supplémentaire a aussi été réalisé dans la colonne QIT1_P50_lâche. Il s'agit d'un essai combiné «infiltration/traceur», à l'état saturé. Ce test consistait à enlever la couche d'eau libre à la surface du stérile saturé. La surface est ensuite couverte par une pellicule plastique étanche sur laquelle l'eau salée est ajoutée. Pour commencer l'essai, on retire rapidement la pellicule, ce qui permet à l'eau salée de s'infiltrer dans le stérile (sous une charge variable). La suite de l'essai est similaire à celui du traceur ordinaire : on préleve l'eau à la sortie de la colonne, on mesure sa conductivité électrique et on détermine les paramètres hydrodispersifs. On élimine ainsi des imprécisions dans les paramètres obtenus, causées par la dissolution de traceur dans l'eau libre qui est présente en quantité importante (≈ 20 litres) en haut de la colonne expérimentale QIT1_P50_lâche.

3.4.5 Essais de drainage libre

Le drainage des colonnes initialement saturées est une étape importante dans l'étude des propriétés hydriques des stériles. Cet essai de drainage libre permet de construire les courbes de rétention d'eau pour les matériaux étudiés après le démontage des colonnes (Hernandez, 2007; Gaillot, 2007). La procédure de l'essai de drainage est la suivante: on laisse la colonne couverte (à pression atmosphérique) pour éviter l'évaporation en surface. On fixe la position de la nappe libre au bas en réglant la hauteur de la sortie d'eau (tube en U). On laisse l'eau s'écouler librement à travers le tuyau de sortie en mesurant le débit d'eau drainée en fonction du temps ainsi que la variation de la pression interstitielle le long de la colonne (voir annexe 8). En règle générale, le niveau de la nappe libre au bas est fixé à 5 - 10 cm plus haut que la limite inférieure du matériau testé (Intissar, 2009). Le test est fini lorsqu'il n'y a plus d'eau qui s'écoule (depuis quelques jours) et que les mesures des capteurs de pression sont stables et correspondent à l'élévation du point de mesure au-dessus de la nappe libre. En général, un essai de drainage dure environ deux semaines pour les matériaux étudiés.

3.4.6 Essais d'infiltration

Quelques essais d'infiltration dans les stériles non saturés ont aussi été réalisés sur les deux dernières colonnes montées, soit les colonnes QIT1_P10_f et QIT1_P50_lâche. Tel que mentionné au chapitre 2, de tels essais peuvent aider à identifier la présence éventuelle des voies d'écoulement préférentiel à l'intérieur des colonnes. Ces voies, ou canaux préférentiels d'écoulement, sont typiques des haldes à stériles (Morin et al., 1991), et elles pourraient contrôler la conductivité hydraulique saturée des stériles (surtout en conditions de laboratoire).

Dans les études antérieures, les essais d'infiltration ont été réalisés sur les stériles miniers sous une charge constante, ce qui permet d'atteindre la saturation du matériau testé (en surface) et d'évaluer le taux d'infiltration minimal, qui peut correspondre à la conductivité hydraulique saturée des stériles. Pour cela, il est nécessaire d'élaborer un dispositif qui permet de maintenir une charge constante lors de l'essai d'infiltration (Gamache-Rochette, 2004 ; Lessard 2011). Dans la présente étude, la détermination exacte de la conductivité hydraulique saturée des stériles à partir d'essais d'infiltration dans les grandes colonnes ne faisait pas partie de l'objectif du

projet. Les essais d'infiltration ont été conduits d'une façon simplifiée, sous une charge variable pour donner des indications sur de possibles écoulements localisés. Le protocole expérimental de ces essais est présenté dans ce qui suit.

Etapes des essais d'infiltration en colonne

- Drainer la colonne jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'écoulement d'eau à la sortie du bas (depuis quelques jours).
- Prendre les lectures de capteurs de pression et vérifier que les relevés correspondent bien à l'élévation de points de mesure au-dessus de la nappe libre (au bas de la colonne).
- Fermer la valve à la sortie de la colonne, puis enlever le couvercle, la plaque trouée et le géotextile en haut de la colonne; ajouter la pellicule imperméable à la surface du matériau et noter le poids total du montage.
- Verser 3,5 L d'eau distillée désaérée en haut de la colonne sur la pellicule imperméable ; noter la hauteur de la couche d'eau et le poids du montage.
- Préparer les récipients pour recueillir l'eau drainée et ouvrir la valve à la sortie au bas de la colonne.
- Retirer rapidement la pellicule et laisser s'infiltrer l'eau librement dans le matériau non saturé.
- Mesurer le niveau de l'eau qui s'infiltre dans le matériau à certains intervalles de temps ; mesurer le débit d'eau drainée à la sortie de la colonne.
- Laisser la colonne se drainer jusqu'à la fin de l'écoulement d'eau à la sortie du bas (depuis quelques jours); vérifier que les capteurs de pression reviennent à leur état initial d'équilibre (c'est-à-dire $\gamma=Z$) ; fermer la valve de sortie.
- Construire les courbes de débit d'eau drainée (Q) et du taux d'infiltration (I) en fonction de temps ; interpréter les résultats obtenus (voir chapitre 4).

Il faut préciser que, dans la présente étude, les colonnes n'ont pas été drainées jusqu'à la fin lors des essais d'infiltration. Ces essais ont été réalisés dans le but de fournir des indications supplémentaires sur la présence des voies d'écoulement préférentielles dans les stériles testés. Pour cette raison, les données recueillies durant 2 premiers jours après le début de l'essai d'infiltration ont été suffisantes pour atteindre le but fixé (le drainage complet de la colonne dure pendant environ 2 semaines).

3.4.7 Démontage des colonnes et caractéristiques de rétention d'eau

Les propriétés hydriques des stériles dans les conditions non saturées en eau sont évaluées à l'aide des essais de drainage suivis par le démontage des colonnes (Chapuis et al., 2007; Hernandez, 2007; Gaillot, 2007). Brièvement, la procédure de démontage consiste à enlever le matériel par tranche d'environ 5 - 7 cm d'épaisseur en notant la masse et le volume (épaisseur) de chaque couche. Le matériau est ensuite séché au four à 105 °C pendant au moins 24 heures, ce qui permet de déterminer la teneur en eau massique (w), la masse volumique sèche (ρ_d) ; on en déduit la porosité (n) de chaque couche. Il faut noter qu'il peut être difficile d'extraire le matériau avec l'eau associée à chaque tranche enlevée (surtout au bas de la colonne). Lorsqu'il y a de l'eau libre en surface, celle-ci est récupérée avec un papier absorbant pour chaque couche, et on additionne la masse de cette eau à celle de la couche enlevée.

On construit ensuite le diagramme de la teneur en eau volumique du matériau θ en fonction de la succion ψ qui correspond à l'élévation du matériau au-dessus de la nappe libre. La teneur en eau θ se calcule selon l'équation suivante :

$$\theta = w(1 - n)D_r \quad (3.16)$$

où	θ	teneur en eau volumique [-]
	w	teneur en eau massique [-]
	n	porosité (valeur 0 – 1) [-]
	D_r	densité relative des grains solides [-]

Les courbes de rétention d'eau (CRE) ainsi construites sont ensuite lissées selon le modèle descriptif de van Genuchten (1980) à l'aide de logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991). Les caractéristiques de rétention d'eau pour les matériaux étudiés sont évaluées à partir de CRE obtenues tel que décrit dans la revue de littérature (section 2.2.3). On en déduit en particulier les paramètres suivants: la pression d'entrée d'air, AEV ou ψ_a , la teneur en eau résiduelle θ_r et la succion correspondante ψ_r . Les points expérimentaux sont également comparés à ceux obtenus avec le modèle prédictif MK (Aubertin et al., 1998, 2003) qui a été décrit en détail dans le chapitre 2 (section 2.2.3).

Les critères d'acceptabilité de la mesure de la CRE expérimentale ne sont pas encore bien définis dans la littérature technique. Cependant, suite à leur étude des différentes sources de variation de la pente des courbes de rétention d'eau, van Es et al. (1999) ont indiqué que les sources aléatoires, non expliquées, constituent une partie très importante des variations observées (soit 21,8 % de la valeur totale du coefficient de variation). Mentionnons que les sources d'erreur les plus importantes dans le cas de la détermination expérimentale des CRE sont: 1) une retombée de l'eau capillaire vers les couches inférieures causées par exemple par une vibration accidentelle de la colonne lors de démontage, 2) la difficulté de déterminer le volume exact de chaque tranche enlevée, notamment, à cause des cailloux qui dépassent à la surface et d'une surface inclinée ou inégale, et 3) les imprécisions des mesures des masses et surtout des distances (volumes).

3.4.8 Déplacement de particules fines

Une stratégie expérimentale a été élaborée afin d'examiner de plus près le phénomène de migration de particules fines dans les stériles miniers. Pour cela, l'eau a été récupérée à la sortie de la colonne lors des essais de perméabilité. On laissait ensuite les particules fines déplacées avec l'eau à l'extérieur de la colonne se déposer au fond des chaudières remplies de l'eau recueillie. On enlevait ensuite l'eau claire qui ne contenait aucun grain solide visible, et l'on séchait le reste au four. Les particules fines récupérées de cette façon ont été soumises à l'analyse granulométrique à l'hydromètre ou au laser, ainsi qu'à l'analyse minéralogique par DRX.

Une autre méthode utilisée dans cette étude afin de déterminer la taille des particules qui se sont déplacées dans la matrice consistait à analyser la courbe granulométrique du sable filtrant placé au fond de certaines colonnes. Une partie des particules déplacées lors des essais de perméabilité a en effet été capturée par le sable filtrant (au lieu de sortir à l'extérieur de la colonne avec l'eau). En comparant la granulométrie initiale et finale du sable, on a pu déterminer la fraction granulométrique de la roche stérile qui s'est déplacée et est sortie de l'échantillon. De plus, la granulométrie et la densité relative du matériau dans des couches du haut, du bas et au milieu de la colonne ont été également analysées suite au démontage de chaque colonne expérimentale afin de détecter une éventuelle migration de particules fines à l'intérieur de la colonne. Ainsi, les particules qui se sont déplacées sur des distances inférieures à leur élévation initiale au-dessus de

la base de la colonne, c'est-à-dire les particules qui ont bougé mais ne sont pas sorties de l'échantillon, ont pu être identifiées.

Pour estimer l'incidence de la migration de particules sur l'évolution des caractéristiques hydriques à l'échelle du laboratoire, des mesures complémentaires ont aussi été appliquées. Chaque série d'essais en colonne débutait par des mesures de perméabilité sous faibles gradients i ($i = 0,1 - 0,5$) afin de déterminer la conductivité hydraulique des matériaux "intacts". Ensuite, on poursuivait nos essais à des gradients plus élevés, pouvant aller jusqu'à environ 3, pour favoriser le déplacement des particules fines. La conductivité hydraulique a été mesurée après avoir exposé les matériaux à des gradients hydrauliques élevés pendant une période prolongée. La série d'essais se terminait par des essais de perméabilité standards selon la norme de l'ASTM (2006). Il est ainsi possible d'évaluer l'évolution de la conductivité hydraulique des matériaux qui subissent un changement de la structure interne à la suite de la migration des particules fines.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

4.1 Caractéristiques des matériaux

Les propriétés physiques de base des matériaux prélevés dans une des haldes à stériles de la mine Tio (QIT1) ont été caractérisées. Les paramètres étudiés comprenaient la courbe granulométrique, la densité relative des grains (D_r), la masse volumique sèche (ρ_d) et la porosité (n) du matériau à l'intérieur des colonnes d'essais. La composition minéralogique de la roche stérile a aussi été déterminée dans des travaux connexes (Pepin, 2009; Intissar, 2009; Plante, 2010). Quelques analyses minéralogiques additionnelles ont été effectuées pour la présente étude. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les sections qui suivent.

4.1.1 Granulométrie

Le tableau 4.1 présente les paramètres granulométriques des stériles avant les essais en colonne (paramètres initiaux). Les courbes granulométriques initiales sont présentées sur la figure 4.1. Selon le système ASTM de classification des sols (basé sur le système unifié USCS; McCarthy 2007), l'échantillon de roche stérile (QIT1) reçu au laboratoire correspond à un sable bien gradué SW, avec diverses proportions d'éléments fins et de gravier pour les fractions passant aux tamis 50, 28, 19, 10, 5 et 2 mm.

La valeur du D_{10} de ces stériles varie entre 0,05 et 0,22 mm, et le D_{60} varie entre 0,87 et 6,70 mm, selon la fraction granulométrique de l'échantillon. Le coefficient d'uniformité C_U varie entre 15 et 30, ce qui classe la roche stérile comme étant un matériau à granulométrie largement étalée. Le coefficient de courbure C_C varie entre 1,5 et 2,2 et reflète la répartition continue de la courbe granulométrique.

On peut aussi constater que les matériaux qui ont été déjà utilisés auparavant dans les essais en laboratoire, nommés «échantillons lessivés» (QIT1_P50_1 et QIT1_P28_1), contiennent moins de particules fines que les matériaux d'origine (QIT1_P50_f et QIT1_P28_f; figure 4.1). Puisqu'une partie de particules fines de ces échantillons a été lessivée lors des essais précédents, la valeur du D_{10} est jusqu'à 2 fois plus grande que celle des échantillons d'origine (tableau 4.1).

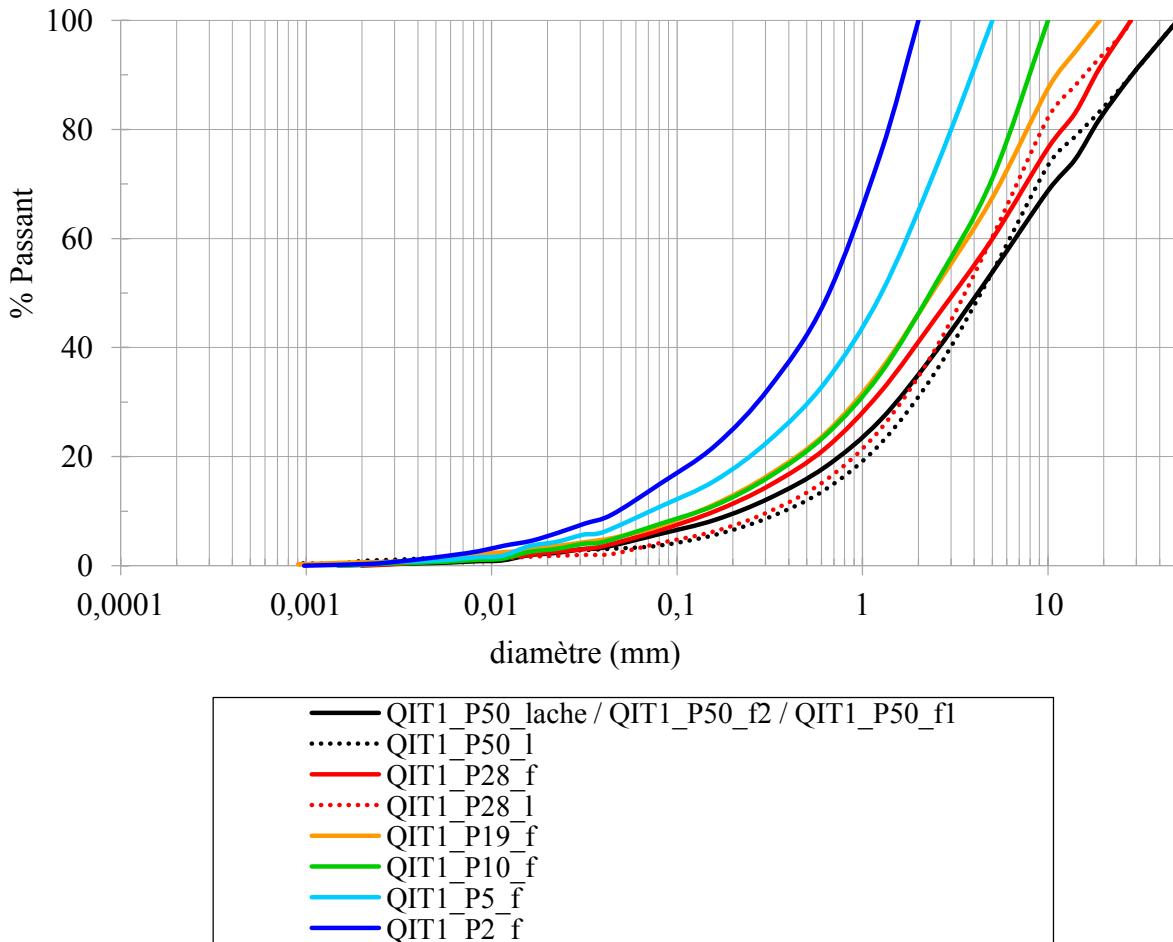


Figure 4.1 : Courbes granulométriques initiales des roches stériles placées dans les colonnes pour les divers essais.

Tableau 4.1 : Paramètres granulométriques initiaux des stériles; les courbes granulométriques sont montrées à la figure 4.1.

Matériaux	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _U (-)	C _C (-)
QIT1_P50_lâche	0,22	1,51	6,70	30,45	1,55
QIT1_P50_f2	0,22	1,51	6,70	30,45	1,55
QIT1_P50_f1	0,22	1,51	6,70	30,45	1,55
QIT1_P50_1	0,38	1,91	6,20	16,32	1,55
QIT1_P28_f	0,16	1,10	5,05	31,56	1,50
QIT1_P28_1	0,32	1,62	4,95	15,47	1,66
QIT1_P19_f	0,13	0,91	3,75	29,53	1,74
QIT1_P10_f	0,13	0,94	3,48	26,77	1,88
QIT1_P5_f	0,07	0,51	1,74	24,86	2,14
QIT1_P2_f	0,05	0,27	0,87	18,13	1,75

La granulométrie des stériles a également été analysée au démontage des colonnes, ce qui nous a donné la granulométrie finale des échantillons après tous les essais. Les échantillons ont usuellement été prélevés à trois endroits à l'intérieur des colonnes, soit en haut, en bas et au milieu. Ceci aide à détecter la migration des particules fines (avec l'eau interstitielle) et à évaluer l'hétérogénéité de la roche stérile. La fraction fine de certains échantillons de stériles a aussi été soumise à l'analyse granulométrique au laser. L'ensemble de toutes les analyses granulométriques réalisées sur le matériau de chaque colonne expérimentale représente le fuseau granulométrique de chaque échantillon testé. Des exemples représentatifs des fuseaux granulométriques ainsi obtenus sont montrés dans la figure 4.2. L'ensemble des courbes granulométriques obtenues pour tous les échantillons étudiés ainsi que les données brutes des analyses granulométriques sont présentées à l'annexe 6.

Les résultats de ces analyses granulométriques montrent que certains spécimens de stériles placés dans les colonnes sont variables (hétérogènes) à l'échelle du laboratoire. À titre d'exemple, l'échantillon QIT1_P19_f est caractérisé par un fuseau granulométrique assez large si l'on prend en considération toutes les analyses granulométriques réalisées sur cet échantillon (voir figure 4.2a pour les courbes granulométriques complètes et 4.2b pour la partie fine de la courbe). L'échantillon QIT1_P50_lâche manifeste le même caractère hétérogène (annexe 6).

Les précautions initiales pour bien homogénéiser les stériles avant les essais ont fait en sorte que la plupart des échantillons avaient une distribution granulométrique assez constante à travers la colonne expérimentale, comme c'était le cas pour l'échantillon QIT1_P50_f2 (figures 4.2c et 4.2d). Une homogénéité relative a aussi été observée dans la distribution granulométrique des échantillons QIT1_P50_f1, QIT1_P50_1, QIT1_P28_f, QIT1_P28_1, QIT1_P10_f, QIT1_P5_f (annexe 6).

Dans certains cas, on a observé une différence significative entre les résultats des analyses à l'hydromètre et les analyses au laser. Par exemple, pour les échantillons QIT1_P10_f et QIT1_P5_f, cette différence pouvait atteindre 10-20 % pour un diamètre donné des grains (figure 4.3). Des écarts significatifs existent entre les résultats des analyses à l'hydromètre et des analyses au laser. De tels écarts sont assez courants et ils sont bien documentés dans la littérature (Campbell, 2003; Blott et Pye, 2006).

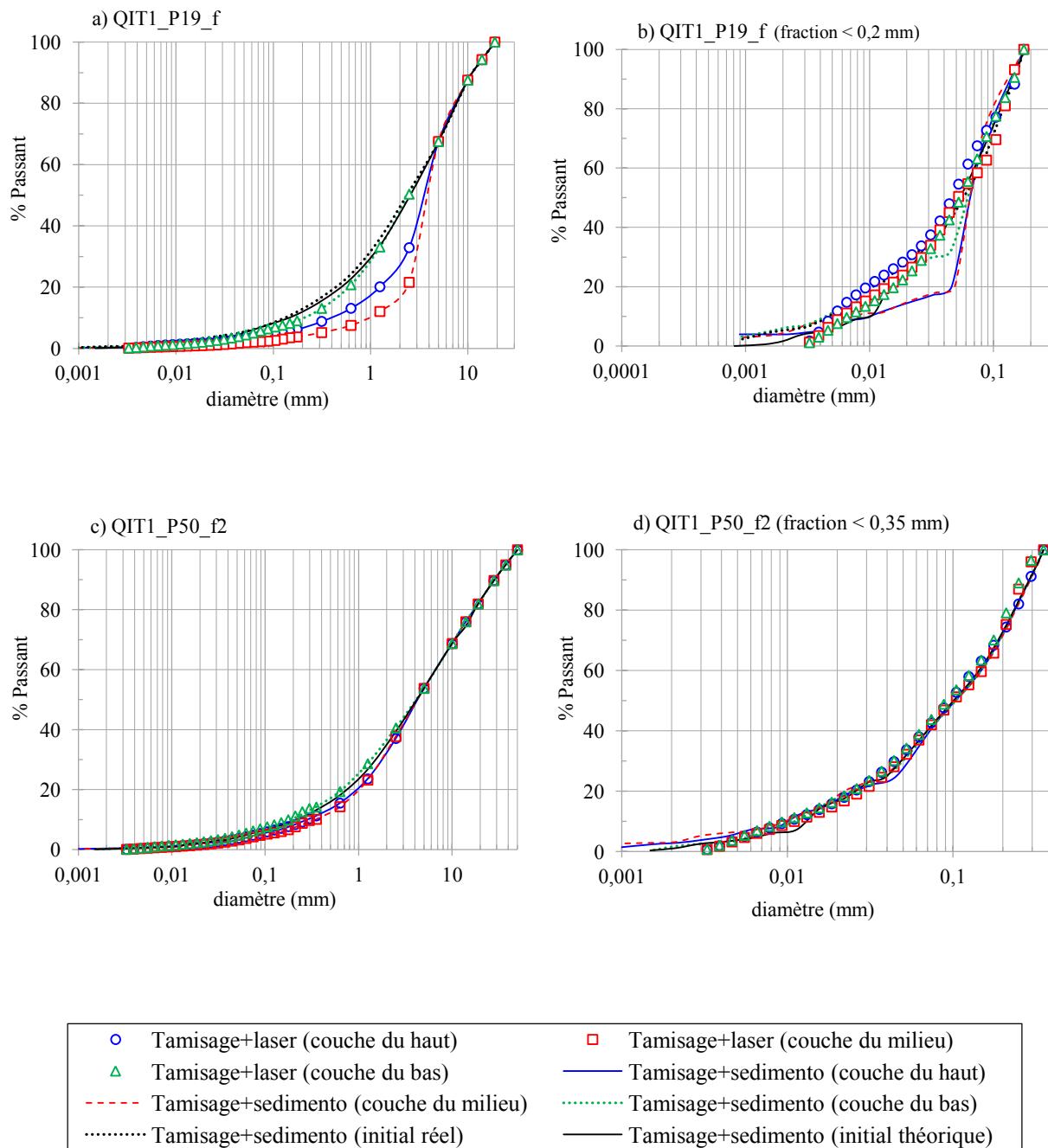


Figure 4.2 : Exemples de courbes granulométriques des stériles déterminées après les essais en colonne : a) courbes complètes et b) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P19_f (passant 19 mm) ; c) courbes complètes et d) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P50_f2 (passant 50 mm).

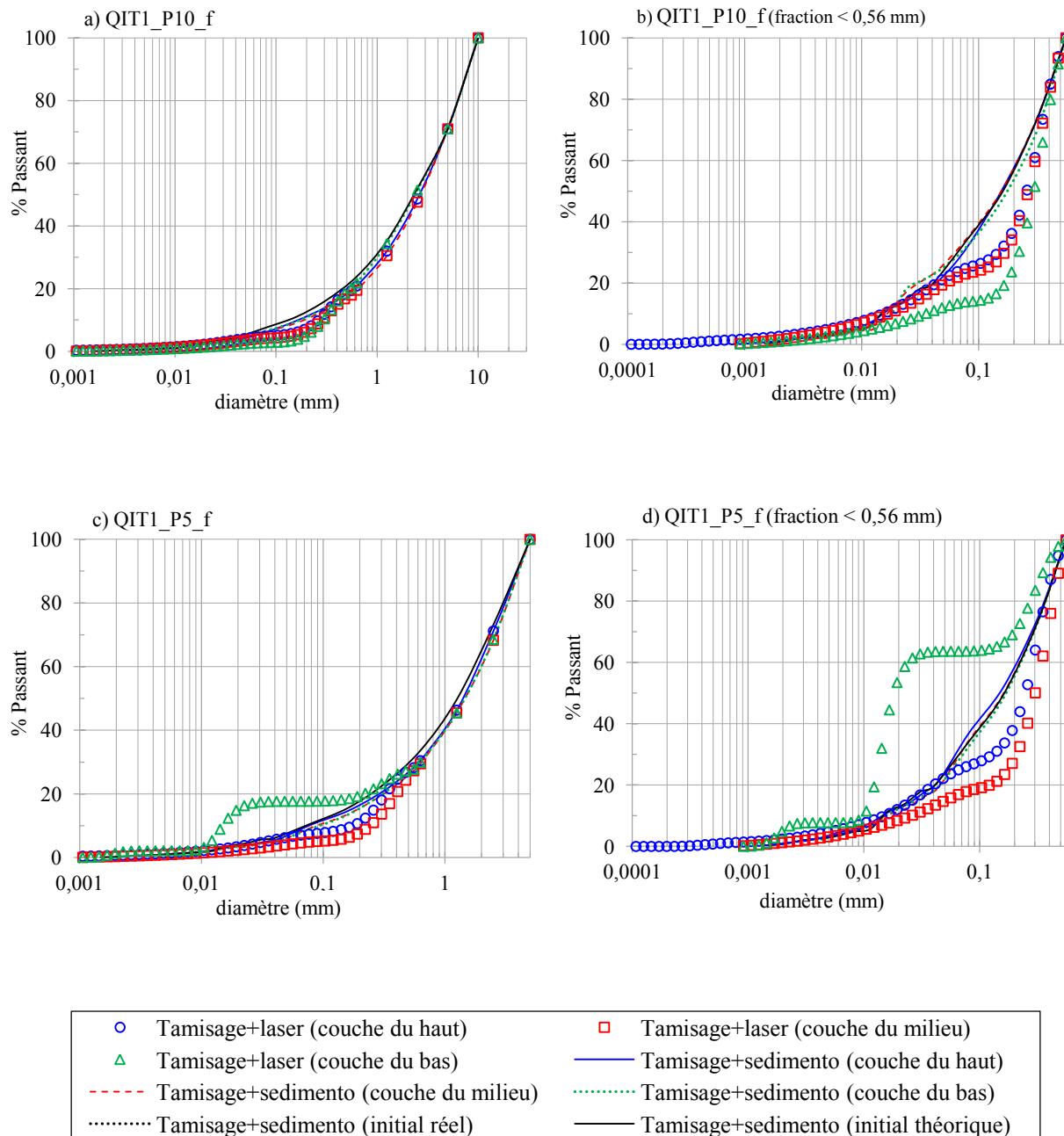


Figure 4.3 : Courbes granulométriques des stériles déterminées par l'analyse à l'hydromètre et par l'analyse au laser : a) courbes complètes et b) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P10_f ; c) courbes complètes et d) courbes agrandies pour l'échantillon de la colonne QIT1_P5_f.

Il est reconnu que l'analyse au laser démontre une sensibilité réduite aux particules fines lors des analyses de matériaux grossiers (Blott et Pye, 2006). Une autre source d'imprécision est liée à l'effet de la forme et de l'angularité des particules, qui affecte le calcul de leur taille moyenne (Campbell, 2003). Les variations de la densité des particules présentes dans les différentes fractions granulométriques des stériles, liées à la composition minéralogique complexe, pourrait aussi contribuer à l'erreur de calcul des pourcentages lors des analyses. Finalement, l'hétérogénéité générale (granulométrique, minéralogique, etc.) des stériles pourrait également expliquer les différences de résultats des analyses à l'hydromètre et des analyses au laser menés sur des échantillons différents.

Comme on va le voir plus loin, une telle différence peut affecter considérablement les résultats des prédictions du comportement hydrique, notamment pour la conductivité hydraulique saturée et pour la courbe de rétention d'eau (qui sont basées sur la granulométrie des matériaux).

Dans la suite de l'étude, on se basera surtout sur les courbes granulométriques obtenues par tamisage et à l'aide de l'analyse à l'hydromètre, étant donné que c'est la méthode standardisée (et plus largement accessible).

Toutefois tous les résultats des analyses granulométriques faites sur chaque échantillon ont été utilisés pour définir la courbe granulométrique moyenne basée sur le fuseau granulométrique ainsi obtenu. On a utilisé cette courbe moyenne (avec les modèles prédictifs) comme étant représentative de l'échantillon testé (tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Paramètres granulométriques moyens.

Matériau	D ₆₀ , mm	D ₁₀ , mm	C _U
QIT1_P50_lâche	6,70	0,29	23,5
QIT1_P50_f2	6,70	0,22	30,5
QIT1_P50_f1	6,70	0,26	25,8
QIT1_P50_1	6,20	0,33	18,8
QIT1_P28_f	5,05	0,18	28,9
QIT1_P28_1	4,95	0,27	18,7
QIT1_P19_f	3,75	0,21	17,9
QIT1_P10_f	3,52	0,17	20,7
QIT1_P5_f	2,00	0,09	21,7
QIT1_P2_f	0,87	0,05	18,1

Rappelons enfin que la granulométrie de l'échantillon de roche stérile reçu a été déjà tronquée à 50 mm avant son transport au laboratoire. Des échantillons plus grossiers des stériles de la mine Lac Tio ont été classés comme graviers très étalés avec cailloux et blocs (Pepin, 2009) pour la fraction granulométrique passant 70 cm (avec un D_{10} variant entre 0,7 et 1,2 mm, un D_{60} variant entre 41 et 80 mm et le C_U pouvant atteindre 85).

Les résultats des analyses granulométriques de deux autres matériaux étudiés (mélange Sigma-Demers et sable filtrant utilisé au fond de certaines colonnes) sont présentés à l'annexe 7.

4.1.2 Minéralogie

Les deux types de stériles de la mine Lac Tio (QIT1 et QIT2) sont composés majoritairement de labrador (un plagioclase calco-sodique avec des teneurs en anorthite variant de An₅₀₋₇₀) et d'hémo-ilménite. Les micas (biotite, chlorite et muscovite), les feldspaths potassiques et les sulfures sont présents en moindres quantités. Pepin (2009) a observé également des quantités significatives de pyroxènes (enstatite et pigeonite). Cependant, ces minéraux n'ont pas été détectés dans les échantillons étudiés dans le présent travail (QIT1). Les principaux résultats des analyses minéralogiques des stériles de la mine Lac Tio sont résumés dans le tableau 4.3.

Comme on l'a déjà mentionné, les échantillons étudiés dans ce projet ont été prélevés sur une halde dont les stériles se caractérisent par des proportions relativement élevées d'ilménite (QIT1). La composition minéralogique de ces matériaux se situe donc du côté des teneurs les plus riches en ilménite pour l'intervalle des valeurs identifiées par Pepin (2009).

Dans la présente étude, la composition minéralogique a été déterminée pour deux fractions granulométriques des stériles, soit le passant 5 mm et le passant 1,25 mm. Les proportions d'hémo-ilménite varient entre les deux fractions testées. La fraction plus fine (passant 1,25 mm) est presque 20% plus riche en hémo-ilménite par rapport à la fraction plus grossière (passant 5 mm). Mais seulement deux analyses ponctuelles ont été faites, de sorte que l'on ne peut pas déterminer s'il s'agit d'une tendance générale (ceci pourrait être une conséquence de l'hétérogénéité générale des stériles étudiés).

Tableau 4.3 : Composition minéralogique des stériles de la mine Lac Tio ; analyses réalisées par DRX pour différentes fractions granulométriques*.

Minéral	Formule chimique	QIT1 présente étude		QIT1 et QIT2 Pepin (2009)	
		Fractions granulométriques			
		$\leq 5 \text{ mm}$	$\leq 1,25 \text{ mm}$		
		%	%	%	
Labrador	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	46,2	27,3	16 – 45	
Ilménite	FeTiO_3	29,8	44,7	23 – 45	
Hématite	Fe_2O_3	10,3	14,7	8 – 20	
Chlorite	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2,4	1,9	≤ 3	
Muscovite	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	2,3	1,2	≤ 1	
Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	2,1	1,8		
Quartz	SiO_2	2,1	1,5		
Pyrite	FeS_2	1,7	2,5	≤ 3	
Augite	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$	1,5	0,9		
Pyrrhotite	FeS	0,8	1,6		
Chalcopyrite	CuFeS_2	0,3	0,3	≤ 1	
Hercynite	$\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$	0,3	1,2		
Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	0,1	0,2		
Enstatite	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$			6 – 25	
Orthoclase	KAlSi_3O_8			≤ 7	
Pigeonite	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ca})_2\text{Si}_2\text{O}_6$			≤ 4	
Biotite	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_3(\text{Al},\text{Fe})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$			≤ 2	

* La précision pour les pourcentages inférieurs à 1% est plutôt faible ; on considère alors ces teneurs comme une trace.

4.1.3 Densité relative des particules solides

Les valeurs de la densité relative (D_r) des grains des roches stériles sont présentées au tableau 4.4. Puisque les stériles de la mine Lac Tio contiennent des quantités importantes d'ilménite, on observe des valeurs de D_r élevées. On a constaté aussi que la densité relative des grains tend à varier avec la grosseur des particules. La fraction des stériles comprise entre 5 et 50 mm est usuellement caractérisée par une densité plus faible, soit environ 3,85 (tableau 4.4). La valeur de D_r augmente avec l'augmentation de la proportion des particules fines atteignant jusqu'à 4,23 pour la fraction passant 5 mm, mais cette valeur diminue pour les fractions les plus fines des matériaux testés (figure 4.4).

Ces résultats suggèrent que l'ilménite, le minéral le plus dense, se retrouve surtout dans les particules de taille moyenne, 2,5 – 5 mm, tandis que les fractions plus fines d'une part et plus grossières d'autre part comportent plus de silicates. Cette tendance a été confirmée par les analyses chimiques faites sur plusieurs fractions granulométriques de la roche stérile de la mine Lac Tio (Pepin, 2009). À titre d'exemple, Pepin (2009) a constaté que les teneurs en titane et en fer, qui sont les principaux composants de l'ilménite, sont plus faibles dans le matériau fin (<0,5 mm) que dans le matériau plus grossier (<6,3 mm). Dans la présente étude, il semble qu'il y ait plus d'hémo-ilménite dans la fraction plus fine (passant 1,25 mm) par rapport à la fraction plus grossière (passant 5 mm), mais ceci pourrait aussi refléter l'hétérogénéité des stériles (tableau 4.3).

Tableau 4.4 : Densité relative (D_r) moyenne des différentes fractions granulométriques des stériles testés.

Matériau	D_r	Méthode utilisée
QIT1_P1,25_f	3,96	ASTM D854 (méthode du pycnomètre)
QIT1_P2_f	3,99	ASTM D854 (méthode du pycnomètre)
QIT1_P2,5_f	4,06	ASTM D854 (méthode du pycnomètre)
QIT1_P5_f	4,23	ASTM D854 (méthode du pycnomètre)
QIT1_P10_f	4,11	ASTM D854 et C127
QIT1_P19_f	4,09	ASTM D854 et C127
QIT1_P28_f	4,08	ASTM D854 et C127
QIT1_P28_1	4,08	ASTM D854 et C127
QIT1_P50_f1	4,05	ASTM D854 et C127
QIT1_P50_f2	4,05	ASTM D854 et C127
QIT1_P50_1	4,05	ASTM D854 et C127
QIT1_P50_lâche	4,05	ASTM D854 et C127
$5 \leq D < 50, \text{ mm}$	3,85	ASTM C127 (méthode pour la fraction grossière)

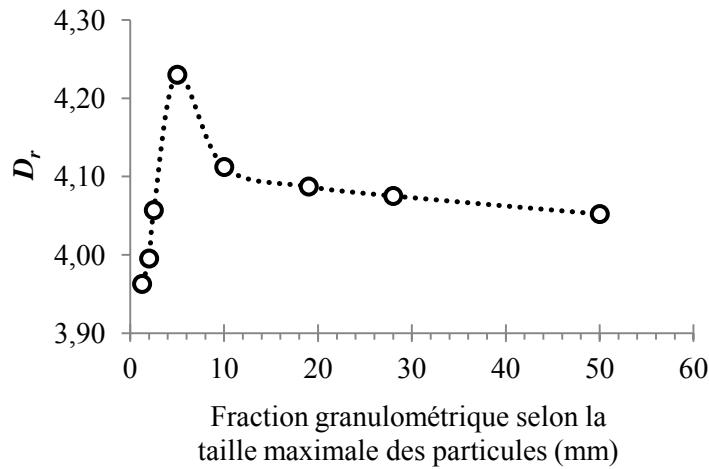


Figure 4.4 : Variation de densité relative D_r des stériles de la mine Lac Tio (QIT1) en fonction de la granulométrie (i.e. taille maximale des particules).

4.1.4 Porosité des matériaux dans les colonnes expérimentales

En général, la porosité mesurée dans les colonnes varie entre 0,20 et 0,30. La masse volumique sèche (ρ_d) des matériaux testés varie de 2650 à 3270 kg/m³. Sur le terrain, la porosité des stériles de surface de la mine Lac Tio serait nettement plus élevée (entre 0,40 et 0,60) même dans les endroits compactés des haldes; la masse volumique sèche varie alors de 1600 à 2400 kg/m³ (Lessard, 2011).

Le tableau 4.5 présente les valeurs de la porosité moyenne et de la masse volumique sèche des stériles dans chaque colonne expérimentale. Il faut préciser que ces valeurs ont été déterminées à partir de la masse des particules solides et du volume total du matériau poreux (équation 3.4) mesurés au montage et au démontage des colonnes, c'est-à-dire avant et après les essais (voir le chapitre 3).

Les mesures de la porosité ont permis d'évaluer la teneur en eau volumique à saturation des stériles (θ_s), qui est égale à la porosité n (si $S_r = 100\%$), et que l'on détermine au démontage des colonnes à partir de la teneur en eau massique (w) dans la couche saturée du sol en bas de la colonne (selon l'équation 3.16). Les valeurs de θ_s pour les colonnes testées sont aussi présentées

dans le tableau 4.5. Dans certains cas, ces valeurs diffèrent des valeurs de porosité obtenues selon les mesures volumiques et massiques (équations 3.5)

Tableau 4.5 : Porosité (n) moyenne des stériles dans les colonnes expérimentales.

Matériau	Porosité [-]			Teneur en eau à saturation θ_s [-]	Masse volumique sèche ρ_d [kg/m ³]
	Moyenne au montage	Moyenne au démontage	Pour la colonne entière		
QIT1_P2_f	0,34	0,34	0,34	-	2650
QIT1_P5_f	-	0,32	0,31	0,30	2890
QIT1_P10_f	0,26	0,27	0,28	0,27	2960
QIT1_P19_f	0,26	0,26	0,27	0,27	3020
QIT1_P28_f	0,24	0,24	0,24	0,24	3080
QIT1_P28_l	0,19	0,20	0,20	0,21	3270
QIT1_P50_f1	0,18	0,18	0,18	0,22	3270
QIT1_P50_f2	0,22	0,21	0,21	0,23	3190
QIT1_P50_l	0,21	0,23	0,22	0,23	3120
QIT1_P50_lâche	-	0,30	0,30	0,30	2810

La raison de cet écart entre θ_s et n est liée aux imprécisions lors des mesures des masses et (surtout) des volumes et à l'imprécision (et la variabilité) des mesures de la densité relative D_r . Il est aussi très difficile de bien égaliser la surface du sol en présence de particules de différentes tailles, y compris les gros cailloux comme dans les stériles miniers, ce qui ajoute à l'imprécision. De plus, il y a presque toujours une certaine quantité d'eau qui s'accumule dans les inégalités de la surface dans les couches plus saturées des stériles lors du démontage des colonnes (voir le chapitre 3). La teneur en eau à saturation (θ_s) peut donc être surestimée à ces endroits. La figure 4.5 montre que l'hétérogénéité de la roche stérile conduit à des variations significatives de la porosité à l'intérieur des colonnes expérimentales, et ce, malgré les efforts déployés pour placer et compacter le matériau d'une façon uniforme. La présence de cailloux rend les mesures volumétriques assez imprécises, ce qui amplifie davantage les fluctuations de la porosité observées dans la figure 4.5.

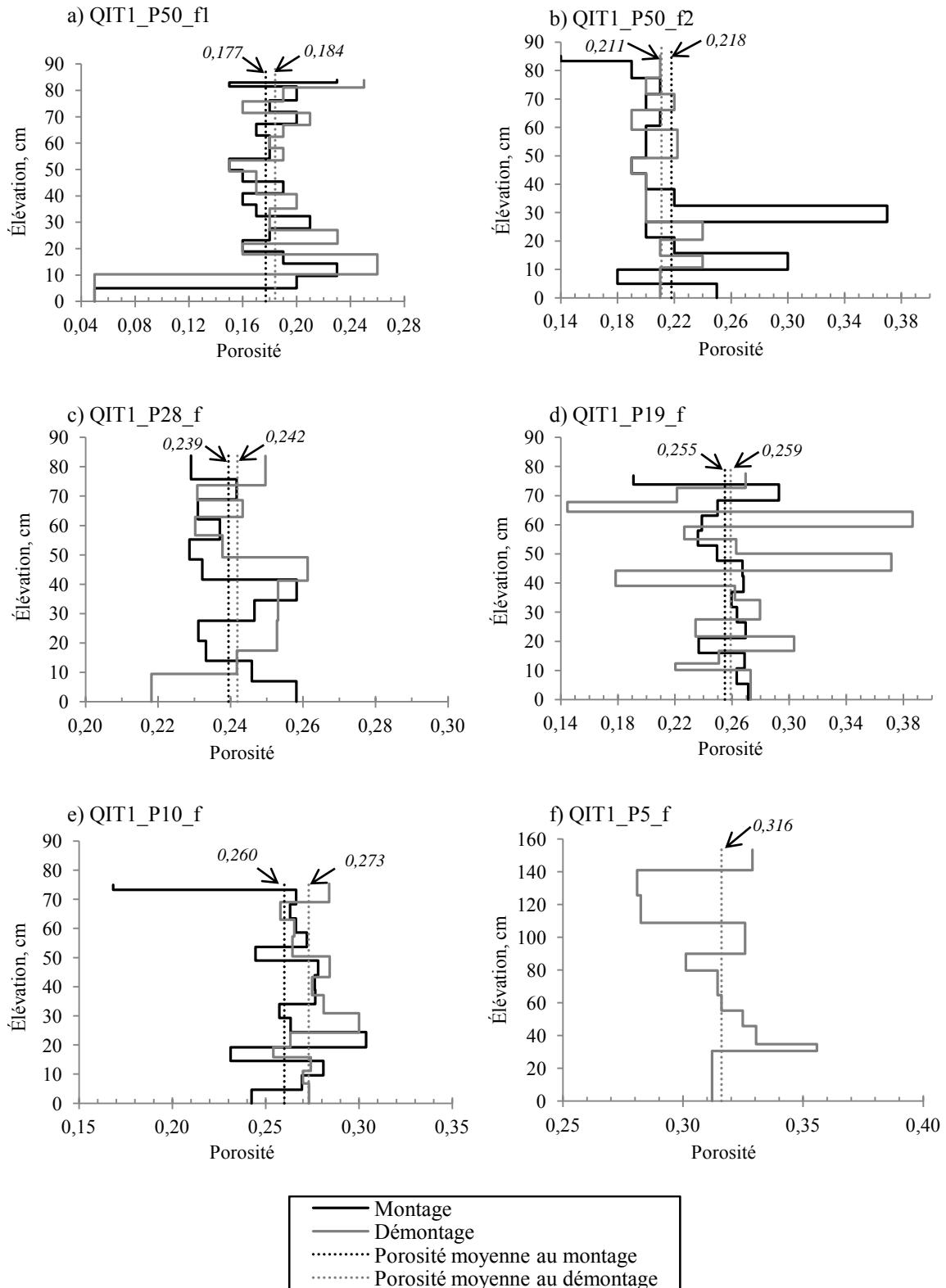


Figure 4.5 : Variation de la porosité des stériles à l'intérieur des colonnes sélectionnées (pour les diverses couches mises en place et au démontage).

En dernière analyse, on peut remarquer que la porosité calculée en utilisant les mesures des masses (M_s) et des volumes (V_T et V_s) pour la colonne entière (équations 3.5, 3.7 et 3.9) est pratiquement égale à la porosité moyenne calculée à partir des mesures prises pour chaque tranche enlevée au démontage de la colonne. La porosité estimée à partir de la teneur en eau volumique à saturation θ_s (équation 3.16 appliquée à la couche saturée au bas de la colonne) est souvent plus élevée. En prenant en considération toutes ces observations, on conclut que la valeur de n déterminée à partir des mesures de masses et de volumes pour la colonne entière reflète bien la porosité moyenne des stériles dans nos essais. Nous allons donc utiliser ces valeurs de n dans les calculs à venir.

Les résultats de nos essais hydrogéologiques (présentés plus loin dans le chapitre 4) ont aussi permis de mettre en lumière une caractéristique importante de la structure interne des roches stériles. Il s'agit de la présence d'une « double porosité », caractérisée par la coexistence d'une « mésoporosité globale » de la matrice et d'un système de macropores qui se forment en raison de l'étalement des stériles. Ainsi, la mésoporosité des stériles est liée à l'étalement de leur granulométrie. Les macropores apparaissent pour leur part autour de la fraction plus grossière. Ces aspects de la structure interne des stériles ainsi que leur incidence sur les caractéristiques hydriques des stériles sont discutés en détail plus loin dans les chapitres 4 et 5.

4.2 Migration des particules fines dans la matrice de la roche stérile

Les essais en colonne ont permis de démontrer que le détachement et le déplacement des particules fines de la roche stérile se produisent surtout à des vitesses d'écoulement élevées. En effet, la présence des particules solides dans l'eau drainée a été observée seulement pendant les essais de perméabilité menés avec des gradients hydrauliques élevés ($\geq 2 - 3$). Le même impact des conditions hydrauliques sur le transport des particules en milieu poreux (par exemple, des particules silteuses dans un gravier) a été observé dans les essais menés par Massei et al. (2002), Benamar et al. (2005), et Alhaddad et al. (2008). La turbidité de l'eau récupérée nous a servi d'indicateur de la présence de particules en suspension. À titre d'exemple, la figure 4.6 montre la différence entre l'eau propre (du robinet) et l'eau récupérée pendant un essai de perméabilité sur l'échantillon QIT1_P50_f2. La couleur foncée de l'eau indique que des particules mises en mouvement par l'écoulement ont été évacuées à l'extérieur de la colonne expérimentale.

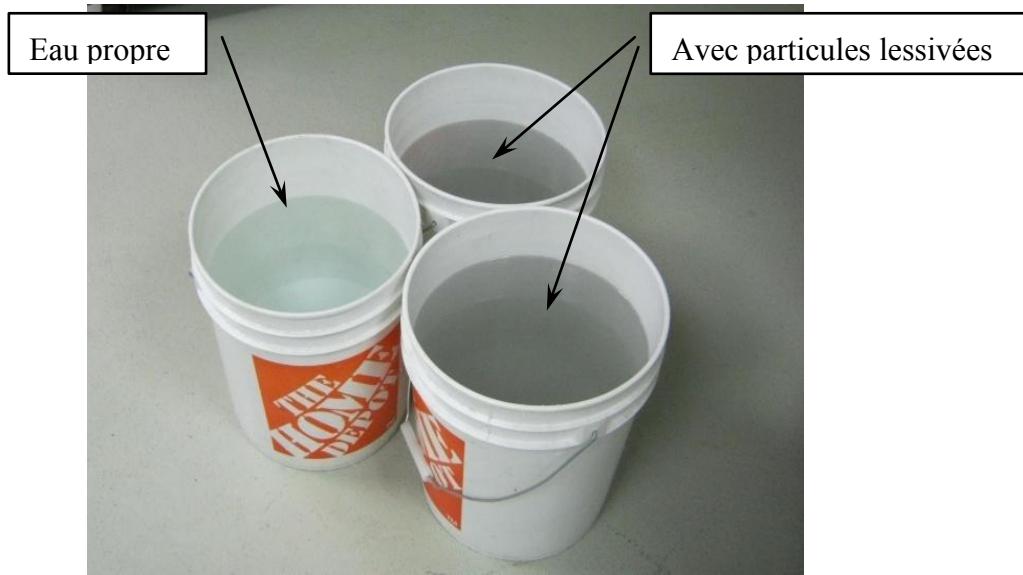


Figure 4.6 : Illustration de la turbidité élevée de l'eau récupérée à la sortie de la colonne QIT1_P50_f2 pendant un essai de perméabilité (deux chaudières de droite).

Une partie des particules entraînées a donc été évacuée de la colonne expérimentale avec l'eau drainée. Une autre partie de ces particules a été retenue par le géotextile placé au fond de chaque colonne expérimentale et par le sable filtrant placé au fond des colonnes QIT1_P19_f et QIT1_P10_f. On a observé que la masse des particules récupérées dans l'eau drainée diminuait pour les essais sur les fractions plus fines des stériles. En conséquence, la quantité de particules qu'on a réussie à recueillir dans les essais sur les fractions inférieures à 19 mm de diamètre n'était pas suffisante pour réaliser les tests de caractérisation. On a donc été obligé de combiner les particules récupérées lors des différents essais afin d'obtenir la quantité de matériau nécessaire à la caractérisation pour les mélanges # 1 et # 2 ; ces deux mélanges contiennent les particules en suspension dans l'eau récupérée lors des essais dans les colonnes QIT1_P19_f, QIT1_P10_f et QIT1_P5_f.

La composition minéralogique des particules drainées est montrée dans le tableau 4.6 pour les deux échantillons ainsi obtenus (mélange # 1 et mélange # 2 dans le tableau 4.6). D'après ces résultats, il semble que les silicates, notamment le labrador, soient mis en mouvement et transportés plus facilement en comparaison avec les minéraux plus lourds comme l'ilménite et

l'hématite (à base de Fe et Ti). La proportion de ces deux minéraux (labrador et hémo-ilménite) dans la composition initiale des différents échantillons des stériles est toujours soit pratiquement pareille (25 – 40 %), soit c'est l'hémo-ilménite qui domine (tableau 4.3). Le pourcentage de labrador dans les particules en suspension est cependant plus élevé par rapport à l'ilménite, soit 25 – 29 % et 15 – 18 % respectivement (tableau 4.6). Il se peut aussi que les fractions les plus fines des stériles, notamment les fractions capables de migrer à travers la matrice granulaire, contiennent plus de labradorite que d'hémo-ilménite en raison du broyage plus fin des silicates. Ceci semble être confirmé par les valeurs de la densité relative (D_r) obtenues pour les différentes fractions granulométriques des stériles. Ainsi, on a constaté que la valeur de D_r diminue progressivement dans les fractions inférieures à 5 mm des stériles testés (figure 4.4). Les fractions plus fines contiendraient donc moins de minéraux lourds (Fe-Ti), c'est-à-dire moins d'hémo-ilménite.

Tableau 4.6 : Composition minéralogique des particules fines entraînées lors des essais de perméabilité en colonne sur les stériles QIT1, obtenue par analyse de diffraction aux rayons X (DRX).

Minéraux	Mélange # 1*	Mélange # 2*
<i>Particules lessivés des stériles</i>	%	%
Labrador	24,59	29,06
Ilménite	15,42	18,22
Hématite	5,70	6,62
Orthose	1,35	
Biotite	1,01	0,78
Pyrite	0,24	
<i>Particules lessivés du sable</i>		
Hypersthène	4,95	5,66
Chlorite	16,78	18,89
Muscovite	14,63	13,43
Actinote	10,63	
Calcite	4,71	5,08

* Mélange # 1 et mélange # 2 sont composés de particules en suspension dans l'eau récupérée lors des essais QIT1_P19_f, QIT1_P10_f et QIT1_P5_f.

Il faut ajouter que certains minéraux qui ont été détectés dans les particules récupérées dans l'eau drainée n'étaient pas présents dans la composition initiale des stériles testés (ou étaient présents en quantité minime). Ceux-ci pourraient provenir du sable filtrant placé au fond des colonnes QIT1_P19_f et QIT1_P10_f. Il s'agit notamment de muscovite, chlorite et calcite (tableau 4.6). C'est l'hypothèse qui est retenue ici.

En ce qui concerne la granulométrie des particules entraînées, la figure 4.7 montre les résultats de l'analyse granulométrique des particules en suspension dans l'eau recueillie à la sortie des colonnes de stériles «grossiers» QIT1_P50_f2 et QIT1_P28_f, ainsi que la granulométrie des deux mélanges de particules lessivées dans les essais sur les matériaux plus fins (QIT1_P19_f, QIT1_P10_f et QIT1_P5_f).

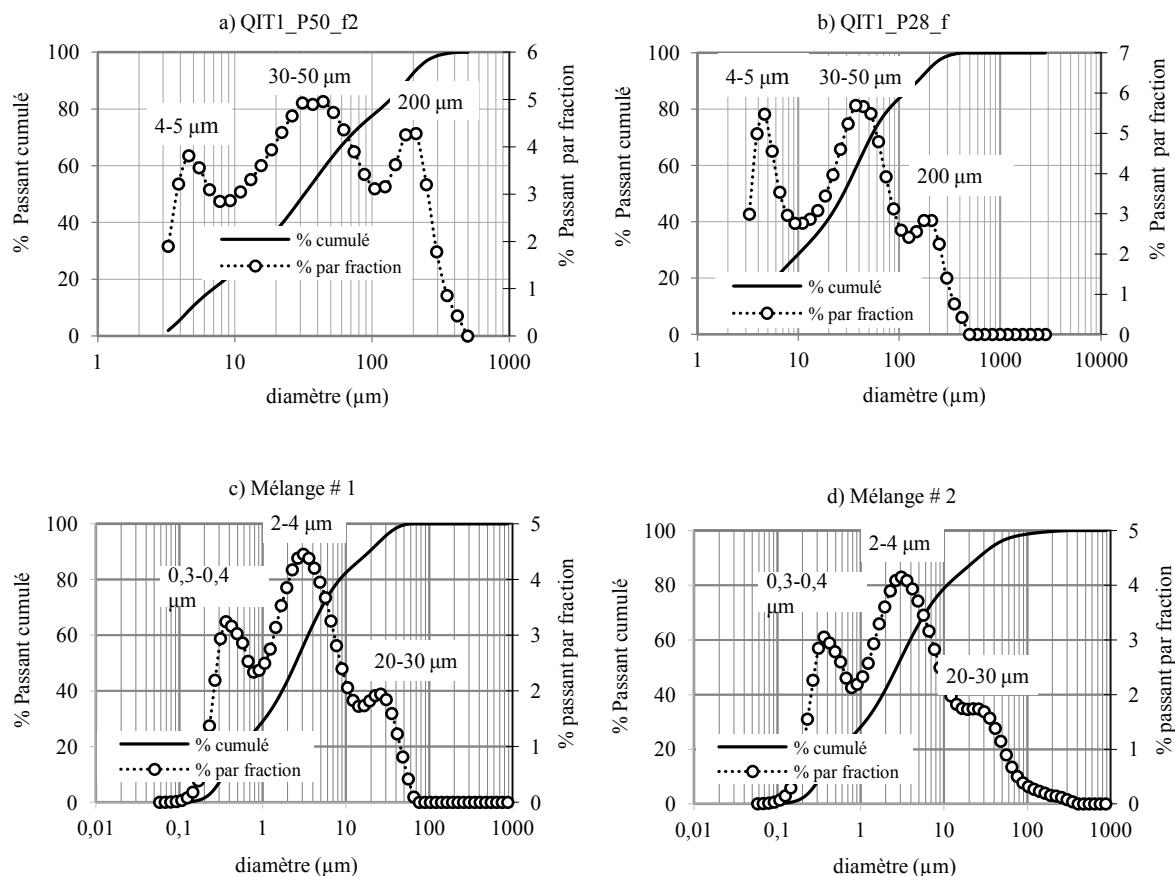


Figure 4.7 : Résultats des analyses granulométriques au laser des particules en suspension dans l'eau récupérée à la sortie des colonnes (voir texte pour les détails sur les mélanges # 1 et # 2).

La figure 4.8 présente la granulométrie des particules retenues par le géotextile (obtenues par le lavage du géotextile à l'eau et séchage des eaux récupérées). Selon les résultats des analyses granulométriques (figures 4.7 et 4.8), le diamètre maximal des particules qui se sont déplacées dans la matrice de la roche stérile, dans les conditions de laboratoire, est d'environ 0,4 mm. Dans les stériles plus grossiers, l'eau a transporté les particules plus grosses que dans les matériaux plus fins. Ainsi, dans les essais sur les stériles grossiers (QIT1_P28 et QIT1_P50), les dimensions des particules en suspension pouvaient atteindre 0,4 mm (ou 400 µm), alors que dans les essais sur les matériaux plus fins (QIT1_P19_f, QIT1_P10_f et QIT1_P5_f) le diamètre des particules lessivées n'excédait pas 0,070 mm (ou 70 µm).

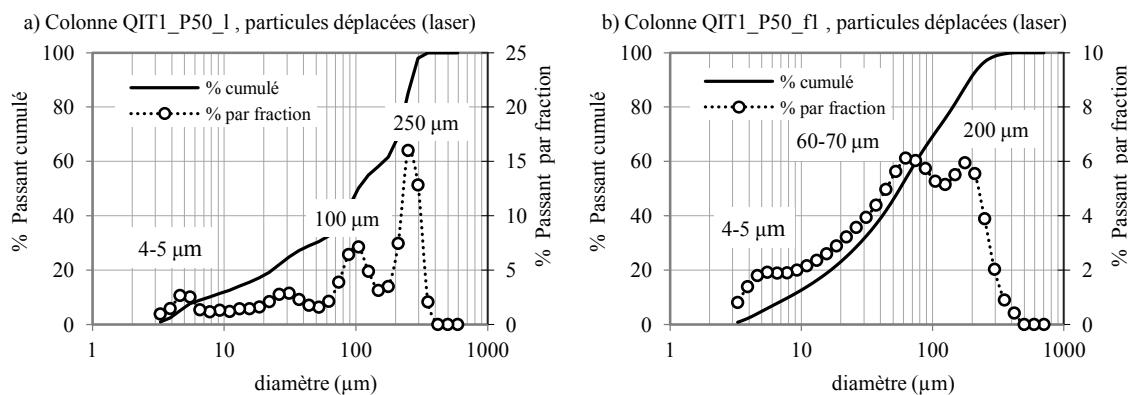


Figure 4.8 : Résultats des analyses granulométriques au laser des particules retenues par le géotextile au fond des colonnes expérimentales.

On remarque aussi que dans les deux types d'échantillon de matériaux fins récupérés et analysés, soit les particules en suspension dans l'effluent et les particules capturées par le géotextile au fond de la colonne, on peut distinguer trois fractions granulométriques qui dominent les particules entraînées. Sur les courbes granulométriques, on voit trois modes (pics) qui correspondent à des tailles des particules de 200 - 300 µm, 30 - 70 µm et 4 - 5 µm pour les colonnes de stériles plus grossiers, et 20 - 30 µm, 2 - 4 µm et 0,2 - 0,4 µm pour les colonnes de stériles plus fins (figures 4.7 et 4.8). Ces résultats suggèrent que, dans les conditions de laboratoire, la taille des particules pouvant migrer dans la matrice de roche stérile dépend de la

granulométrie des stériles. Dans les stériles grossiers, l'eau peut transporter des particules plus grandes que dans les matériaux plus fins.

Si l'on compare les courbes granulométriques des particules transportées avec la granulométrie initiale de la roche stérile, on peut voir que la courbe initiale présente également trois modes pour les particules fines, qui sont assez similaires à ceux observés pour les particules transportées (figure 4.9). Cependant, la magnitude relative de ces pics et le diamètre des particules diffèrent de ceux observés pour les particules récupérées. Il ne s'agit donc pas simplement d'un effet direct de la distribution de la taille des particules sur la granulométrie des particules déplacées. Néanmoins, on constate que les particules dont la taille est d'environ 200, 30 – 50 et 4 – 5 µm pour les colonnes de stériles « grossiers » et 20 – 30 µm, 2 – 4 µm et 0,2 – 0,4 µm pour les stériles plus « fins », sont transportées en plus grande quantité à travers la matrice des stériles testés.

Certaines des particules arrachées de la matrice par les forces hydrodynamiques peuvent rester piégées dans le milieu poreux en formant des zones de colmatage (Harvey et al., 1993; Silliman, 1995; Alem et al., 2006). Ceci est particulièrement vrai pour les matériaux à granulométrie étalée comme les stériles miniers. Il est donc possible que dans nos essais, une partie des particules mises en mouvement par l'écoulement ne soit pas parvenue à traverser toute la colonne expérimentale et n'ait pas été évacuée en dehors avec l'effluent. De telles particules peuvent être bloquées dans les pores de la matrice des stériles à différents endroits de la colonne. Afin d'évaluer si c'était le cas, on a analysé la granulométrie des stériles après les essais à trois différents niveaux le long de la colonne expérimentale. Les résultats les plus représentatifs sont montrés à la figure 4.10 (tous les autres résultats sont présentés dans l'annexe 6).

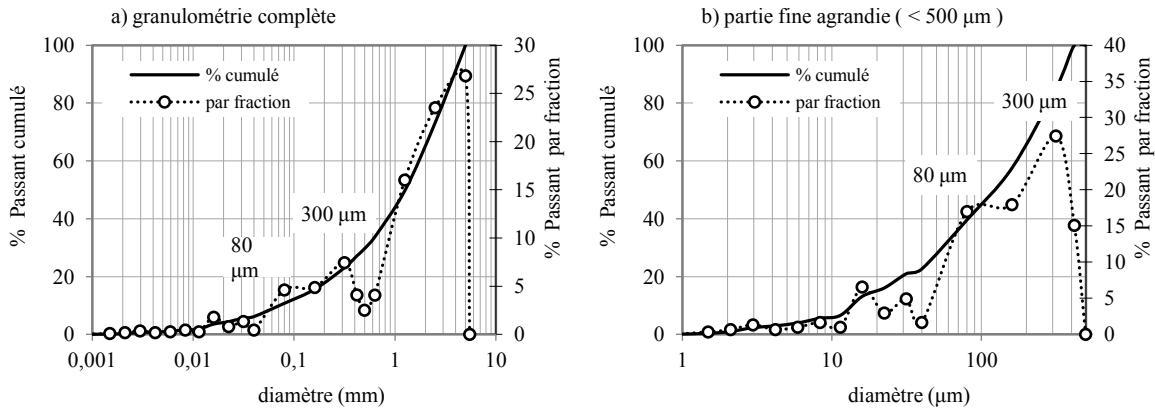


Figure 4.9 : Résultats des analyses granulométriques de la fraction passant au tamis 5 mm de l'échantillon initial de la roche stérile QIT1 avant les essais au laboratoire.

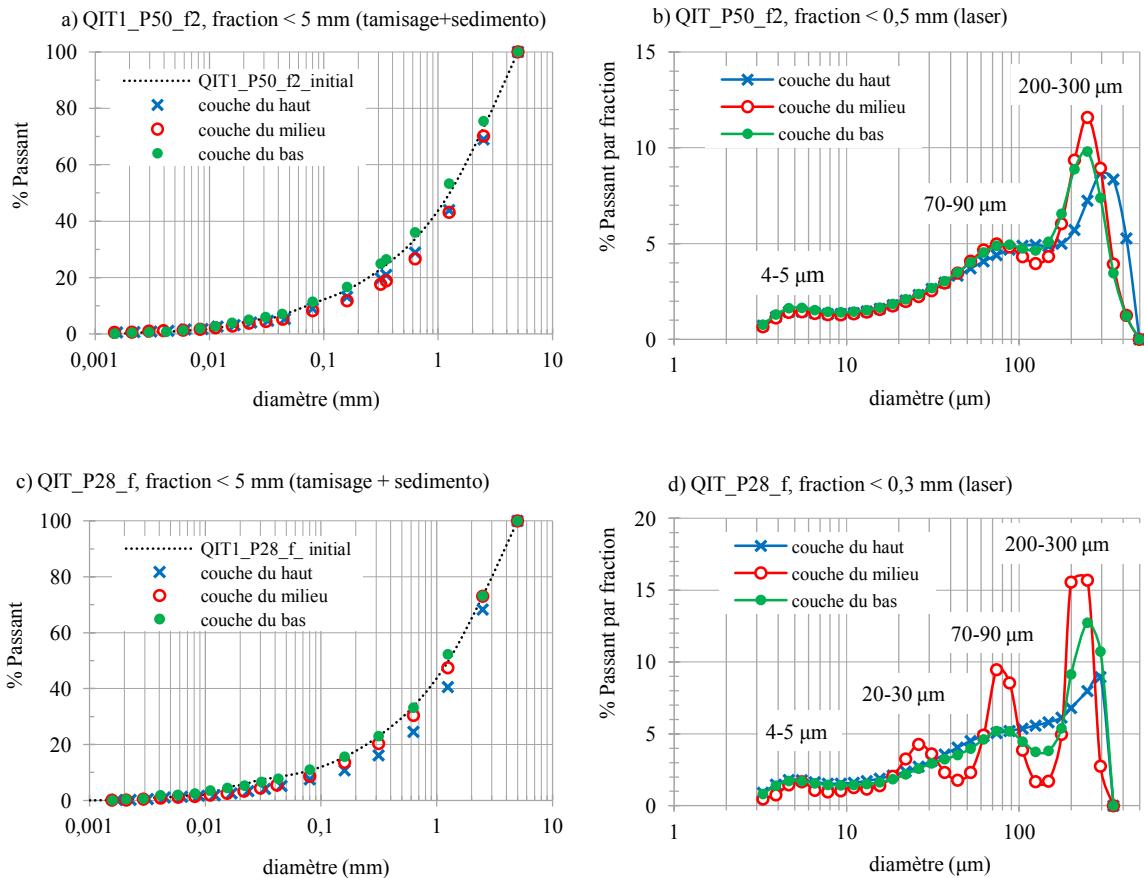


Figure 4.10 : Résultats des analyses granulométriques des matériaux après le démontage des colonnes QIT1_P50_f2 et QIT1_P28_f.

Sur les courbes granulométriques complètes, on voit que la distribution des stériles échantillonnés après les essais en haut, au milieu et en bas de la colonne semble avoir légèrement changé par rapport à la granulométrie initiale (figures 4.10a et 4.10c). La granulométrie des stériles en bas de la colonne est restée similaire entre le début et la fin des essais. En haut de la colonne toutefois, la proportion de particules fines a diminué par rapport à la granulométrie initiale. Si l'on regarde plus en détail la partie « fine » de la courbe granulométrique, on peut remarquer que les proportions des particules dont la taille est d'environ 200 à 300 µm fluctuent sur les 3 horizons échantillonnés (figures 4.10b et 4.10d). Selon ces figures, des particules de 200-300 µm de diamètre ont été entraînées de la partie supérieure des stériles, et se sont déposées au milieu de la colonne. Comme le montre la figure 4.10, le déplacement de ces particules a modifié la granulométrie de la fraction fine (inférieure à 300 µm) des stériles.

Rappelons que tous les échantillons analysés dans ce volet du projet, incluant les particules en suspension, les particules capturées par le géotextile et les particules emprisonnées à l'intérieur de la colonne, ont présenté des tailles similaires pour les particules mobiles. On peut donc conclure que les particules dont la taille est d'environ 250 µm (jusqu'à 400 µm au maximum) sont capables à se détacher et se déplacer dans la matrice de ces stériles. Dans le chapitre 5, on discutera du lien entre la taille des particules entraînées et la structure interne du milieu poreux étudié.

4.3 Mesures de la conductivité hydraulique saturée

Comme on l'a mentionné dans le chapitre 3, de 15 à 20 mesures de la perméabilité à charge constante et à charge variable ont été réalisées en colonne sur chaque échantillon de roches stériles. Un exemple de données obtenues lors des essais de perméabilité sur un échantillon testé en colonne est présenté dans le tableau 4.7 ; les résultats détaillés des essais de perméabilité sur les autres échantillons de stériles sont présentés à l'annexe 4. Dans le tableau 4.7, les résultats des essais sont présentés par ordre chronologique avec l'indication du type d'essais (essai à charge constante *CC* ou à charge variable *CV*) et des gradients hydrauliques imposés par la cellule de Mariotte ou mesurés à l'aide de piézomètres. Les valeurs moyennes de k_{sat} pour chaque type d'essais sont fournies avec la valeur de k_{sat} représentative de l'échantillon à la fin du tableau. La valeur de k_{sat} jugée représentative est calculée selon la moyenne arithmétique des valeurs de k_{sat}

obtenues des essais à charge constante à faible gradient hydraulique ($i < 0,3$) et des valeurs obtenues des essais à charge variable.

Tableau 4.7 : Résultats des mesures de la conductivité hydraulique saturée des stériles lors des essais en colonne (échantillon QIT1_P28_f).

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s	
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos
1	CC1	0,20	0,16	9,9E-02	1,2E-01
2	CC2	0,20	-	1,1E-01	2,2E-01
3	CC3	0,20	0,07 - 0,19	1,0E-01	1,8E-01
4	CC4	0,20	0,07 - 0,19	1,0E-01	1,8E-01
5	CV1	0,17 à 0,56		9,7E-02	-
6	CC5	1,00	-	7,5E-02	-
7	CC6	1,00	-	7,4E-02	-
8	CV2	0,04 à 0,40		1,1E-01	-
9	CC7	2,00	-	5,9E-02	-
10	CC8	2,00	-	6,0E-02	-
11	CV3	0,04 à 0,52		1,0E-01	-
12	CC9	2,78	-	5,4E-02	-
13	CC10	2,78	-	5,2E-02	-
14	CV4	0,09 à 0,56		1,0E-01	-
15	CC11	0,21	0,10	9,7E-02	1,9E-01
16	CC12	0,21	0,10	9,8E-02	2,0E-01

	k_{sat} moyen, cm/s
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)	1,0E-01
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)	1,8E-01
Essais à charge variable CV	1,0E-01
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)	1,4E-01

* CC – essai à charge constante, CV – essai à charge variable

** i est contrôlé par la pression imposée avec la cellule de Mariotte ou mesurée à l'aide des piézomètres.

La figure 4.11 montre les valeurs de k_{sat} obtenues pour les échantillons testés pendant toute la séquence des essais de perméabilité. On peut constater qu'en général, les essais à charge variable donnent des valeurs de conductivité hydraulique proches de celles mesurées lors des essais à charge constante à faible gradient hydraulique ($i < 0,3$, figure 4.11) ; rappelons que lors d'un

essai à charge variable, le gradient hydraulique i décroît progressivement (usuellement de $\approx 0,6$ à $\approx 0,04$). Sur la figure 4.11, on note aussi que la différence entre les valeurs mesurées de k_{sat} pour les essais à charge constante et les essais à charge variable est plus importante pour des gradients hydrauliques plus élevés ($i \geq 1$, figure 4.11). Cette différence pourrait être reliée (du moins en partie) aux pertes de charge dans les tuyaux à l'entrée et à la sortie de la colonne, qui sont plus importantes lors des essais à gradient élevé.

Dans la suite, les valeurs de la conductivité hydraulique obtenues des essais à gradient élevé ($i \geq 1$) ne seront pas prises en compte pour déterminer une valeur de k_{sat} représentative de l'échantillon testé. Rappelons que cette valeur de k_{sat} est calculée comme la moyenne arithmétique des valeurs obtenues des essais à charge constante à faible gradient (basée sur les mesures dans les piézomètres) et les valeurs obtenues lors des essais à charge variable d'autre part, pour i déterminé à partir des charges imposées aux limites de la colonne. Le tableau 4.8 présente les valeurs de la conductivité hydraulique saturée moyenne obtenues dans la présente étude pour les stériles de la mine Lac Tio.

Tableau 4.8 : Compilation des résultats des essais de perméabilité sur les stériles, incluant les valeurs moyennes de k_{sat} considérées comme représentatives des échantillons.

Matériau	n^*	e^*	Charge variable	k_{sat} à 20°C, cm/s		Représentatif de l'échantillon
				Mariotte	Piézomètres	
QIT1_P50_f1	0,18	0,22	3,5E-02	2,9E-02	7,5E-02	4,3E-02
QIT1_P50_f2	0,21	0,27	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01
QIT1_P50_lâche	0,30	0,43	1,7E-01	2,5E-01	6,8E-01	4,3E-01
QIT1_P50_1	0,22	0,28	8,8E-02	8,9E-02	8,0E-02	8,4E-02
QIT1_P28_f	0,24	0,32	1,0E-01	1,0E-01	1,8E-01	1,4E-01
QIT1_P28_1	0,20	0,25	3,1E-02	2,2E-02	2,3E-02	2,7E-02
QIT1_P19_f	0,27	0,37	1,3E-01	1,1E-01	1,0E-01	1,2E-01
QIT1_P10_f	0,28	0,39	9,1E-02	1,1E-01	1,2E-01	1,1E-01
QIT1_P5_f	0,31	0,45	1,9E-02	1,7E-02	3,5E-02	2,7E-02
QIT1_P2_f	0,34	0,52	3,0E-03	3,2E-03	3,9E-03	3,6E-03

*Valeurs obtenues selon équations 3.9 et 3.10 pour la colonne entière (voir tableau 4.5)

**Résultats des essais à faible gradient hydraulique ($i \leq \approx 0,3$)

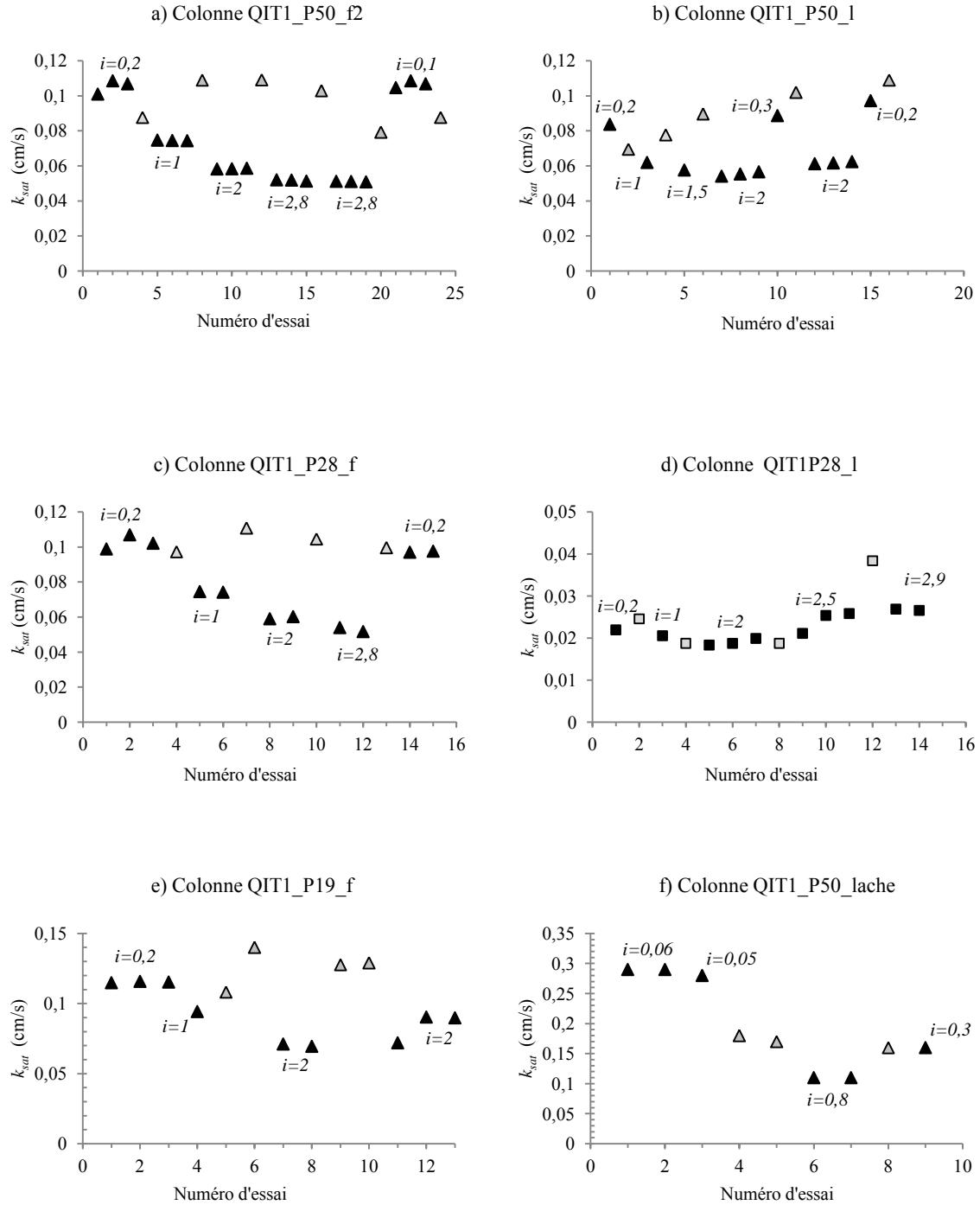


Figure 4.11 : Conductivité hydraulique saturée (k_{sat} à 20°C) des stériles selon le type d'essai (noir – essais à charge constante ; gris – essais à charge variable ; i – gradient hydraulique).

Nos observations suggèrent aussi que la conductivité hydraulique des stériles peut varier à l'intérieur de la colonne expérimentale de manière assez significative. Le tableau 4.9 montre les valeurs de k_{sat} déduites des mesures de perte de charge sur les piézomètres dans les différentes couches des stériles.

Tableau 4.9 : Conductivité hydraulique des stériles telle que déduite des mesures piézométriques à l'intérieur des colonnes expérimentales.

Position des piézomètres dans la colonne	k_{sat} mesuré [cm/s]			
	QIT1_P10_f (essai CC1)	QIT1_P28_f (essai CC3)	QIT1_P50_f2 (essai CC3)	QIT1_P50_lâche (essai CC1)
Haut	1,3E-01	1,0E-01	7,8E-02	1,1E+00
Bas	1,3E-01	2,8E-01	9,5E-02	4,2E-01
k_{sat} moyen*, [cm/s]	1,1E-01	1,4E-01	1,0E-01	4,3E-01

* valeurs moyennes (présentées au tableau 4.8)

On peut voir que dans ces essais (surtout dans les colonnes avec matériaux plus grossiers), la valeur de k_{sat} mesurée en haut de la colonne diffère (d'un facteur de 2 à 3) de celle déterminée dans la partie inférieure de la colonne. Cela serait dû en partie à l'hétérogénéité des stériles et à la présence de macropores autour des particules les plus grossières. Cette « macroporosité » fait varier la conductivité hydraulique saturée à travers la colonne expérimentale.

Les résultats obtenus ici indiquent également que la conductivité hydraulique des stériles est peu influencée par la présence de diverses proportions de cailloux. La figure 4.12 montre ainsi qu'il n'y a aucun lien apparent entre les valeurs de k_{sat} obtenues dans les essais et les valeurs de D_{10} et D_{60} des échantillons testés. La conductivité hydraulique mesurée dans la présente étude est pratiquement la même pour toutes les fractions granulométriques étudiées. Elle varie autour de 10^{-1} cm/s (de 0,03 à 0,14 cm/s), sauf dans le cas du matériau grossier plus lâche QIT1_P50_lâche où $k_{sat} \approx 0,4$ cm/s.

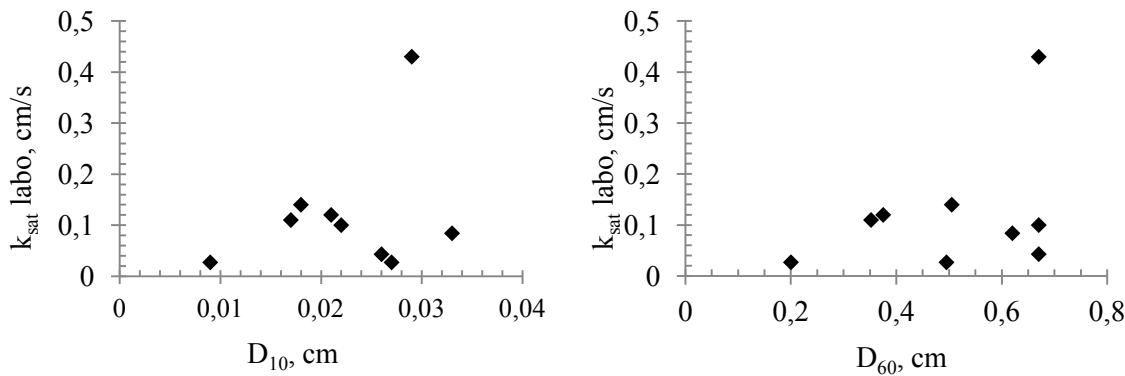


Figure 4.12 : Valeurs de la conductivité hydraulique (k_{sat}) moyennes mesurées lors des essais en fonction des paramètres granulométriques D_{10} et D_{60} des stériles.

Pour aider à valider les mesures de k_{sat} à partir des essais en colonne, on a aussi mesuré la valeur de k_{sat} du mélange Sigma-Demers (résidus miniers – sable, voir section 3.4.3) dans la grande colonne. On a obtenu une valeur identique à celle déterminée auparavant sur un autre montage expérimental. Les résultats de ces essais sont montrés dans le tableau 4.10.

De plus, deux essais dans de petits perméamètres ont également été réalisés pour mesurer les valeurs de k_{sat} sur les mêmes échantillons de roches stériles (sans cailloux) qui ont été testés dans les grandes colonnes (échantillons QIT1_P10_f et QIT1_P5_f). On peut voir au tableau 4.10 que les valeurs de k_{sat} obtenues avec les deux montages expérimentaux sont assez similaires. Ce tableau présente aussi les valeurs de k_{sat} prédictes avec les modèles KC et KCM pour le mélange Sigma-Demers.

Tableau 4.10 : Comparaison des valeurs de la conductivité hydraulique (k_{sat}) obtenue dans les essais en colonne avec les valeurs de k_{sat} déterminées dans les perméamètres à parois rigides de dimension standard.

Équipement utilisé	Sigma – Demers			QIT1_P10_f		QIT1_P5_f	
	k_{sat} (cm/s)			Porosité n [-]	k_{sat} (cm/s)	Porosité n [-]	k_{sat} (cm/s)
	Labo	KC*	KCM*				
Colonne	1,34E-03			0,4	1,31E-01	0,3	4,60E-02
Perméamètre	1,26E-03	1,08E-03	1,80E-03	0,4	3,67E-02	0,3	4,99E-02

* valeurs prédites selon les modèles de Kozeny-Carman (KC, éq. 2.7) et Kozeny-Carman modifié (KCM, éq. 2.8)

4.4 Résultats des essais de traceur et interprétation préliminaire

Les essais de traceur (au NaCl) ont été réalisés sur deux échantillons à granulométrie distincte, soit QIT1_P5_f et QIT1_P50_lâche selon la procédure décrite à la section 3.4.4. Le tableau 4.11 fournit les conditions et les principaux résultats de ces essais. La figure 4.13 présente les courbes d'apparition du traceur obtenues pour les deux essais en colonnes. La figure 4.14 montre les courbes de débit de sortie lors de ces essais.

Tableau 4.11 : Conditions et résultats de l'essai de traceur.

Paramètres de l'essai	QIT1_P5_f	QIT1_P50_lâche
Concentration initial du traceur, C_o [g/L]	5	10
Débit sortant Q [cm^3/s]	1,1	19,6
Section de la colonne A [cm^2], diamètre D [cm]	82,37 (10,24 cm)	672,47 (29,26 cm)
Longueur de l'échantillon L [cm]	153,4	60,3
Vitesse de Darcy V_a ($V_a = Q/A$) [cm/s]	0,014	0,029
Première arrivée du traceur t_{arr} [min]	22	4
Porosité moyenne au démontage n [-]	0,31	0,3

Dans des travaux précédents (Bui, 2007; Gaillot, 2007; Bourrel, 2008; Intissar, 2009), une analyse des paramètres de dispersion du traceur dans les stériles de la mine Tio a été effectuée à travers la résolution de l'équation d'advection-dispersion selon la méthode de Ogata et Banks (1961) présentée dans Domenico et Schwartz (1997). Dans la présente étude, nous avons utilisé

la méthode des paramètres adimensionnels de Sauty (1980) afin de fournir une évaluation des paramètres suivants : le temps d'advection t_{adv} , le coefficient de dispersion longitudinale D_L et la dispersivité longitudinale α_L (voir section 2.3.2 pour les définitions). Dans le cas d'une injection continue du traceur dans un champ uni-dimensionnel, l'équation de restitution du traceur sous forme adimensionnelle est la suivante (Sauty, 1980) :

$$C_r(t_r, Pe) = 0,5 \left\{ erfc \left(\left(\frac{Pe}{4t_r} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - t_r) \right) - exp(Pe) erfc \left(\left(\frac{Pe}{4t_r} \right)^{\frac{1}{2}} (1 + t_r) \right) \right\} \quad (4.1)$$

où C_r – concentration normalisée égale à C/Co [-],
 t_r – temps normalisé égale à t/t_{max} (t_{max} correspond au temps t à $C_r(C/Co) = 0,5$) [-],
 Pe – nombre de Peclet [-].

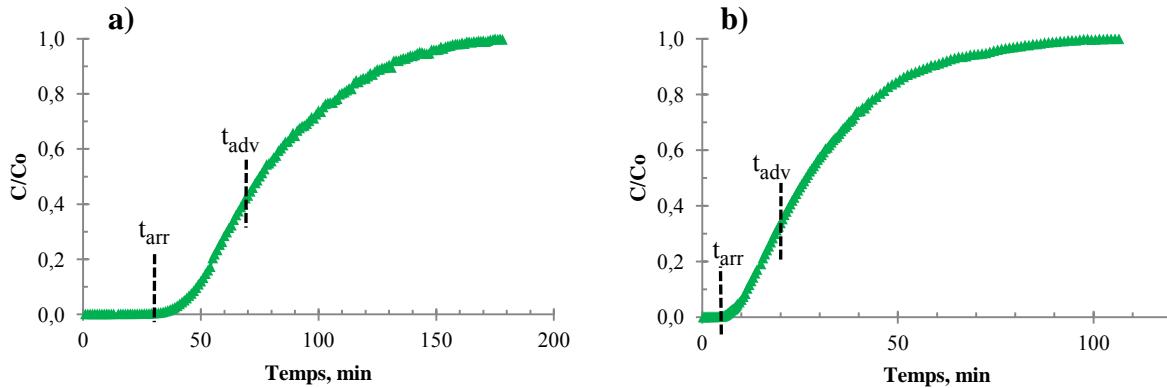


Figure 4.13 : Courbes d'apparition du traceur à la sortie: a) colonne QIT1_P5_f; b) colonne QIT1_P50_lâche.

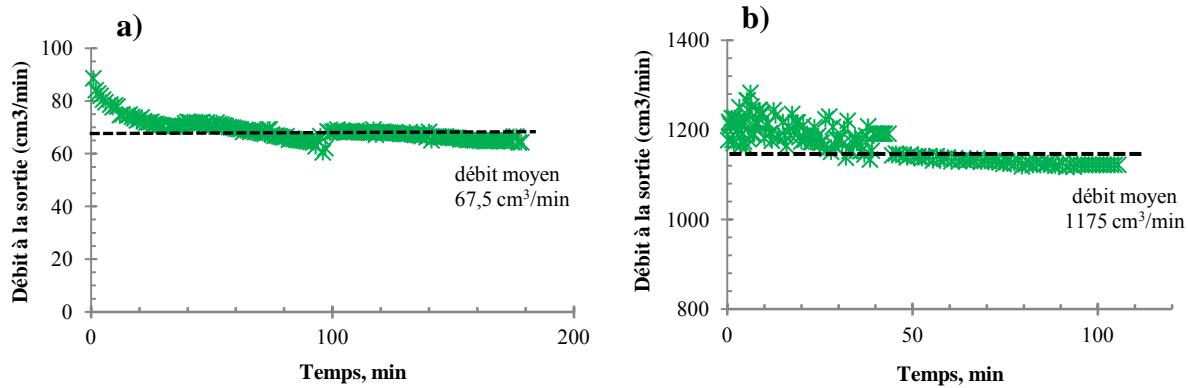


Figure 4.14 : Mesures du débit d'eau à la sortie lors de l'essai de traceur pour la colonne: a) QIT1_P5_f, b) QIT1_P50_lâche.

En suivant la méthode de Sauty (1980), on peut construire les courbes-types pour différentes valeurs de nombre de Peclet (Pe) (figure 4.15). Ceci permet d'évaluer la valeur du nombre de Peclet pour les matériaux testés par une superposition des courbes-types aux courbes d'apparition de traceur mesurées dans les essais (figure 4.16). Ces valeurs de Pe permettent d'évaluer les paramètres de dispersion, selon les équations fournies dans le tableau 4.12.

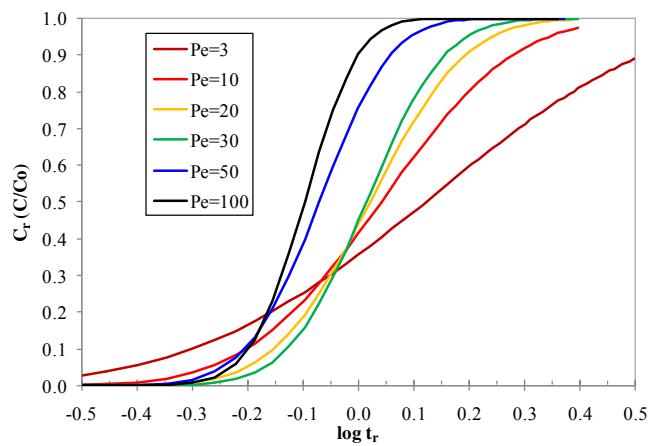


Figure 4.15 : Courbes types calculées pour le cas d'une injection continue du traceur dans un champ uni-dimensionnel, selon la méthode de Sauty (1980).

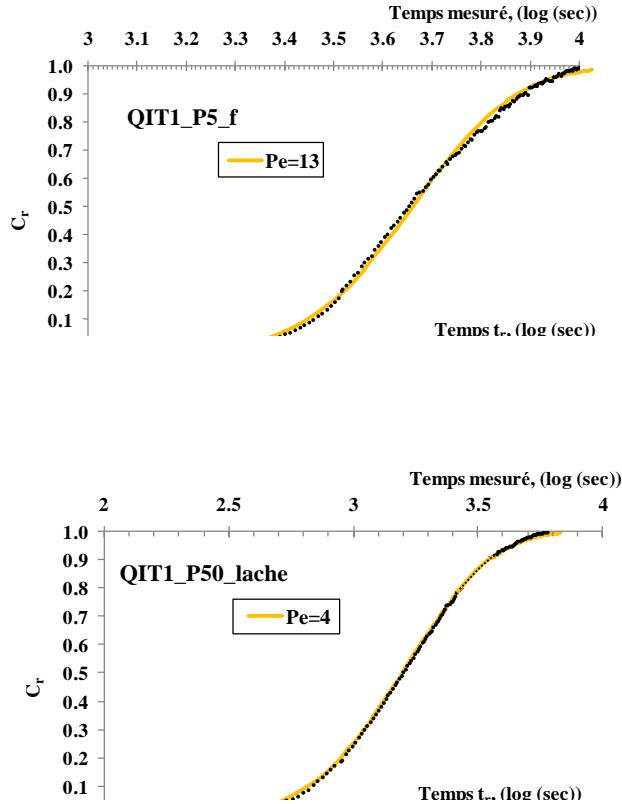


Figure 4.16 : Superposition des courbes mesurées durant les essais de traceur (C_r vs *log temps*) aux courbes types selon la méthode de Sauty (1980).

Tableau 4.12 : Estimation de paramètres d’advection-dispersion selon la méthode de Sauty (1980)*.

Paramètres	Méthode	QIT1_P5_f	QIT1_P50_lâche
Pe	Superposition des courbes	13	4
t_{adv} (min)	$\log t_{adv} = \log t_{max} - \log t_r$	71	21
$\log t_{max}$	courbe d’essai ($C/Co = 0,5$)	3,66	3,2
$\log t_r$	courbe type ($C_r = 0,5$)	0,03	0,1
V_x (cm/s)	$V_x = L/t_{adv}$	0,036	0,048
D_L (cm ² /s)	$D_L = V_x L/Pe$	0,42	0,72
α_L (cm)	$\alpha_L = L/Pe$	12	15

* Définition des paramètres présentés dans ce tableau (voir aussi chapitre 2) : Pe – nombre de Peeclet ; t_{max} – temps à $C/Co = 0,5$ sur la courbe d’apparition de traceur ; t_r – temps normalisé égal à t/t_{max} ; C_r - concentration normalisée égale à C/Co ; t_{adv} – temps d’advection ; Vx – vitesse linéaire dans les pores ; L – longueur de l’échantillon ; D_L – coefficient de dispersion longitudinale ; α_L – dispersivité longitudinale.

Pour l'échantillon QIT1_P5_f, le traceur produit une augmentation de la conductivité électrique de l'eau à la sortie de la colonne au bout de 22 minutes d'injection (figure 4.13a). Le temps d'advection pour le même échantillon est estimé à 71 min selon la méthode de Sauty (1980) (tableau 4.12).

En ce qui concerne la colonne QIT1_P50_lâche, le temps d'arrivée du traceur au bas de l'échantillon est de 4 min, alors que le temps d'advection est égal à 21 min (figure 4.13b). Cette différence témoigne de la dispersion mécanique, qui joue un rôle relativement important dans le transport du traceur dans les stériles testés. Dans ces matériaux grossiers et hétérogènes, une macro dispersion serait associée (en partie) à des voies d'écoulement préférentiel.

On peut remarquer que dans les colonnes QIT1_P5_f et QIT1_P50_lâche, le temps d'advection t_{adv} obtenu à l'aide de la méthode de Sauty (1980) est inférieur à la valeur de t_{50} (temps à $C/Co = 0,5$), ce qui suggère un retard du traceur par rapport au front advectif (figure 4.13). Ceci peut être dû, en partie, au fait que le débit d'eau mesuré à la sortie des deux colonnes lors des essais de traceur a diminué avec le temps avant de se stabiliser et d'atteindre une valeur constante (figure 4.14). La méthode de Sauty (1980) suppose que le débit est constant lors de l'essai. Une autre cause possible de ce retard du traceur serait l'adsorption des ions du Na^+ sur la surface des particules de roches stériles, notamment dans les endroits plus denses caractérisés par une faible perméabilité. Cependant, la récupération du traceur lors des deux essais approche 100%, ce qui indique que les ions de Na^+ n'ont pas été adsorbés à la surface des stériles en quantités significatives. Ce phénomène d'échange est donc considéré comme négligeable dans les conditions d'essais réalisés. Il est à noter que la même tendance ($t_{adv} < t_{50}$) a été observée dans les travaux antérieurs sur les stériles de la mine Tio (Bui, 2007 ; Intissar, 2009). Des études plus détaillées sont nécessaires afin de mieux comprendre ce phénomène.

Les valeurs de la dispersivité longitudinale (α_L) obtenues selon la méthode de Sauty (1980) sont de 12 cm pour le matériau QIT1_P5_f et de 15 cm pour le matériau QIT1_P50_lâche (tableau 4.12). Des valeurs assez semblables de dispersivité ont été obtenues dans les travaux antérieurs sur les stériles de la mine Tio. Par exemple, une valeur de $\alpha_L = 20$ cm a été déduite par Intissar (2009) pour la fraction des stériles QIT2 passant 10 mm, alors qu'une valeur de $\alpha_L = 10$ cm a été obtenue par Bui (2007) pour la même fraction granulométrique de la roche stérile.

4.5 Résultats des essais d'infiltration

Les essais d'infiltration ont été effectués dans le but d'identifier qualitativement la présence d'un système des macropores conducteurs dans la matrice de la roche stérile. Toutefois, la détermination exacte de la capacité d'infiltration I_c et du taux d'infiltration minimale, qui peut correspondre à la conductivité hydraulique saturée du sol, ne faisait pas partie de l'objectif du projet. Les essais ont été conduits d'une façon simplifiée, sous une charge variable dans les colonnes montées avec les deux derniers échantillons testés (c.-à-d. QIT1_P10_f et QIT1_P50_lâche ; voir section 3.4.6 pour les détails).

Les figures 4.17 et 4.18 montrent le volume cumulatif d'eau entrant et sortant de la colonne en fonction du temps mesurés lors des essais d'infiltration sur les matériaux QIT1_P10_f et QIT1_P50_lâche respectivement. Les figures 4.19 et 4.20 montrent le débit d'eau drainée au bas en fonction du temps pour les mêmes essais. Rappelons que le volume d'eau entrant est évalué en mesurant la hauteur d'eau au dessus de la surface (qui s'infiltra dans le matériau) avec une règle à divers intervalles de temps.

Puisque le drainage complet des matériaux testés prendrait beaucoup de temps (presque 2 semaines pour drainer une grande colonne initialement saturée), les deux essais d'infiltration, menés sur les colonnes QIT1_P10_f et QIT1_P50_lâche, ont été arrêtés avant la fin de drainage en raison de la nécessité de resaturer les matériaux et poursuivre d'autres essais en colonnes. Cela veut dire qu'au temps de la dernière mesure prise, au bout de deux jours environ, le volume d'eau infiltrée en haut des échantillons n'a pas encore été récupéré à 100 % à la sortie (voir figures 4.17b et 4.18b).

Dans les deux essais, 3,5 L d'eau ont été versés sur la surface (initialement couverte d'une pellicule de plastique) des matériaux non saturés (suite à la phase de drainage). Le temps nécessaire pour que cette eau s'infiltra dans les stériles est de 12,4 min pour l'échantillon QIT1_P10_f et de 7,0 min pour l'échantillon QIT1_P50_lâche. On peut voir que dans les deux essais, l'eau infiltrée qui percole à travers le matériau à l'intérieur de la colonne expérimentale arrive à la sortie en plus d'une phase. Pour la colonne QIT1_P10_f (échantillon de roche stérile de 75,4 cm de longueur plus une couche de sable filtrant de 7,5 cm d'épaisseur), deux phases ont été observées (figure 4.19). La première portion de l'eau à la sortie de la colonne est récupérée 2,5 s après le début de l'essai. Cette eau se draine avec un débit d'environ 400 mL/min. Avec le

temps, le débit diminue. L'écoulement de l'eau s'arrête au bout de 5,5 min. Après une pause d'environ 13 min, l'eau recommence à sortir de la colonne, ce qui constitue la deuxième phase d'écoulement. Le débit d'eau est alors plus faible, avec un débit maximal n'excédant pas 83 mL/min.

On peut supposer que la première portion de l'eau récoltée à la sortie lors de la première phase correspond (au moins en partie) à l'eau présente au bas de la colonne avant le début de l'essai et qui est expulsée de la colonne en raison de la surpression d'air créée à l'intérieur de la colonne au moment quand l'eau commence à s'infiltrer à la surface du matériau testé (lorsque l'on enlève la pellicule de plastique en surface). La deuxième portion de l'eau récupérée devrait correspondre (presqu'en totalité) à l'eau infiltrée de la surface.

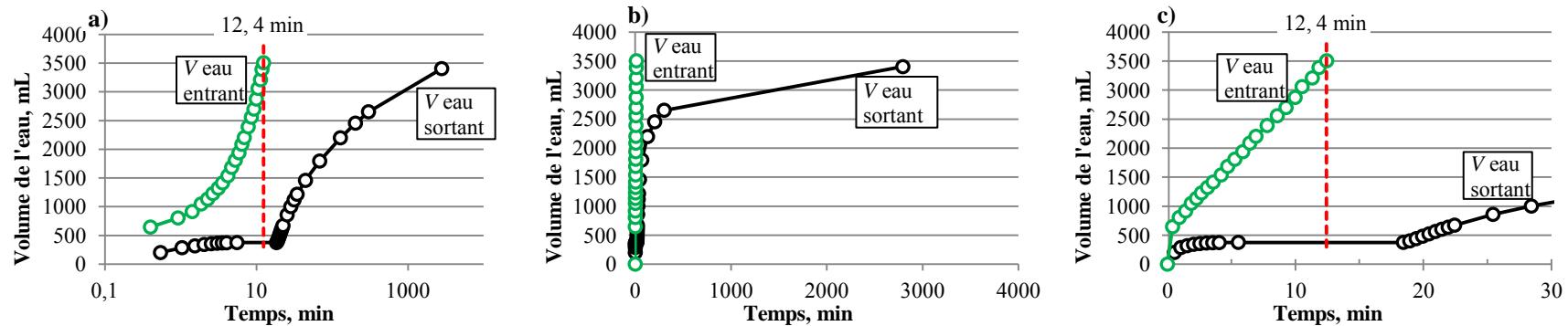


Figure 4.17 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration sur le matériau QIT1_P10_f : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique; c) début de l'essai présenté en détail sur une échelle arithmétique.

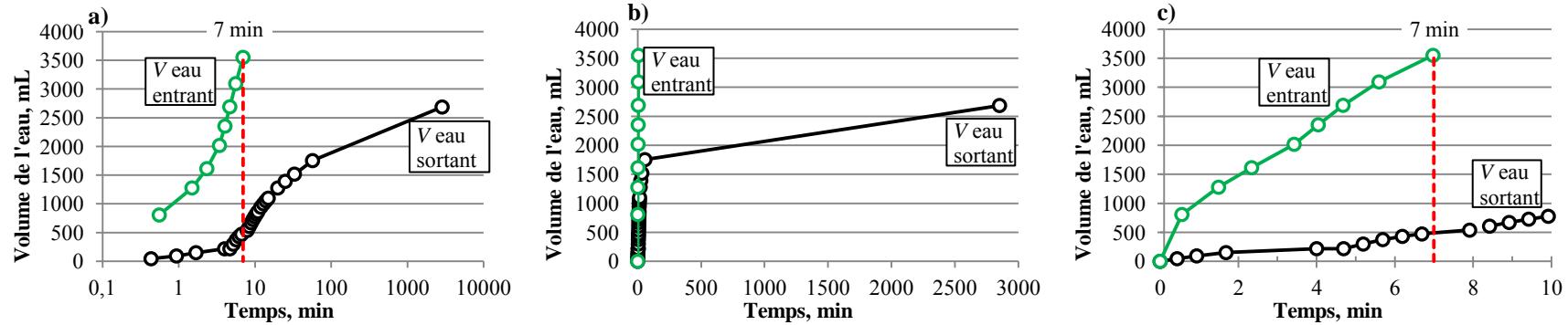


Figure 4.18 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration sur le matériau QIT1_P50_lâche : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique; c) début de l'essai présenté en détail sur une échelle arithmétique.

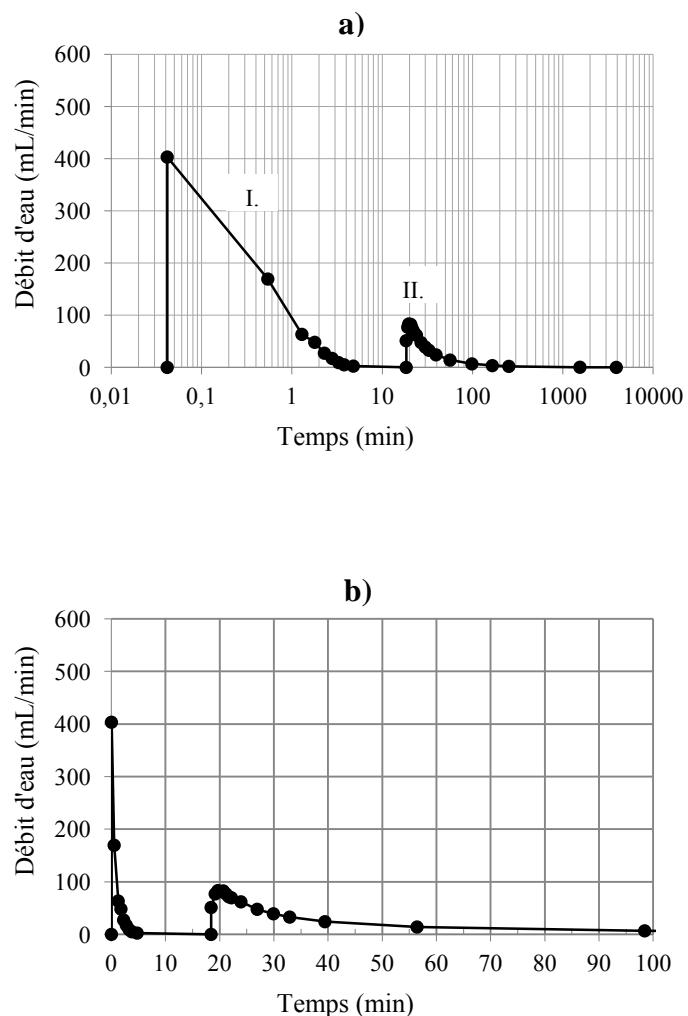


Figure 4.19 : Débit d'eau récoltée au bas de la colonne QIT1_P10_f en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique pour le début de l'essai.

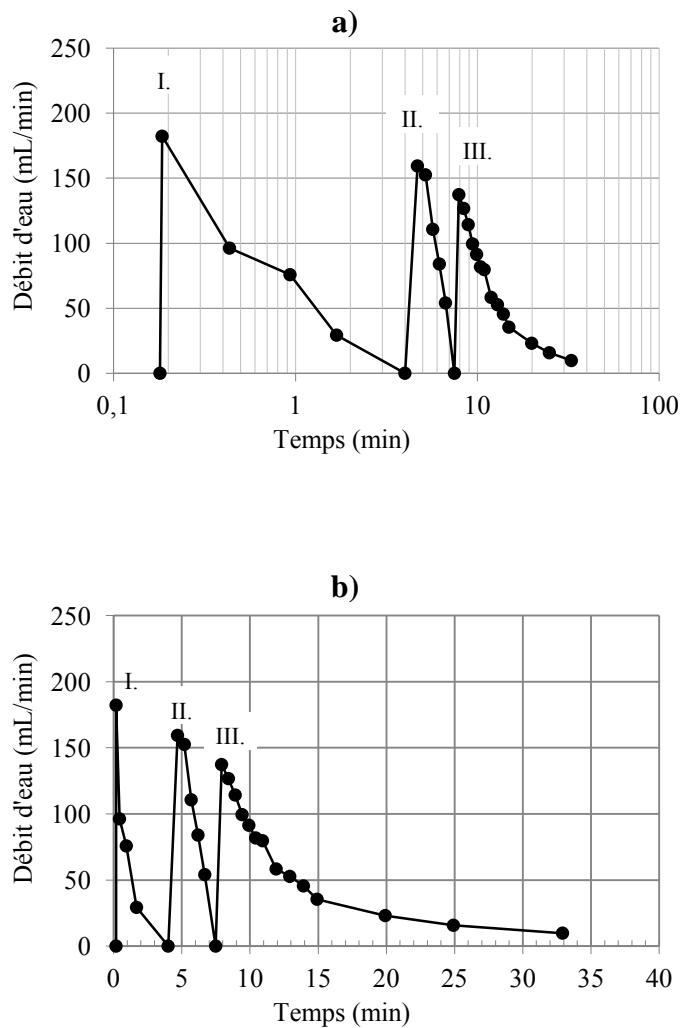


Figure 4.20 : Débit d'eau récoltée au bas de la colonne QIT1_P50_lâche en fonction du temps lors de l'essai d'infiltration : a) échelle logarithmique; b) échelle arithmétique.

Lors de l'essai sur le stérile QIT1_P50_lâche (échantillon de 60,3 cm de longueur), l'eau a été récupérée de la colonne en trois phases, avec de brèves pauses entre chacune (figure 4.20). Dans ce cas-là, on peut supposer que la première portion de l'eau correspond à l'eau du bas qui sort à cause de la suppression d'air, la deuxième portion correspondrait à l'eau acheminée à travers le matériau par un système de macropores interconnectés (qui forment des voies d'écoulement préférentiel) et la troisième portion correspond à l'eau qui passe par les pores de la matrice. La phase d'écoulement de «l'eau macroporale» observée dans l'essai QIT1_P50_lâche, mais non

déTECTée dans l'essai QIT1_P10_f, pourraUT être due à la granulométrie plus grossière du matériau dans la colonne QIT1_P50_lâche ainsi que par son état lâche qui favorisent la formation des macropores bien interconnectés. Nous reviendrons sur cet aspect au chapitre 5.

En comparant les résultats des essais d'infiltration dans les deux matériaux et QIT1_P10_f, on peut constater que le débit d'eau drainée dans la colonne QIT1_P50_lâche est plus

Le taux d'infiltration (I), qui correspond au volume d'eau entrant l'échantillon par unité de surface par unité de temps, a été calculé selon l'équation suivante :

$$I = \frac{V_{\text{infiltré}}}{A(t_2 - t_1)} \quad (4.2)$$

où I – taux d'infiltration [cm/s]

$V_{\text{infiltré}}$ – volume d'eau infiltrée dans le sol par intervalle du temps [cm³]

A – surface d'infiltration (= section de la colonne expérimentale) [cm²]

$t_2 - t_1$ – intervalle du temps [s]

Les valeurs du taux d'infiltration I pour les deux essais sont présentées aux figures 4.21 et 4.22; le calcul de I se fait sur la base des mesures du volume d'eau infiltrée à toutes les 30 secondes.

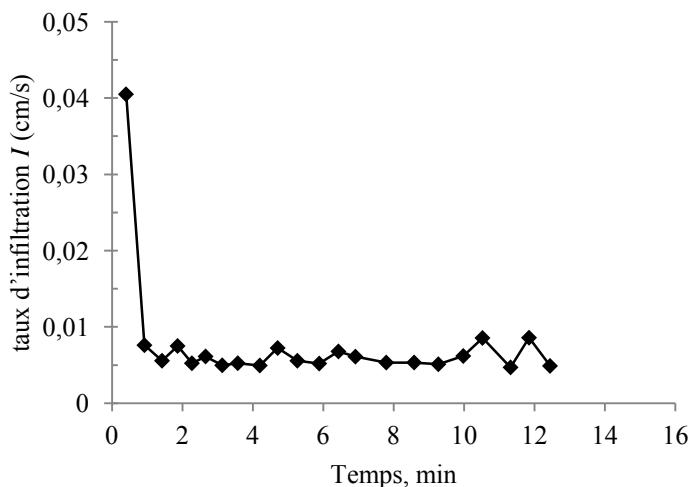


Figure 4.21 : Taux d'infiltration I en fonction du temps t pour l'essai d'infiltration dans la colonne QIT1_P10_f.

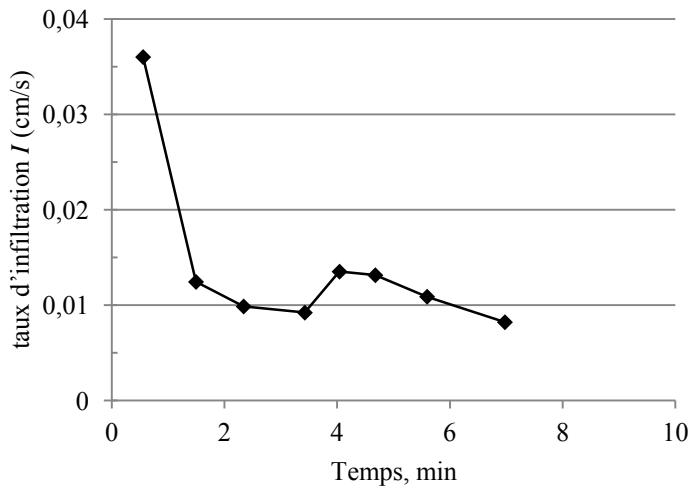


Figure 4.22 : Taux d'infiltration I en fonction du temps t pour l'essai d'infiltration dans la colonne QIT1_P50_lâche.

Pour les deux colonnes, le taux d'infiltration maximal (I_{\max}) a été observé au début de l'essai (pendant les 30 premières secondes) quand le matériau était encore relativement sec (suite au drainage préalable de la colonne). Les matériaux dans la partie supérieure de la colonne se trouvaient alors proches de l'état de saturation résiduelle.

La valeur de I_{\max} est d'environ 0,04 cm/s pour les deux colonnes testées (figures 4.21 et 4.22). Dans les deux cas, le taux d'infiltration diminue significativement au bout d'environ une minute après le début de l'essai. Dans la colonne QIT1_P10_f, le taux d'infiltration a diminué jusqu'à une valeur assez constante de 0,006 cm/s (figure 4.21). La durée d'infiltration dans la colonne QIT1_P50_lâche, soit environ 7 minutes, ne semble pas avoir été suffisante pour que le taux d'infiltration se stabilise ; la valeur minimale du taux d'infiltration mesuré dans cet essai est d'environ 0,01 cm/s (figure 4.22).

Les résultats de ces essais suggèrent la présence de voies d'écoulement préférentiel pour le stérile QIT1_P50_lâche.

4.6 Essai combiné « infiltration/traceur » en condition saturée

L'essai combiné « infiltration/traceur » a été réalisé sur l'échantillon QIT1_P50_lâche. La description de l'essai est présentée à la section 3.4.4. Les principales conditions de réalisation de l'essai sont montrées au tableau 4.13. Rappelons que cet essai est effectué selon le même procédé que l'essai d'infiltration présenté ci-dessus, mais sur un échantillon initialement saturé, avec le traceur ajouté dans l'eau injectée. Cet essai visait à identifier qualitativement la présence des voies d'écoulement préférentiel. Selon les résultats obtenus, le temps nécessaire pour que les 9 L d'eau salée s'infiltrent dans les stériles est de 9,7 min (figure 4.23); la première apparition du traceur à la sortie de la colonne est enregistrée au bout d'environ 110 secondes (1,8 min) après le début de l'infiltration (figure 4.24). Puisque le but principal de cet essai était de déterminer le temps de la première apparition du traceur, la prise de mesures du volume d'eau sortant a été arrêtée aussitôt après la détection du traceur à la sortie de la colonne (seules les mesures du volume d'eau entrant et les mesures de la conductivité électrique de l'eau sortant ont été poursuivies jusqu'au moment où toute eau salée s'est infiltrée dans le matériau testé). Ceci explique la différence entre les volumes d'eau entrant et sortant à la figure 4.23. L'interprétation et la discussion des résultats de cet essai sont présentées au chapitre 5.

Tableau 4.13 : Principales conditions de réalisation de l'essai « infiltration/traceur » (QIT1_P50_lache).

Paramètre	Description
Échantillon	QIT1_P50_lâche
État initial	matériau saturé
Longueur de l'échantillon	60,35 cm
Section de l'échantillon A	672,5 cm ²
Traceur	NaCl
Volume d'eau salée injectée	9 L
Concentration initiale du traceur dans l'eau injectée	10,5 g/L
Conductivité électrique initiale de l'eau injectée	18,05 mS
Type d'essai	essai à charge variable
Variation de la charge hydraulique à l'entrée	de 13,5 cm à 0
Variation de la vitesse de Darcy V_a ($V_a=Q/A$)	de 0,040 cm/s à 0,035 cm/s
Intervalle de prise de mesures	toutes les 10 secondes
Temps de la première arrivée du traceur t_{arr}	110 secondes
Temps nécessaire pour que 9 L d'eau s'infiltre dans le stérile	9,7 min (580 secondes)

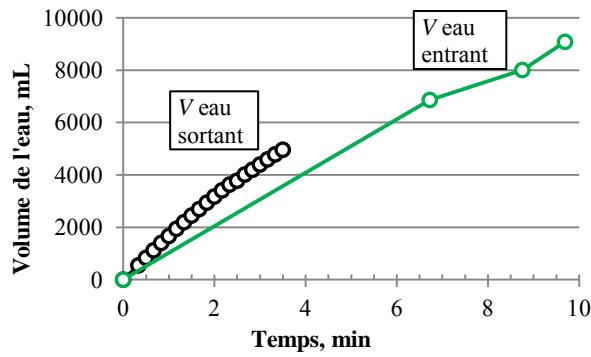


Figure 4.23 : Volume de l'eau entrant et sortant en fonction du temps lors de l'essai « infiltration/traceur » sur le matériau QIT1_P50_lâche.

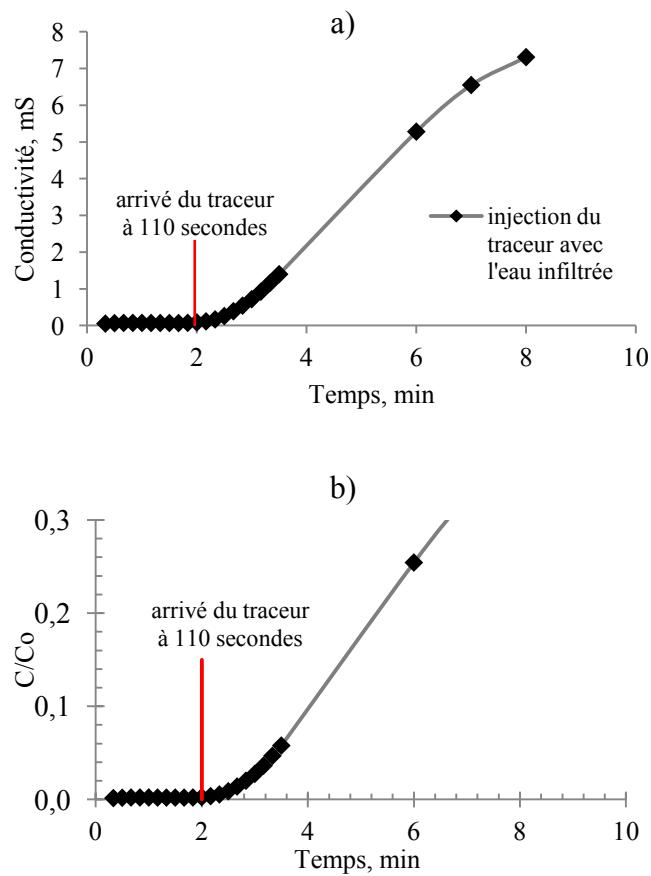


Figure 4.24 : Courbe d'apparition de traceur lors de l'essai «infiltration/traceur» dans la colonne QIT1_P50_lâche saturée : a) conductivité électrique de l'eau drainée en fonction du temps; b) C/C_0 de l'eau drainée en fonction du temps (où C_0 = concentration initiale du traceur ; C = concentration du traceur récupéré au temps t).

4.7 Résultats des essais de drainage et CRE

Le but principal de ces essais est de drainer la colonne jusqu'à un niveau de nappe contrôlé, avec un état d'équilibre dans la distribution et la pression de l'eau à travers la colonne (voir section 3.4.5 pour les détails). Le profil de la teneur en eau en fonction de l'élévation du matériau au-dessus de la nappe libre peut alors servir pour la construction de la courbe de rétention d'eau CRE. Les données enregistrées lors du début du drainage libre peuvent aussi servir à estimer la conductivité hydraulique saturée des matériaux k_{sat} . Les données enregistrées lors de ces essais incluent le volume d'eau drainée (et le débit) en fonction du temps. Les figures 4.25 et 4.26 présentent les résultats obtenus pour les échantillons QIT1_P50_f et QIT1_P10_f. Les autres résultats sont présentés à l'annexe 8.

Au début des essais en grandes colonnes (≈ 30 cm de diamètre), le débit d'eau drainé varie d'environ 1400 mL/min à 4100 mL/min, selon la porosité et la granulométrie des stériles. Le débit maximal (4108 mL/min) a été observé dans la colonne QIT1_P50_lâche. Rappelons que le matériau dans cette colonne est caractérisé par des valeurs relativement élevées de porosité n et par des valeurs mesurées maximales de k_{sat} ($n = 30\%$; $k_{sat} = 0,43$ cm/s, voir tableau 4.8). Dans la colonne longue et étroite QIT1_P5_f (≈ 10 cm de diamètre), le débit d'eau n'excède pas 110 mL/min. La valeur de k_{sat} mesurée lors des essais de perméabilité est également plutôt faible, soit 0,027 cm/s. Les valeurs du débit d'eau au début de l'essai de drainage dans les colonnes QIT1_P50_f1 et QIT1_P10_f (figures 4.25e et 4.26e) diffèrent significativement (1400 mL/min et 3000 mL/min, respectivement). Cette différence serait reliée à la différence de porosité des matériaux à l'intérieur des deux colonnes. Les valeurs du débit concordent également avec les valeurs de k_{sat} mesurées dans les colonnes QIT1_P50_f1 et QIT1_P10_f (voir tableau 4.8).

Lors du drainage des colonnes, la charge hydraulique diminue progressivement et le débit d'eau drainée diminue en conséquence. Selon la colonne testée, environ 85% de l'eau récupérée a été drainée après une période de 30 à 60 min. Le drainage passe alors à un régime plus lent (presque « goutte à goutte ») avec un débit inférieur à 10 mL/min (au temps t_1 sur les figures 4.25c et 4.26c).

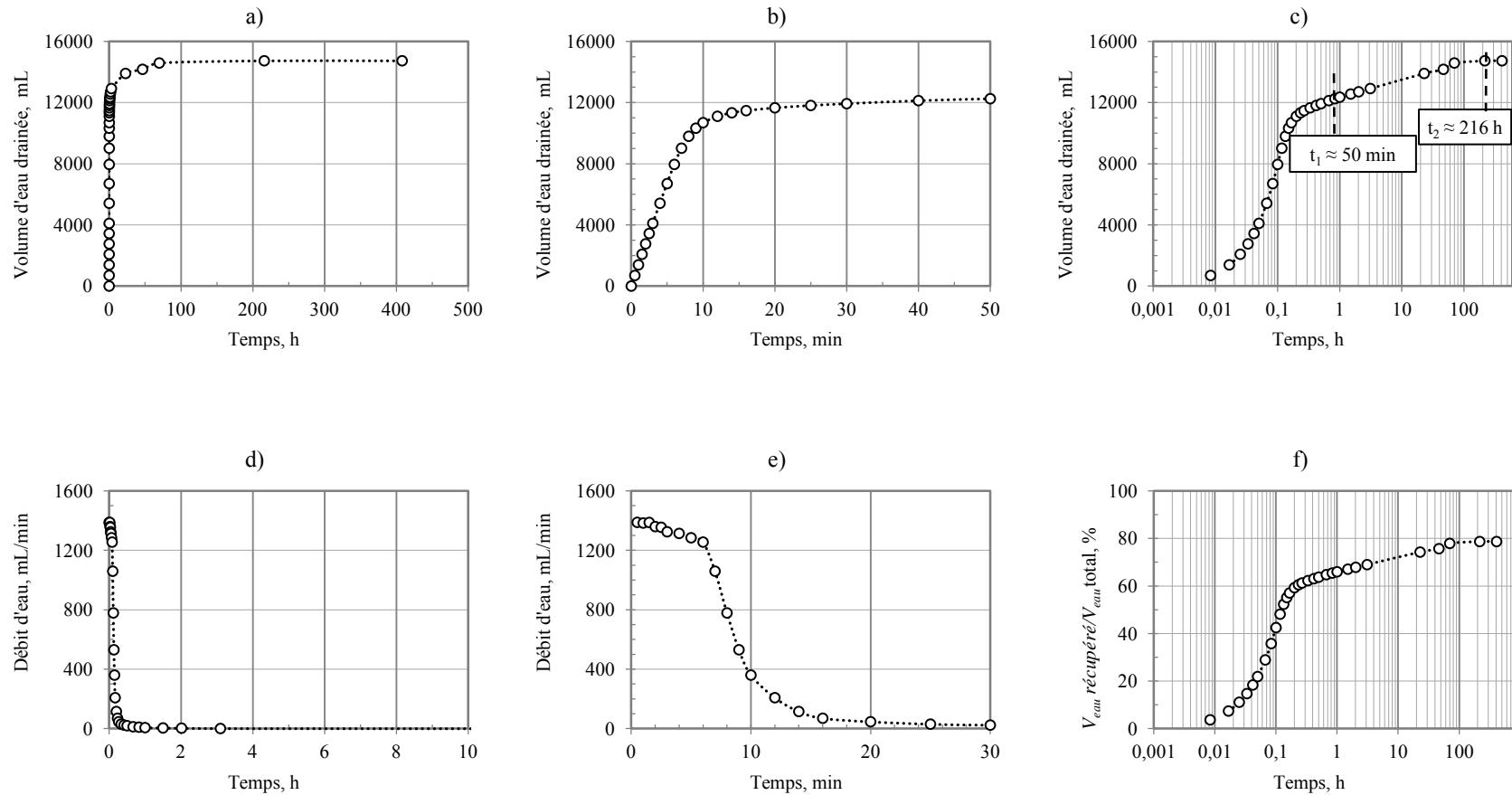


Figure 4.25 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P50_f : a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); e) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; f) $V_{eau \text{ récupérée}}/V_{eau \text{ total}}$ (dans la colonne) en fonction du temps ; t_1 = temps requis pour que le drainage passe à un régime « goutte à goutte », avec un débit inférieur à 10 mL/min ; t_2 = temps requis pour que le matériau atteigne l'équilibre hydrostatique.

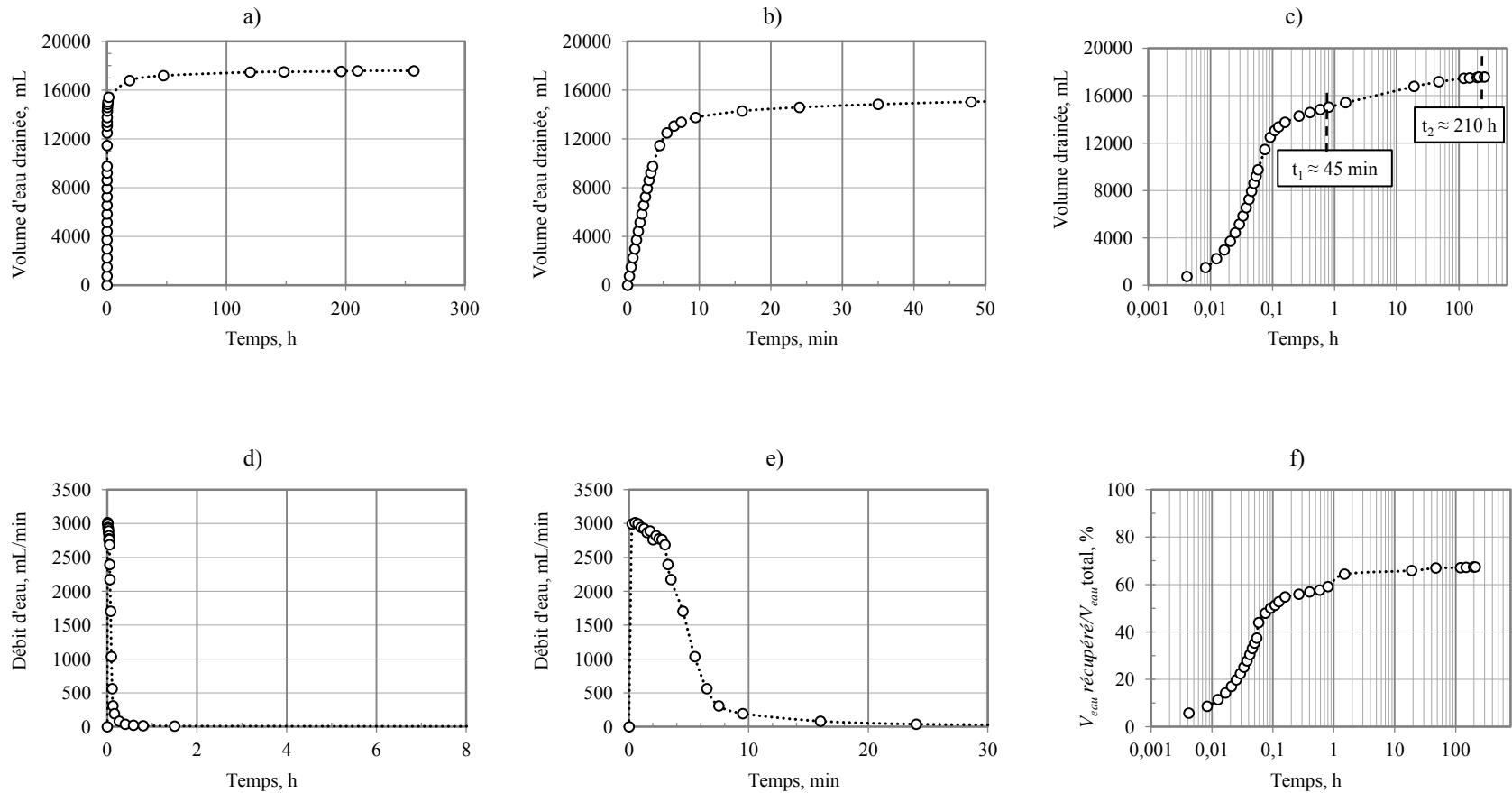


Figure 4.26 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P10_f : a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); e) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; f) $V_{eau} \text{ récupérée}/V_{eau} \text{ total}$ (dans la colonne) en fonction du temps ; t_1 = temps requis pour que le drainage passe à un régime « goutte à goutte » avec un débit inférieur à 10 mL/min ; t_2 = temps requis pour que le matériau atteigne l'équilibre hydrostatique.

Quand le drainage est terminé, entre 60 et 80% de l'eau interstitielle ($\frac{V_{eau\,récupéré}}{V_{eau\,total}}$) est récupérée, selon le type de stériles (figures 4.25f et 4.26f). On vérifie alors que les mesures des capteurs de pression correspondent bien à l'élévation des points de mesure au-dessus de la nappe (sortie d'eau). Lorsque l'état d'équilibre hydrostatique est confirmé par les mesures de capteurs de pression, on procède au démontage de la colonne. Le temps requis pour que le matériau atteigne l'équilibre hydrostatique varie de 210 heures à 240 heures (temps t_2 sur les figures 4.25c et 4.26c). Le tableau 4.14 présente le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre hydrostatique pour chaque colonne testée.

Tableau 4.14 : Temps requis pour atteindre l'équilibre hydrostatique dans les colonnes drainées.

Matériaux	Temps (t_2) requis pour atteindre l'équilibre dans les colonnes drainées (fin du drainage) [heures]
QIT1_P50_f1	216
QIT1_P50_f2	235
QIT1_P50_lâche	230
QIT1_P50_l	214
QIT1_P28_f	224
QIT1_P28_l	240
QIT1P19_f	230
QIT1_P10_f	210
QIT1_P5_f	240

La figure 4.27 montre les valeurs de θ et ψ basées sur les mesures expérimentales ainsi que les CRE lissées à l'aide du logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991) selon le modèle de van Genuchten (1980) (voir aussi l'annexe 9). Rappelons que sur ces courbes, la succion correspond à la distance verticale (élévation Z) par rapport à un niveau de la sortie (nappe libre) au bas de la colonne ($\psi=Z$). La figure 4.27 présente aussi les relevés de pression des capteurs qui mesurent la

suction à l'intérieur de la colonne expérimentale. Ces données servent à confirmer les valeurs de ψ selon les distances par rapport au niveau de la nappe.

Les valeurs du *AEV* (« air entry value », ou ψ_a) et de la succion ψ_r à la teneur en eau volumique résiduelle, qui sont également montrées sur la figure 4.27, ont été obtenues par la méthode graphique de l'intersection des tangentes sur les CRE lissées. Le tableau 4.15 fournit les paramètres ajustés par le code RETC et les autres paramètres d'intérêt. Dans ce tableau, la teneur en eau volumique à saturation (θ_s labo) et la teneur en eau résiduelle (θ_r labo) sont des paramètres obtenus des essais en colonne. Les mêmes paramètres, θ_s et θ_r , avec la mention « *ajusté* », sont les paramètres qui ont été obtenus par le code RETC sur les courbes lissées. Le tableau 4.15 contient également les valeurs de ψ_a et ψ_r , déterminées par la méthode graphique sur les courbes lissées par le RETC (« $\text{AEV}(\psi_a)$ RETC/graph» et « ψ_r RETC/graph»). Les valeurs de ψ_a obtenues des essais, soit « ψ_a labo» qui correspond à la frange capillaire au-dessus de la nappe libre, sont pratiquement identiques aux valeurs de ψ_a déduites par la méthode graphique sur les courbes lissées. Les valeurs « ψ_a RETC/graph» données dans le tableau 4.15 seront utilisées dans notre analyse des résultats.

Comme on peut le voir à la figure 4.26, les stériles de la mine Lac Tio sont caractérisés par une teneur en eau résiduelle (θ_r) relativement élevée, soit environ 0,06 – 0,08. Il est intéressant de noter que la valeur de θ_r est pratiquement la même pour toutes les fractions granulométriques étudiées. Elle serait donc peu influencée par la quantité de gravier et cailloux dans la roche stérile, ce qui paraît logique car la teneur en eau résiduelle dépend de la surface spécifique des matériaux, qui est surtout contrôlée ici par la quantité de particules plus petites que les graviers et cailloux. La valeur de la pression d'entrée d'air ψ_a (déduites par la méthode graphique sur les courbes lissées) varie entre 0,4 et 8,0 cm et elle atteint ses valeurs maximales pour les fractions plus fines des stériles (tableau 4.15).

On peut aussi constater sur les CRE que la longueur des colonnes était suffisante pour que les échantillons testés puissent atteindre la teneur en eau résiduelle (figure 4.26). En règle générale, la succion résiduelle ψ_r des stériles testés n'excédait pas 12 cm, sauf pour le matériau le plus fin, soit la fraction passant 5 mm dans la colonne QIT1_P5_f, où la valeur de ψ_r s'élève à environ 30 cm.

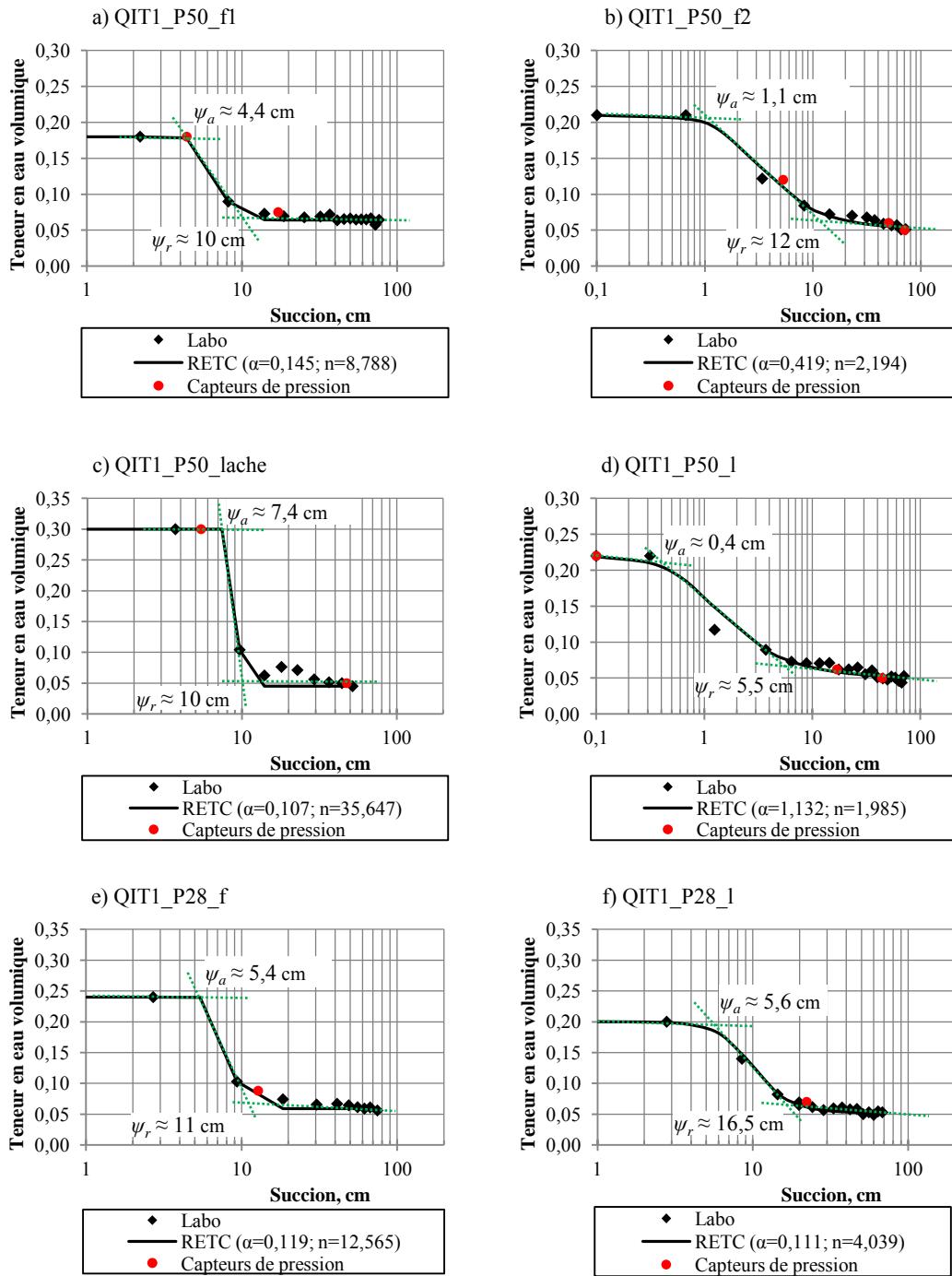


Figure 4.27 (début) : Courbes de rétention d'eau (CRE) : données expérimentales (au démontage) et courbes lissées (les valeurs de ψ_a et ψ_r sont déduites par la méthode graphique des tangentes sur les courbes lissées).

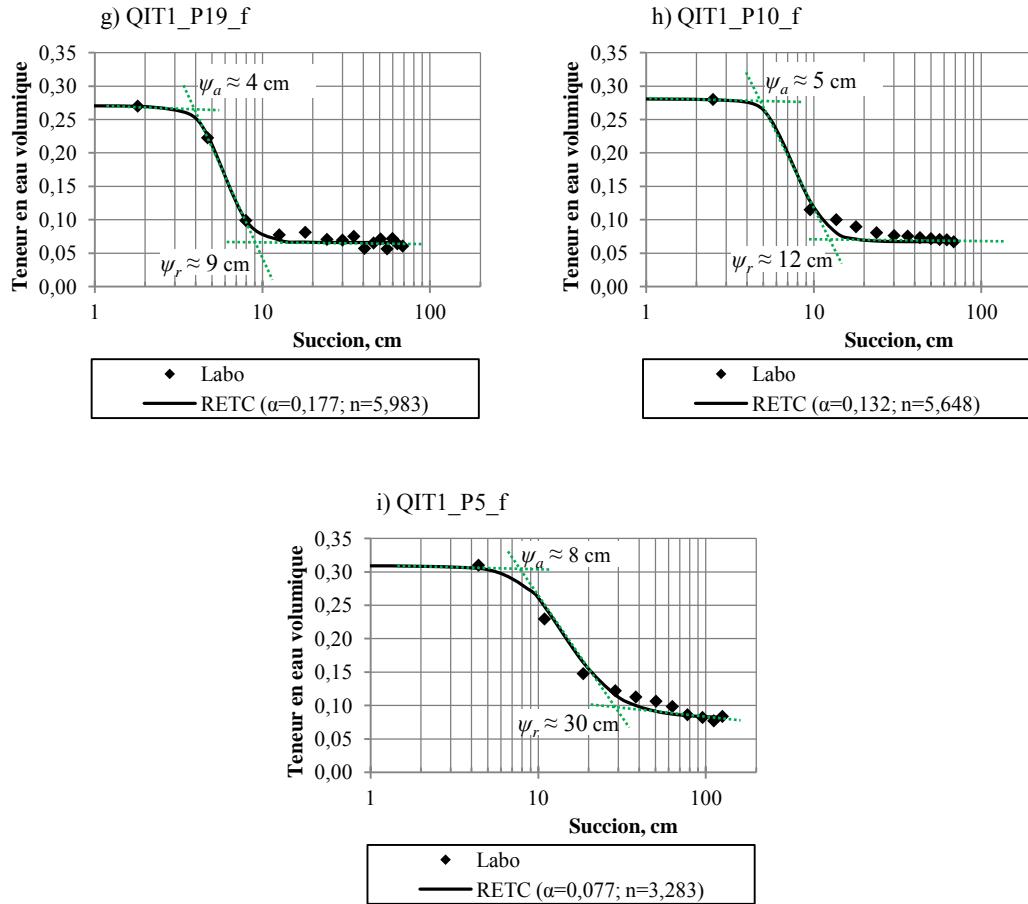


Figure 4.27 (suite et fin) : Courbes de rétention d'eau (CRE) : données expérimentales (au démontage) et courbes lissées (les valeurs de ψ_a et ψ_r sont déduites par la méthode graphique des tangentes sur les courbes lissées).

Les paramètres issus du lissage des courbes de rétention d'eau selon le modèle de van Genuchten (1980), c'est-à-dire α et n , sont également fournis dans le tableau 4.15. Ces paramètres peuvent être utilisés dans la modélisation numérique de l'écoulement non saturé de l'eau dans une halde à stériles. Ces données seront analysées plus en détails au chapitre 5.

Tableau 4.15 : Propriétés de rétention d'eau des stériles et paramètres de la CRE ajustée avec le code RETC (de van Genuchten et al., 1991).

Échantillon	θ_s labo (≈ porosité n) [-]	θ_r labo [-]	AEV (ψ_a) labo* [cm]	AEV (ψ_a) ajusté RETC (≈ 1/ α) [cm]	AEV (ψ_a) RETC/graph [cm]	ψ_r RETC/graph [cm]	α ajusté RETC [cm $^{-1}$]	n ajusté RETC [-]
QIT1_P50_f1	0,18	0,06	4,4	6,9	4,4	10	0,145	8,788
QIT1_P50_f2	0,21	0,05	1,3	2,4	1,1	12	0,419	2,194
QIT1_P50_lâche	0,30	0,05	7,4	9,3	7,4	10	0,107	35,65
QIT1_P50_l	0,22	0,05	0,6	0,9	0,4	5,5	1,132	1,985
QIT1_P28_f	0,24	0,06	5,4	8,4	5,4	11,5	0,119	12,565
QIT1_P28_l	0,20	0,05	5,6	9,0	5,6	16,5	0,111	4,039
QIT1_P19_f	0,27	0,07	3,6	5,6	4	9	0,177	5,983
QIT1_P10_f	0,28	0,07	5	5,4	5	12	0,132	5,648
QIT1_P5_f	0,31	0,08	8,8	12,9	8	30	0,077	3,283

* AEV (ψ_a) labo correspond à la frange capillaire au-dessus de la sortie (nappe libre) au bas de la colonne

CHAPITRE 5 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente une analyse des résultats, en mettant l'emphasis sur trois principales composantes :

- Mesures et prédictions de la conductivité hydraulique saturée
- Évaluation de la structure interne des stériles
- Détermination des courbes de rétention d'eau avec le modèle *MK*

Nous allons également comparer les résultats obtenus dans la présente étude avec des données tirées de la littérature.

5.1 Conductivité hydraulique des stériles

Les résultats des essais en colonne ont montré que la conductivité hydraulique saturée des stériles mesurée en laboratoire est pratiquement la même pour toutes les fractions granulométriques étudiées. Elle varie autour de 10^{-1} cm/s. La conductivité hydraulique serait donc peu influencée par la présence de différents pourcentages de graviers et de cailloux dans les stériles testés. Les raisons qui peuvent expliquer ce comportement sont discutées plus loin.

5.1.1 Valeurs mesurées et prédites

Les valeurs de k_{sat} mesurées suite aux essais ont été comparées à celles obtenues par les modèles de prédiction de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) (équations 2.7 et 2.8). Ces modèles sont basés sur la granulométrie et la porosité n (indice des vides e) des matériaux. On prend ici en considération les résultats de l'ensemble des analyses granulométriques disponibles pour chaque échantillon testé (fuseaux granulométriques). Les variations de l'indice des vides à l'intérieur de la colonne expérimentale (Δe) doivent également être prises en compte. Cette prise en compte des fuseaux granulométriques et des fluctuations de e des stériles élargissent considérablement l'intervalle des valeurs de k_{sat} prédites. La figure 5.1 montre les exemples de telles plages de valeurs prédites pour les conditions d'essais de laboratoire.

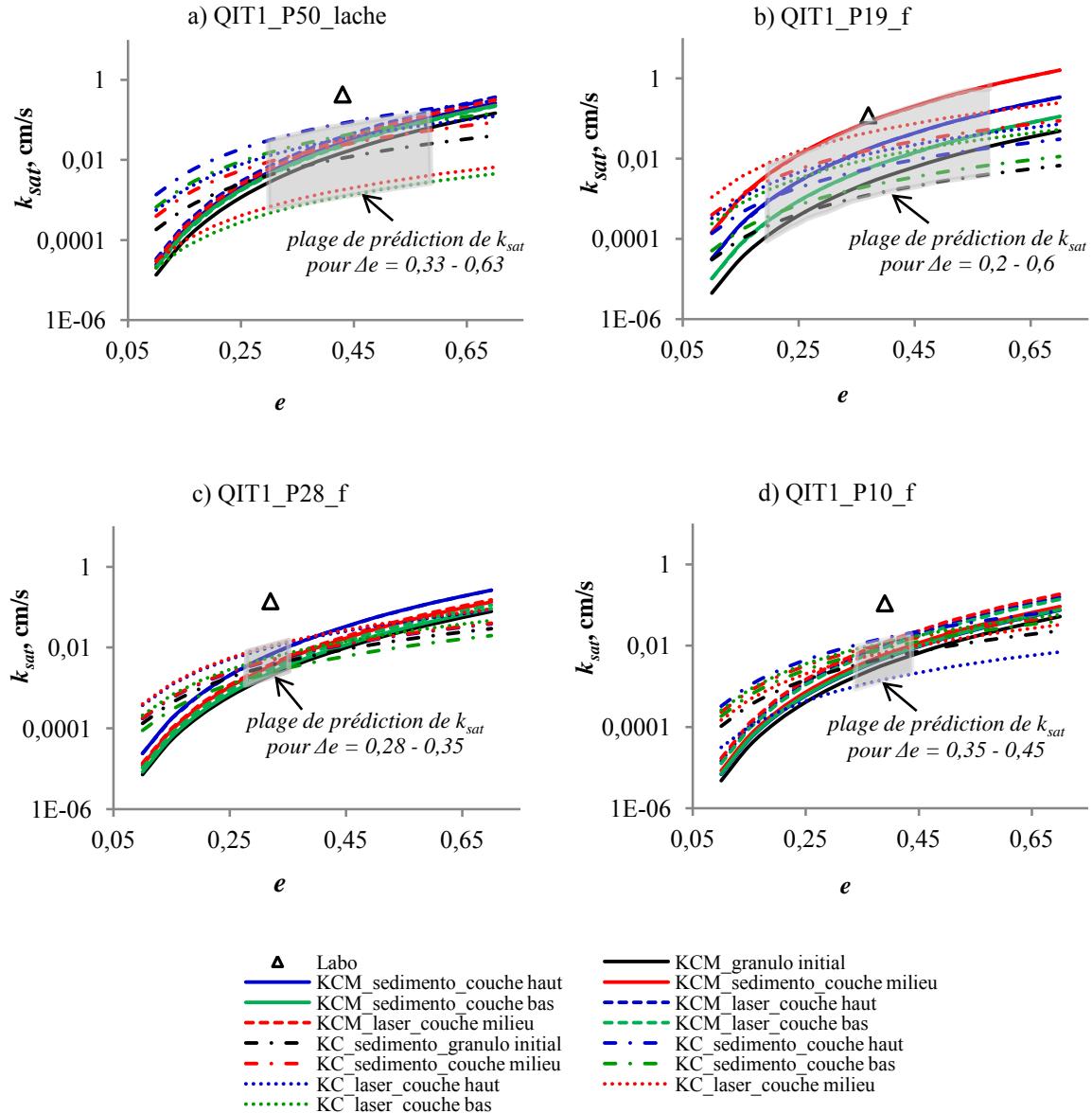


Figure 5.1 : Conductivité hydraulique mesurée k_{sat} (Labo, voir tableau 4.8) et conductivité hydraulique prédictée par les modèles de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) pour les courbes granulométriques obtenues des diverses analyses sur les échantillons.

La figure 5.2 regroupe l'ensemble des valeurs moyennes de k_{sat} mesurées et prédites à partir de la courbe granulométrique moyenne de chaque échantillon testé (tableau 4.2). On peut constater que pour tous les échantillons testés, les valeurs de la conductivité hydraulique mesurées dans les essais en colonne sont toujours plus élevées (de 1 à 2 ordres de grandeur) que la valeur de k_{sat}

prédite à partir de la granulométrie moyenne des stériles, selon les modèles de KC et KCM (voir aussi figure 5.1). La figure 5.2a montre également que les valeurs obtenues avec les deux modèles prédictifs sont assez semblables (< facteur de 3 à 5) pour la plage de e variant de 0,2 à 0,6. Le modèle de Kozeny-Carman (KC) semble donner des résultats un peu plus proches des résultats expérimentaux, surtout pour les échantillons plus grossiers. Cet écart entre les valeurs de k_{sat} mesurées et prédites est expliqué plus loin dans le mémoire par la présence de macropores dans la matrice de la roche stériles. On considèrera dans la suite que la conductivité hydraulique saturée des stériles est contrôlée par les macropores interconnectés qui forment des voies d'écoulement préférentielles. Selon cette hypothèse, les particules fines et mobiles qui se déplacent à l'intérieur du matériau ne contribuent pas à la variation du k_{sat} . Il est intéressant de noter ici que les prédictions de k_{sat} par le modèle de KC correspondent très bien aux valeurs mesurées (figure 5.2b) si l'on néglige la présence de la fraction fine et mobile des matériaux ($d \leq 250\mu\text{m}$) dans le calcul de la surface spécifique.

En ce qui concerne le lien entre la conductivité hydraulique saturée des stériles et l'indice des vides (trait plein en noir à la figure 5.2a), les résultats expérimentaux semblent correspondre à une relation de type $k_{sat} \approx Ce^3$ (où C est une constante et e est l'indice des vides).

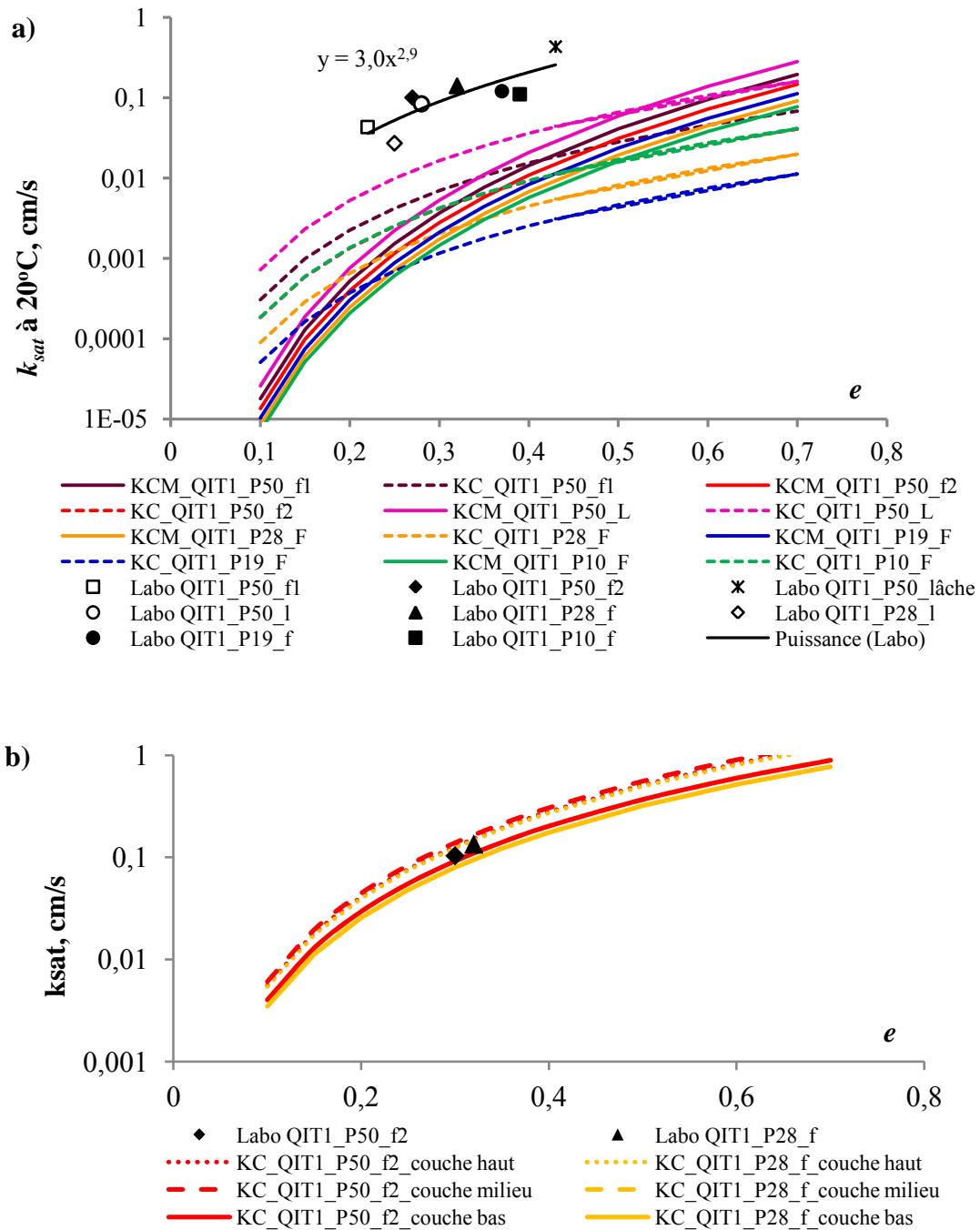


Figure 5.2 : Relation entre l'indice des vides e et la conductivité hydraulique mesurée pour les différentes fractions granulométriques des stériles (k_{sat} Labo, tableau 4.8) : a) on montre aussi la conductivité hydraulique prédictive selon les modèles de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) pour les granulométries moyennes complètes de ces stériles; b) on montre aussi la conductivité hydraulique prédictive selon le modèle Kozeny-Carman (KC) et la courbe granulométrique sans les particules fines mobiles ($d \leq 250 \mu\text{m}$).

Lien entre porosité (indice des vides) et pourcentage de gravier

La figure 5.3 montre la variation de la porosité en fonction du pourcentage de gravier ($\geq 4,75$ mm) dans les matériaux testés. On peut voir que pour les fractions granulométriques préparées ici, la porosité moyenne des stériles dans les colonnes expérimentales diminue avec l'augmentation du pourcentage de gravier. Ces résultats sont en accord avec la théorie des mélanges (Furnas, 1928; Clarke, 1979); celle-ci a déjà été appliquée aux stériles miniers (Wickland et al., 2006); la même tendance a aussi été observée expérimentalement par Hernandez (2007). Selon la théorie des mélanges binaires, la porosité d'un sol formé de deux matériaux avec des tailles de grains distinctes atteint un minimum lorsque la combinaison des particules permet de combler un maximum de vides. Dans le mémoire de Hernandez (2007), qui comporte des résultats d'essais sur des mélanges composés d'un sable et d'un gravier, une situation analogue a été observée pour les échantillons avec un pourcentage de particules grossières (≥ 5 mm) d'environ 60%. Ceci a aussi été observé par Ouangrawa (2007) suite à des essais sur des mélanges de résidus miniers et de sable. Pour les stériles de QIT, la porosité minimale ($n = 18\text{-}21\%$) a été observée pour les échantillons grossiers QIT1_P50_f1,f2 dans lesquels la proportion de gravier ($\geq 4,75$ mm) est d'environ 50% (figure 5.3). Selon la théorie des mélanges (Wickland et al., 2006; Koffi et al., 2008), cette valeur devrait être assez proche de la porosité minimale n_{min} pour ces stériles (pour une même énergie de densification). Selon cette approche, la porosité devrait augmenter par la suite avec une augmentation du pourcentage de gravier dans la roche stérile ; cette tendance est illustrée à titre indicatif sur la figure 5.3. Cette tendance pourrait être évaluée à partir d'essais additionnels avec une plus grande proportion de particules de gravier (non réalisés ici).

Lors de nos essais, nous avons aussi observé une corrélation positive entre les valeurs de la conductivité hydraulique saturée des stériles et leur porosité (indice des vides), telle que démontrée à la figure 5.2. Cependant, cette corrélation ne semble pas directement liée à la granulométrie des matériaux testés dans cette étude (voir figure 4.12). Ceci pourrait être dû à l'effet de la macroporosité créée dans les échantillons. Plus de travaux sur le sujet seraient requis pour mieux évaluer cet aspect du comportement des stériles.

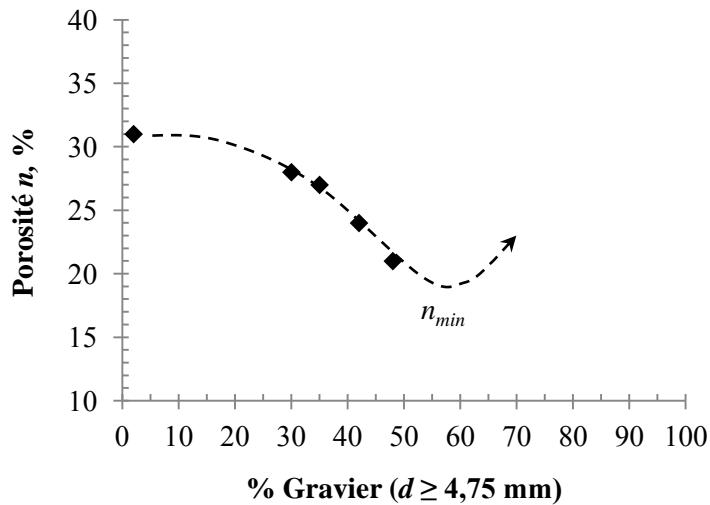


Figure 5.3 : Valeurs de la porosité moyenne mesurée en fonction du pourcentage de gravier dans les échantillons de stériles soumis aux essais en colonne.

Effet de la surface spécifique

Tel que mentionné plus haut, les valeurs de la conductivité hydraulique des stériles prédites selon les modèles de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) diffèrent de façon assez significative des résultats expérimentaux (figures 5.4a et 5.4b). Cependant, on observe une assez bonne concordance entre les valeurs de k_{sat} prédites selon ces deux modèles (figure 5.4c).

La différence (relativement limitée) entre les valeurs obtenues des deux modèles prédictifs pourrait être due, en partie, à la façon de calculer la surface spécifique des matériaux (Hernandez, 2007). Le tableau 5.1 présente les valeurs de la surface spécifique (S_s) calculées selon ces deux modèles, soit Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM), et selon le modèle Kovács modifié (MK) (Aubertin et al., 2003); les équations pour calculer les valeurs de S_s sont présentées à la section 2.2.2 (équations 2.9, 2.11, 2.12).

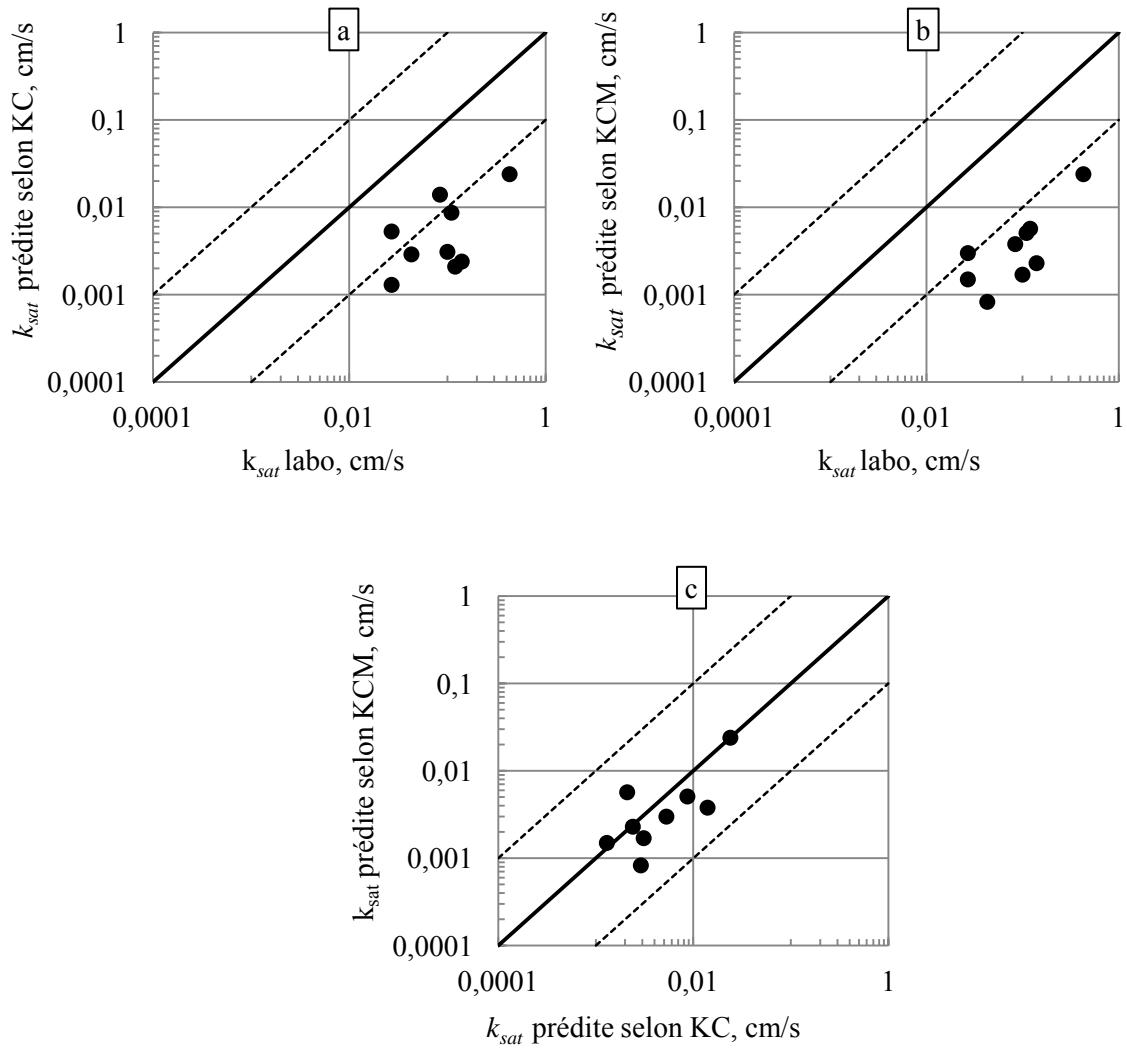


Figure 5.4 : Conductivité hydraulique k_{sat} mesurée (labo) et prédicté selon les modèles Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM).

Tableau 5.1 : Surface spécifique évaluée selon les modèles KC, KCM et MK*.

Matériau	Surface spécifique (m^2/kg)		
	KC	KCM	MK
QIT1_P50_f1	7,54	5,53	3,59
QIT1_P50_f2	9,75	6,36	4,11
QIT1_P50_lâche	6,66	5,04	3,28
QIT1_P50_1	4,92	4,59	3,01
QIT1_P28_f	13,88	7,80	5,19
QIT1_P28_1	13,47	5,59	3,66
QIT1_P19_f	18,35	7,22	4,74
QIT1_P10_f	9,55	8,65	5,64
QIT1_P5_f	14,43	15,76	10,04

* les paramètres granulométriques utilisés sont présentés au tableau 4.2.

La figure 5.5 montre une comparaison entre les valeurs de la surface spécifique calculées selon ces trois modèles. On peut voir que pour les échantillons les plus grossiers, la surface spécifique obtenue selon le modèle KC est assez semblable à celle calculée selon les modèles KCM et MK. Pour les échantillons avec un plus grand étalement de la fraction fine, les valeurs de S_s obtenues selon le modèle de Kozeny-Carman (méthode de Chapuis et Légaré, 1992) sont 2 à 3 fois plus grandes que celles obtenues avec les modèles KCM et MK. La même tendance a été observée par Hernandez (2007) pour des matériaux similaires aux stériles miniers, notamment pour un gravier à granulométrie très étalée contenant une assez grande quantité de particules fines. Ces différences peuvent être expliquées par le fait que le modèle de Kozeny-Carman prend en considération toute la courbe granulométrique, y inclut la fraction plus « fine » ($< D_{10}$). Les équations de S_s utilisées dans les modèles KCM et MK ont été conçues pour les matériaux plus homogènes; ces modèles utilisent seulement le D_{10} et D_{60} des matériaux. Donc, ils ne prennent pas bien en compte l'étalement de la fraction fine. Dans les échantillons avec un fort étalement de la taille des particules les plus fines ($< D_{10}$), les valeurs de S_s calculées selon le modèle KC sont donc plus grandes que celles obtenues avec les équations des modèles KCM et MK. Cette imprécision de la valeur de S_s obtenue avec le modèle KCM peut expliquer, en partie, les écarts entre la conductivité hydraulique prédictive et la valeur mesurée. Mais comme les deux modèles (KC et KCM) sous-estiment k_{sat} , ceci n'explique pas toutes les divergences observées (qui sont d'un ordre de grandeur et plus).

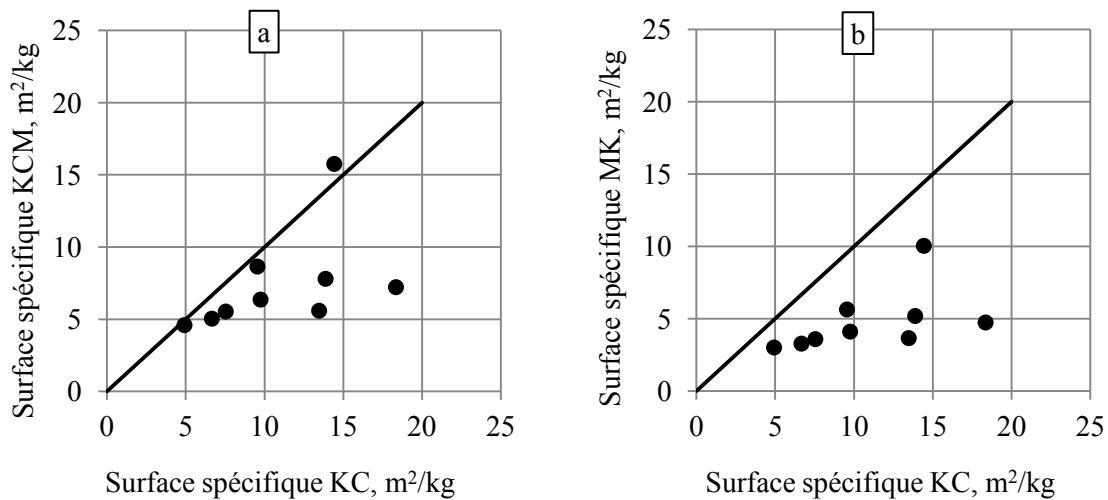


Figure 5.5 : Comparaison de la surface spécifique (S_s) des stériles calculée avec les modèles Kozeny-Carman (KC) selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992) (éq. 2.9), Kozeny-Carman modifié (KCM) (éq. 2.11) et Kovács modifié (MK) (éq. 2.12).

Autres modèles de prédiction de k_{sat} pour les stériles miniers

En complément des modèles de Kozeny – Carman (KC) et Kozeny – Carman modifié (KCM), plusieurs autres méthodes de prédiction ont été évaluées afin d'identifier une approche qui permettrait de mieux représenter la conductivité hydraulique saturée des stériles miniers. On a ainsi appliqué (entre autres) les équations empiriques de Hazen (1911) et de Sherard et al. (1984), et une modification de l'équation KC proposée dans McCarthy (2007). En général, ces équations ne reproduisent pas bien les valeurs de k_{sat} obtenues en laboratoire pour les stériles. Comme les modèles KC et KCM, ces approches sont conçues essentiellement pour des sols plus fins et à granulométrie moins étalée que celle des stériles miniers. Ces modèles adoptent usuellement les valeurs de D_{10} (ou D_{15}) comme taille représentative des grains (on en parle quelquefois comme du diamètre « effectif »). Cependant, l'utilisation de ces paramètres (D_{10} ou D_{15}) n'est peut-être pas appropriée pour les stériles qui contiennent une forte quantité de particules grossières (comme les graviers et les cailloux) et dont la conductivité hydraulique pourrait être liée à une macroporosité.

En ce sens, la dimension de référence qui pourrait mieux refléter l'influence de la granulométrie sur la valeur de k_{sat} des stériles est le D_{50} . Dans la littérature, il existe quelques équations prédictives qui sont basées sur le D_{50} des sols (Taylor, 1948; Shepherd, 1989; Fetter, 2001; Budhu, 2011). Le tableau 5.2 donne les valeurs de k_{sat} prédites selon l'équation empirique proposée par Shepherd (1989) pour des sédiments consolidés; cette équation s'écrit comme suit :

$$k_{sat} (\text{cm/s}) = 3,53 \times 10^{-4} [100D_{50}^{1,5}] \quad (5.1)$$

où $3,53 \times 10^{-4}$ – constante pour la conversion des unités en cm/s

D_{50} – diamètre des grains correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique [mm]

Au tableau 5.2, on peut voir que cette formulation (qui ne tient pas compte de e) donne des valeurs assez semblables à celle mesurées en laboratoire, à l'exception des échantillons plus denses (QIT1_P50_f et QIT1_P28_l). Cette méthode prédit une valeur de k_{sat} des stériles dans la plage $0,7 < \frac{k_{sat} \text{ prédit}}{k_{sat} \text{ labo}} < 3$; elle semble surtout valide pour les échantillons dont l'indice des vides e est plus grand que 0,28 (tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Valeurs de la conductivité hydraulique mesurée et prédite par l'équation de Shepherd (1989)*.

Matériaux	D_{50} , mm		indice des vides (e)	k_{sat} , cm/s		$k_{sat} \text{ prédit}^*, \text{ cm/s}$	
	min**	max**		labo	prédit*	$k_{sat} \text{ labo}$, cm/s	min
QIT1_P50_f1	4,23		0,22	0,04	0,31		7,1
QIT1_P50_f2	4,20		0,27	0,10	0,30		3,0
QIT1_P50_lâche	4,20		0,43	0,43	0,30		0,7
QIT1_P50_l	4,35		0,28	0,08	0,32		3,8
QIT1_P28_f	3,10	3,5	0,32	0,14	0,19	0,23	1,4
QIT1_P28_l	3,50	3,58	0,25	0,03	0,23	0,24	8,6
QIT1_P19_f	2,35	3,85	0,37	0,12	0,13	0,27	1,1
QIT1_P10_f	2,32	2,72	0,39	0,11	0,12	0,16	1,1
QIT1_P5_f	1,26	1,45	0,45	0,03	0,05	0,06	1,8
							2,3

*Valeur de k_{sat} calculée selon l'équation 5.1; **valeurs minimales et maximales obtenues des fuseaux granulométriques

Une équation apparentée qui utilise le D_{50} du matériau pour évaluer la conductivité hydraulique peut être présentée comme suit (Taylor, 1948; Budhu, 2011) :

$$k_{sat} \text{ (cm/s)} = C_1 \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^3}{(1+e)} D_{50}^{1,5} \quad (5.2)$$

où C_1 – constante, facteur de la forme

γ_w – poids unitaire de l'eau ($\gamma_w=9,8 \text{ kN/m}^3$)

μ_w – viscosité dynamique de l'eau ($\mu_w \approx 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ à 20°C)

e – indice des vides du matériau [-]

D_{50} – diamètre des grains correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique [cm]

Dans cette équation, le paramètre C_1 doit être déterminé sur la base des données expérimentales selon l'équation suivante (basée sur l'équation 5.2) :

$$C_1 = \frac{k_{sat labo} \times \mu_w (1+e)}{D_{50}^2 \gamma_w e^3} \quad (5.3)$$

où $k_{sat labo}$ – conductivité hydraulique saturée mesurée [cm/s]

La valeur de C_1 calculée à partir des valeurs de k_{sat} mesurées dans la présente étude est de 0,004 (pour k_{sat} en cm/s et D_{50} en cm). Le tableau 5.3 montre les valeurs «prédites» de la conductivité hydraulique des stériles selon le modèle de Taylor (1948) (équation 5.2) avec cette valeur moyenne de C_1 déterminé à partir des valeurs de k_{sat} mesurées dans nos essais en colonne. On peut constater que les valeurs «prédites» sont assez proches de valeurs obtenues expérimentalement pour tous les échantillons testés, $0,7 < \frac{k_{sat \text{ prédit}}}{k_{sat \text{ labo}}} < 2,8$. Ces résultats indiquent donc que pour les essais de labo sur les stériles de la mine Tio, l'équation prédictive de Taylor (1948) donnerait des estimations de k_{sat} relativement précises comparées aux valeurs de k_{sat} mesurées au laboratoire (pour $C_1 = 4 \times 10^{-3}$).

Tableau 5.3 : Valeurs de la conductivité hydraulique k_{sat} mesurée et prédictie par l'équation de Taylor (1948)**.

Matériaux	C ₁ *		labo	k_{sat} , cm/s		$\frac{k_{sat} \text{ prédit } **, \text{cm/s}}{k_{sat} \text{ labo, cm/s}}$	
	min	max		prédit**	min	max	min
QIT1_P50_f1	0,004		0,04		0,06		2,8
QIT1_P50_f2	0,004		0,10		0,11		1,4
QIT1_P50_lâche	0,005		0,43		0,38		0,9
QIT1_P50_1	0,003		0,08		0,13		1,8
QIT1_P28_f	0,006	0,005	0,14	0,09	0,12	0,7	0,8
QIT1_P28_1	0,002	0,002	0,03	0,06	0,06	2,2	2,3
QIT1P19_f	0,005	0,002	0,12	0,08	0,22	0,7	1,8
QIT1_P10_f	0,005	0,004	0,11	0,09	0,12	0,7	0,9
QIT1_P5_f	0,003	0,002	0,03	0,04	0,05	1,3	1,7

*calculé selon l'équation 5.3;

**calculé selon l'équation 5.2 avec C₁ = 0,004 (moyenne des valeurs déduites des essais)

5.1.2 Comparaison avec les résultats d'études antérieures

Les propriétés hydriques des stériles de la mine Tio ont déjà fait l'objet de quelques études préliminaires au laboratoire (Gaillot, 2007; Bourrel, 2008; Intissar, 2009) et sur le terrain (Lessard, 2011). Dans cette section, nous allons comparer les résultats obtenus dans la présente étude avec ceux obtenus dans les études antérieures. Les échantillons prélevés sur la même halde à stériles que ceux testés ici (QIT1, fractions passant 10, 28, 37,5 et 50 mm) ont été étudiés auparavant dans Gaillot (2007). Bourrel (2008) et Intissar (2009) ont testé les stériles de la même mine, mais contenant moins d'ilménite (QIT2). Les résultats de ces autres études sont compilés dans le tableau 5.4 et présentés aux figures 5.6 et 5.7 (voir l'annexe 10 pour plus de détails).

Comme on peut le voir dans le tableau 5.4 et aux figures 5.6 et 5.7, les valeurs de la conductivité hydraulique saturée obtenues pour les stériles QIT1 et QIT2 lors des études antérieures sont relativement proches des résultats obtenus dans la présente étude. Les mêmes tendances ont également été observées en ce qui concerne des corrélations entre les valeurs de k_{sat} mesurées et celles prédictes selon les modèles de Kozeny – Carman (KC) et Kozeny – Carman modifié (KCM). L'estimation de k_{sat} fournie par le modèle KC correspond un peu mieux aux résultats

expérimentaux que les prédictions de k_{sat} obtenues selon le modèle KCM. On note que les résultats des mesures de k_{sat} effectuées par Bourrel (2008) et Intissar (2009) correspondent bien aux valeurs de k_{sat} prédites selon le modèle de Kozeny-Carman (KC) (figures 5.6a et 5.7). Dans ces travaux, on note toutefois que les valeurs de la surface spécifique, utilisée dans l'équation de KC (équation 2.7), ont été calculées à partir des courbes granulométriques tronquées qui n'incluent pas de données de l'analyse par sédimentométrie (pas de particules avec un diamètre inférieur à 80 µm). Cela tend à confirmer que la valeur de la surface spécifique ne devrait pas prendre en compte les fractions fines et mobiles pour les prédictions de k_{sat} des stériles avec le modèle KC ; ce calcul devrait se limiter aux fractions grossières de ces matériaux, qui sont associées à la formation de macropores.

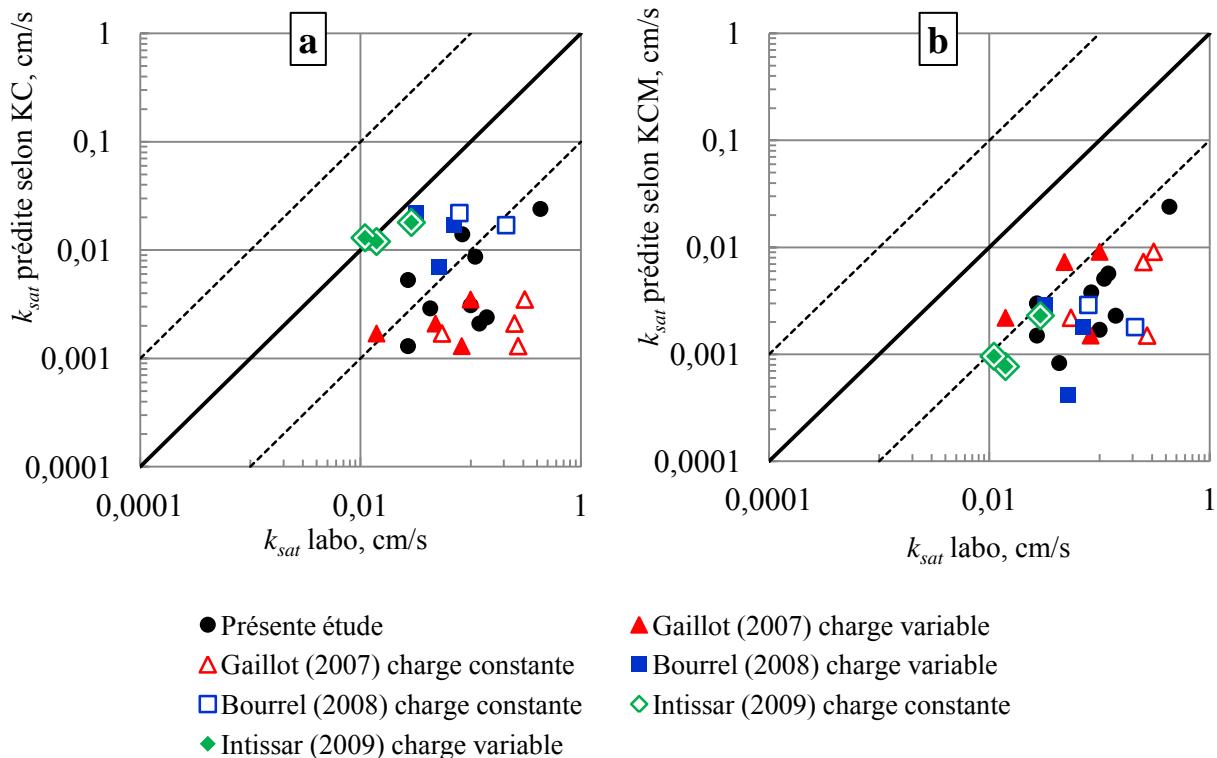


Figure 5.6 : Comparaison des valeurs de k_{sat} (mesurées et prédictes) obtenues dans la présente étude avec les résultats d'études antérieurs (voir tableau 5.4 et annexe 10 pour plus d'information).

Tableau 5.4 : Valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des stériles de la mine Tio, mesurées et prédites dans les études antérieures.

Source	Matériaux	e	k_{sat} (cm/s)			
			Charge variable	Charge constante	KC	KCM
Gaillet (2007)	QIT1_passant 10mm	0,33	1,4E-02	5,5E-02	1,7E-03	2,2E-03
	QIT1_passant 28mm	0,36	4,8E-02	2,5E-01	2,1E-03	7,3E-03
	QIT1_passant 37,5mm	0,36	1,0E-01	3,1E-01	3,5E-03	9,1E-03
	QIT1_passant 50mm	0,24	8,3E-02	2,7E-01	1,3E-03	1,5E-03
Bourrel (2008)	QIT2_passant 50mm	0,29	3,2E-02	7,9E-02	2,2E-02	2,9E-03
	QIT2_passant 25mm	0,29	7,0E-02	2,1E-01	1,7E-02	1,8E-03
	QIT2_passant 19mm	0,25	5,2E-02	-	7,0E-03	4,2E-04
Intissar (2009)	QIT2_passant 19mm	0,30	2,8E-02	2,9E-02	1,8E-02	2,3E-03
	QIT2_passant 10mm	0,37	7,3E-03	1,4E-02	1,2E-02	7,7E-04
	QIT1_passant 10mm	0,33	1,6E-02	1,1E-02	1,3E-02	9,6E-04

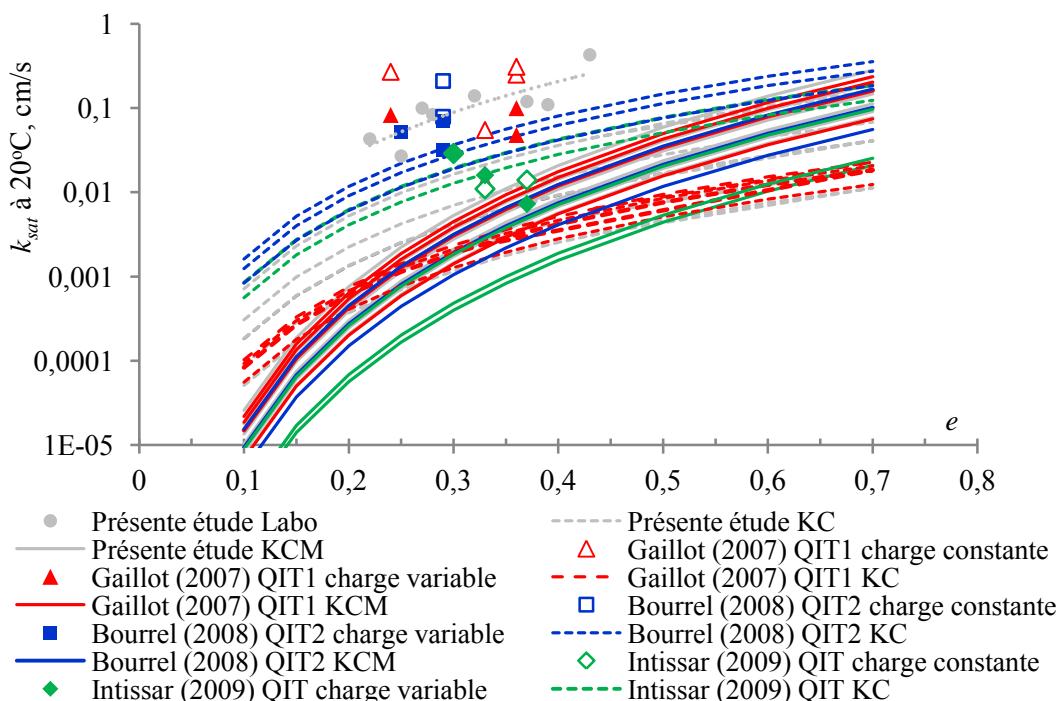


Figure 5.7 : Relation entre l'indice des vides e et la conductivité hydraulique des stériles de la mine Tio, selon les valeurs prédites (modèles KC et KCM) et mesurées lors d'études antérieures; on montre aussi les résultats de la présente étude (voir tableau 4.4).

En ce qui concerne les équations empiriques de prédition de la conductivité hydrauliques saturée de Shepherd (1989) (éq. 5.1) et de Taylor (1948) (éq. 5.2), on constate qu'elles donnent des estimations assez exactes de k_{sat} pour les stériles QIT1 de la mine Tio testés dans la présente étude et dans l'étude de Gaillot (2007). On observe cependant des écarts significatifs entre les valeurs de k_{sat} prédites et celles mesurées dans les travaux sur les stériles miniers (QIT2 et stériles Laronde) (tableaux 5.5 et 5.6) ; il est toutefois difficile de statuer sur la valeur (et la qualité) de ces mesures expérimentales. Finalement, on peut mentionner que les valeurs de k_{sat} mesurées ici sur les échantillons des stériles QIT1 dans les grandes colonnes expérimentales, sont comparables aux valeurs de k_{sat} estimées dans les conditions naturelles sur une des haldes à stériles de la mine Tio à l'aide d'essais d'infiltration à grande et à petite échelle, c.-à.-d. $k_{sat} < 5 \times 10^{-3}$ à 2×10^{-1} cm/s (Lessard, 2011).

Tableau 5.5 : Valeurs mesurées de k_{sat} des stériles et d'autres matériaux, selon des travaux antérieurs, comparées aux valeurs prédites selon l'équation de Shepherd (1989) (éq. 5.1).

	Matériaux	D_{50} , mm	k_{sat} , cm/s		$\frac{k_{sat} \text{ prédit}}{k_{sat} \text{ labo}}$
			Labo (charge constante)	Prédit (équation 5.1)	
Gaillot (2007)	QIT1_passant 10mm	2,3	5,5E-02	1,2E-01	2,2
	QIT1_passant 28mm	3,1	2,5E-01	1,9E-01	0,8
	QIT1_passant 50mm	4,2	2,7E-01	3,0E-01	1,1
Bourrel (2008)	QIT2_tout passant	6,8	7,9E-02	6,3E-01	7,9
	QIT2_passant 25mm	4,1	2,1E-01	2,9E-01	1,4
Intissar (2009)	QIT2_passant 19mm	5	2,9E-02	3,9E-01	13,6
	QIT2_passant 10mm	2	1,4E-02	1,0E-01	7,1
Hernandez (2007)	Gravier Mirabel GMT3	15	1,1E-01	2,1E+00	18,0
	Gravier Mirabel GMP3	4,3	3,1E-02	3,1E-01	10,1
	Stériles Laron-56	14	1,2E-03	1,8E+00	1608
	Stériles Laron-28	8	1,5E-01	8,0E-01	5,3
	Stériles Laron-20	6	1,6E-02	5,2E-01	33,5

Tableau 5.6 : Valeurs mesurées de k_{sat} des stériles et d'autres matériaux, selon des travaux antérieurs, comparées aux valeurs prédites selon l'équation de Taylor (1948) (éq. 5.2).

	Matériaux	e	D_{50} , mm	k_{sat} , cm/s		$\frac{k_{sat} \text{ prédit}}{k_{sat} \text{ labo}}$
				Labo (charge constante)	Prédit (équation 5.2)	
Gaillet (2007)	QIT1_passant 10mm	0,33	2,3	5,5E-02	5,6E-02	0,9
	QIT1_passant 28mm	0,36	3,1	2,5E-01	1,3E-01	0,5
	QIT1_passant 50mm	0,24	4,2	2,7E-01	7,7E-02	0,3
Bourrel (2008)	QIT2_tout passant	0,29	6,8	7,9E-02	3,4E-01	4,3
	QIT2_passant 25mm	0,29	4,1	2,1E-01	1,2E-01	0,6
Intissar (2009)	QIT2_passant 19mm	0,3	5	2,9E-02	2,0E-01	6,8
	QIT2_passant 10mm	0,37	2	1,4E-02	5,8E-02	5,8
Hernandez (2007)	Gravier Mirabel GMT3	0,45	15	1,1E-01	5,5E+00	48,6
	Gravier Mirabel GMP3	0,38	4,3	3,1E-02	2,9E-01	9,2
	Stériles Laron-56	0,44	14	1,2E-03	4,5E+00	3952
	Stériles Laron-28	0,43	8	1,5E-01	1,4E+00	9,2
	Stériles Laron-20	0,5	6	1,6E-02	1,2E+00	76

5.1.3 Effet de la migration des particules sur la conductivité hydraulique

Un déplacement des particules fines dans la matrice de la roche stérile a été observé ici lors des essais de perméabilité. Cependant, les valeurs de k_{sat} obtenues suggèrent que la conductivité hydraulique saturée des stériles est peu influencée par la migration des particules fines à travers des échantillons testés. On a tenté d'estimer l'impact possible du déplacement des particules fines sur la valeur de k_{sat} des stériles à partir de données expérimentales sur la distribution granulométrique des particules lessivées, en utilisant le modèle de prédiction de la conductivité hydraulique saturée de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003). En bref, l'approche utilisée consiste à estimer la variation de la surface spécifique et de l'indice des vides des matériaux, au fur et à mesure que les particules se déplacent dans la matrice du sol. L'équation de Kozeny-Carman (équation 2.7) est alors utilisée pour «prédir» la variation de conductivité hydraulique saturée à partir des données sur la surface spécifique et l'indice des vides ainsi obtenues. Le tableau 5.7 fournit les résultats de cette analyse. Un exemple du calcul est présenté à l'annexe 12.

Le tableau 5.7 est organisé de la façon suivante. La ligne «*a*» présente les valeurs initiales des paramètres des matériaux dans la colonne QIT1_P50_f2 avant l'essai (avant que les particules fines commencent à se déplacer). Les paramètres analysés incluent la masse totale des grains solides, l'indice des vides e , la surface spécifique S_s calculée selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992) et la conductivité hydraulique k_{sat} prédite à partir de données granulométriques selon le modèle KC (Chapuis et Aubertin, 2003). Un lessivage graduel de 50 g, 100 g, 200 g, ...3200 g de particules fines (colonne 2, lignes «*b*», «*s*», «*d*», ...«*h*» dans le tableau 5.7) se traduit par une diminution de la masse totale des grains solides (colonne 4). Puisque le volume total de l'échantillon reste constant (selon l'hypothèse adoptée ici), la diminution de la masse (et du volume) des grains solides conduit à une augmentation de l'indice des vides e (colonne 5 dans le tableau 5.7), selon l'équation 3.10. Le départ d'une partie des particules fines devrait aussi conduire à une variation de granulométrie des matériaux restants et de leur surface spécifique (colonne 6) ; cette variation de la surface spécifique est estimée selon les données granulométriques des particules récupérées lors des essais sur l'échantillon QIT1_P50_f2 (figure 4.7). Pour ces calculs, on a donc admis que le changement de la courbe granulométrique initiale de l'échantillon QIT1_P50_f2 se fait seulement pour les fractions qui ont été identifiées selon les particules en suspension dans l'eau recueillie lors des essais de perméabilité (voir section 4.2 du chapitre 4). Les valeurs de la surface spécifique (S_s) calculées selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992) pour les courbes granulométriques ainsi modifiées sont présentées dans la colonne 6 (tableau 5.7) en tenant compte de la masse des particules lessivées (colonne 2). Ces valeurs de S_s sont ensuite utilisées pour les calculs de la conductivité hydraulique saturée selon le modèle KC (colonne 7, équation 2.7).

Tableau 5.7 : Estimation de l'effet du déplacement des particules fines sur la valeur de k_{sat} des stériles pour la colonne QIT1_P50_f2 (basée sur le modèle KC, équation 2.7).

Quantité des particules lessivées			Variation des paramètres des stériles lors du lessivage des particules fines						
#	[g]	[%]	Masse totale sèche [kg]	Indice des vides e	Δe^{**} [-]	Surface spécifique [m^2/kg]	k_{sat} selon le modèle KC [cm/s]	Δk_{sat}^{***} [cm/s]	$\left(\frac{k_{sat} \text{ lessivé}}{k_{sat} \text{ initial selon KC}^{****}} \right)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
a*	0	0	181,33	0,2651	0	8,97	3,49E-03	0	1
b	50	0,03	181,28	0,2655	0,0004	8,96	3,52E-03	3,0E-05	1,01
c	100	0,06	181,23	0,2658	0,0007	8,94	3,55E-03	6,0E-05	1,02
d	200	0,11	181,13	0,2665	0,0014	8,91	3,60E-03	1,1E-04	1,03
e	400	0,22	180,93	0,2679	0,0028	8,84	3,71E-03	2,2E-04	1,06
f	800	0,44	180,53	0,2707	0,0056	8,69	3,95E-03	4,6E-04	1,12
g	1600	0,86	179,73	0,2764	0,0113	8,41	4,46E-03	9,7E-04	1,28
h	3200	1,76	178,13	0,2879	0,0228	7,84	7,16E-03	3,7E-03	2,05

* voir texte pour explications

** $\Delta e = e_{final} - e_{initial}$

*** $\Delta k_{sat} = k_{sat} - k_{sat}(\text{initial selon KC})$; $k_{sat}(\text{initial selon KC})$ » représente ici la conductivité hydraulique initiale de l'échantillon estimée selon le modèle de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003)

Les résultats du tableau 5.7 indiquent que si l'on prend en considération les valeurs de k_{sat} prédites par le modèle KC (incluant la conductivité hydraulique initiale), il faudrait évacuer plus de 3 kilogrammes de particules pour augmenter la conductivité hydraulique du matériau d'un facteur de 2, c'est-à-dire l'augmenter d'environ 0,004 cm/s (voir Δk_{sat} dans le tableau 5.7). En pratique, cette analyse semble indiquée que la variation Δk_{sat} due à la migration des particules fines serait négligeable comparée à la conductivité hydraulique réelle de l'échantillon, telle que mesurée en laboratoire ; pour l'échantillon considéré ici, soit QIT1_P50_f2, la valeur de k_{sat} mesurée est égale à 0,1 cm/s (tableau 4.8).

Cette analyse approximative, qui ne prend pas en considération les changements internes de la structure causés par la migration de particules fines, indiquerait donc que ce facteur ne semble pas prépondérant. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que la formation des passages préférentiels (ou le colmatage des pores) par les particules déplacées sont très courants dans les matériaux érodés, ce qui pourrait affecter la conductivité hydraulique, tel que démontré par Chapuis et al. (1996). Il est important de souligner que même si les critères de filtre sont satisfaisants pour certains matériaux, les critères de mobilité des particules fines ne sont pas nécessairement rencontrés de sorte que les particules fines peuvent parfois se déplacer dans les pores de ces matériaux (Chapuis et al., 1996).

5.2 Macroporosité des stériles

Comme on l'a mentionné auparavant, les résultats de la présente étude indiquent que la conductivité hydraulique saturée des stériles serait peu influencée par la présence des différentes proportions de graviers et de cailloux. Toutes les fractions granulométriques des stériles testées ont menées à des valeurs pratiquement similaires de k_{sat} . Les valeurs de k_{sat} prédites selon les modèles de Kozeny-Carman (KC) et Kozeny-Carman modifié (KCM) sous-estiment systématiquement la conductivité des stériles de 1 à 2 ordres de grandeur (par rapport aux mesures). La raison de cet écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées semble due (en partie) à la nature très hétérogène des stériles. On peut supposer que pour ce type de matériau à granulométrie très étalée (avec cailloux), il existe d'autres caractéristiques qui contrôlent les propriétés hydriques. Les résultats des essais de traceur et des essais d'infiltration suggèrent la présence de voies d'écoulement préférentiel qui seraient formées par un système de macropores interconnectés.

Par exemple, lors des essais de traceur, on a noté un écart considérable entre le temps de la première arrivée du traceur et le temps d'arrivée du front advectif, soit 4 min et 21 min respectivement pour l'échantillon QIT1_P50_lâche, et 22 min et 71 min pour l'échantillon QIT1_P5_f (tableaux 4.11 et 4.12). Ceci pourrait être relié à la présence des voies d'écoulement préférentiel dans les stériles testés.

Les valeurs de la dispersivité longitudinale (α_L) déterminées lors des essais de traceurs dans la présente étude (et les travaux antérieurs) sont présentées dans le tableau 5.8. On peut voir que les valeurs du coefficient α_L obtenues par différentes méthodes varient entre 10 et 20 cm. Selon les données de Gelhar et al. (1992), la dispersivité longitudinale pour cette échelle, c'est-à-dire pour des échantillons dont la longueur est d'environ 100 cm, serait de 5 cm ou moins (selon la granulométrie ; figure 5.8). Les valeurs relativement élevées des coefficients α_L déduites des essais en colonnes témoignent d'une grande hétérogénéité et pourraient être dues à des voies d'écoulement préférentiel, qui contribuent aux processus de dispersion dans les stériles miniers.

Tableau 5.8 : Valeurs de la dispersivité longitudinale α_L des stériles obtenues dans la présente étude et les études antérieures.

Source	Méthode utilisée	Matériaux	α_L [cm]
Présente étude	Méthode de paramètres adimensionnées de Sauty (1980) (voir section 4.4)	QIT1_P50 lâche	15
		QIT1 P5 f	12
Bui (2007)	POLLUTE et l'équation d'advection-dispersion d'Ogata-Banks (1961)	QIT Passant 10 mm	10
		QIT Passant 50 mm	10
Intissar (2009)	Solution d'Ogata-Banks (1961)	QIT2 Passant 10 mm	20

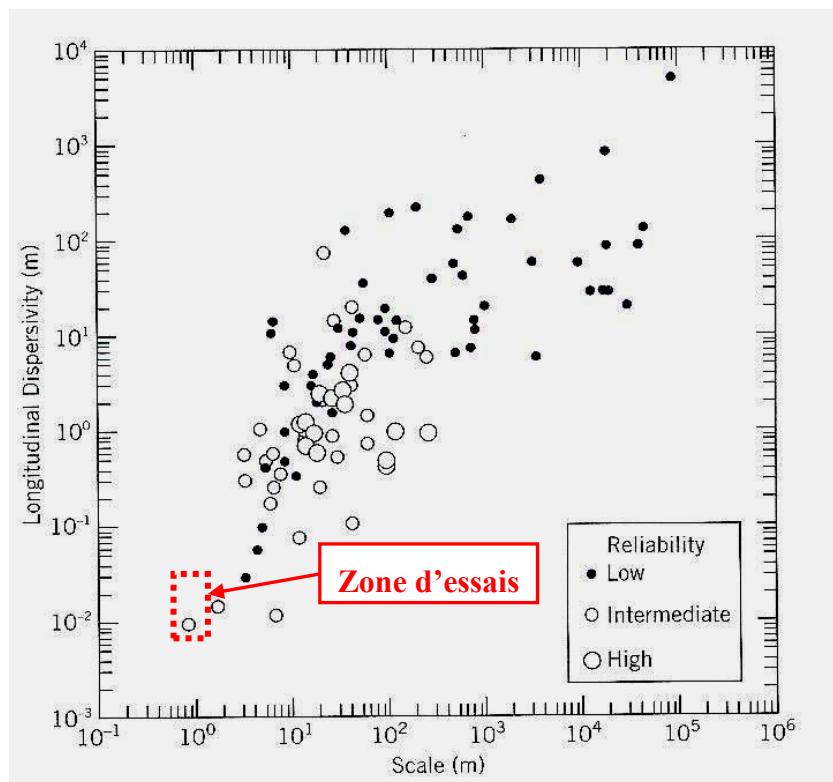


Figure 5.8 : Lien entre la dispersivité longitudinale α_L et l'échelle des essais de terrain (tiré de Gelhar et al., 1992).

En ce qui concerne les résultats des essais d'infiltration, on peut remarquer que les valeurs minimales du taux d'infiltration I (de 0,01 cm/s à 0,04 cm/s pour les deux matériaux testés, QIT1_P10_f et QIT1_P50_lâche, voir figures 4.21 et 4.22) sont significativement inférieures aux valeurs de k_{sat} mesurées lors des essais de perméabilité du matériau saturé, soit 0,11 cm/s et 0,43 cm/s respectivement (voir tableau 4.8). Cet écart pourrait être expliqué, en partie, par la présence d'un système de macropores interconnectés dans les matériaux testés. A l'état complètement saturé, ces macropores pourraient jouer un rôle comme voies d'écoulement préférentiel, responsables des valeurs élevées de k_{sat} . Dans les conditions non-saturées qui prévalent lors des essais d'infiltration (de courte durée), ces macropores ne seraient pas entièrement remplis d'eau (certains seraient même presque vides). Dans ce cas-là, les macropores ne pourraient pas contribuer de manière significative à l'écoulement de l'eau et contribuer à l'infiltration dans le matériau, ce qui expliquerait les valeurs réduites du taux d'infiltration I (par rapport à k_{sat}).

Il est possible d'estimer approximativement le diamètre des macropores, qui pourraient former les voies d'écoulement préférentiel dans les stériles, en prenant en considération les dimensions des particules lessivées lors des essais de perméabilité. Afin de traverser un échantillon de roche stérile, une particule solide doit passer par un système des pores interconnectés dont le diamètre minimal doit être plus grand que la taille de la particule déplacée. Dans la présente étude, la taille des plus grandes particules récupérées serait d'environ 250 µm (ce diamètre correspond à 3-4% des particules en suspension dans l'eau récupérée et à plus de 15% des particules retenues par le géotextile au bas des colonnes QIT1_P50_f1,f2,lâche). Une certaine quantité de particules plus grandes que 250 µm (0,25 mm), mais plus petites que 400 µm (0,4 mm) ont également été lessivées au cours des essais (identifié par l'analyse laser des particules récupérées ; voir figures 4.7, 4.8 et 4.10). On n'a pas observé des particules plus grandes que 400 µm parmi les particules recueillis à la sortie des colonnes expérimentales. On peut donc conclure que la taille maximale des macropores conducteurs pourrait être supérieure à 250 µm, sans dépasser trop 400 µm. Il est possible que des macropores plus grands que 400 µm soient présents dans la matrice de la roche stériles, surtout dans les fractions plus grossières des stériles (p. ex. dans les échantillons QIT1_P50_f1,f2,lâche,l et QIT1_P28_f,l). Cependant, ces pores seraient isolés dans la matrice, c'est-à-dire ils ne seraient pas rattachés au système des macropores interconnectés qui forment les voies d'écoulement préférentiel. Ceci influence les dimensions des pores conducteurs ainsi que la taille des particules mobiles.

À partir de ces déductions, il est possible d'estimer la valeur de la porosité "effective" des macropores en utilisant les données obtenues lors de l'essai combiné «infiltration/traceur». Cet essai a été effectué sous une charge variable. Le débit d'eau a été mesuré à la sortie de la colonne pour divers intervalles de temps (tableau 5.9).

En sachant le débit d'eau (Q) et la section de la colonne expérimentale (A), nous pouvons déduire la vitesse de Darcy (V_a) selon les équations 2.3 et 2.4 ($V_a=Q/A$). Nous pouvons ensuite calculer la porosité effective (n_e) par itérations en utilisant l'équation de la vitesse linéaire $V_x=V_a/n_e$. Pour cela, il faut définir la valeur de n_e qui permettrait au traceur d'arriver à la sortie de la colonne au bout d'environ 2 minutes, soit le temps de la première apparition du traceur dans l'eau recueillie lors de l'essai «infiltration/traceur». Les résultats de ces calculs sont montrés dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Eléments utilisés pour estimer la porosité "effective" des macropores d'après les résultats de l'essai combiné «infiltration/traceur» pour la colonne QIT1_P50_lâche.

Temps, s	Masse d'eau récupérée à la sortie, g	C/Co dans l'eau récupérée	V_a (Darcy), ($V_a=Q/A^*$), cm/s	$V_x (=V_a/n_e)$, cm/s ($n_e=0,0782$)**	Distance parcourue par le traceur à chaque intervalle de temps, ($L=V_x \times \Delta t$), cm
20	543,1	0,0015	0,040	0,518	10,36
30	287,3	0,0018	0,043	0,548	5,48
40	287,4	0,0020	0,043	0,548	5,48
50	279,6	0,0021	0,042	0,533	5,33
60	263,1	0,0021	0,039	0,502	5,02
70	275,3	0,0020	0,041	0,525	5,25
80	250,5	0,0020	0,037	0,478	4,78
90	254	0,0020	0,038	0,484	4,84
100	247,1	0,0019	0,037	0,471	4,71
110	243,8	0,0021	0,036	0,465	4,65
120***	233,8	0,0025	0,035	0,446	4,46
\sum (parcours) = longueur de l'échantillon = 60,35 cm					

* Q – débit d'eau à la sortie de la colonne expérimental; A – section de la colonne

** valeur de n_e déduite pour obtenir le temps de la première arrivée du traceur

*** temps de la première arrivée du traceur à la sortie de la colonne (2 min)

La valeur de la porosité "effective" n_e due aux macropores ainsi obtenue s'élèverait alors à environ 8 %. Rappelons toutefois que l'échantillon considéré pour cette analyse (QIT1_P50_lâche) est caractérisé par un état lâche (pas de compactage lors de son montage). La porosité totale déterminée au démontage de l'échantillon en question est d'environ 30 %. Lors

des essais de traceur sur cet échantillon, on a noté un écart considérable entre le temps de la première arrivée du traceur et le temps d'arrivée du front advectif, soit 4 et 21 min, ce qui pourrait refléter la présence des voies d'écoulement préférentiel. Il est probable que la porosité "effective" due aux macropores serait plus faible dans les échantillons plus denses.

5.3 Courbes de rétention d'eau des stériles

Dans la présente étude, les courbes de rétention d'eau des stériles (CRE) ont été définies par un lissage des données expérimentales (présentées à la section 4.8.1), à l'aide du logiciel RETC en utilisant le modèle de van Genuchten (1980) (figure 4.26). Les valeurs de la pression d'entrée d'air ψ_a ($\equiv AEV$) et de la succion résiduelle ψ_r ont été déterminées par la méthode graphique des tangentes (voir section 2.2.3) sur les CRE lissées (tableau 4.15). Les valeurs de ψ_a ainsi obtenues varient de 0,4 à 8 cm pour les différentes fractions granulométriques testées en colonne, ce qui représente une faible variation de ces valeurs (dans l'absolu), surtout si l'on tient compte de la précision des mesures. Les valeurs de la succion résiduelle ψ_r varient de 5,5 à 30 cm. Pour ces deux paramètres, ψ_a et ψ_r , les plus grandes valeurs sont observées sur les fractions relativement plus fines des stériles. La figure 5.9 montre les valeurs de ψ_a et de ψ_r en fonction de la valeur du D_{10} des stériles testés dans la présente étude et dans certaines études antérieures (voir détails à l'annexe 11). Si l'on considère uniquement les résultats de la présente étude, on peut constater que le lien entre le AEV et la granulométrie des stériles n'est pas bien défini (figure 5.9a, points noirs). On note toutefois une tendance à l'augmentation des valeurs de ψ_r pour les stériles avec des granulométries plus fines (figure 5.9b).

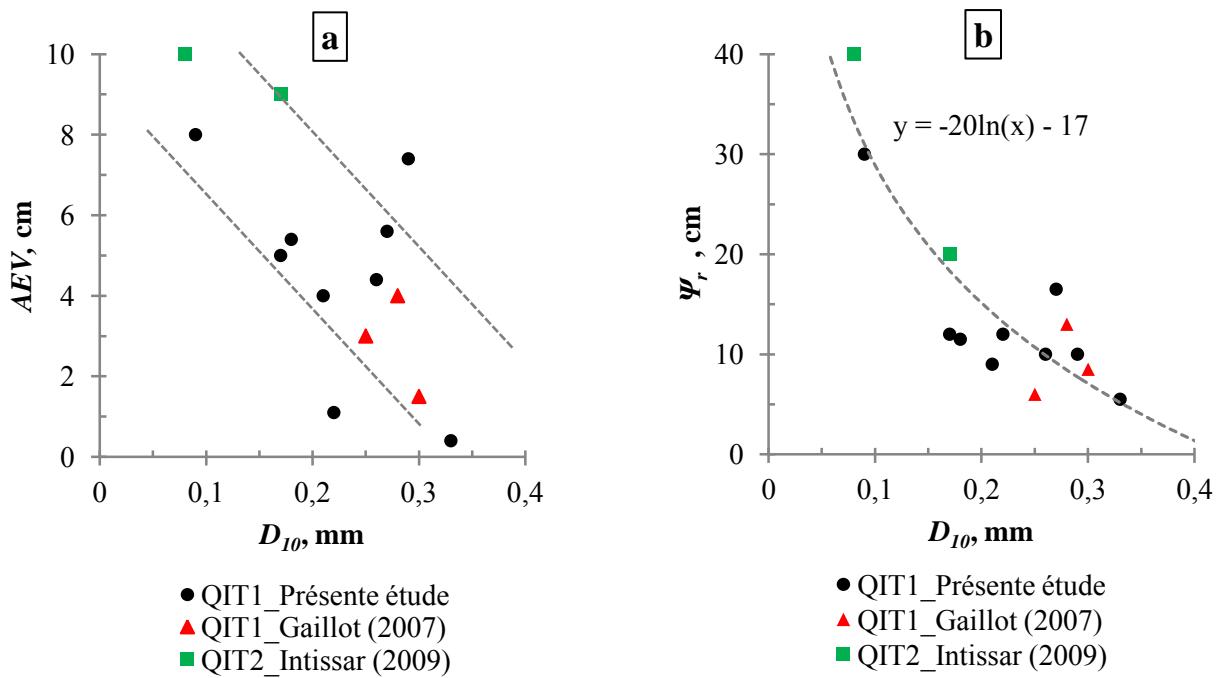


Figure 5.9 : Valeurs de la pression d'entrée d'air ψ_a ($\equiv AEV$) et de la succion résiduelle ψ_r obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales, en fonction du D_{10} des matériaux testés (voir détails à l'annexe 11).

Les propriétés de rétention d'eau dans les conditions proches de la saturation, associées au AEV , semblent cependant plus influencées par la présence des macropores. Lors de la désaturation, les plus gros pores se vident les premiers à l'application d'une succion. Ceci conditionne les valeurs relativement basses du AEV dans les stériles miniers, qui contiennent des pores de grande taille. Comme on l'a déjà mentionné, les valeurs du AEV obtenues expérimentalement sont toutefois assez semblables dans toutes les fractions granulométriques étudiées. La présence des macropores explique également la conductivité hydraulique élevée des stériles. Le fait que les valeurs mesurées de k_{sat} soient pratiquement les mêmes pour tous les échantillons testés ($k_{sat} \approx 10^{-1}$ cm/s pour les fractions < 10 à 50 mm) suggère que le système des macropores qui se forme dans ces matériaux est peu influencé par la proportion variable de cailloux dans les différentes fractions granulométriques testées. Dans le cas du AEV , la combinaison de divers facteurs d'influence, tels la présence des macropores et le degré de compactage, le grand étalement granulométrique,

l'angularité des grains et la géométrie des pores qui en découle, pourrait expliquer le fait que le lien entre le *AEV* et la granulométrie des stériles n'est pas aussi apparent que pour les matériaux plus fins et plus uniformes (tel qu'étudié par Aubertin et al. (2003), par exemple).

La valeur de la succion résiduelle ψ_r dépendrait surtout de la granulométrie et la porosité de la fraction plus fine des stériles, d'où le lien mieux défini qui semble exister entre les valeurs de ψ_r et le D_{10} des stériles (figure 5.9b).

En ce qui concerne la teneur en eau résiduelle θ_r , les valeurs mesurées sur les stériles QIT1 dans la présente étude, c'est-à-dire $0,06 < \theta_r < 0,08$, s'accordent très bien avec les résultats obtenus dans les travaux précédents. Ainsi, les valeurs de θ_r égales à 0,05 et 0,06 ont été obtenues pour les stériles QIT1 par Gaillot (2007). Des résultats similaires ($\theta_r = 0,05 - 0,07$) ont été déterminés par Intissar (2009) pour les stériles QIT2, qui sont assez semblables aux stériles QIT1 (sauf par leur teneur réduite en ilménite). Les valeurs de θ_r obtenues au moyen des essais en colonnes sont confirmées par les mesures de terrain à la mine Tio, où la teneur en eau naturelle des stériles est environ 0,06 à quelques mètres de profondeur (Lessard, 2011).

En résumé, on peut donc déduire de ces résultats que :

- Les roches stériles de la mine Tio sont caractérisées par des valeurs faibles de la pression d'entrée d'air *AEV*, ce qui signifie qu'ils se désaturent facilement à l'application d'une petite succion (moins de 10 cm d'eau ou 1 kPa).
- Ces stériles montrent aussi des valeurs relativement basses de la succion résiduelle ψ_r (moins de 40 cm d'eau ou 4 kPa), ce qui signifie qu'ils atteignent aisément un état de saturation résiduelle.
- Ces stériles montrent cependant une valeur relativement élevée de la teneur en eau résiduelle ($0,05 < \theta_r < 0,08$), ce qui reflète une fraction assez importante (et étalée) de particules fines, qui sont responsables de cette rétention d'eau.

5.4 Prédiction de la courbe de rétention d'eau

Les courbes de rétention d'eau (CRE) obtenues expérimentalement ont été comparées avec les CRE prédictes (selon les courbes granulométriques des stériles) à l'aide du modèle Kovács

modifié MK (Aubertin et al., 2003). Les concepts et les équations utilisées dans ce modèle ont été présentés dans le chapitre 2 (section 2.2.3) du mémoire. Rappelons que le modèle MK utilise les valeurs de D_{10} , C_U et l'indice des vides des matériaux. Une comparaison entre les CRE prédictes et les valeurs expérimentales est montrée à la figure 5.10. Les principaux paramètres des CRE prédictes selon le modèle MK sont donnés dans le tableau 5.10.

La figure 5.10 montre que les prédictions de la CRE avec le modèle MK diffèrent souvent assez significativement des données expérimentales, surtout dans la partie résiduelle de la courbe. On peut voir en particulier que le modèle MK sous-estime systématiquement la teneur en eau résiduelle des stériles; les valeurs de θ_r obtenues selon le modèle MK ($\theta_{r MK} \approx 0,02$) sont plus basses que les valeurs obtenues au laboratoire ($0,05 < \theta_{r LABO} < 0,08$) (voir aussi tableau 5.10).

En ce qui concerne les valeurs de la pression d'entrée d'air des stériles, les prédictions du modèle MK sont assez proches des valeurs mesurées au laboratoire, bien que les valeurs du AEV prédictes soient un peu plus élevées, tel que montré à la figure 5.11a. Les valeurs du AEV selon le modèle MK n'excèdent cependant pas 10 cm d'eau, ce qui est semblable aux résultats expérimentaux (tableau 5.10).

En général, les valeurs de la succion résiduelle des stériles définies par la méthode graphique des tangentes sur les CRE prédictes avec le modèle MK concordent assez bien avec les valeurs de ψ_r prises sur les CRE déduites des mesures de laboratoire. Les valeurs de ψ_r prédictes sont toutefois plus élevées que les valeurs expérimentales (figure 5.11b). L'écart entre les valeurs prédictes et mesurées est plus grand dans le cas des prédictions de la succion résiduelle selon l'équation 2.21 (figure 5.12). L'utilisation de cette équation pour les stériles miniers est donc déconseillée. Les raisons qui pourraient expliquer les écarts entre les CRE prédictes et les CRE mesurées, ainsi que des modifications qui pourraient améliorer la qualité des prédictions avec le modèle MK dans le cas des stériles miniers, sont discutées dans les prochaines sections.

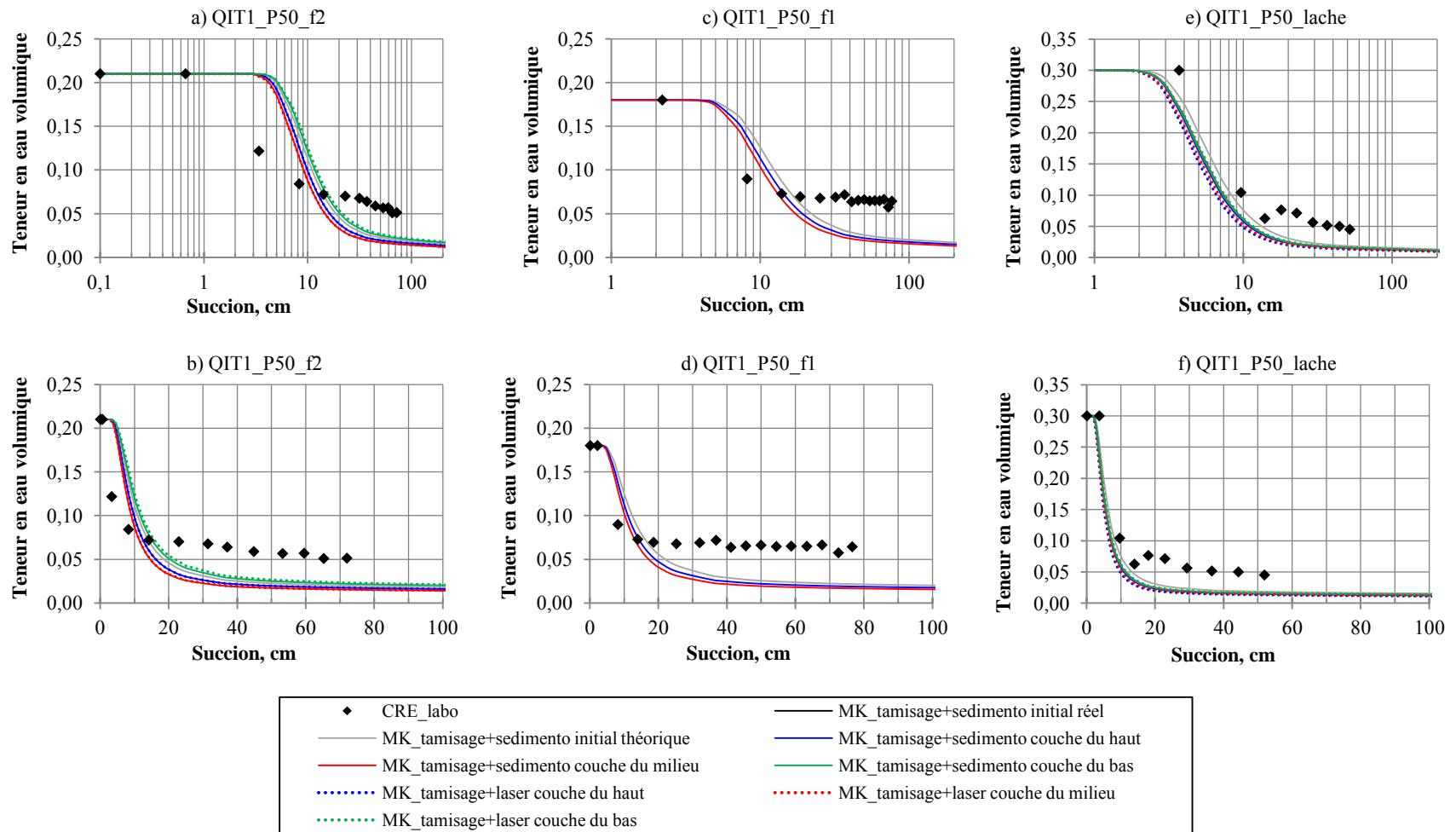


Figure 5.10 (début) : Comparaison des courbes de rétention d'eau mesurées et prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon les données granulométriques disponibles pour les différentes couches des stériles dans les colonnes expérimentales. Les CRE sont présentées dans un plan semi-log (en haut) et arithmétique (en bas). Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre. Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et par analyse laser au Malvern.

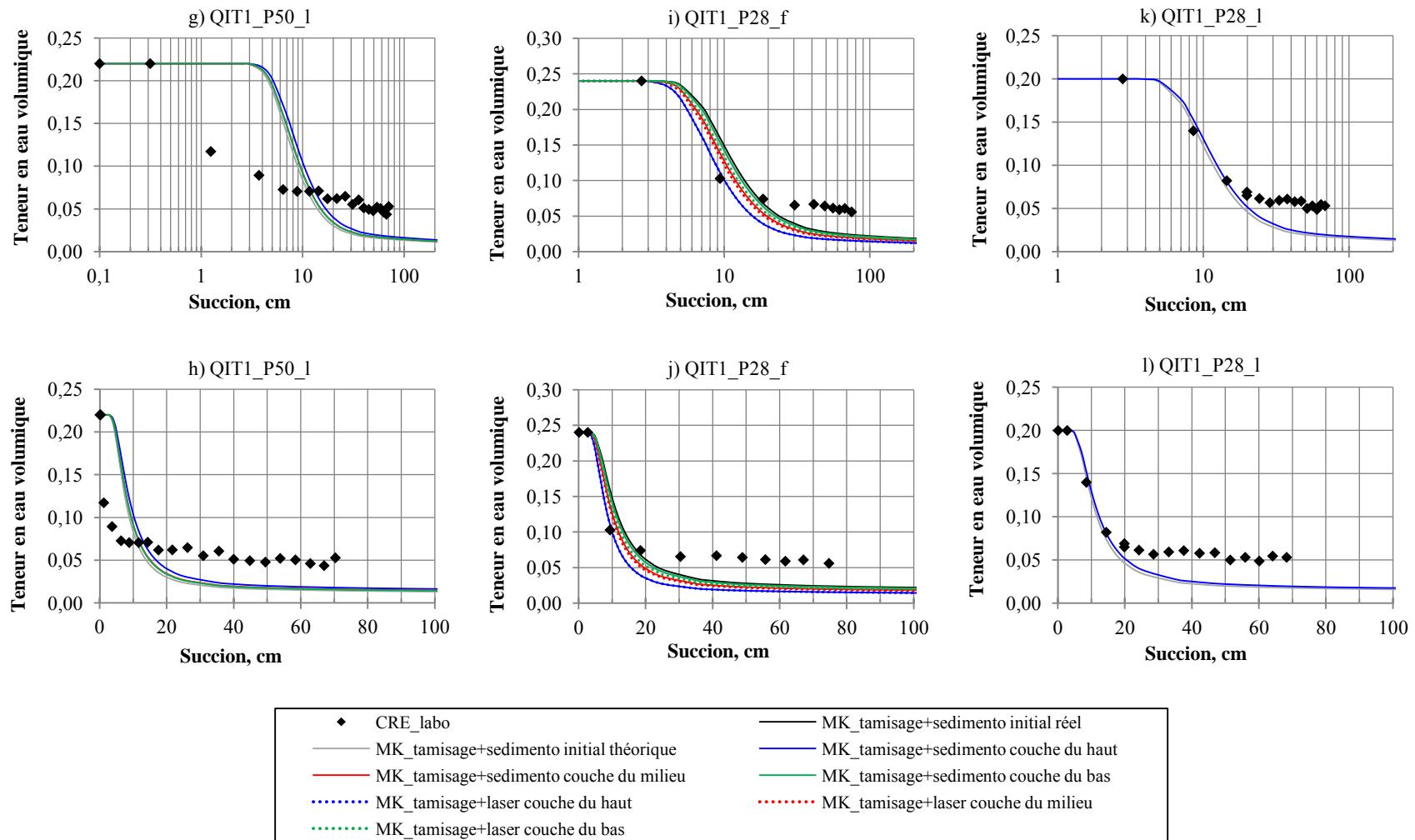


Figure 5.10 (suite) : Comparaison des courbes de rétention d'eau mesurées et prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon les données granulométriques disponibles pour les différentes couches des stériles dans les colonnes expérimentales. Les CRE sont présentées dans un plan semi-log (en haut) et arithmétique (en bas). Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre. Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et par analyse laser au Malvern.

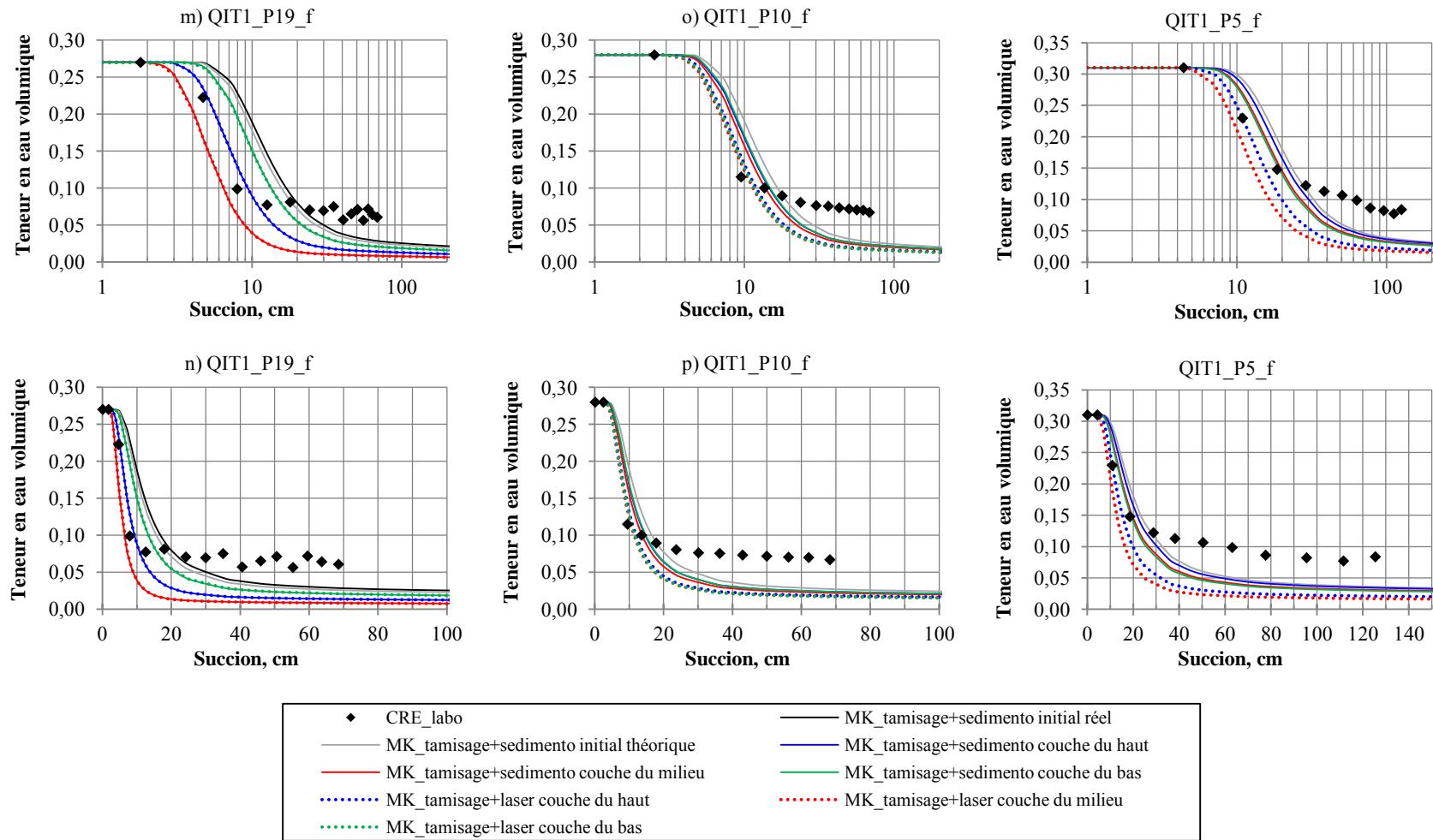


Figure 5.10 (suite et fin) : Comparaison des courbes de rétention d'eau mesurées et prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon les données granulométriques disponibles pour les différentes couches des stériles dans les colonnes expérimentales. Les CRE sont présentées dans un plan semi-log (en haut) et arithmétique (en bas). Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre. Les CRE identifiées comme «MK_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et par analyse laser au Malvern.

Tableau 5.10 : Paramètres des CRE obtenus à partir du modèle MK (Aubertin et al., 2003) selon la courbe granulométrique représentative des échantillons (voir tableau 4.2 pour les valeurs du D_{10} et du C_U utilisées).

Échantillon	Indice des vides e [-]	Paramètre $m (=1/C_U)$ [-]	h_{co} MK éq. 2.16 [cm]	AEV Labo RETC/graph* [cm]	AEV MK CRE/graph** [cm]	AEV($\equiv\psi_a$) MK éq.2.23 [cm]	θ_r Labo [-]	θ_r MK CRE/graph** [-]	ψ_r MK CRE/graph** [cm]	ψ_r MK éq.2.21 [cm]
QIT1_P50_f1	0,22	0,039	49,6	4,4	5,5	9,9	0,06	0,02	21,7	82,5
QIT1_P50_f2	0,27	0,033	46,9	1,1	4,8	9,4	0,05	0,02	19,6	76,9
QIT1_P50_lâche	0,43	0,043	23,2	7,4	2,7	4,6	0,05	0,02	10,6	31,7
QIT1_P50_1	0,28	0,053	32,4	0,4	4,4	6,5	0,05	0,02	15,5	48,2
QIT1_P28_f	0,32	0,035	50,1	5,4	5,4	10,0	0,06	0,02	21,4	83,7
QIT1_P28_1	0,25	0,053	44,7	5,6	6	8,9	0,05	0,02	21,5	72,4
QIT1_P19_f	0,37	0,056	39,2	4	5,3	7,8	0,07	0,02	19	61,4
QIT1_P10_f	0,39	0,048	44,7	5	5,9	8,9	0,07	0,02	21,4	72,38
QIT1_P5_f	0,45	0,046	70,8	8	8,8	14,2	0,08	0,03	33,5	129,2

*AEV Labo RETC/graph – valeurs expérimentales définies par la méthode graphique des tangents sur les CRE lissées à l'aide du logiciel RETC en utilisant le modèle de van Genuchten (1980)

** AEV, θ_r , ψ_r MK CRE/graph – valeurs prédictes définies par la méthode graphique des tangents sur les CRE prédictes selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003)

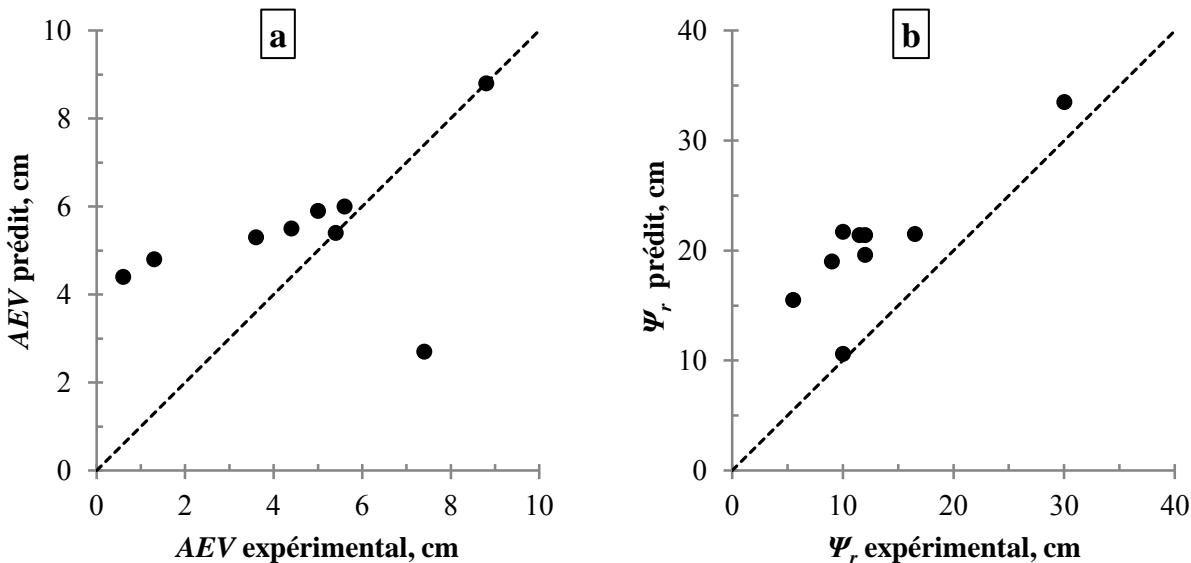


Figure 5.11 : Comparaison des valeurs du AEV et de la succion résiduelle ψ_r obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales (modèle de van Genuchten, 1980) et des valeurs prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) à partir des courbes granulométriques moyennes (tableau 4.2).

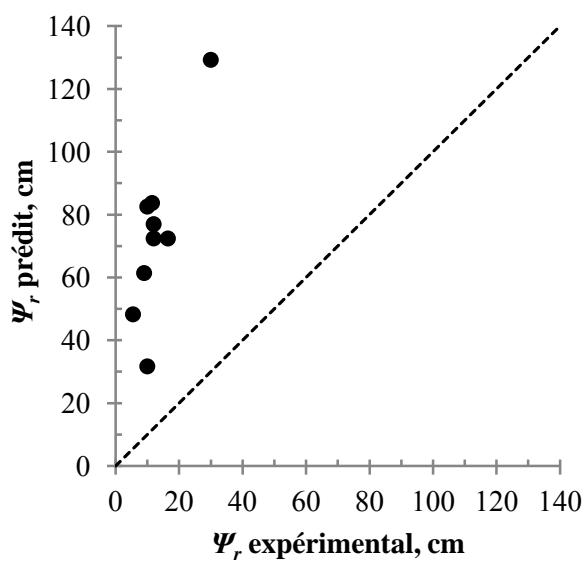


Figure 5.12 : Comparaison des valeurs de la succion résiduelle ψ_r prédites selon l'équation 2.21 (modèle MK; Aubertin et al., 2003) et des valeurs mesurées obtenues par la méthode graphique des tangentes sur les CRE lissées à partir de données expérimentales.

5.5 Modifications du modèle MK

5.5.1 Paramètres d'influence

Les courbes de rétention d'eau prédites selon le modèle MK comprennent deux composantes : la saturation capillaire S_c et la saturation d'adhésion S_a (figure 2.2). Dans sa partie « résiduelle », la CRE prédite selon le modèle MK est contrôlée principalement par la composante S_a . Compte tenu des écarts observés, c'est au niveau de l'évaluation de la saturation d'adhésion que des modifications sont apportées ici afin d'améliorer la qualité des prédictions dans le cas des stériles miniers. Selon l'équation 2.19, qui définit le paramètre S_a , il y a deux variables qui peuvent modifier la CRE, soit le coefficient d'adhésion a_c et la remontée capillaire équivalente h_{co} . L'équation qui définit la remontée capillaire h_{co} (équation 2.16) inclut, à son tour, deux paramètres qui peuvent être ajustés : l'angle de mouillage β et le diamètre équivalent D_H (qui est lié à la surface spécifique S_s). Dans les prochaines sections, nous allons discuter l'effet de ces paramètres (a_c , β et D_H) sur la courbe de rétention d'eau.

Effet du coefficient d'adhésion a_c

Pour le modèle MK appliqué aux matériaux granulaires (peu plastiques, sans cohésion), le coefficient a_c est usuellement fixé à 0,01 (si la succion est exprimée en cm). Cette valeur a été obtenue à partir de données expérimentales selon un ajustement des courbes de rétention d'eau prédites. Ce coefficient pourrait toutefois dépendre de la surface spécifique S_s et du facteur de la forme (Aubertin et al., 2003). Un changement de la valeur de a_c entraîne un changement de la teneur en eau résiduelle prédite par le modèle MK, en raison du déplacement de toute la branche « résiduelle » de la courbe de rétention d'eau.

En utilisant nos données expérimentales, il est possible d'ajuster le paramètre a_c pour chaque matériau testé afin de mieux représenter les points expérimentaux dans la partie résiduelle de la CRE; ceci est montré à la figure 5.13. Dans le cas des stériles de la mine Tio, les valeurs de a_c ainsi ajustées varient de 0,008 à 0,044 (voir l'annexe 11); la valeur moyenne est égale à environ 0,03. Le tableau 5.11 présente les valeurs du a_c ajustées sur la base de données granulométriques moyennes des échantillons testés (voir tableau 4.2); les valeurs du a_c obtenues pour toutes les courbes granulométriques disponibles dans la présente étude sont présentées à l'annexe 11.

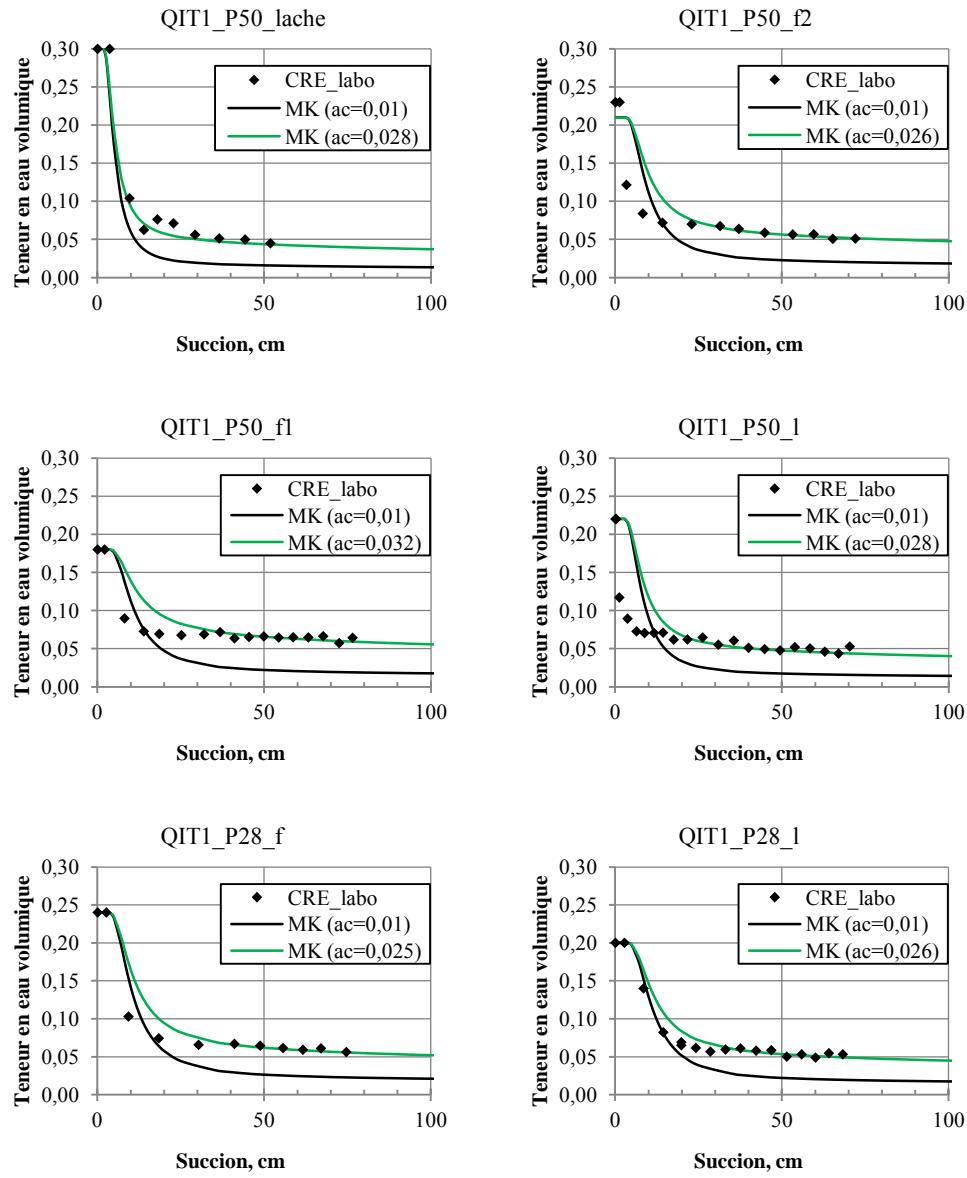


Figure 5.13 (début) : Courbes de rétention d'eau des stériles obtenues du modèle MK (Aubertin et al., 2003) avec le coefficient a_c de base ($a_c = 0,01$) et ajusté (les données utilisées sont présentées dans le tableau 4.2).

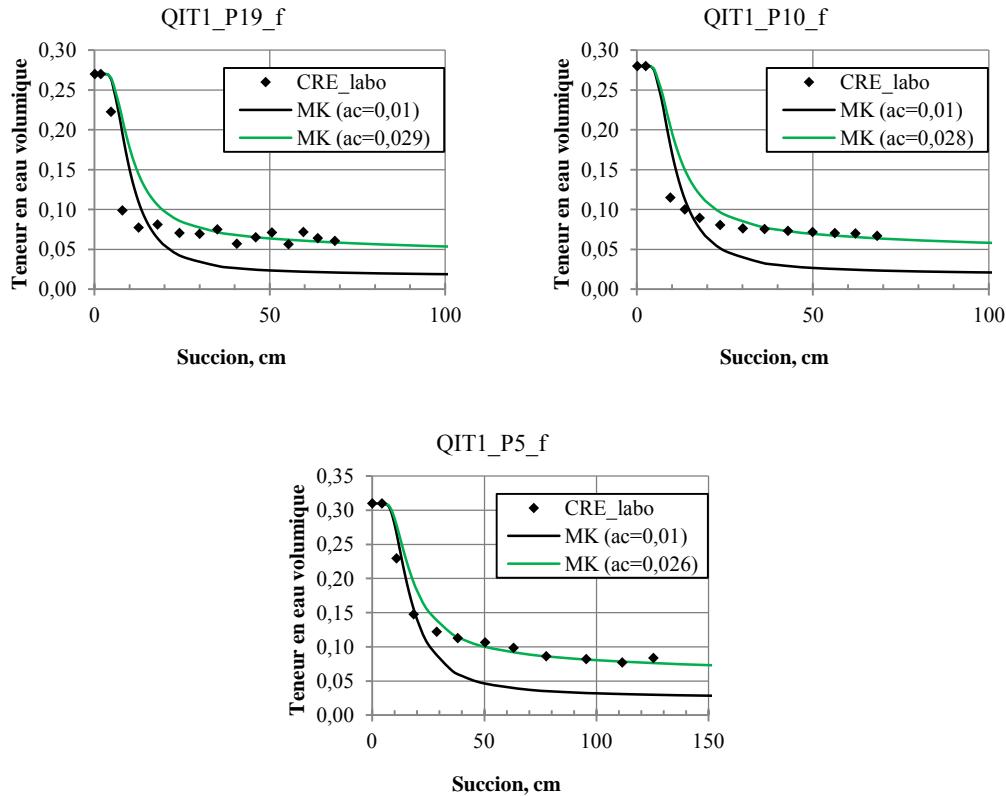


Figure 5.13 (suite et fin) : Courbes de rétention d'eau des stériles obtenues du modèle MK (Aubertin et al., 2003) avec le coefficient a_c de base ($a_c = 0,01$) et ajusté (les données utilisées sont présentées dans le tableau 4.2).

Tableau 5.11 : Valeurs du coefficient a_c ajusté pour obtenir une meilleure représentation des données expérimentales avec le modèle MK (voir figure 5.13); les paramètres granulométriques moyens utilisés sont présentés dans le tableau 4.2.

Échantillon	a_c ajusté
QIT1_P50_f1	0,032
QIT1_P50_f2	0,026
QIT1_P50_lâche	0,028
QIT1_P50_1	0,028
QIT1_P28_f	0,025
QIT1_P28_1	0,026
QIT1_P19_f	0,029
QIT1_P10_f	0,028
QIT1_P5_f	0,026

Le coefficient a_c du modèle MK a été déterminé par Aubertin et al. (2003) sur la base des données expérimentales obtenues sur des matériaux à granulométrie relativement fine, notamment des résidus miniers et des silts dont le D_{10} n'excède pas 0,014 cm. Cependant, les stériles étudiés dans le présent projet sont beaucoup plus étalés et grossiers ; leur D_{10} varie d'environ 0,01 cm à 0,1 cm et le $C_U > 15$.

La figure 5.14 montre les valeurs ajustées du coefficient a_c (incluant les valeurs montrées à la figure 5.13 et celles présentées à l'annexe 11) en fonction du D_{10} des matériaux testés dans la présente étude et ceux des principaux matériaux utilisés à l'étape de développement du modèle MK. La figure 5.14 inclus les résultats obtenus pour toutes les courbes granulométriques disponibles dans la présente étude, incluant les données granulométriques obtenues au démontage des colonnes expérimentales et les analyses faites par la méthode de l'hydromètre et au laser.

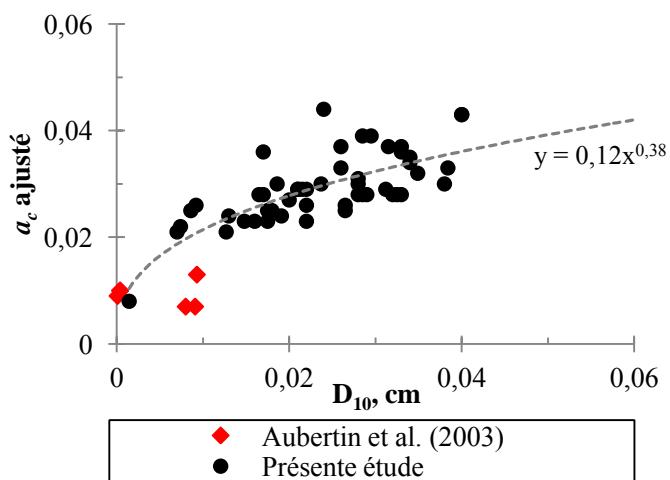


Figure 5.14 : Valeurs du coefficient a_c ajustées sur la CRE en fonction du D_{10} des stériles (selon toutes les courbes granulométriques disponibles); on montre aussi quelques valeurs du coefficient a_c ajustées pour les matériaux fins ($D_{10} \leq 0,014$ cm) qui ont servi à déduire la valeur de base ($a_c=0,01$) du modèle MK (selon Aubertin et al., 2003).

Comme on peut le voir à la figure 5.14, la valeur du coefficient a_c semble augmenter avec le D_{10} des matériaux. Si l'on analyse plus en détail les valeurs montrées à la figure 5.14, on peut remarquer que les points peuvent être regroupés pour chaque fraction granulométrique des stériles ; dans chaque cas, le coefficient a_c augmente avec l'augmentation du D_{10} (figure 5.15).

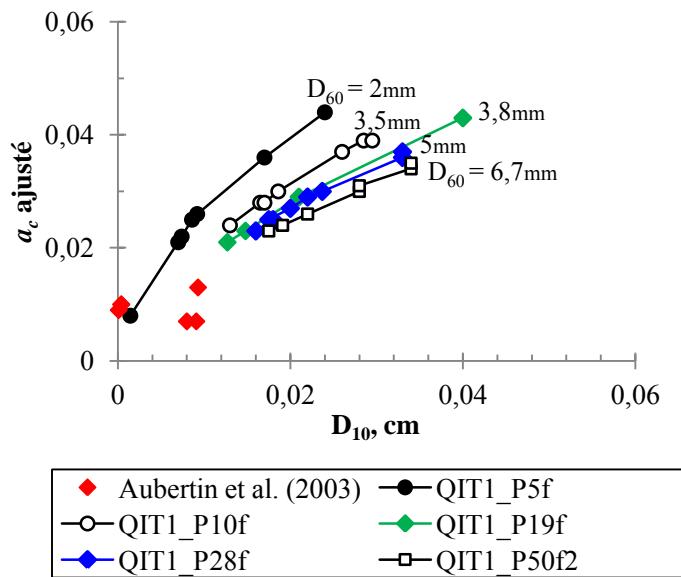


Figure 5.15 : Valeurs du coefficient a_c ajusté sur les CRE en fonction du D_{10} des échantillons de roches stériles.

La figure 5.15 suggère que le coefficient a_c est affecté par le D_{10} et le D_{60} des matériaux. La figure 5.16 montre qu'il y aurait un lien entre le coefficient d'uniformité C_U des stériles ($=D_{60}/D_{10}$) et la valeur du coefficient a_c . Toutefois, les points qui correspondent aux matériaux utilisés initialement pour développer le modèle MK (Aubertin et al., 2003) sont à l'écart et divergent de la tendance observée pour les stériles. On n'a pas non plus trouvé de lien apparent entre la valeur du coefficient a_c et la surface spécifique globale S_s des stériles (figure 5.17). On note néanmoins que le coefficient a_c semble diminuer avec une augmentation de la surface spécifique S_s des matériaux.

À la lumière de ces résultats, il serait hasardeux de définir le coefficient a_c en fonction des propriétés de base (D_{10} , D_{60}) de ces matériaux. Un ajustement selon deux autres paramètres variables, soit l'angle de mouillage β et la remontée capillaire h_{co} , est considéré afin d'améliorer les prédictions du modèle MK pour les stériles miniers dans les prochaines sections.

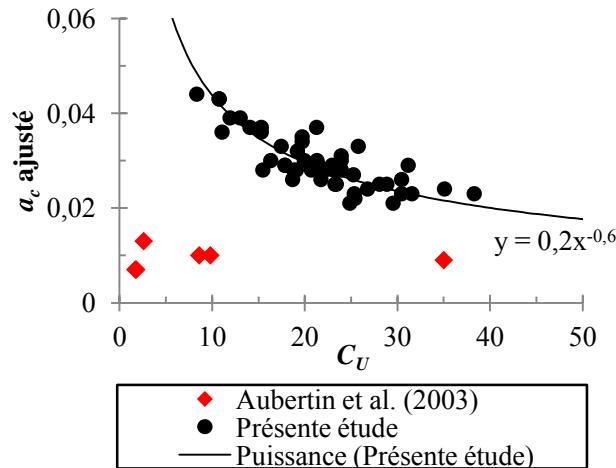


Figure 5.16 : Valeur du coefficient a_c (ajusté sur les CRE) en fonction du C_U des stériles pour toutes les courbes granulométriques disponibles.

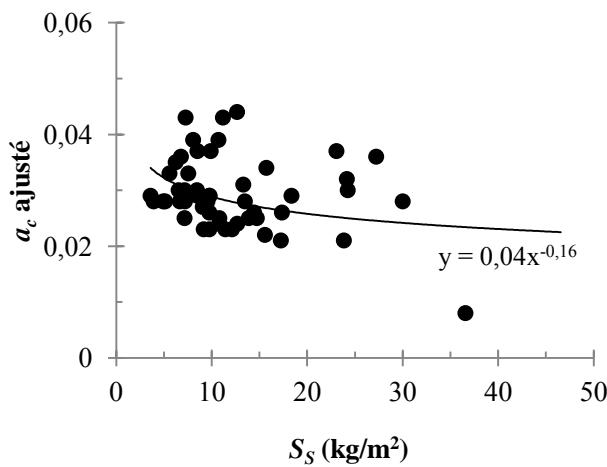


Figure 5.17 : Valeur du coefficient a_c (ajusté sur les CRE) en fonction de la surface spécifique S_s des stériles (calculée selon Chapuis et Légaré, 1992) pour toutes les courbes granulométriques disponibles.

Effet d'angle de mouillage β

L'angle entre la surface du ménisque d'un liquide et la surface solide représente l'angle de contact, ou l'angle de mouillage β (Delage et Cui, 2000). Cet angle de mouillage ($\beta \approx 0$ pour de l'eau sur du verre ou du quartz en drainage) a un effet direct sur les propriétés hydriques non saturées des matériaux. Ainsi, la remontée capillaire h_{co} (et la valeur du AEV) dépend de cet angle de mouillage du solide ; h_{co} diminue dans un milieu hydrophobe dont l'angle de contact est relativement plus élevé. Cette influence peut être prise en compte dans le modèle MK qui utilise l'angle de contact β dans le calcul de la remontée capillaire équivalente h_{co} (équation 2.16). Dans la plupart des cas, quand le modèle MK est appliqué aux sols et aux rejets miniers, on considère que l'angle de mouillage β est nul en drainage ($\cos \beta = 1$) ; il serait de l'ordre de 60° en mouillage (Maqsoud et al., 2006). En règle générale, les rejets miniers sont constitués en grande partie de silicates avec des teneurs moindres en oxydes et sulfures. Ils représentent un milieu relativement hydrophile et l'utilisation de $\beta = 0$ (en drainage) peut être considérée comme une simplification acceptable.

Les stériles de la mine Tio contiennent toutefois des quantités importantes d'hémo-ilménite, FeTiO₃, soit jusqu'à 40-60% (tableau 4.3). Les oxydes sont habituellement considérés comme des matériaux relativement peu hydrophiles ou légèrement hydrophobes (Youtsumoto 2006). Des études récentes montrent aussi que l'hydroxylation de la surface des oxydes peut augmenter considérablement leur hydrophobie (Drzymala, 1994; Gentleman et Ruud, 2009). Il est donc possible que, suite à un contact prolongé avec l'air et/ou l'eau, l'hydrophobie et l'angle de contact β de l'ilménite, présente dans les stériles, deviennent plus grandes qu'admis généralement, c'est-à-dire plus grand que 14° (Drzymala, 1994).

Il n'est toutefois pas simple de déterminer la valeur de l'angle de contact β représentatif de la roche stérile, à inclure dans le modèle MK. Lorsque la surface d'un solide est composée de deux matériaux différents, l'angle de contact β moyen obéirait à la relation suivante (Cassie et Baxter, 1944) :

$$\cos(\beta) = s_1 \cos(\beta_1) + s_2 \cos(\beta_2), \text{ avec } s_1 + s_2 = 1 \quad (5.4)$$

- où β – angle de contact moyen du solide [°]
 β_1 et β_2 – angles de contact pour les matériaux 1 et 2 qui composent le solide [°]
 s_1 et s_2 – fractions des surfaces des matériaux 1 et 2 qui composent le solide

L'angle de contact des stériles de la mine Tio peut varier localement, dépendamment de leur composition minéralogique (rapport entre les silicates et l'hémo-ilménite) et le degré d'hydroxylation de l'hémo-ilménite.

Pour évaluer l'effet de l'angle de mouillage sur la courbe de rétention d'eau prédictive selon le modèle MK, on a fait varier la valeur de β de 0 à 70° ; les résultats sont montrés à la figure 5.18.

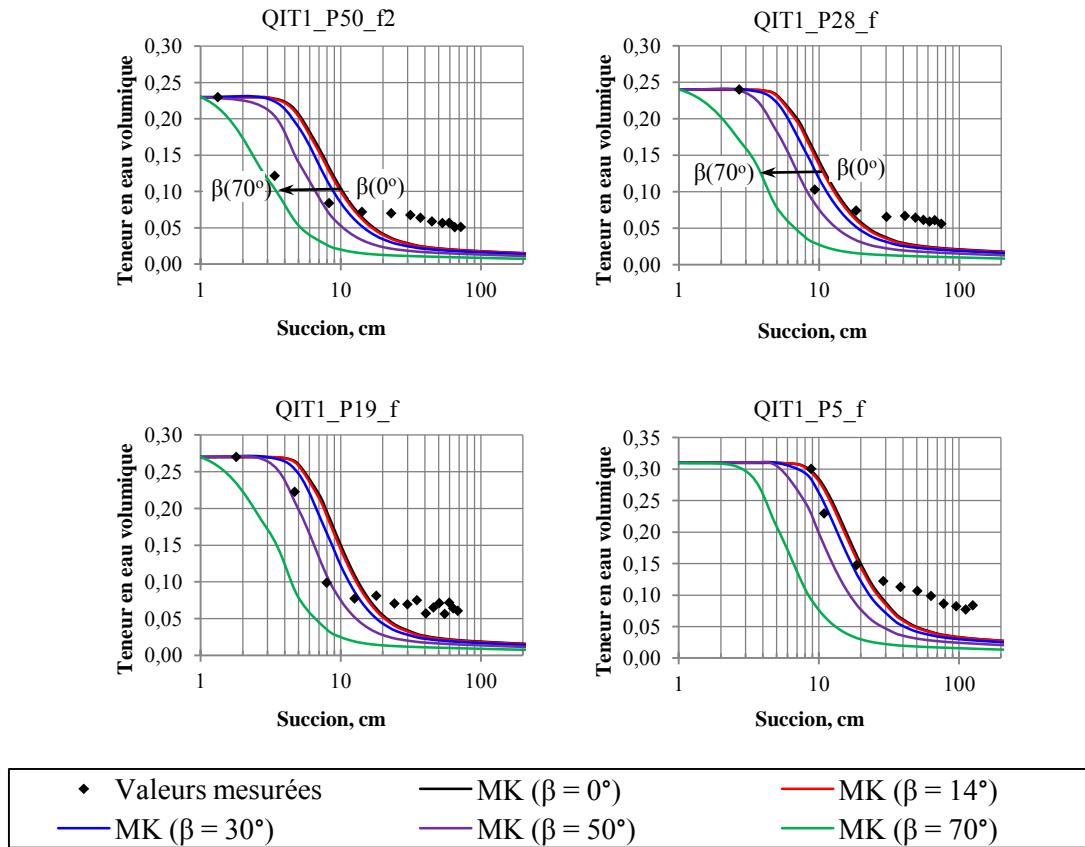


Figure 5.18 : Effet d'angle de mouillage β sur l'allure des CRE prédictes avec le modèle MK; on montre aussi les valeurs mesurées au laboratoire (en drainage).

À la figure 5.18, on peut voir que l'angle de mouillage β n'affecte pas beaucoup la valeur de la teneur en eau résiduelle θ_r prédictée avec le modèle MK. Une augmentation de l'angle de mouillage de 0 à 70° diminue légèrement la valeur de θ_r , ce qui nous éloigne d'avantage des résultats expérimentaux. On voit aussi que l'angle β affecte d'une façon marquée la valeur du AEV

(suction d'entrée d'air ψ_a), en déplaçant toute la courbe de rétention d'eau vers des succions plus faibles (figure 5.18). On peut remarquer que les points expérimentaux se situent entre les courbes de rétention prédictes avec les valeurs de β de 30° à 50° . Ceci pourrait signifier que l'angle de mouillage des stériles de la mine Tio est assez différent de zéro. Mais cela ne nous aide pas à régler le problème des écarts entre les données expérimentales et les valeurs prédictes de θ_r .

5.5.2 Modification du diamètre équivalent D_H

Dans le modèle MK classique, la valeur de D_H est calculée selon celle du D_{10} et du coefficient d'uniformité C_U (qui représente le rapport de D_{60} sur D_{10} de la courbe granulométrique; équation 2.1). Ainsi, les caractéristiques de la fraction la plus « fine » de la courbe granulométrique, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à D_{10} de l'échantillon, ne sont pas directement prises en compte. Ceci convient bien aux matériaux relativement uniformes, mais les stériles miniers comportent une longue queue des particules fines avec une granulométrie très étalée. Cela affecte la surface spécifique des stériles. Il est possible d'évaluer la surface spécifique (et le D_H) en considérant toute la courbe granulométrique, selon la méthode proposée par Chapuis et Légaré (1992) (équation 2.9). La figure 5.19a montre que les valeurs de la surface spécifique S_s obtenues selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992) sont plus élevées que celles obtenues du modèle MK pour les roches stériles. Il faut noter que cette différence est minimale pour les matériaux les plus grossiers, mais plus grande pour les matériaux qui montrent un grand étalement de la taille des particules fines. L'écart entre les résultats des deux méthodes devient maximal lorsque la fraction fine des échantillons est analysée selon la granulométrie au laser (figure 5.19b). Le diamètre équivalent des grains D_H calculé à partir de cette surface spécifique (équation 1.12 avec le facteur de la forme α égale à 6) est beaucoup plus petit que la valeur usuelle obtenue selon le modèle MK (équation 2.17).

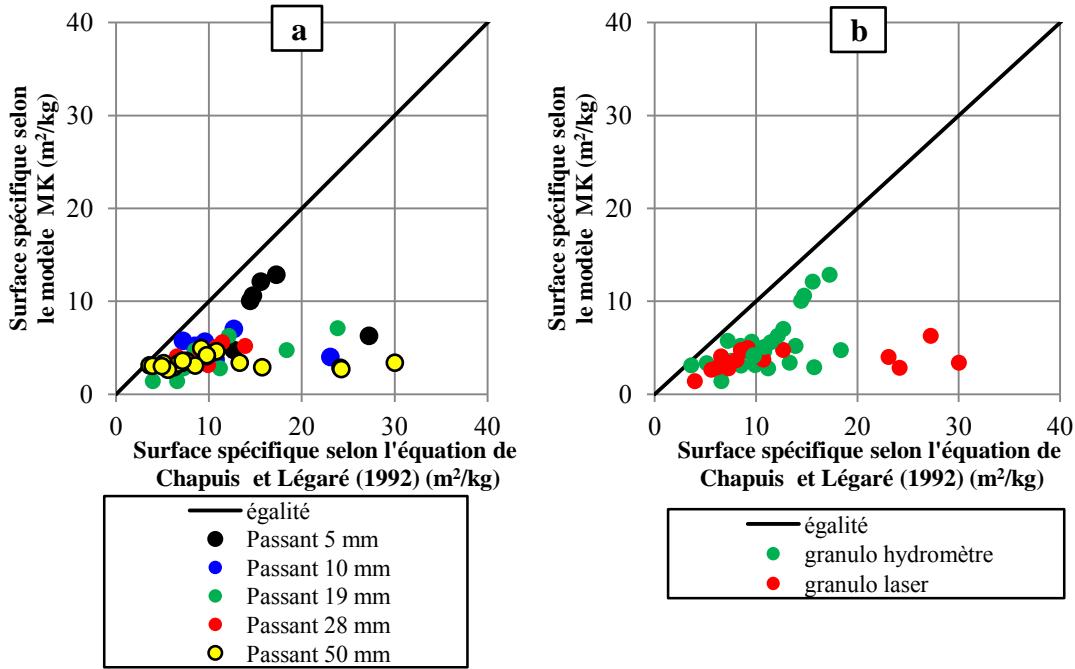


Figure 5.19 : Comparaison des valeurs de la surface spécifique calculées selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003), équation 2.12, et selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992), équation 2.9.

La différence entre les valeurs de D_H calculées selon ces deux méthodes est également apparente lorsque l'on considère le rapport de D_H sur D_{10} des stériles (figure 5.20). Cette figure est basée sur un diagramme de Kovács (1981) où le rapport de D_H sur D_{10} des matériaux est présenté en fonction du coefficient d'uniformité C_U . Après avoir analysé une grande quantité de valeurs mesurées pour différents types de matériaux, Kovács (1981) a proposé deux types d'approximation (linéaire et logarithmique) pour le rapport $\frac{D_H}{D_{10}}$ en fonction de C_U . Elles sont montrées à la figure 5.20. On voit sur cette figure que les valeurs calculées selon le modèle MK (équation 2.17, ligne droite sur la figure 5.20) se trouvent entre les deux courbes proposées par Kovács (1981). Les valeurs calculées selon la relation de Chapuis et Légaré (1992) (pour S_s) se trouvent à l'écart des approximations de Kovács (1981) et des prédictions du modèle MK (Aubertin et al., 2003). Il semble donc que l'étalement granulométrique des particules fines dans les stériles miniers réduit le diamètre équivalent des grains D_H , qui peut même devenir inférieur au D_{10} .

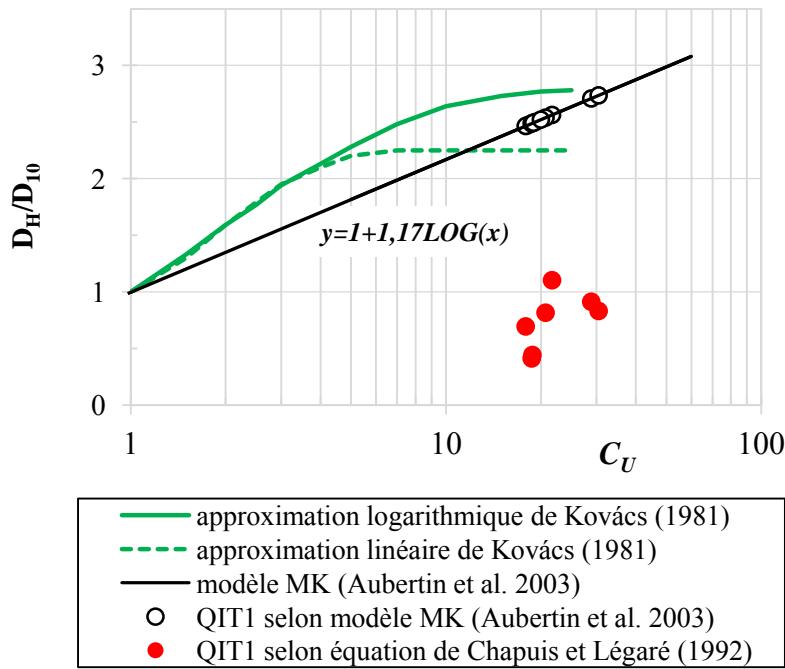


Figure 5.20 : Relations entre le rapport des diamètres caractéristiques (D_H/D_{10}) calculé selon différentes méthodes, et le coefficient d'uniformité C_U .

Nous proposons donc d'ajouter dans le modèle MK un coefficient qui corrigerait le diamètre équivalent D_H , selon la valeur découlant de la méthode de Chapuis et Légaré (1992). Selon cette approche, il n'y a pas de différence entre les valeurs prédites par le modèle MK et le modèle MK ajusté pour les stériles « MK_s » pour les matériaux relativement peu étalés. Pour les matériaux à granulométrie très étalée avec particules fines, comme les stériles QIT, le modèle MK intégrera les modifications proposées. Les modifications des équations du modèle MK influencent essentiellement la partie « résiduelle » de la courbe de rétention d'eau, c'est-à-dire les composantes qui représentent la saturation d'adhésion S_a .

Nous proposons d'utiliser l'équation suivante pour ajuster la valeur calculée de la remontée capillaire équivalente h_{co} pour la détermination de la saturation d'adhésion (équation 2.19) :

$$h_{co_adhésion} = h_{co} \times \frac{D_H}{D_{H_CL}} \quad (5.5)$$

où h_{co} – remontée capillaire calculée selon le modèle MK (équations 2.16 et 2.18) [cm]
 D_H – diamètre équivalent des grains calculé selon le modèle MK (équation 2.17) [cm]
 D_{H_CL} – diamètre équivalent calculé à partir de la surface spécifique selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992) (équations 2.9 et 2.12 avec $\alpha=6$) [cm]

Un ajustement est aussi requis pour la succion résiduelle ψ_r utilisée pour la détermination de la saturation d'adhésion S_a dans le modèle MK. On propose une équation basée sur l'équation 2.21 du modèle MK :

$$\psi_{r_ajusté} = \psi_r \times \left(\frac{D_H}{D_{H_CL}} \right)^{1,26} \quad (5.6)$$

où ψ_r – succion résiduelle calculée selon le modèle MK (équation 2.21) [cm]
 D_H – diamètre équivalent des grains calculé selon le modèle MK (équation 2.17) [cm]
 D_{H_CL} – diamètre équivalent calculé à partir de la surface spécifique de Chapuis et Légaré (1992) (équations 2.9 et 2.12 avec $\alpha=6$) [cm]

En ce qui concerne le calcul de la saturation capillaire S_c du modèle MK, il n'y a pas de changement à l'équation d'origine pour la détermination de D_H , c'est-à-dire équation 2.17 basée sur le D_{10} et D_{60} des matériaux, car on considère ici que la partie plus saturée de la courbe de rétention d'eau serait contrôlée principalement par la fraction plus grossière des matériaux.

5.5.3 Application du modèle MK_s

Des courbes de rétention d'eau (CRE) obtenues à l'aide du modèle MK_s avec les modifications proposées dans la présente étude, sont montrées à la figure 5.21. Cette figure présente une série de CRE construites pour les stériles sur la base des courbes granulométriques disponibles, incluant les courbes granulométriques obtenues au laser et à l'hydromètre. Ainsi, on peut parler d'un fuseau de courbes granulométriques et de CRE prédictes pour chaque matériau. On peut constater que, suite aux modifications apportées au modèle MK, les points expérimentaux se trouvent à l'intérieur des fuseaux des CRE prédictes.

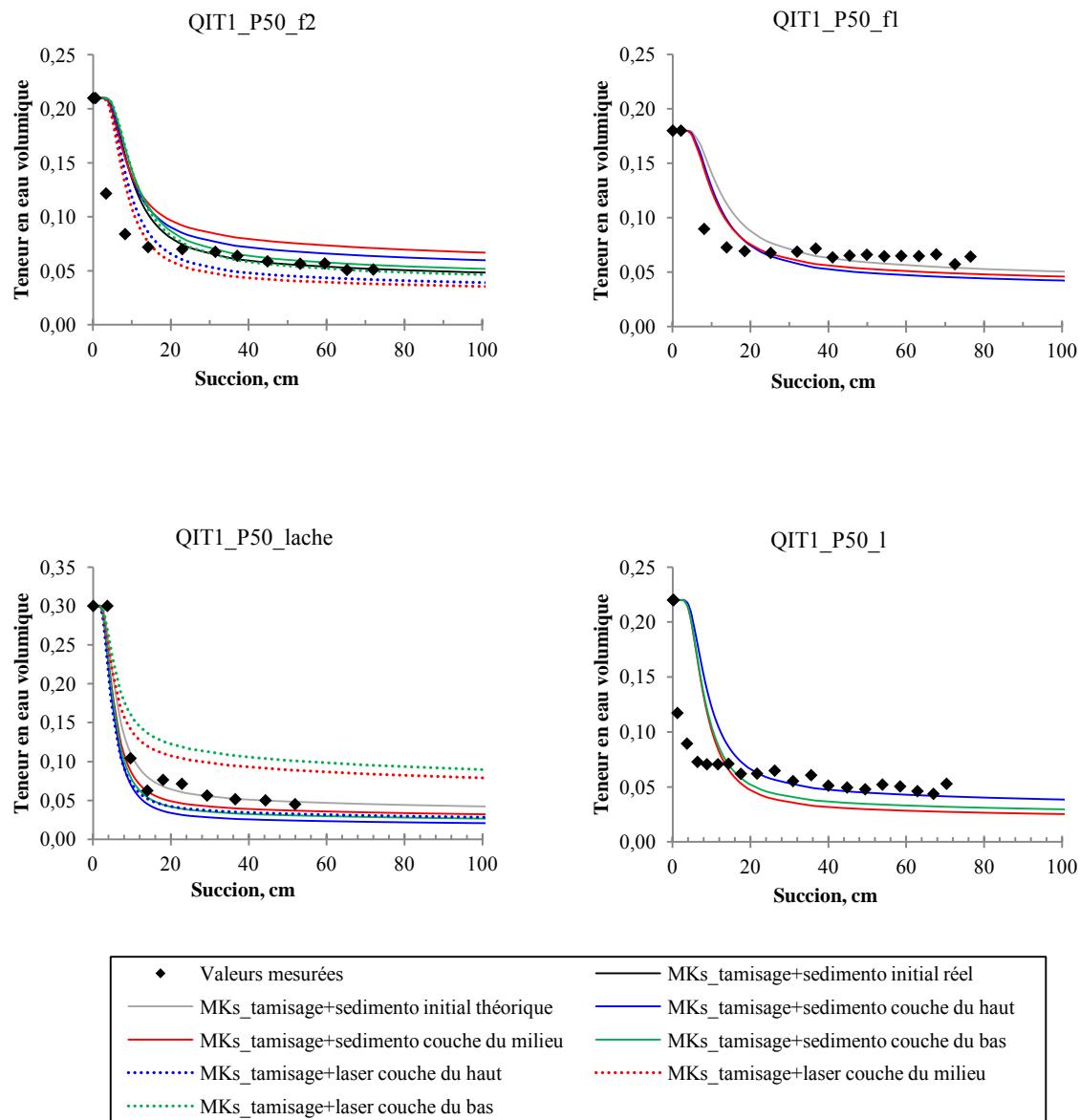


Figure 5.21 (début) : Courbes de rétention d'eau des stériles de la mine Tio obtenues avec le modèle MK_s selon les courbes granulométriques disponibles pour chaque échantillon ; les CRE identifiées comme «MK_s_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre ; les CRE identifiées comme «MK_s_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et au laser.

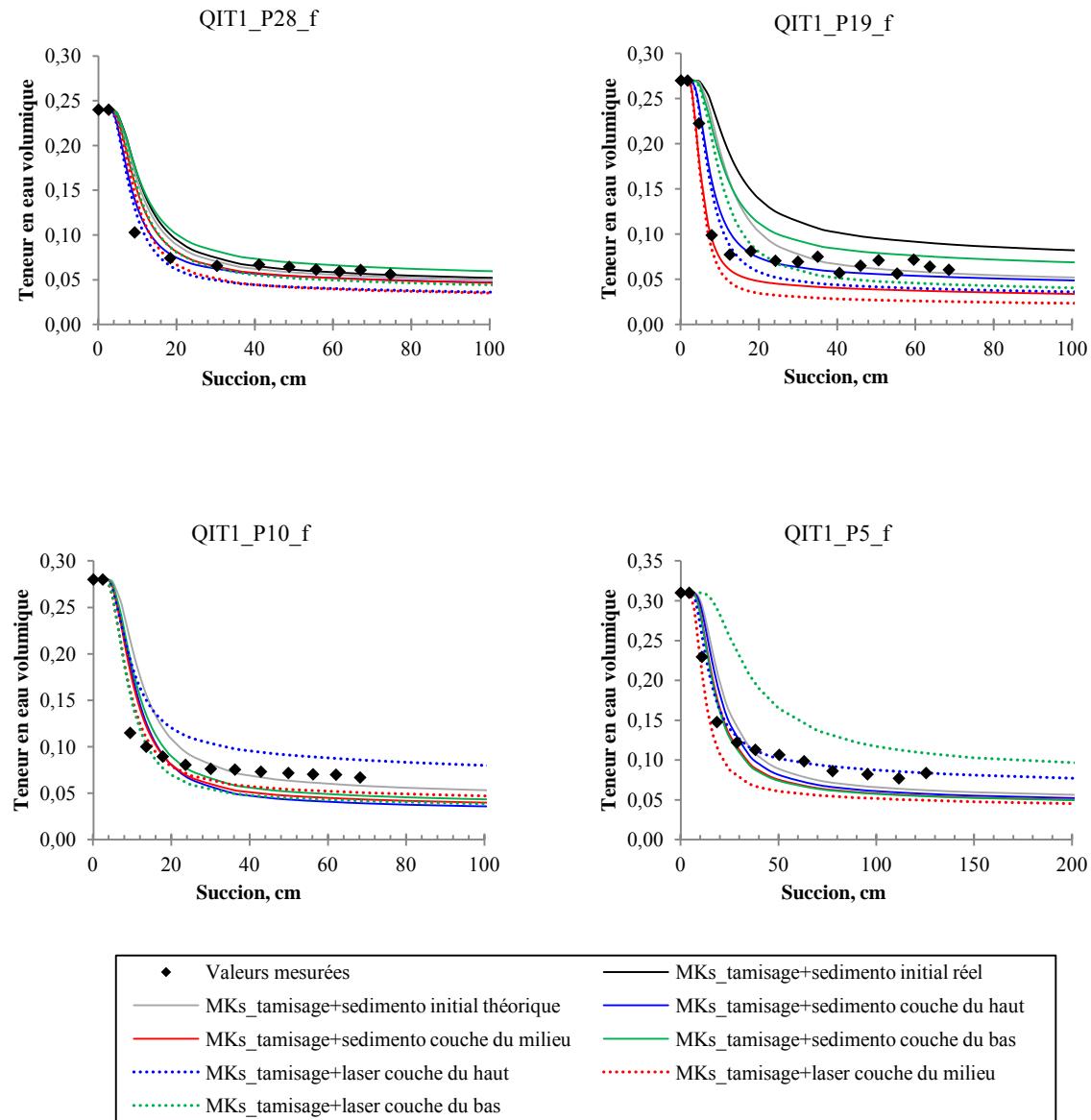


Figure 5.21 (suite et fin) : Courbes de rétention d'eau des stériles de la mine Tio obtenues avec le modèle MK_s selon les courbes granulométriques disponibles pour chaque échantillon ; les CRE identifiées comme «MK_s_tamisage+sedimento» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et à l'hydromètre ; les CRE identifiées comme «MK_s_tamisage+laser» sont déduites à partir des données granulométriques obtenues à l'aide des analyses par tamisage et au laser.

Les modifications proposées ne sont effectives que si l'on utilise la courbe granulométrique complète des matériaux pour le calcul de la surface spécifique S_s et du diamètre équivalent des grains D_H (selon la méthode de Chapuis et Légaré, 1992). Il faut donc déterminer la distribution granulométrique de la fraction fine des matériaux ($< 80 \mu\text{m}$), que l'on peut obtenir de l'analyse à l'hydromètre ou par la granulométrie laser. Il n'est cependant pas rare que cette partie de la courbe granulométrique ne soit pas disponible dans le cas des stériles miniers. La figure 5.22 montre des courbes de rétention d'eau des stériles prédictes selon le modèle MK_s en utilisant les courbes granulométriques représentatives pour chaque échantillon, mais limitée à la fraction granulométrique plus grande que $80 \mu\text{m}$ (les principaux paramètres des courbes granulométriques représentatives des échantillons sont donnés dans le tableau 4.2). On constate ici que les CRE prédictes selon le modèle MK_s avec la granulométrie tronquée (pour la partie fine) sont identiques aux CRE prédictes à partir du D_{10} et du D_{60} des stériles (voir figure 5.22). La teneur en eau résiduelle prédicta est alors significativement sous-estimée par rapport aux données expérimentales. Les prédictions du modèle MK_s basées sur les courbes granulométriques complètes montrent un bon accord avec les valeurs expérimentales.

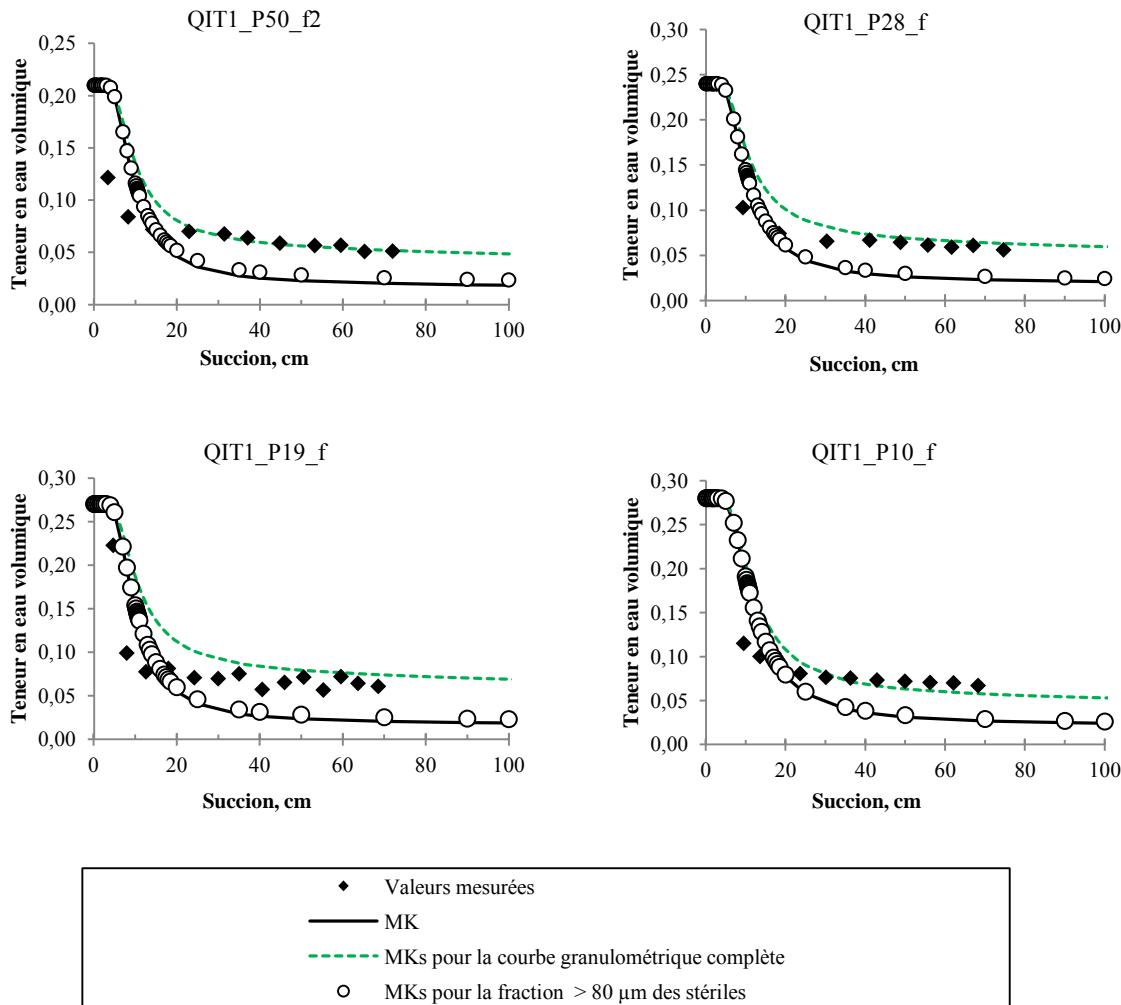


Figure 5.22 : Comparaison des courbes de rétention d'eau des stériles de la mine Tio prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et le modèle MK_s pour des distributions granulométriques complètes et tronquées à 80 µm.

5.5.4 Application du modèle MK_s à d'autres matériaux

Dans cette section, nous allons utiliser des données tirées de la littérature afin d'évaluer si les modifications au modèle MK, proposées plus haut, fonctionnent aussi pour d'autres matériaux à granulométrie étalée. En particulier, nous allons appliquer le modèle MK_s aux stériles de la mine Laronde et au gravier Mirabel, caractérisés en laboratoire par Hernandez (2007).

Stériles de la mine Laronde

Les échantillons de roches stériles de la mine Laronde étudiés par Hernandez (2007) sont des matériaux à granulométrie très étalée, assez similaires aux stériles de la mine Tio. Trois fractions granulométriques de ces stériles ont été testées en laboratoire: les fractions passant aux tamis 56 mm, 28 mm et 20 mm (LARON-56, -28, -20) (Hernandez, 2007). La fraction fine des stériles ($< 80 \mu\text{m}$) représente environ 10% de leur masse sur la courbe granulométrique. La figure 5.23 montre les courbes granulométriques des échantillons de stériles testés au laboratoire. Les paramètres de base ainsi que les valeurs de la surface spécifique (S_s) calculées selon les deux méthodes présentées (c.-à.-d. la méthode de Chapuis et Légaré (1992) et la méthode de Aubertin et al., 2003), sont données dans le tableau 5.12. La figure 5.24 montre les courbes de rétention d'eau des stériles Laronde mesurées et celles prédites avec le modèle MK et le modèle MK_s (avec les modifications proposées dans la présente étude). Ces prédictions ont été obtenues en utilisant toute la courbe granulométrique des stériles incluant les données sur la fraction fine ($< 80 \mu\text{m}$) obtenues à l'aide de l'analyse à l'hydromètre.

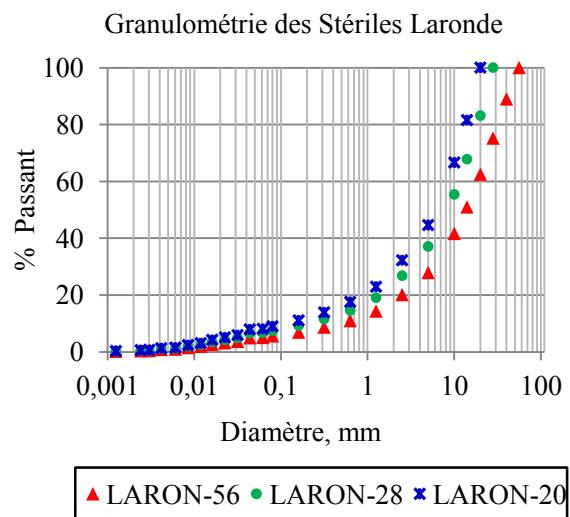


Figure 5.23 : Granulométrie des échantillons de roches stériles de la mine Laronde caractérisés au laboratoire par Hernandez (2007).

Tableau 5.12 : Propriétés de base des échantillons de roches stériles de la mine Laronde (Hernandez, 2007).

Matériaux	n	D_r	D_{10}	D_{60}	C_U	S_s MK*	S_s **	D_H MK*	$D_{H_CL}^{**}$
	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[-]	[m ² /kg]	[m ² /kg]	[cm]	[cm]
LARON-56	0,31	2,84	0,048	0,187	39,3	2,59	19,76	0,136	0,011
LARON-28	0,30	2,84	0,021	0,114	55,4	5,66	26,25	0,062	0,008
LARON-20	0,33	2,84	0,012	0,815	70,9	9,69	31,57	0,036	0,007

* - valeurs calculées selon la méthode de Aubertin et al. (2003)

** - valeurs calculées selon l'équation de Chapuis et Légaré (1992)

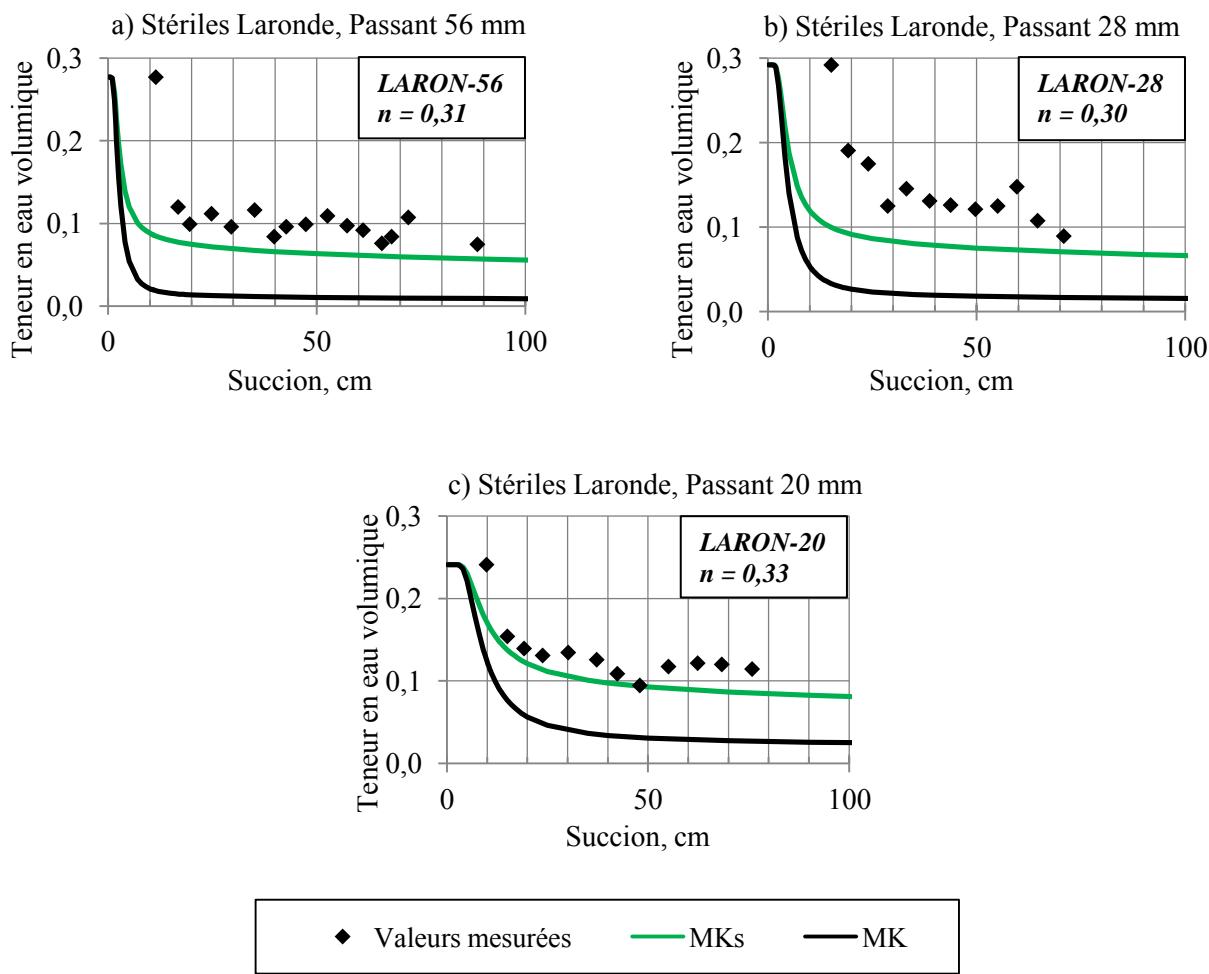


Figure 5.24 : Données expérimentales (Hernandez, 2007) et CRE prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et le modèle MK_s (présente étude) pour différentes fractions granulométriques des roches stériles de la mine Laronde.

On peut voir que dans le cas des stériles de la mine Laronde, les modifications proposées au modèle MK améliorent l'accord entre les courbes de rétention d'eau prédictes et les données expérimentales pour la partie résiduelle correspondant à θ_r . On note cependant un écart entre les valeurs du AEV prédictes par les deux modèles (MK et MK_s) et les données expérimentales; la valeur prédictée de θ_r semble aussi un peu sous-estimée.

Gravier Mirabel

Le gravier Mirabel est un sol naturel grossier caractérisé par un large étalement granulométrique ($20 < C_U < 55$). Ce matériau est aussi utilisé pour évaluer les modifications proposées au modèle MK. Deux fractions granulométriques du gravier Mirabel ont été étudiées par Hernandez (2007) : diamètre < 10 mm (GMP3) et le sol complet (GMT3). Les courbes granulométriques des échantillons testés sont montrées à la figure 5.25. Les principaux paramètres granulométriques ainsi que les résultats de calculs de la surface spécifique S_s et du diamètre équivalent D_H des grains selon les modèles MK et MK_s sont donnés dans le tableau 5.13.

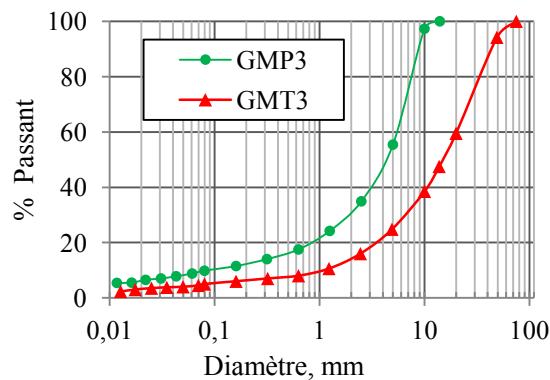


Figure 5.25 : Granulométrie des échantillons du gravier Mirabel (Hernandez, 2007).

Tableau 5.13 : Propriétés de base des échantillons du gravier Mirabel (Hernandez, 2007).

Matériaux	n [-]	D_r [-]	D_{10} [cm]	D_{60} [cm]	C_U [-]	S_s MK* [m ² /kg]	S_s ** [m ² /kg]	D_H MK* [cm]	D_{H_CL} ** [cm]
GMP3	0,24	2,79	0,01	0,55	55	11,8	22,47	0,03	0,0096
GMT3	0,30	2,79	0,1	2,01	20,1	1,4	10,17	0,25	0,0212

* - valeurs calculées selon la méthode d'Aubertin et al. (2003)

** - valeurs calculées selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992)

On peut voir au tableau 5.13 que le diamètre équivalent des grains D_H des échantillons de gravier Mirabel calculé selon la valeur de S_s basée sur l'équation de Chapuis et Légaré (1992) est jusqu'à un ordre de grandeur plus petit que celle du D_H calculée selon le modèle MK (équation 2.17). La comparaison avec les courbes de rétention d'eau du gravier Mirabel mesurées en laboratoire montre que l'introduction de la valeur corrigée du D_H dans le modèle MK_s permet d'obtenir de meilleures prédictions de la CRE, bien que la valeur de θ_r semble encore un peu sous-estimée (figure 5.26).

Ces résultats indiquent donc que le modèle ajusté MK_s serait plus approprié pour prédire la CRE des matériaux grossiers à granulométrie très étalée.

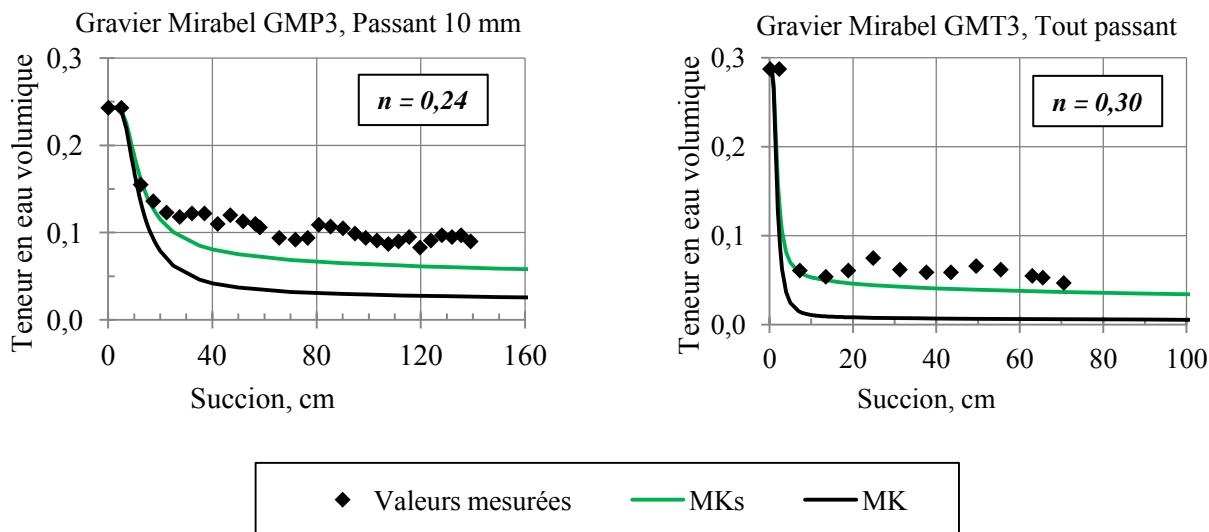


Figure 5.26 : Valeurs expérimentales (Hernandez, 2007) et CRE prédites selon le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et MK_s (présente étude) pour les échantillons de gravier Mirabel.

5.6 Courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité d'un milieu à double porosité

Comme discuté dans la revue de littérature (chapitre 2), la conductivité hydraulique et la courbe de rétention d'eau sont principalement contrôlées par la répartition de la taille des pores dans les matériaux. Par conséquent, la présence des macropores dans les stériles miniers devrait influencer leurs propriétés hydriques. Dans cette section, nous analysons comment la structure interne des stériles (particulièrement la présence des macropores), peut affecter la courbe de rétention d'eau. Nous présenterons aussi les résultats de l'analyse de la fonction de perméabilité des stériles obtenus à l'aide de code RETC pour certains de nos essais en colonnes. Lors de cette analyse, la présence des macropores dans la matrice poreuse des roches stériles nous a amené à traiter ces matériaux comme un milieu à double porosité.

CRE de la fraction < 50 mm

Comme on l'a vu au chapitre 3, deux essais sur la fraction passant 50 mm des stériles ont été effectués dans la colonne QIT1_P50_f1 et la colonne QIT1_P50_f2. La différence entre les deux échantillons dans ces colonnes est dans leur degré de compactage ; le matériau dans la colonne QIT1_P50_f1 a été plus compacté que celui de la colonne QIT1_P50_f2 (les valeurs de la porosité moyenne n sont égales respectivement à 0,18 et 0,21 - tableau 4.5, figure 4.5 a et b). Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) mesurées dans ces deux colonnes sont également différentes, soit $4,3 \times 10^{-2}$ cm/s pour le matériau plus dense (QIT1_P50_f1) et 1×10^{-1} cm/s pour le matériau plus lâche (QIT1_P50_f2). Nous pouvons postuler que le stérile de la colonne QIT1_P50_f2, qui montre une plus grande porosité et un k_{sat} plus élevé, contient plus de macropores en comparaison avec la colonne QIT1_P50_f1. Afin d'illustrer l'impact d'un milieu à double porosité, on adopte ici l'hypothèse que le matériau « compacté » dans la colonne QIT1_P50_f1 représente la matrice de la roche stérile. Le matériau plus « lâche » QIT1_P50_f2 représente des stériles avec une structure interne affectée par la présence d'une macroporosité importante. Les figures 5.27 a et b présentent les courbes de rétention d'eau pour ces deux matériaux, lissées à l'aide du logiciel RETC (modèle de van Genuchten, 1980).

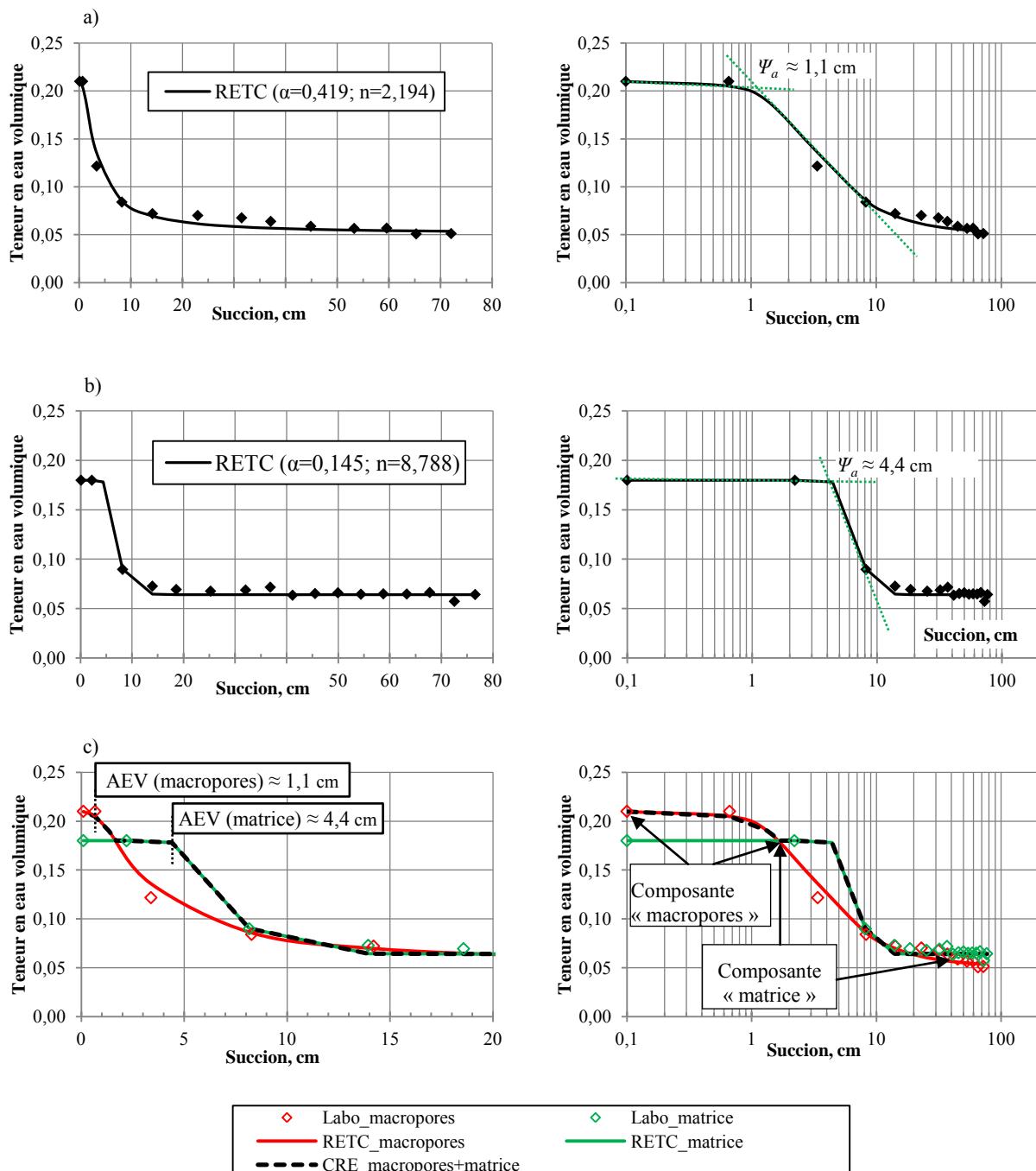


Figure 5.27 : Courbes de rétention d'eau lissées avec RETC (van Genuchten et al., 1991) selon les résultats des essais en colonne sur la fraction passant 50 mm des stériles de la mine Tio (à gauche – en échelle arithmétique, à droite – en échelle logarithmique) : a) QIT1_P50_f2 (lâche, avec macropores); b) QIT1_P50_f1 (dense, matrice sans effet des macropores); c) QIT1_P50 (combinaison macropores+matrice).

Les données d'entrée issues des essais en colonnes, ainsi que les paramètres ajustés à l'aide du code RETC (van Genuchten et al., 1991) sont présentées dans le tableau 5.14.

Tableau 5.14 : Données d'entrée et paramètres ajustés avec le code RETC pour la CRE et la fonction de perméabilité.

Paramètre	Origine	QIT1_P50_f1 matrice	QIT1_P50_f2 macropores
k_{sat} , cm/s	Essai en colonne	0,043	0,100
Paramètre α^* , cm ⁻¹	Lissage RETC	0,145	0,419
Paramètre n^*	Lissage RETC	8,788	2,194
θ_s (= porosité n)	Essai en colonne	0,18	0,21
θ_r	Essai en colonne	0,06	0,05
AEV (ψ_a)*, cm	Essai en colonne	4,4	1,1
AEV ($\psi_a \approx 1/\alpha$)*, cm	Lissage RETC	6,9	2,4
AEV (ψ_a), cm	Lissage RETC/graphique**	$\approx 4,4$	$\approx 1,1$
Succion résiduelle (ψ_r), cm	Lissage RETC/graphique**	≈ 10	≈ 12

* voir section 2.2.3 pour les définitions

** valeurs obtenues par la méthode graphique de l'intersection des lignes sur les CRE lissées

On observe que la succion d'entrée d'air (ψ_a) est plus élevée pour les stériles QIT1_P50_f1 représentant la matrice seule ($\psi_a \approx 4,4$ cm). Les stériles plus «lâches» QIT1_P50_f2, qui selon notre hypothèse représentent un système avec macropores, sont caractérisés par une valeur d'entrée d'air plus faible ($\psi_a \approx 1,1$ cm). Ceci reflète le fait que les macropores se vident plus facilement sous l'effet d'une petite succion en comparaison avec les pores plus petits de la matrice des stériles. La présence de ces deux systèmes de pores, aux caractéristiques assez différentes, nous permet de traiter le matériau comme un milieu à double porosité (bien que les différences soient relativement faibles pour le AEV, le k_{sat} et les autres paramètres hydriques).

La figure 5.27c montre la courbe de rétention d'eau pour le milieu à double porosité construite selon une combinaison des CRE qui représentent la matrice (plus dense) et les stériles lâches (avec macropores). La combinaison de deux courbes de rétention d'eau afin de créer une CRE globale pour un matériau structuré (de nature bimodale) a été utilisée par Ross et Smettem (1993), Durner (1994) et d'autres. Selon la CRE ainsi composée, l'application d'une faible succion vide d'abord les macropores présents dans la roche stérile (qui sont aussi les plus conductrices). On atteint alors la teneur en eau volumique (θ) correspondant à la teneur en eau

saturée de la matrice plus dense de la roche stérile. La désaturation des stériles va se poursuivre lorsque la charge de succion appliquée atteint la valeur d'entrée d'air de cette matrice, soit environ 4,4 cm. Ensuite, la courbe de rétention d'eau correspond à celle de la matrice de la roche stérile jusqu'à la teneur en eau résiduelle θ_r .

Conductivité hydraulique non-saturée

Le code RETC permet d'estimer la conductivité hydraulique non saturée des matériaux à partir de la courbe de rétention d'eau (voir section 2.2.4). Les fonctions de perméabilité pour les deux échantillons de stériles passant 50 mm, «lâche» et «dense», sont montrées à la figure 5.28. La fonction combinée de perméabilité pour un milieu à double porosité est montrée à la figure 5.29.

On peut voir que la présence des macropores a une influence assez significative sur la conductivité hydraulique des stériles en conditions saturées et non-saturées (surtout à faible succion). La comparaison de la fonction de perméabilité des stériles plus dense avec celle des stériles plus lâches montre que la présence de macropores engendre une conductivité hydraulique qui décroît plus rapidement à l'application d'une faible succion. Dès que les macropores se vident, ils ne peuvent plus servir de voies d'écoulement, et la conductivité hydraulique des stériles diminue par un facteur de deux environ (figure 5.29b).

Des travaux plus élaborés sur les milieux à double porosité (ou à double perméabilité) ont été menés par Gerke et van Genuchten (1993,1996), Durner (1994), Brouyère (2006) et d'autres. Cet aspect du comportement des stériles miniers devrait être étudié plus en détails dans les travaux à venir.

Ce type de résultats, incluant les paramètres de la courbe de rétention d'eau et de la fonction de perméabilité des stériles, peut être utilisé pour simuler numériquement l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles.

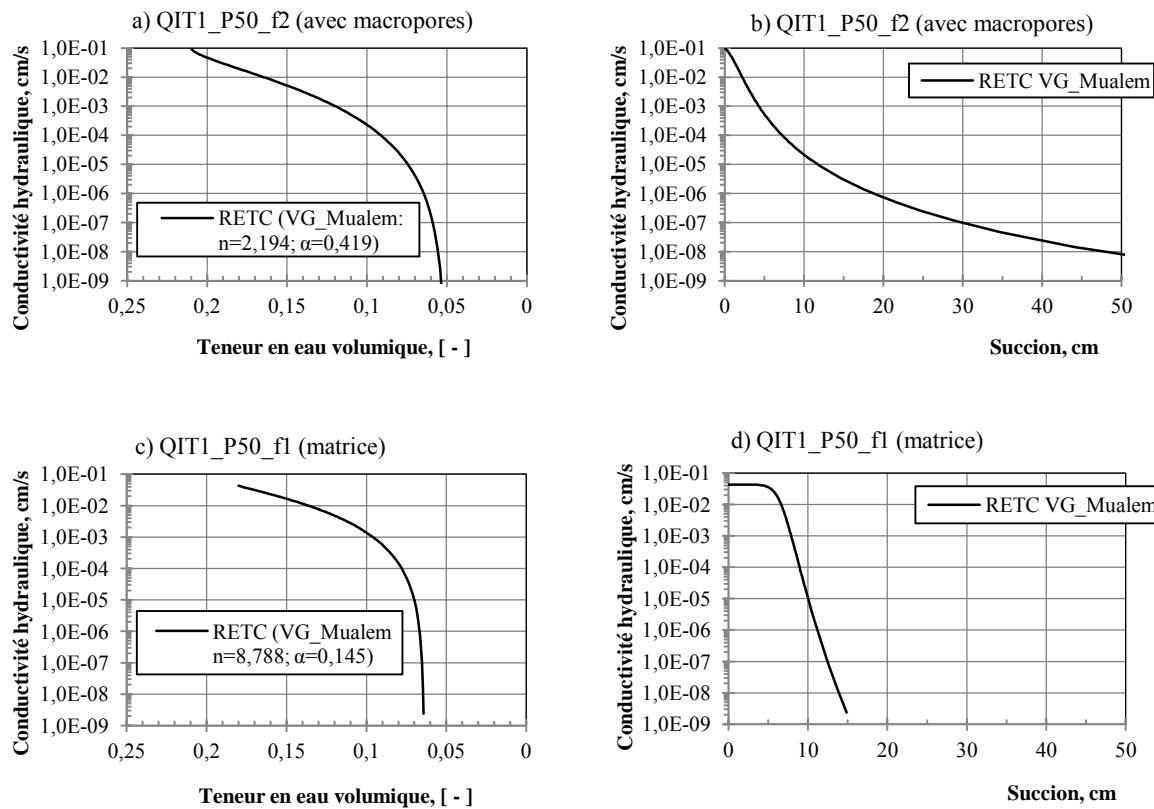


Figure 5.28 : Fonction de perméabilité des stériles QIT selon les résultats des essais en colonne sur la fraction passant 50 mm : en fonction de la teneur en eau volumique à gauche; en fonction de la succion à droite.

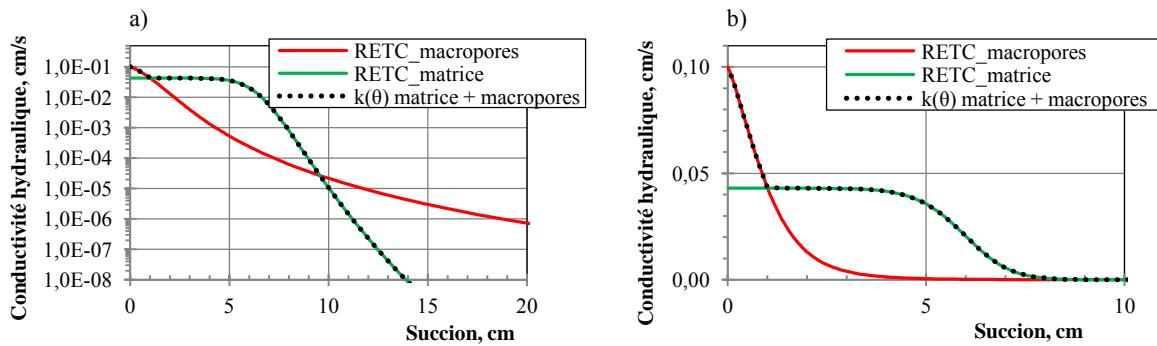


Figure 5.29 : Fonction de perméabilité pour un milieu à double porosité sur la base des essais sur la fraction passant 50 mm des stériles QIT : a) échelle semi-log; b) échelle arithmétique.

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les grandes quantités de stériles miniers générées annuellement par l'industrie minière représentent des risques pour l'environnement. Le stockage des roches stériles dans les haldes peut conduire à de graves problèmes causés par le drainage minier acide (DMA) ou le drainage neutre contaminé (DNC). Des problèmes de stabilité des haldes, en raison de la taille de ces ouvrages et de leur structure interne, sont également assez fréquents et demandent une attention spéciale. Par conséquent, des études systématiques sur les stériles miniers sont nécessaires afin d'élaborer des méthodes de stockage écologiques et sécuritaires.

Le projet de recherche présenté dans ce mémoire avait pour objectif d'étudier les principales caractéristiques hydrogéologiques de stériles miniers à partir d'une approche expérimentale à l'échelle intermédiaire en laboratoire. Le but spécifique du projet visait la détermination de la conductivité hydraulique saturée des échantillons de roches stériles et de leur courbe de rétention d'eau. On a aussi évalué l'effet du déplacement des particules fines lors de l'écoulement de l'eau à travers les stériles sur leurs propriétés hydriques. Finalement, on a utilisé les données expérimentales afin de modifier des modèles prédictifs existants pour estimer les propriétés hydrogéologiques des stériles à partir de leurs propriétés de base.

Les essais de laboratoire ont été réalisés sur les échantillons prélevés sur une halde à stériles de la mine du Lac Tio (RTFT, Havre-Saint-Pierre, Québec). Les propriétés hydrogéologiques de ces stériles ont été déterminées à l'aide d'essais de perméabilité, de traceur, d'infiltration et de rétention d'eau dans de grandes colonnes instrumentées. Ces essais ont été menés sur des fractions granulométriques tronquées (où la taille maximale des particules était contrôlée). Le travail de laboratoire a débuté par une caractérisation des propriétés physiques de base des matériaux. Les paramètres étudiés comprenaient la courbe granulométrique, la densité relative des grains et la porosité du matériau à l'intérieur des colonnes.

Selon le système unifié (ou ASTM) de classification des sols, les échantillons des stériles testés (diamètre ≤ 50 mm) dans la présente étude correspondent à un sable bien étalé (SW) avec diverses proportions de particules fines, de gravier et de cailloux. Le coefficient d'uniformité C_U des échantillons varie entre 15 et 30, ce qui en fait des matériaux à granulométrie très étalée. Les résultats des diverses analyses ont aussi montré que les stériles sont des matériaux hétérogènes; les analyses ponctuelles sur des échantillons de petite taille peuvent ainsi donner des résultats

assez variables. Il est alors préférable de considérer leurs fuseaux granulométriques (plutôt que la courbe moyenne) afin de représenter les stériles de façon plus adéquate.

Les résultats des essais en colonne ont montré que la conductivité hydraulique saturée des stériles, mesurée en laboratoire à échelle intermédiaire, est peu influencée par la présence de différents pourcentages de graviers et de cailloux. La valeur de k_{sat} des stériles varie autour de 10^{-1} cm/s pour les diverses fractions granulométriques testées. La comparaison de ces résultats avec les modèles prédictifs a montré des écarts significatifs avec les valeurs prédites, à partir de modèles existants, qui sont beaucoup plus faibles que les valeurs expérimentales. Cette divergence pourrait être expliquée par le fait que la conductivité hydraulique saturée des stériles est principalement contrôlée par un système de macropores interconnectés qui représentent des voies d'écoulement préférentiel. La présence de telles voies d'écoulement préférentiel dans les stériles a été confirmé (en partie) par les résultats des essais de traceur et des essais d'infiltration.

Selon nos résultats, l'utilisation de la valeur du diamètre effective D_{10} comme taille représentative dans des modèles prédictifs ne serait pas appropriée pour les stériles qui contiennent une forte quantité de particules grossières et dont la conductivité hydraulique pourrait être liée à une macroporosité. La dimension de référence qui semble mieux refléter l'influence de la granulométrie sur la valeur de k_{sat} des stériles est le D_{50} . Deux équations prédictives qui utilisent le D_{50} des matériaux ont été considérées ici pour estimer la valeur de k_{sat} des stériles, soit l'équation de Shepherd (1989) et l'équation de Taylor (1948) (équations 5.1 et 5.2). Selon nos résultats, l'équation de Shepherd (1989) semble surtout valide pour les échantillons des stériles dont l'indice des vides e est plus grand que 0,28 ; elle prédit une valeur de k_{sat} des stériles dans la plage $0,7 < \frac{k_{sat} \text{ prédit}}{k_{sat} \text{ labo}} < 3$. L'équation prédictive de Taylor (1948) donne aussi des estimations de k_{sat} des stériles assez justes comparées aux valeurs de k_{sat} mesurées au laboratoire ($0,7 < \frac{k_{sat} \text{ prédit}}{k_{sat} \text{ labo}} < 2,8$); toutefois, les bons résultats obtenus avec cette dernière équation (éq. 5.2) requièrent un ajustement de la valeur du paramètre C_1 à partir des valeurs de k_{sat} mesurées dans la présente étude (i.e. $C_1 = 0,004$ pour k_{sat} en cm/s et D_{50} en cm).

Les essais en colonne ont montré également que le déplacement des particules fines dans la matrice de la roche stérile se produit surtout pour des conditions de gradient hydraulique $i \geq 2-3$. Les valeurs obtenues expérimentalement ont cependant démontré, qu'à l'échelle du laboratoire, la

conductivité hydraulique saturée des stériles n'est pas influencée significativement par la migration des particules.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont aussi montré que l'hypothèse de la présence de macropores dans la matrice poreuse des stériles aide à identifier de nouvelles pistes pour des travaux futurs ; en se sens, la roche stérile pourrait être traitée comme un milieu à double porosité (ou à double perméabilité). Dans les conditions saturées en eau, la conductivité hydraulique des stériles semble ainsi contrôlée par la macroporosité. Pour des conditions non saturées, la conductivité hydraulique décroît rapidement à l'application d'une faible succion ; dès que les macropores se vident, ils ne peuvent plus servir de voies d'écoulement préférentiel. Ce comportement se traduit par une courbe de rétention d'eau (CRE) typique des milieux à double porosité (de nature bimodale), qui peut être construite par la combinaison des CRE de la matrice et du système de macropores. La fonction de perméabilité qui en découle montre aussi deux régimes pour l'écoulement de l'eau. Toutefois, des études plus détaillées sont nécessaires afin de vérifier si le concept de la double porosité (ou celui de la double perméabilité) peut être utilisé dans le cas des stériles miniers, particulièrement lors de la détermination de leur courbe de rétention d'eau et de la fonction de perméabilité.

Plus spécifiquement, les courbes de rétention d'eau obtenues expérimentalement montrent une pression d'entrée d'air ($\psi_a = AEV$) faible (< 10 cm) et une teneur en eau volumique résiduelle (θ_r) relativement élevée (0,06 – 0,08).

Les résultats expérimentaux ont aussi permis de proposer des modifications au modèle prédictif MK (Aubertin et al. 2003) pour mieux représenter l'effet de la fraction fine des stériles sur la teneur en eau résiduelle. Il a ainsi été proposé d'utiliser la méthode de Chapuis et Légaré (1992) pour évaluer le diamètre équivalent des grains D_H , qui est utilisé dans le modèle prédictif MK pour le calcul de la rétention d'adhésion. Des données tirées de la littérature ont été utilisées afin de démontrer que les modifications proposées au modèle MK fonctionnent bien pour d'autres types de roches stériles et pour d'autres matériaux à granulométrie très étalée.

Les résultats de la présente étude pourront être utilisés dans les travaux portant sur la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles. Les résultats de ces modélisations peuvent servir à développer des méthodes optimales pour la construction des haldes afin de réduire les risques environnementaux, particulièrement ceux liés au DMA et au

DNC. Ceci peut contribuer grandement à la réduction des coûts de restauration des sites miniers et aider à la fermeture sécuritaire à la fin de l'exploitation.

Recommandations

En ce qui concerne les travaux futurs, il serait utile d'étudier plus en détail les particularités de la structure interne des stériles. Plus spécifiquement, les recherches futures devraient viser à déterminer les caractéristiques et les conditions nécessaires à la formation de la macroporosité dans la roche stérile. Les questions à examiner comprennent : le lien entre la granulométrie des stériles et la formation des macropores, l'influence du degré de compactage, l'estimation approximative de la taille des macropores selon le pourcentage de gravier et de cailloux, les mécanismes de la formation des macropores (par ségrégation des particules ou par la formation de zones « cachées », plus lâches, au-dessous des grosses particules).

Aussi, il est recommandé d'évaluer (et de comprendre) comment se forment les macropores dans les stériles miniers à l'échelle du laboratoire et également dans des haldes à stériles *in situ*. Il faudrait aussi évaluer plus en détails le rôle de la macroporosité des stériles sur le régime d'écoulement de l'eau à l'intérieur des stériles et compléter le développement d'approches pour représenter cet aspect dans la simulation de leur comportement dans les haldes. Ensuite, il serait utile d'étudier ces phénomènes sur des stériles provenant d'autres sites miniers et ayant des caractéristiques de base différentes (c.-à-d., la granulométrie, la minéralogie, la densité relative, l'angularité des particules, etc.). Il serait également intéressant d'essayer de développer des critères qui permettraient de faire une estimation rapide, basée sur les caractéristiques géotechniques de base, de la prédisposition du matériau à développer une macroporosité, qui s'ajoute à la porosité de la matrice.

En laboratoire, il est suggéré de poursuivre une étude détaillée afin d'établir plus précisément le lien entre les caractéristiques hydrauliques des stériles et leur structure interne. Des essais additionnels sur des propriétés hydrauliques de ces matériaux à différents degrés de compactage permettraient de caractériser plus en détail la présence et l'effet des macropores et leur influence sur la conductivité hydraulique saturée et la courbe de rétention d'eau. Les futurs essais devraient mettre l'emphase sur l'évaluation de la conductivité hydraulique saturée de la matrice des roches

stériles et celle du système des macropores qui forment des voies d'écoulement préférentiel (notamment avec des essais de traceurs).

Il est aussi recommandé de poursuivre le travail afin de comparer les résultats des essais de laboratoire avec les données de terrain, et aussi avec les résultats de simulations numériques (notamment avec des modèles à double porosité, à double perméabilité, ou avec la présence de « fractures » dans la matrice). Il serait également utile de continuer à travailler sur l'amélioration des modèles prédictifs qui permettraient de prédire les caractéristiques hydriques des matériaux dont la structure interne est compliquée par la présence de la macroporosité.

BIBLIOGRAPHIE

- Aberg, B. (1992). Void ratio of noncohesive soils and similar materials. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 118(9), 1315-1333.
- Alem, A., Alhaddad, S., Benamar, A. & Wang, H. (2006). Migration des particules en suspension dans un milieu poreux: erosion interne. *XXIV^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Le Havre cedex, France, p. 1-8.
- Alhaddad, S., Alem, A., Wang, H., Benamar, A. & Ahfir, N. (2008). Effet des conditions hydrauliques et de la forme des grains sur l'érosion interne dans un milieu poreux. *XXVI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Nancy, France, p. 1-8.
- Anterrieu, O., Chouteau, M. & Aubertin, M. (2010). Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Geological Engineering and the Environment*, 69, 533-548.
- Arya, L. M. & Paris, J. F. (1981). A physico-empirical Model to predict the soil moisture Characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1023-1030.
- ASTM (2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (D2434), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007a). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter (D5856), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007b). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D422), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2007c). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (C127), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2010). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (D854), ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Aubertin, M. & Bussière, B. (2011). Chaire industrielle CRSNG Polytechnique – UQAT en environnement et gestion de rejets miniers. École polytechnique de Montréal. Consulté le 20 novembre 2011, tiré de <http://www.enviro-geremi.polymtl.ca>.
- Aubertin, M., Bussière, B. & Bernier, L. (2002a). *Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur CD-ROM*. Presses Internationales Polytechnique, Montréal.
- Aubertin, M., Bussière, B. & Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 470-482.
- Aubertin, M., Fala, O., Bussière, B., Martin, V., Campos, D., Gamache-Rochette, A., Chouteau, M. & Chapuis, R. (2002b). Analyse des écoulement de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles. *Défis et Perspectives: Symposium 2002 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Canada. Comptes-Rendus sur CD-ROM.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez, M. A., Chapuis, R. P., Bussière, B., Lahmira, B. & Lefebvre, R. (2008). Caractérisation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Comptes-rendus du Symposium 2008 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussiere, B., Chapuis, R. P., Chouteau, M. & Wilson, G. W. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Comptes-rendus du Symposium 2005 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 1104-1122.
- Aubertin, M., Ricard, J. F. & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 55-69.
- Azam, S., Wilson, G. W., Herasymuk, G., Nichol, C. & Barbour, L. S. (2007). Hydrogeological behavior of an unsaturated waste rock pile : a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 66(3), 259-268.

- Barbour, S. L. (1998). Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: A historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 873 - 894.
- Barbour, S. L., Hendry, M. J., Smith, J. L., Beckie, R. D. & Wilson, G. W. (2001). *A research partnership program in the mining industry for waste rock hydrology*. Workshop Notes (Unpublished). University of Saskatchewan.
- Bédard, C. (2003). *Étude en laboratoire sur les propriétés hydriques non saturées des sols sableux*. Thèse de doctorat. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Benamar, A., Wang, H., Ahfir, N., Alem, A., Massei, N. & Dupont, J.-P. (2005). Effets de la vitesse d'écoulement sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé. *C. R. Geoscience*, 337, 497-504.
- Beven, K. & Germann, P. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), 1311-1325.
- Blott, S. J. & Pye, K. (2006). Particle size distribution analysis of sandsized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effect of particle shape. *Sedimentology*, 53, 671–685.
- Bourrel, S. (2008). Rapport de stage. Chaire industrielle CRSNG Polytechnique - UQAT en environnement et gestion de rejets miniers. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Brooks, R. & Corey, A. (1964). *Hydraulic properties of porous medium*. Hydrology paper 3, Colorado State University (Fort Collins), Colorado.
- Brouyère, S. (2006). Modelling the migration of contaminants through variably saturated dual-porosity, dual-permeability chalk. *Journal of Contaminant Hydrology*, 82(3–4), 195-219.
- Budhu, M. (2011). *Mechanics and foundations* (3^e éd.). John Wiley & Sons, Inc.
- Bui, F. (2007). *Détermination du coefficient de dispersion de stériles miniers en laboratoire*. Rapport du projet de fin d'études. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.

- Burger, C. A. & Shackelford, C. D. (2001). Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 53-66.
- Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*. Thèse de doctorat. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G., Potvin, R. & Benzazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des sites miniers abandonnés générateurs de drainage minier acide. *Comptes-rendus du Symposium 2005 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Plante, B., Pépin, G., Aubertin, M. & Laflamme, D. (2008). Évaluation du comportement géochimique des stériles miniers de la mine Tio, Havre-St-Pierre, Québec. *Comptes-rendus du Symposium 2008 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM.
- Bussière, B., Demers, I., Dawood, I., Plante, B., Aubertin, M., Peregoedova, A., Pepin, G., Lessard, G., Intissar, R., Benzaazoua, M., Molson, J., Chouteau, M., Zagury, G., Monzon, M. & Laflamme, D. (2011). Comportement géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine Lac Tio. *Comptes-rendus du Symposium 2011 sur l'Environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Québec, Canada, CD-ROM.
- Campbell, J. R. (2003). Limitations in the laser particle sizing of soils. In Roach, I. C. (ed.), *Advances in Regolith* (pp. 38-42). Canberra, Australia: CRC LEME.
- Cassie, A. B. D. & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.*, 40, 546-551.
- Chapuis, R. (1992). Similarity of internal stability criteria for granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713.
- Chapuis, R. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 787-795.

- Chapuis, R. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71, 401-434.
- Chapuis, R.P., Baass, K. & Davenne, L. (1989). Granular soils in rigid-wall permeameters: method for determining the degree of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 71-79.
- Chapuis, R. & Légaré, P. (1992). A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance. American Society for Testing and Materials, ASTM STP*, 1147, 177-186.
- Chapuis, R. P. & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 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. *Revue canadienne de géotechnique*, 33(1), 168-176.
- Chapuis, R. P., Masse, I., Madinier, B. & Aubertin, M. (2007). A drainage column test for determining unsaturated properties of coarse materials. *Geotechnical testing journal*, 30(2), 83-89.
- Clarke, R. H. (1979). Reservoir properties of conglomerates and sandstones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(5), 799-809.
- Dane, J. H. & Topp, G. C., Eds. (2002). Methods of Soil Analysis, Part 4. In *Physical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Dawood, I., Aubertin, M., Intissar, R. & Chouteau, M. (2011). A combined hydrogeological-geophysical approach to evaluate unsaturated flow in a large waste rock pile. *Proceedings of the Pan-Am CGS Geotechnical Conference*. Toronto, Canada.
- Delage, P. & Cui, Y.-J. (2000). *L'eau dans les sols non saturés. Techniques de l'Ingénieur, C301, traité Construction, volume C2*.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2^e éd.). John Wiley & Sons, Inc.

- Drzymala, J. (1994). Hydrophobicity and collectorless flotation of inorganic materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, 50, 143-185.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211-223.
- Environnement Canada (2009). Guide pour la déclaration de résidus miniers et de stériles à l'Inventaire national des rejets polluants. <http://www.ec.gc.ca/inrpnpri>
- Eriksson, N., Gupta, A. & Destouni, G. (1997). Comparative analysis of laboratory and field tracer tests for investigating preferential flow and transport in mining waste rock. *Journal of Hydrology*, 194(1-4), 143-163.
- Fala, O. (2002). *Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques*. Mémoire de maîtrise. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Fala, O., Aubertin, M., Bussiere, B., Chapuis, R. P. & Molson, J. (2008). Stochastic numerical simulations of long term unsaturated flow in waste rock piles. *Proceedings of the Canadian Geotechnical Conference. GeoEdmonton 2008*, 1492-1498.
- Fala, O., Aubertin, M., Molson, J. W., Bussière, B., G.W., W., Chapuis, R. & V, M. (2003). Numerical modelling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. *Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia*, 895-902.
- Fala, O., Molson, J. W., Aubertin, M. & Bussière, B. (2005). Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water and the Environment*, 24(4), 172-185.
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology (4th ed.)*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Fredlund, D. & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, D. H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Freeze, R. & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall of Canada, Toronto.

- Furnas, C. C. (1928). Relations Between specific Volume, Voids and Size Composition in Systems of Broken Solids of Mixed Sizes. *US. Bur. Mines Rep. Invest.*, 2894.
- Gaillot, A. (2007). *Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de rejets miniers*. . Rapport de stage. Chaire industrielle CRSNG Polytechnique - UQAT en environnement et gestion de rejets miniers. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Gamache-Rochette, A. (2004). *Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles*. Mémoire de maîtrise. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Gardner, W. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85, 228-232.
- Gelhar, L. W., Welty, C. & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, 28(7), 1955-1974.
- Gentleman, M. M. & Ruud, J. A. (2009). Role of Hydroxyls in Oxide Wettability. *Langmuir*, 26(3), 1408-1411.
- Gerke, I. H. & Van Genuchten, M. (1996). Macroscopic representation of structural geometry for simulating water and solute movement in dual-porosity media. *Advances in Water Resources*, 19(6), 343-357.
- Gerke, I. H. & van Genuchten, M. T. (1993). A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, 29, 305-319.
- Germaine, J. T. & Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical laboratory measurements for engineers*. John Wiley & Sons, Inc.
- Green, W. & Ampt, G. (1911). Studies on soil physics. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1-24.
- Harries, J. & Ritchie, A. (1983). Runoff fraction and pollution levels in runoff from a waste rock dump undergoing pyritic oxidation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 19, 155-170.
- Harvey, R., Kinner, N., MacDonald, D., Metge, D. & Bunn, A. (1993). Role of physical heterogeneity in the interpretation of small-scale laboratory and field observations of

- bacteria, microbial-sized microsphere, and bromide transport through aquifer sediments. *Water Resources Research*, 29, 2713-2721.
- Haverkamp, R. & Parlange, J. Y. (1986). Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142(6), 325-339.
- Hazen, A. (1911). Discussion of dams on sand foundation, transactions. *American Science of civil Engineering*, 73, 199-203.
- Hernandez, M. A. (2007). *Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée*. Mémoire de maîtrise. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.
- Horton, R. (1940). Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America*, 5, 399-417.
- Intissar, R. (2009). *Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles*. Mémoire de maîtrise. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Jarvis, N. J., Jansson, P.-E., Dik, P. E. & Messing, I. (1991). Modelling water and solute transport in macroporous soil. I. Model description and sensitivity analysis. *Journal of Soil Science*, 42, 59-70.
- Kezdi, A. (1979). *Soil Physics: Selected Topics, Developments in geotechnical engineering*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Koffi, K., Aubertin, M., Hernandez, M. A., Oungrawa, M., Chapuis, R. P. & Bussière, B. (2008). Étude de la conductivité hydraulique des mélanges à granulométrie étalée. *Proceedings of the Canadian Geotechnical Conference. GeoEdmonton 2008*, 1478-1483.
- Kovács, G. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier.
- Larsbo, M., Roulier, S., Stenemo, F., Kasteel, R. & Jarvis, N. (2005). An Improved Dual-Permeability Model of Water Flow and Solute Transport in the Vadose Zone. *Vadose Zone Journal*, 4(2), 398-406.

- Lessard, G. (2011). *Essais d'infiltration sur la halde à stériles Petit-Pas de la mine Tio, Havre-St-Pierre*. Rapport de maîtrise. Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. & Mbonimpa, M. (2006). Modification of the predictive MK model to integrate hysteresis of the water retention curve. *ASCE Geotechnical Special Publication, Unsaturated Soils 2006: Proceedings of the fourth International Conference on Unsaturated Soils*. Carefree, Arizona.
- Martin, V., Aubertin, M., Bussière, B. & Chapuis, R. (2004). Evaluation of unsaturated flow in mine waste rock. *57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th joint CGS-IAH Conference*. Quebec City.
- Massei, N., Lacroix, M., Wang, H. Q. & Dupont, J.-P. (2002). Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer parameters. *Journal of Contaminant Hydrology*, 57, 21-39.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. & 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), 773-787.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P. & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20, 235-259.
- McCarter, M. (1990). Design and operating considerations for mine waste embankments. In Kennedy B.A. (ed.), *Surface Mining* (2nd ed.) (pp. 890-899), SME.
- McCarthy, D. F. (2007). *Essentials of soil mechanics and foundations: basic geotechnics*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- McKeown, R., Barbour, L., Rowlett, D. & Herasymuk, G. (2000). Characterization of the grain-size distribution for waste rock of metal mines - a review of the existing data and evaluation of the implications for hydrogeologic behavior. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. London, Ontario, Canada.

- Molson, J., Fala, O., Aubertin, M. & Bussière, B. (2005). Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78(4), 343-371.
- Morin, K. A., Gerencher, E., Jones, C. E. & Konasewich, D. E. (1991). *Critical literature review of acid drainage from waste rock. Canadian Mine Environmental Neutral Drainage (MEND) Program*. Canada Centre for Mineral and Energy Technology.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Musy, A. (2005). Hydrologie générale (cours sur internet). École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2011, tiré de <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>.
- Musy, A. & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Lausanne: Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- Nichol, C., Smith, L. & Beckie, R. (2005). Field-scale experiments of unsaturated flow and solute transport in a heterogeneous porous medium. *Water Resources Research*, 41(5), 1-11.
- Nichols, R. S. (1987). Rock segregation in waste dumps. In *Flow-through rock drains. Proceedings of the International symposium on flow through rock drains*. Cranbrook, BC, Canada, September 8-11, 1986.
- Ogata, A. & Banks, R. (1961). A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 411-A.
- Oungrawa, M. (2007). *Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-geochemique des résidus minier sulfureux partiellement submergés*. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Pepin, G. (2009). *Évaluation du comportement géochimique de stériles potentiellement générateurs de drainage neutre contaminé à l'aide de cellules expérimentales in situ*. Mémoire de maîtrise. École polytechnique de Montréal, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada.
- Pfannkuch, H. (1962). Contribution à l'étude des déplacements des fluides miscible dans un milieu poreux. *Rev. Inst. Fr. Petrol.*, 18(2), 215-270.

- Philip, J. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83, 345-357.
- Plante, B. (2010). *Prediction du drainage neutre contaminé en Ni: cas de la mine Tio*. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada.
- Poirier, S., Denis, C. & Bédard, L. (2005). *Étude hydrogéologique. Mine TIO, Havre Saint-Pierre*. (Projet ENV 01-00-13-04-2004). Montréal: Dessau-Soprin inc.
- Powelson, D., Gerba, C. & Yahya, M. (1993). Virus transport and removal in wastewater during aquifer recharge. *Water Resources Research*, 27(4), 583–590.
- Ricca, V. (1979). Acid mine drainage modeling of surface mining. *Proceedings of the First International Mine Drainage Symposium*. Denver, Colorado, 651-670.
- Ritchie, A. (1994). Sulphide oxidation mechanisms: Controls and rates of oxygen transport. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste*, Mineralogical Association of Canada, 201-245.
- Ross, P. J. & Smetten, R. J. (1993). Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions. *Soil Science Society American Journal*, 57, 26-29.
- Santamarina, J. C., Klein, Y. H. & Prencke, E. (2002). Specific Surface: Determination and Relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 233-241.
- Sauty, J. (1980). An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers. *Water Resources Research*, 16(1), 145-158.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Ground water*, 27(5), 633-638.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. & Talbot, J. R. (1984). Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of geotechnical engineering division*, 110(6), 684-700.
- Silliman, S. (1995). Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: influence of physical structure of the medium. *Journal of Hydrology*, 167, 79-98.
- Smith, L., Lopez, D., Beckie, R., Morin, K., Dawson, R. & Price, W. (1995). Hydrogeology of waste rock dumps. Final report to Department of Natural Resources Canada. www.mend-nedem.org

- Smith, L., Neuner, M., Gupton, M., Moore, M., Bailey, B., Blows, D., Smith, L. & Sego, D. (2009). Diavik waste rock project: from the laboratory to the Canadian Arctic. *Proceedings of the 8th International Conference on Acid Rock Drainage, June 22-26. Skellefteå, Sweden.*
- Smith, R. (1972). The infiltration envelope: Results from a theoretical infitrometer *Journal of Hydrology, 17*, 1-21.
- Société Canadienne de Géotechnique (1994). *Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations* (2^e éd.). Richmond: Société Canadienne de Géotechnique.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: Wiley.
- Todd, D. & Mays, L. (2005). *Groundwater Hydrology* (3^d ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- van Es, H. M., Ogden, C. B., Hill, R. L., Schindelbeck, R. R. & Tsegaye, T. (1999). Integrated assessment of space, time, and management - related variability of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America, 63*, 1599 - 1608.
- van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America, 44*, 892-898.
- van Genuchten, M., Leij, F. & Yates, S. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulics functions of unsaturated soils*. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/2-91/065.
- Wadsworth, M. (1981). Recovery of metal values from low grade copper sulfide ores. *Separation Science and Technology, 16*, 1081-1112.
- Wang, J. S. Y. (1991). Flow and transport in fractured rocks. *Reviews of Geophysics, 29*, Supplement, 254-262.
- Whiting, D. (1981). Surface and groundwater pollution potential. In *Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps* (pp. 90-98).
- Wickland, B. E., Wilson, G. W., Wijewickreme, D. & Klein, B. (2006). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal, 43(9)*, 928-945.

ANNEXE 1 : Protocole expérimental pour le montage et le démontage des colonnes pour les essais visant à mesurer la conductivité hydraulique et la courbe de rétention d'eau (en conformité avec les recommandations de Chapuis et al. (2006), Gaillot (2007) et Hernandez (2007)).

1. Préparer une colonne en plastique rigide transparent (renforcée) ayant une hauteur totale plus grande que la valeur de la charge de succion ψ (en cm) anticipée correspondant à la teneur en eau volumique résiduelle (θ_r) du matériau (soit ψ_r). Le diamètre intérieur de la colonne doit être au moins 8 à 12 fois la taille maximale des particules solides. La hauteur de la colonne doit permettre l'ajout d'une certaine quantité d'eau libre (> 10 cm) au dessus des roches stériles. Un diamètre de l'ordre de 30 cm et une hauteur d'environ 1,2 à 1,5 m sont suggérés.
2. Estimer la masse du matériau sec nécessaire pour remplir la colonne à la porosité désirée. Bien mélanger (homogénéiser) et humidifier le matériau ($w = 3\%$) avant le montage. Laisser l'échantillon (couvert) reposer au moins 24 heures pour assurer l'uniformité.
3. Nettoyer la colonne avec de l'eau savonneuse si nécessaire. Bien essuyer. Installer la colonne sur la balance de plancher ; la balance doit avoir la capacité et la précision voulue (p. ex. capacité de 200 kg et précision de ± 2 g).
4. Peser la colonne vide avec tous les accessoires : capteurs de pression, géotextiles (pour le haut et pour le bas), plaques en plastique perforées (pour le haut et pour le bas), un cylindre en plastique perforé (ou un ressort) agissant sur la plaque perforée pour retenir le matériau en haut de la colonne, un couvercle, des vis pour fixer le couvercle, etc.
5. Remplir la colonne avec de l'eau du robinet. Vérifier que tous les conduits et raccords sont étanches et fonctionnent normalement (pas de blocage, ni de fuites). Peser la colonne remplie d'eau avec les accessoires. Vider la colonne et assécher.
6. Déposer la plaque perforée du bas puis le géotextile au fond de la colonne.
7. Mesurer la hauteur totale intérieure de la colonne avec la plaque perforée et le géotextile du bas. Mesurer le diamètre de la colonne. Prendre au moins cinq mesures pour chaque valeur.

8. Vérifier le bon fonctionnement des connexions à prises rapides (« quick connect ») pour les piézomètres ; y ajouter une protection en coton pour éviter l'accumulation des particules fines et le blocage des conduites. La configuration de la colonne est illustrée à la figure 3.3.
9. Déposer le matériau humide par couches de 5 à 7 cm d'épaisseur. Il est important de peser chaque portion du matériau déposée. Pour les matériaux plus grossiers, il est préférable de déposer les plus grosses particules à la main afin d'éviter qu'elles ne se touchent et qu'elles ne touchent les parois de la colonne en formant des ponts qui peuvent créer des vides.
10. Densifier chaque couche du matériau avec une plaque rigide de grand diamètre afin d'appliquer une surcharge uniforme. Le matériau doit être placé dans la colonne pour atteindre une densité (ou indice des vides) uniforme (le nombre de coups doit être le même pour chaque couche).
11. Mesurer la distance entre le haut de la colonne et la surface du matériau compacté pour chaque couche déposée. Prendre au moins 5 mesures. Avant de placer la couche suivante, gratter légèrement la surface de la couche précédente afin d'assurer un bon contact entre les couches.
12. Au fur et à mesure que la colonne remplit, installer les prises des capteurs de pression. Il est préférable de mettre tout de suite une couche de la silicium autour des prises afin d'assurer leur étanchéité à l'eau (avant la saturation de la colonne).
13. Lorsque toutes les couches ont été mises en place (avec $h > \psi_r$), déposer le géotextile et la plaque perforée sur le matériau en haut de la colonne. Appliquer une pression (permanente) en haut de la colonne (mettre des ressorts ou un support) avant de la fermer avec le couvercle rigide (à boulonner).
14. Mesurer la masse de la colonne remplie avec les accessoires.
15. Saturer la colonne avec de l'eau désaérée, en appliquant un écoulement du bas vers le haut. L'écoulement de l'eau doit être lent avec un faible débit pour empêcher le déplacement des particules fines dans le matériau.
16. Mesurer régulièrement la masse de la colonne avec le matériau qui se sature en eau.
17. Laisser écouler l'eau jusqu'à atteindre un degré de saturation d'au moins 95%. Vérifier le degré de saturation S_r selon la méthode des masses et volumes présentée à l'annexe 2.
18. Réaliser les essais nécessaires sous conditions saturées (p. ex., mesure de la conductivité hydraulique saturée, essais de traceur, etc.) selon les protocoles décrits au chapitre 3.

19. Une fois les mesures complétées pour les conditions saturées, ouvrir la valve du bas pour permettre le drainage de la colonne et la récupération de l'effluent; la valve du haut doit alors être 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 contrôlée au bas de la colonne).
20. Mesurer le débit de sortie en fonction du temps à des intervalles de temps réguliers choisis en fonction de la vitesse d'écoulement d'eau (mesures typiques à toutes les 10-30 seconds initialement, puis à des intervalles plus longs lorsque le débit diminue). Prendre les mesures de pression à l'aide des capteurs de pression (à des intervalles de 2-10 minutes au début de l'essai de drainage). Noter aussi régulièrement la masse de la colonne pendant le drainage.
21. Le drainage est terminé quand il n'y a plus d'eau qui coule au bas et plus de changement de la masse pendant quelques jours (ceci peut prendre environ 2 semaines au total). Vérifier que l'état d'équilibre hydrostatique est atteint en comparant les mesures des capteurs de pression avec la position des points de mesures au-dessus de la nappe libre (i.e. $z = \psi$).
22. Une fois le drainage terminé, on pèse le tout une dernière fois et on démonte la colonne (après avoir fermé la valve du bas).
23. Au démontage, éviter de bouger ou cogner la colonne afin de conserver la distribution d'eau à l'équilibre à travers la colonne. Vérifier que le tuyau de sortie est bien fermé.
24. Retirer le couvercle, la plaque perforée et le géotextile du haut. Mesurer la distance entre la surface du matériau et le haut de la colonne ; prendre au moins 5 mesures.
25. Récupérer le matériau par tranches horizontales de même épaisseur qu'au montage (typiquement 5 à 7 cm). Mesurer la masse humide de chaque couche et la distance entre le haut de la colonne et la surface du matériau pour chaque couche.
26. A proximité de la nappe libre au bas de la colonne, une eau libre est souvent présente à la surface du matériau (qui est alors saturé), surtout dans les irrégularités. Retirer cette eau à l'aide d'un papier absorbant (qui doit être pesé avant et après) ; additionner la masse de l'eau absorbée à la masse humide du matériau retiré avec la tranche précédente.
27. Mesurer la masse du matériau sec pour chaque couche, après un séchage du matériau humide au four pour une période de 24 heures (à 105° C).

28. Déterminer la teneur en eau massique, le poids volumique, la porosité et la teneur en eau volumique pour chaque couche (selon les équations 3.5 – 3.10) ; noter aussi la succion (i.e. l’élévation du matériau au-dessus de la nappe libre) au milieu de chaque couche.
29. Les résultats au démontage permettent de tracer le graphique de la CRE, i.e. succion ψ (élévation en cm) versus la teneur en eau volumique θ (ou degré de saturation).
30. Il est important durant ces essais de prendre en note tous les relevés et de documenter le déroulement afin de pouvoir identifier certains problèmes potentiels lors de l’interprétation des mesures. Cette interprétation est décrite dans le mémoire, au chapitre 4 (voir aussi Chapuis et al., 2006 ; Hernandez, 2007).

ANNEXE 2 : Vérification du degré de saturation des matériaux lors des essais en colonne selon la méthode de Chapuis et al. (2007).

Exemple de calcul pour la colonne QIT1_P50_f2

1. La masse de la colonne vide avec les accessoires $M_1 = 26\text{kg}$
2. La masse de la colonne remplie d'eau avec les accessoires $M_e = 92,6\text{kg}$
3. La masse de la colonne remplie du matériau sec $M_2 = 207,3\text{kg}$
4. La masse totale de la colonne remplie du matériau et saturée en eau $M_{tot} = 227,7\text{kg}$
5. La masse du matériau sec $M_s = M_2 - M_1 = 207,3\text{kg} - 26\text{kg} = 181,3\text{kg}$
6. La masse du matériau humide $M_{ms} = M_{tot} - (M_e - V_{tot}\rho_w)$

$$M_{ms} = 227,7\text{kg} - (92,6\text{kg} - 0,06565\text{m}^3 \times 998,21\text{kg/m}^3) = 200,7\text{kg}$$

7. La masse de l'eau dans l'échantillon saturé :

$$M_w = M_{ms} - M_s = 200,7\text{kg} - 181,3\text{kg} = 19,4\text{kg}$$

8. Le volume des vides dans la colonne $V_v = V_{tot} - V_s = V_{tot} - M_s/\rho_s$

$$V_v = 0,06565\text{m}^3 - 181,3\text{kg}/(4,052 \times 998,21)\text{kg/m}^3 = 0,021\text{m}^3$$

9. Le degré de saturation $S_r = V_w/V_v = M_w/(\rho_w \times V_v) = \frac{M_{tot}-M_e+V_{tot}\times\rho_w-M_s}{\rho_w\times[V_{tot}-(M_s/\rho_s)]}$

$$S_r = \frac{227,7\text{kg}-92,6\text{kg}+\left(0,06565\text{m}^3 \times \frac{998,21\text{kg}}{\text{m}^3}\right)-181,3\text{kg}}{998,23\text{kg/m}^3 \times [0,06565\text{m}^3 - (181,3\text{kg}/(4,052 \times 998,23))\text{kg/m}^3]} = 0,93 \text{ (93%)}$$

ANNEXE 3 : Valeurs individuelles des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes.

Tableau A3.1 : Valeurs des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes

Élévation au-dessus de la nappe libre au milieu de la couche (cm)	Épaisseur de la couche (cm)	Masse du matériau sec (g)	Volume total (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Porosité (n)	θ (-)
QIT1_P50_f2						
(aire de la section $A = 665,08 \text{ cm}^3$, longueur de l'échantillon des stériles $L = 85,3 \text{ cm}$)						
72,0	7,8	16555,3	5181,0	3,20	0,21	0,05
65,3	5,7	12393,2	3817,5	3,25	0,20	0,05
59,5	5,7	12012,3	3784,3	3,17	0,22	0,06
53,3	6,9	14962,1	4589,0	3,26	0,19	0,06
44,9	9,9	20812,6	6584,3	3,16	0,22	0,06
37,1	5,6	12248,4	3731,1	3,28	0,19	0,06
31,5	5,7	12202,2	3764,3	3,24	0,20	0,07
23,0	11,3	24264,6	7542,0	3,22	0,20	0,07
14,2	6,2	12594,2	4110,2	3,06	0,24	0,07
8,3	5,7	12122,9	3771,0	3,21	0,21	0,08
3,4	4,1	8385	2733,5	3,07	0,24	0,12
-4,0	10,7	22652,8	7109,7	3,19	0,21	0,23
QIT1_P50_f1						
(aire de la section $A = 665,08 \text{ cm}^3$, longueur de l'échantillon des stériles $L = 83,8 \text{ cm}$)						
76,5	2,8	5585,1	1835,6	3,04	0,25	0,06
72,5	5,3	11541,5	3511,6	3,29	0,19	0,06
67,7	4,3	9693,8	2859,8	3,39	0,16	0,07
63,3	4,6	9756,5	3059,4	3,19	0,21	0,06
58,7	4,5	9774	2979,6	3,28	0,19	0,07
54,4	4,2	9351,2	2806,6	3,33	0,18	0,06
49,9	4,7	10205,8	3132,5	3,26	0,19	0,07
45,5	4,1	9540,9	2760,1	3,46	0,15	0,07
41,1	4,6	10271,5	3046,1	3,37	0,17	0,06
36,8	4,1	9045,7	2700,2	3,35	0,17	0,07
32,0	5,5	11881,2	3671,2	3,24	0,20	0,07
25,2	8,1	17767,9	5373,8	3,31	0,18	0,07
18,6	5,2	10808,8	3471,7	3,11	0,23	0,07
13,9	4,0	9156,6	2686,9	3,41	0,16	0,07
8,2	7,5	14972,6	5001,4	2,99	0,26	0,09
-0,8	10,3	26305	6850,3	3,84	0,05	0,22

Tableau A3.1 (suite) : Valeurs des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes

Élévation au-dessus de la nappe libre au milieu de la couche (cm)	Épaisseur de la couche (cm)	Masse du matériau sec (g)	Volume total (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Porosité (n)	θ (-)
QIT1_P50_lâche						
(aire de la section A = 672,47 cm ³ , longueur de l'échantillon des stériles L = 60,3 cm)						
57,3	3,8	6928,2	2528,5	2,74	0,32	0,03
51,9	7,0	12406,7	4693,8	2,64	0,35	0,05
44,3	8,2	15899,0	5527,7	2,88	0,29	0,05
36,6	7,3	13273,0	4895,6	2,71	0,33	0,05
29,3	7,2	13827,9	4841,8	2,86	0,29	0,06
22,9	5,7	11245,6	3860,0	2,91	0,28	0,07
18,0	3,9	7886,7	2649,5	2,98	0,26	0,08
14,0	4,1	6902,5	2784,0	2,48	0,39	0,06
9,7	4,5	8719,7	3012,7	2,89	0,28	0,10
3,1	8,6	17532,0	5783,2	3,03	0,25	0,30
QIT1_P50_I						
(aire de la section A = 672,83 cm ³ , longueur de l'échantillon des stériles L = 84,5 cm)						
70,3	2,9	6184,9	1971,4	3,14	0,22	0,05
67,0	3,8	7926,1	2556,8	3,10	0,23	0,04
62,9	4,4	9378,1	2973,9	3,15	0,22	0,05
58,4	4,5	9238,7	3000,8	3,08	0,24	0,05
53,9	4,6	10258,2	3121,9	3,29	0,19	0,05
49,5	4,2	8698,3	2825,9	3,08	0,24	0,05
44,8	5,1	10606,6	3418,0	3,10	0,23	0,05
40,0	4,6	9629,8	3068,1	3,14	0,22	0,05
35,6	4,3	9437,7	2866,3	3,29	0,19	0,06
30,9	5,1	10296,8	3404,5	3,02	0,25	0,06
26,2	4,4	9164,8	2926,8	3,13	0,23	0,06
21,7	4,7	9937,6	3169,0	3,14	0,22	0,06
17,6	3,6	7439	2408,7	3,09	0,24	0,06
14,4	2,8	5825	1897,4	3,07	0,24	0,07
11,7	2,6	5694,7	1722,4	3,31	0,18	0,07
8,8	3,1	6526,8	2099,2	3,11	0,23	0,07
6,4	1,7	3495,7	1143,8	3,06	0,24	0,07
3,7	3,7	7049,2	2489,5	2,83	0,30	0,09
1,2	1,2	2458,9	827,6	2,97	0,27	0,12
-6,0	13,3	29141,6	8968,8	3,25	0,20	0,23

Tableau A3.1 (suite) : Valeurs des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes

Élévation au-dessus de la nappe libre au milieu de la couche (cm)	Épaisseur de la couche (cm)	Masse du matériau sec (g)	Volume total (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Porosité (n)	θ (-)
QIT1_P28_f						
(aire de la section $A = 672,83 \text{ cm}^3$, longueur de l'échantillon des stériles $L = 83,8 \text{ cm}$)						
74,6	10,1	20741,4	6795,6	3,05	0,25	0,06
67,0	5,1	10757,0	3438,2	3,13	0,23	0,06
61,6	5,7	11803,6	3835,1	3,08	0,24	0,06
55,7	6,2	13104,4	4185,0	3,13	0,23	0,06
48,8	7,5	15645,3	5046,2	3,10	0,24	0,06
41,1	7,9	16053,7	5342,3	3,01	0,26	0,07
30,3	13,6	27718,9	9123,6	3,04	0,25	0,07
18,4	10,3	21062,9	6930,1	3,04	0,25	0,07
9,3	7,9	16352,9	5301,9	3,08	0,24	0,10
0,6	9,5	20327,7	6391,9	3,18	0,22	0,24
QIT1_P19_f						
(aire de la section $A = 672,47 \text{ cm}^3$, longueur de l'échantillon des stériles $L = 77,6 \text{ cm}$)						
68,5	4,9	9799,3	3288,4	2,98	0,27	0,06
63,7	4,9	10381,9	3268,2	3,18	0,22	0,06
59,6	3,4	7885,4	2259,5	3,49	0,14	0,07
55,3	5,1	8619,7	3443,0	2,50	0,39	0,06
50,6	4,3	9209,8	2918,5	3,16	0,23	0,07
46,0	4,9	9908,3	3295,1	3,01	0,26	0,07
40,6	5,9	10104,4	3940,7	2,56	0,37	0,06
35,0	5,3	11856,8	3537,2	3,35	0,18	0,07
30,0	4,8	9800,0	3254,7	3,01	0,26	0,07
24,2	6,7	13174,4	4482,0	2,94	0,28	0,07
18,0	5,8	12254,4	3923,9	3,12	0,23	0,08
12,6	5,0	9477,9	3335,4	2,84	0,30	0,08
8,0	4,3	8838,7	2891,6	3,06	0,25	0,10
4,7	2,2	4706,1	1479,4	3,18	0,22	0,22
-1,5	10,2	20346,0	6859,2	2,97	0,27	0,27

Tableau A3.1 (suite et fin) : Valeurs des propriétés de chaque couche au démontage des colonnes

Élévation au-dessus de la nappe libre au milieu de la couche (cm)	Épaisseur de la couche (cm)	Masse du matériau sec (g)	Volume total (cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Porosité (n)	θ (-)
QIT1_P10_f						
(aire de la section A = 665,08 cm ³ , longueur de l'échantillon des stériles L = 75,4 cm)						
68,2	6,3	12393,9	4216,6	2,94	0,28	0,07
62,1	6,0	12115,6	3977,2	3,05	0,26	0,07
56,2	5,8	11533,3	3824,2	3,02	0,27	0,07
49,9	6,9	13796,8	4569,1	3,02	0,26	0,07
42,9	7,1	13950,1	4748,7	2,94	0,28	0,07
36,3	6,1	12154,8	4083,6	2,98	0,27	0,08
30,1	6,2	12150,4	4116,8	2,95	0,28	0,08
23,6	6,7	12862	4476,0	2,87	0,30	0,08
17,8	4,9	9856,5	3258,9	3,02	0,26	0,09
13,6	3,6	7249,5	2367,7	3,06	0,25	0,10
9,5	4,6	9194,3	3086,0	2,98	0,27	0,11
5,0	4,3	7882,1	2886,4	2,73	0,27	0,27
-0,6	6,8	13452,1	4509,2	2,98	0,27	0,27
QIT1_P5_f						
(aire de la section A = 82,37 cm ³ , longueur de l'échantillon des stériles L = 153,4 cm)						
125,4	12,5	2913,3	1028,0	2,83	0,33	0,08
111,6	15,3	3826,8	1260,3	3,04	0,28	0,08
95,5	16,8	4198,1	1385,5	3,03	0,28	0,08
77,7	18,8	4417,8	1551,9	2,85	0,33	0,09
63,1	10,3	2498,9	846,8	2,95	0,30	0,10
50,4	15,1	3601	1243,9	2,90	0,31	0,11
38,2	9,3	2217,3	767,7	2,89	0,32	0,11
28,8	9,4	2216,7	777,6	2,85	0,32	0,12
18,6	11,1	2585,1	914,4	2,83	0,33	0,15
10,9	4,2	941,2	346,0	2,72	0,36	0,23
-6,5	30,5	7302,6	2514,1	2,90	0,31	0,30

ANNEXE 4 : Résultats des essais de perméabilité.

Tableau A4.1 : Résultats des mesures de la conductivité hydraulique saturée des stériles lors des essais en colonne

Échantillon QIT1_P50_f2

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s			
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos		
1	CC1	0,21	0,17	1,1E-01	1,2E-01		
2	CC2	0,21	0,17	1,1E-01	1,3E-01		
3	CC3	0,21	0,23 – 0,29	1,1E-01	0,9E-01		
4	CV1	0,15 à 0,48		8,8E-02	-		
5	CC4	0,99	-	7,5E-02	-		
6	CC5	0,99	-	7,4E-02	-		
7	CC6	0,99	-	7,4E-02	-		
8	CV2	0,05 à 0,42		1,1E-01	-		
9	CC8	2,00	-	5,8E-02	-		
10	CC9	2,00	-	5,8E-02	-		
11	CC10	2,00	-	5,9E-02	-		
12	CV3	0,02 à 0,42		1,1E-01	-		
13	CC11	2,79	-	5,2E-02	-		
14	CC12	2,79	-	5,2E-02	-		
15	CC13	2,79	-	5,1E-02	-		
16	CV4	0,02 à 0,44		1,0E-01	-		
17	CC14	2,79	-	5,1E-02	-		
18	CC15	2,79	-	5,1E-02	-		
19	CC16	2,79	-	5,1E-02	-		
20	CV5	0,07 à 0,54		7,9E-02	-		
k_{sat} moyen, cm/s							
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)							
1,0E-01							
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)							
1,0E-01							
Essais à charge variable CV							
9,7E-02							
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)							
1,0E-01							

Échantillon QIT1_P50_f1

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s	
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos
1	CC1	0,21	0,08	2,9E-02	7,5E-02
2	CV1		0,04 à 0,57	3,2E-02	-
3	CC2	1,02	1,26	2,6E-02	2,1E-02
4	CV2		0,01 à 0,53	3,5E-02	-
5	CC3	1,93	-	2,3E-02	-
6	CV3		0,02 à 0,59	3,4E-02	-
7	CC4	2,88		2,7E-02	-
8	CC5	2,88		1,8E-02	-
9	CC6	2,88	-	1,8E-02	-
10	CV4		0,04 à 0,56	3,7E-02	-
11	CC8	2,88		2,1E-02	-
12	CC9	2,88		2,2E-01	-
13	CC10	2,88	-	2,2E-02	-
14	CV5		0,02 à 0,59	3,9E-02	-
k_{sat} moyen, cm/s					
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)					
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)					
Essais à charge variable CV					
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)					

Échantillon QIT1_P50_lâche

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s	
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos
1	CC1	0,06	0,01 – 0,03	2,9E-01	7,3E-01
2	CC2	0,06	0,01 – 0,03	2,9E-01	7,6E-01
3	CC3	0,06	0,03	2,8E-01	5,8E-01
4	CV1	0,05 à 0,58		1,8E-01	-
5	CV2	0,07 à 0,60		1,7E-01	-
6	CC4	0,77	-	1,1E-01	-
7	CC5	0,77	-	1,1E-01	-
8	CV3	0,11 à 0,64		1,6E-01	-
9	CC6	0,3	0,05 – 0,07	1,6E-01	6,9E-01
k_{sat} moyen, cm/s					
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)					
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)					
Essais à charge variable CV					
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)					

Échantillon QIT1_P28_f

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s	
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos
1	CC1	0,20	0,16	9,9E-02	1,2E-01
2	CC2	0,20	-	1,1E-01	2,2E-01
3	CC3	0,20	0,07 – 0,19	1,0E-01	1,8E-01
4	CC4	0,20	0,07 – 0,19	1,0E-01	1,8E-01
5	CV1	0,17 à 0,56		9,7E-02	-
6	CC5	1,00	-	7,5E-02	-
7	CC6	1,00	-	7,4E-02	-
8	CV2	0,04 à 0,40		1,1E-01	-
9	CC7	2,00	-	5,9E-02	-
10	CC8	2,00	-	6,0E-02	-
11	CV3	0,04 à 0,52		1,0E-01	-
12	CC9	2,78	-	5,4E-02	-
13	CC10	2,78	-	5,2E-02	-
14	CV4	0,09 à 0,56		1,0E-01	-
15	CC11	0,21	0,10	9,7E-02	1,9E-01
16	CC12	0,21	0,10	9,8E-02	2,0E-01
k_{sat} moyen, cm/s					
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)					
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)					
Essais à charge variable CV					
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)					

Échantillon QIT1_P5_f

Essai №	Type d'essai*	Gradient hydraulique i^{**}		k_{sat} à 20°C, cm/s			
		Mariotte	Piezos	Mariotte	Piezos		
1	CC1	1	0,3	1,2E-02	4,6E-02		
2	CC2	1	0,3	1,3E-02	4,8E-02		
3	CC3	0,6	0,3	1,6E-02	3,5E-02		
4	CV1	0,07 à 0,32		1,7E-02	-		
5	CC4	1,2	0,4	1,8E-02	4,5E-02		
6	CC5	0,9	0,3	2,5E-02	5,6E-02		
7	CC6	0,3	-	1,9E-02	-		
8	CV2	0,09 à 0,32		2,1E-02	-		
k_{sat} moyen, cm/s							
Essais à charge constante CC (Mariotte, faible gradient)							
Essais à charge constante CC (Piezos, faible gradient)							
Essais à charge variable CV							
k_{sat} représentatif de l'échantillon (moyenne des résultats d'essais CC (Piezos, faible gradient) et d'essais CV)							

ANNEXE 5 : Exemple de calcul de la conductivité hydraulique pour les échantillons stratifiés.

Le calcul de la conductivité hydraulique verticale dans la couche de stériles placée sur la couche de sable se faisait en utilisant l'équation suivante (basée sur l'équation 3.12) :

$$k_{stériles} = \frac{z_{stériles}}{\frac{z_{stériles} + z_{sable}}{k_{éq}} - \frac{z_{sable}}{k_{sable}}} \quad (\text{A5.1})$$

où k_{eq} – conductivité hydraulique équivalente verticale pour le sol stratifié

($\equiv k_{sat}$ mesurée lors de l'essai en colonne)

$z_{stériles}$ – épaisseur de la couche de stériles [L]

z_{sable} – épaisseur de la couche de sable [L]

$k_{stériles}$ – conductivité hydraulique dans la couche de stériles [L/T]

k_{sable} – conductivité hydraulique dans la couche de sable [L/T]

Exemple de calcul pour la colonne OIT1_P19_f

1. Épaisseur de la couche de sable $z_{sable} = 7,94$ cm
2. Épaisseur de la couche de stériles $z_{stériles} = 76,9$ cm
3. Épaisseur total de l'échantillon $z_{stériles} + z_{sable} = 84,84$ cm
4. Valeur de k_{sat} de l'échantillon (k_{eq}) déterminée lors d'un essai à charge variable CV2
 k_{eq} (CV2) = 1,29E-01 cm/s
5. k_{sat} (sable filtrant) = 0,1 cm/s (déterminé à l'aide d'un perméamètre ordinaire)
6. Selon l'équation A5.1 :

$$k_{stériles} = \frac{z_{stériles}}{\frac{z_{stériles} + z_{sable}}{k_{éq}} - \frac{z_{sable}}{k_{sable}}} = \frac{76,9\text{cm}}{\frac{76,9\text{cm} + 7,94\text{cm}}{0,129\text{cm/s}} - \frac{7,94\text{cm}}{0,1\text{cm/s}}} = 0,133 \text{ cm/s}$$

ANNEXE 6 : Courbes granulométriques des roches stériles et données granulométriques détaillées.

Tableau A.6.1 : Distribution granulométrique initiale pour les échantillons testés

d, mm	QIT1_P50_lâche QIT1_P50_f1 QIT1_P50_f2 (% Passant)
50	100
37,5	94,96
28	89,76
19	81,94
14	74,50
10	68,74
5	53,78
2,5	39,36
1,25	26,71
0,63	18,11
0,315	12,38
0,16	8,38
0,08	5,77
0,04	3,29
0,03140	3,05
0,02240	2,34
0,01592	1,91
0,01138	0,95
0,00833	0,81
0,00590	0,57
0,00418	0,43
0,00296	0,33
0,00210	0,14
0,00149	0,05

d, mm	QIT1_P50_I (% Passant)
50	100
37,5	95,00
28	89,81
19	83,30
14	78,70
10	73,41
5	53,81
2,5	35,79
1,25	22,39
0,63	13,97
0,315	8,89
0,16	5,65
0,08	3,69
0,04478	3,11
0,03176	2,87
0,02252	2,63
0,01597	2,38
0,01136	1,90
0,00833	1,51
0,00590	1,41
0,00417	1,31
0,00296	1,07
0,00210	0,92
0,00149	0,44
0,00086	0,44

d, mm	QIT1_P28_f (% Passant)
28	100
19	91,29
14	82,99
10	76,58
5	59,90
2,5	45,61
1,25	31,86
0,63	21,50
0,315	14,73
0,16	9,99
0,08	6,47
0,03975	3,57
0,02866	2,90
0,02052	2,46
0,01476	1,84
0,01051	1,56
0,00772	1,34
0,00552	0,94
0,00394	0,56
0,00281	0,22
0,00199	0

Tableau A.6.1 (suite) : Distribution granulométrique initiale pour les échantillons testés

d, mm	QIT1_P28_f (% Passant)
28	100
25	97,36
19	93,14
14	88,03
10	82,14
5	60,21
2,5	40,05
1,25	25,05
0,63	15,63
0,315	9,95
0,16	6,33
0,08	4,13
0,04478	2,15
0,03176	1,98
0,02252	1,82
0,01597	1,65
0,01136	1,31
0,00833	1,04
0,00590	0,98
0,00417	0,91
0,00296	0,74
0,00210	0,64
0,00149	0,30
0,00086	0,27

d, mm	QIT1_P19_f (% Passant)
19	100,00
14	94,27
10	87,55
5	67,47
2,5	51,33
1,25	35,90
0,63	24,28
0,315	16,73
0,16	11,30
0,08	7,27
0,04519	5,11
0,03236	4,38
0,02315	3,68
0,01652	3,10
0,01367	2,66
0,00865	2,19
0,00618	1,60
0,00440	1,09
0,00311	0,77
0,00220	0,66
0,00156	0,55
0,00090	0,26

d, mm	QIT1_P10_f (% Passant)
10	100
5	70,96
2,5	51,93
1,25	35,25
0,63	23,89
0,315	16,33
0,16	11,06
0,08	7,61
0,03988	4,34
0,03140	4,03
0,02240	3,08
0,01592	2,52
0,01138	1,26
0,00833	1,07
0,00590	0,76
0,00418	0,57
0,00296	0,44
0,00210	0,19
0,00149	0,06

d, mm	QIT1_P5_f (% Passant)
5	100
2,5	73,18
1,25	49,67
0,63	33,67
0,315	23,02
0,16	15,58
0,08	10,72
0,03988	6,12
0,03140	5,68
0,02240	4,35
0,01592	3,55
0,01138	1,77
0,00833	1,51
0,00590	1,06
0,00418	0,80
0,00296	0,62
0,00210	0,27
0,00149	0,09

d, mm	QIT1_P2_f (% Passant)
2	100
1,25	75,52
0,63	48,62
0,315	32,69
0,16	21,99
0,08	14,91
0,04443	9,34
0,0319	7,73
0,0229	6,05
0,0164	4,57
0,0117	3,67
0,0085	2,64
0,0061	1,93
0,0044	1,29
0,0031	0,74
0,0022	0,32
0,0010	0,00

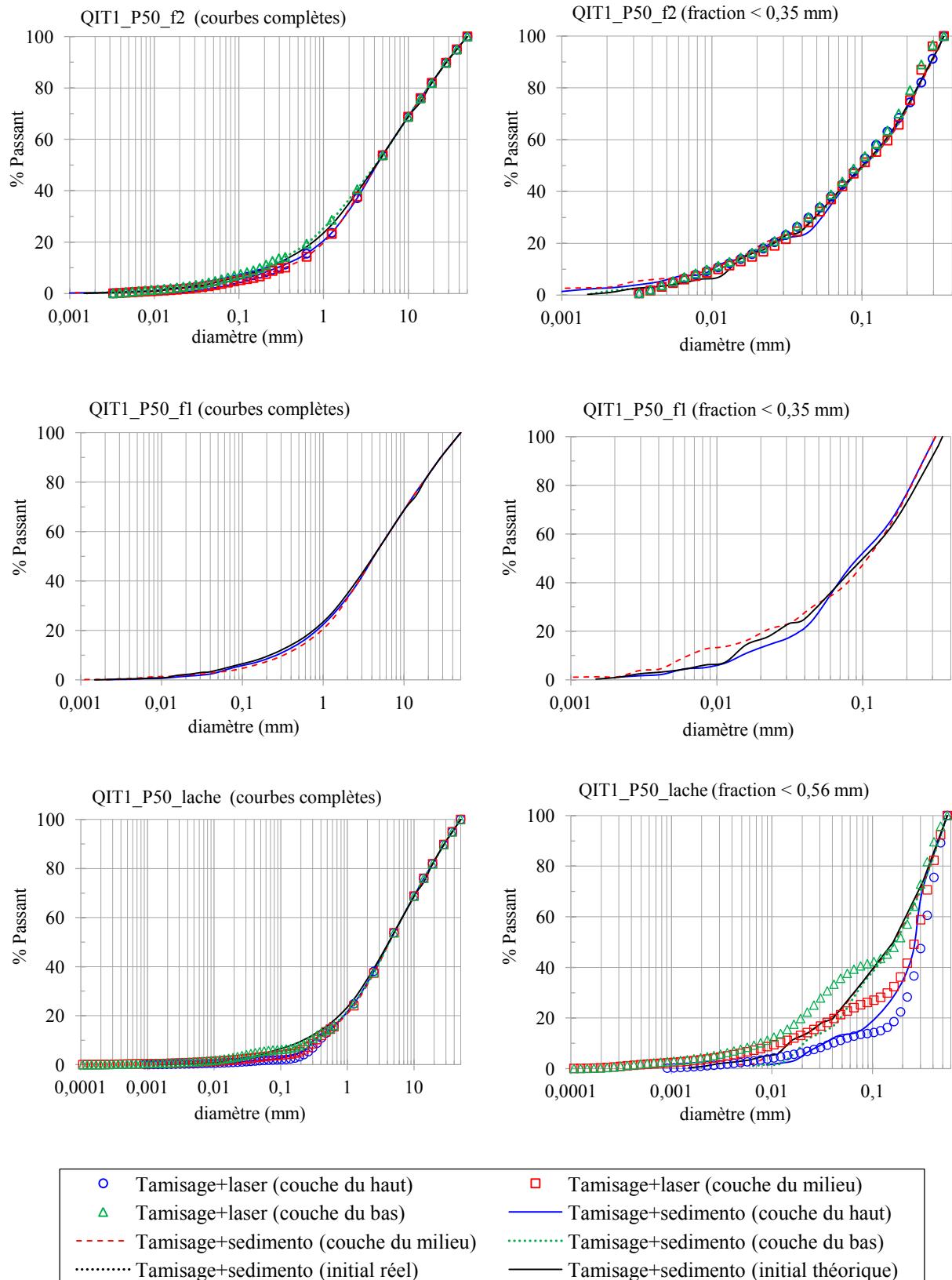


Figure A.6.1 : Ensemble des courbes granulométriques pour les échantillons testés.

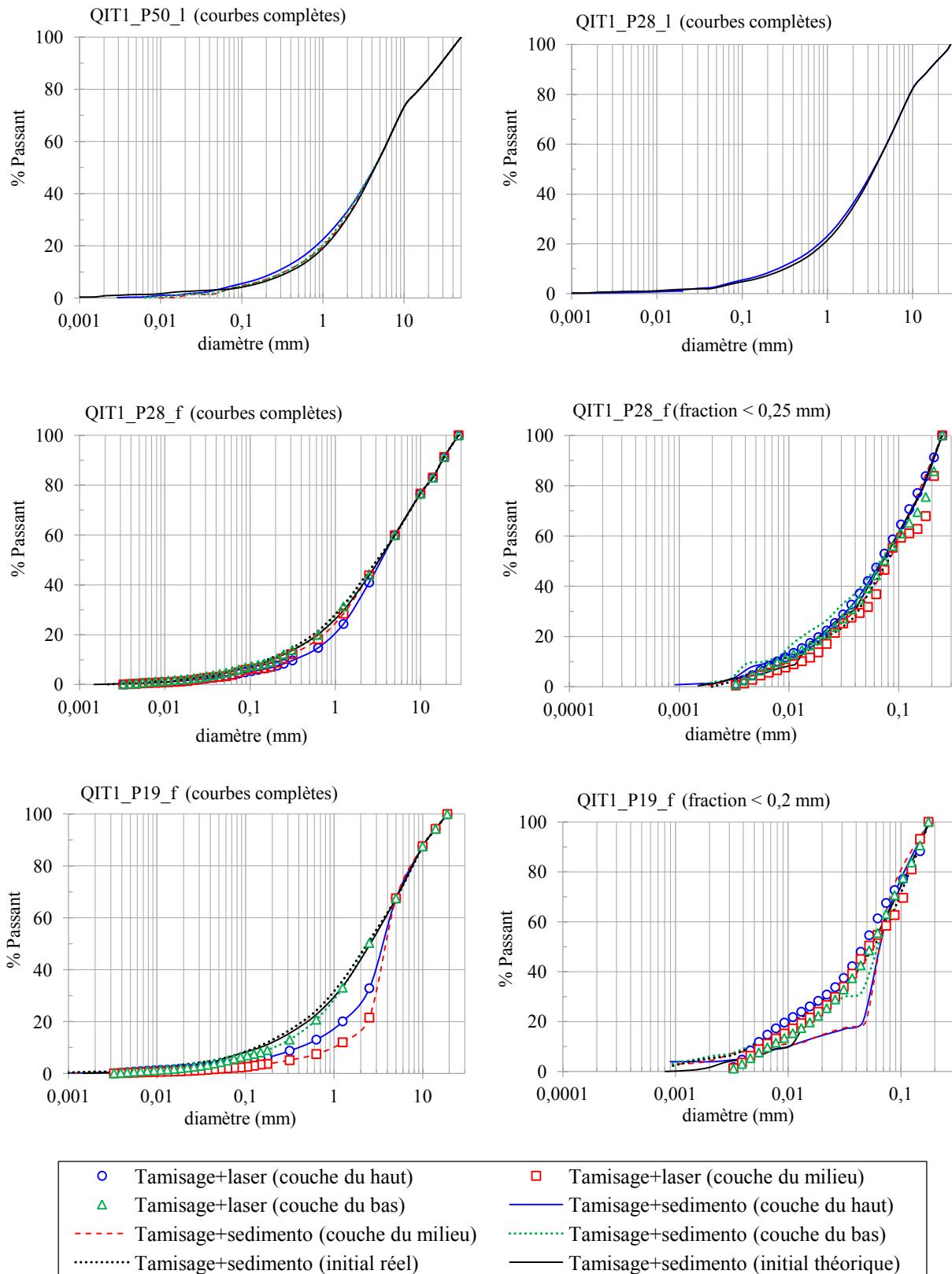


Figure A.6.1 (suite): Ensemble des courbes granulométriques pour les échantillons testés.

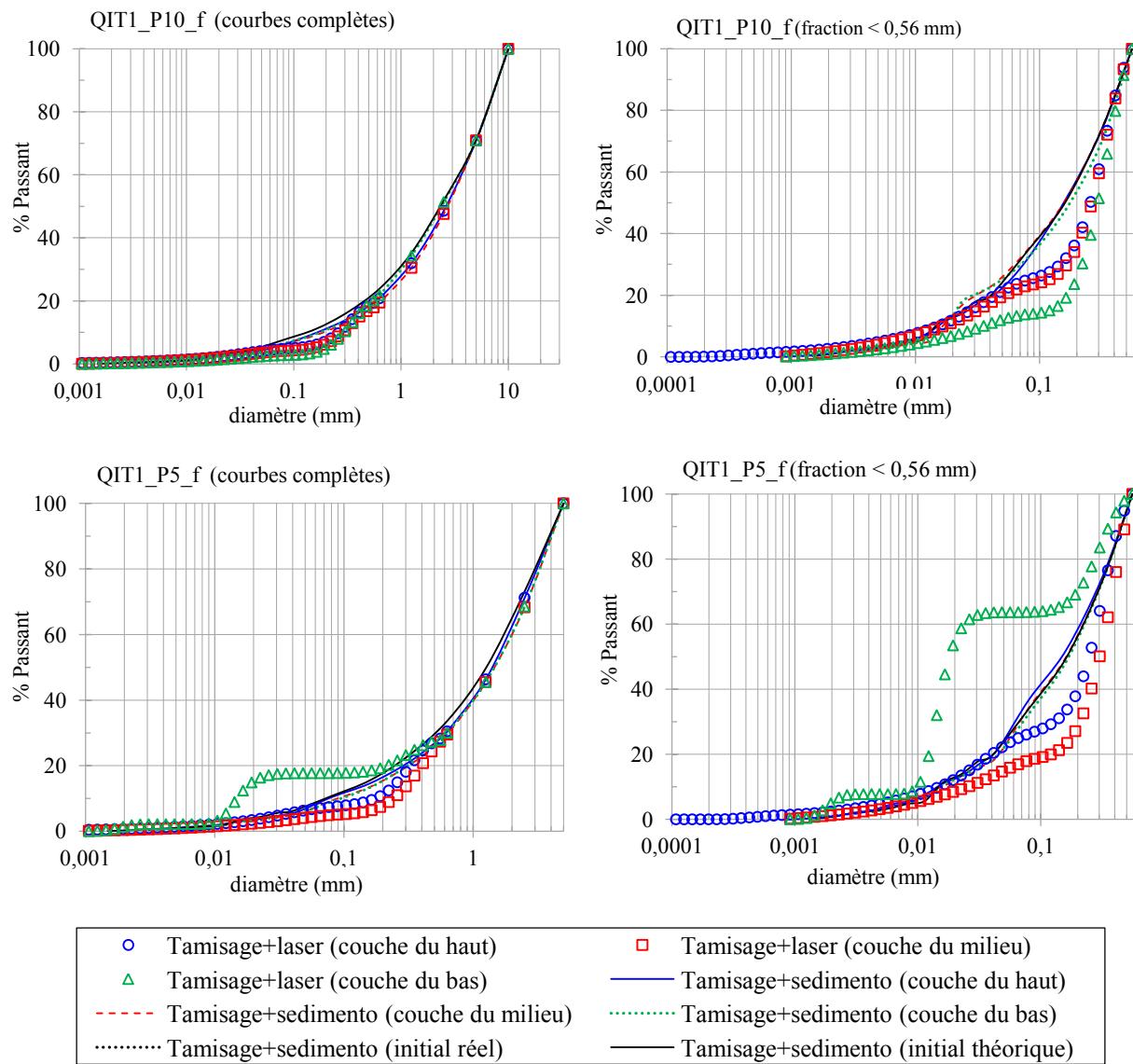


Figure A.6.1 (suite): Ensemble des courbes granulométriques pour les échantillons testés.

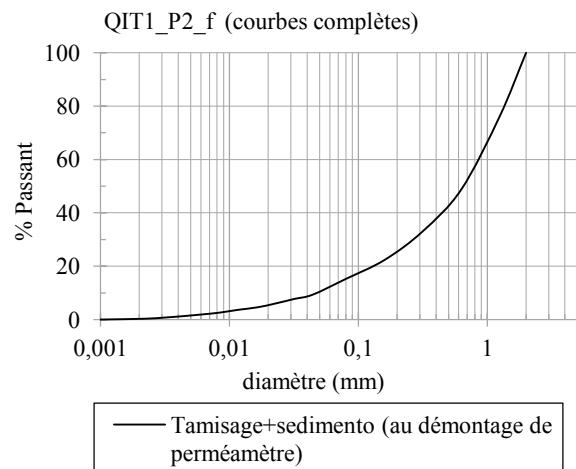


Figure A.6.1 (suite et fin): Ensemble des courbes granulométriques pour les échantillons testés.

ANNEXE 7 : Courbes granulométriques des matériaux supplémentaires (mélange Sigma-Demers et sable filtrant).

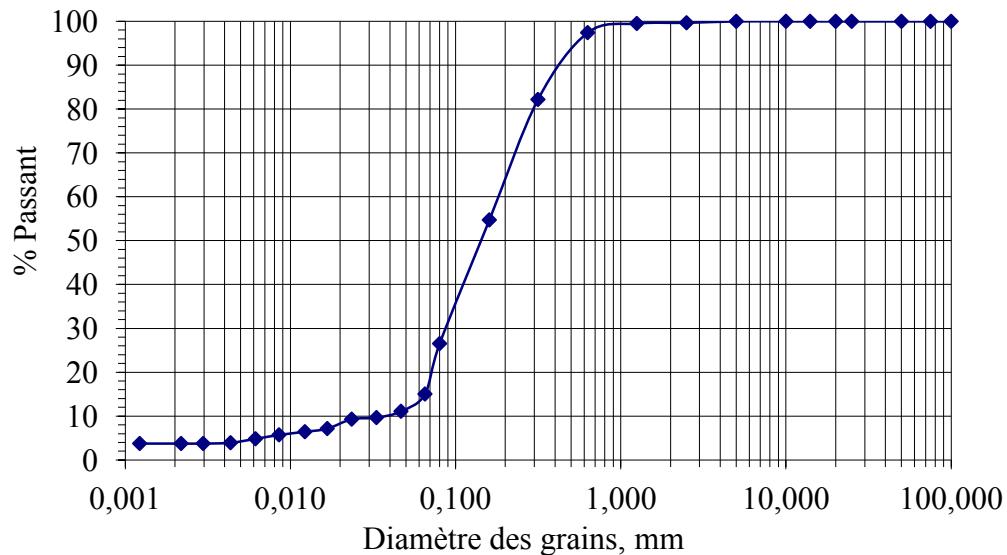


Figure A7.1 : Courbe granulométrique du mélange Sigma-Demers utilisé pour valider les résultats des essais de perméabilité en colonnes.

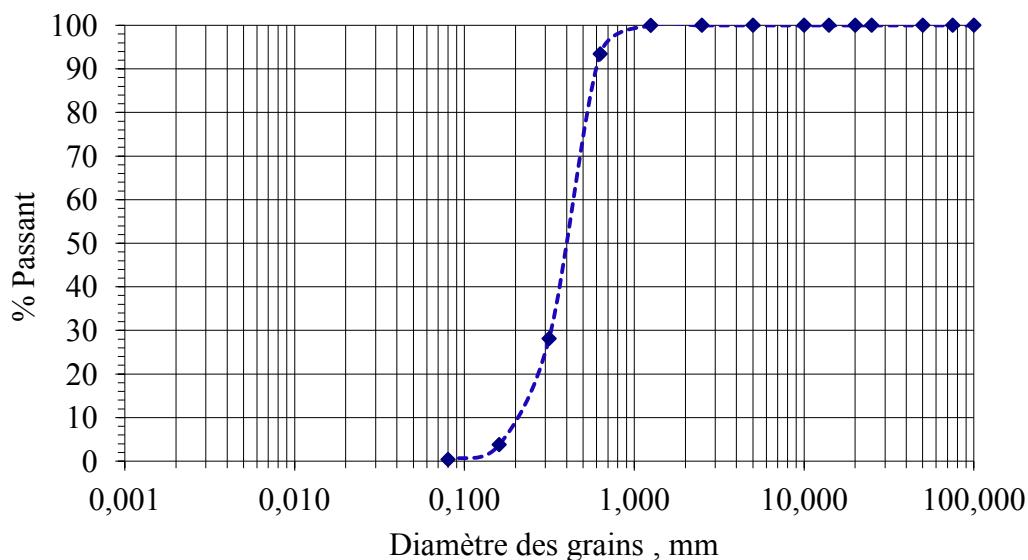


Figure A7.2 : Courbe granulométrique du sable filtrant utilisé dans la présente étude.

Tableau A7.1 : Distribution granulométrique du mélange Sigma-Demers.

d, mm	% Passant
5,000	100,0
2,500	99,7
1,250	99,5
0,630	97,4
0,315	82,2
0,160	54,7
0,080	26,5
0,0652	15,0
0,0467	11,1
0,0332	9,7
0,0235	9,3
0,0167	7,2
0,0122	6,4
0,0085	5,7
0,0061	4,8
0,0043	3,9
0,0030	3,8
0,0022	3,8
0,0012	3,8

Tableau A7.2 : Distribution granulométrique du sable filtrant.

d, mm	% Passant
1,250	100,0
0,630	93,4
0,315	28,1
0,160	3,8
0,080	0,4

ANNEXE 8 : Résultats des essais de drainage.

Échantillon	QIT1_P50_f1
Masse initiale de la colonne (kg)	232,35
Masse finale de la colonne (kg)	218,7
Longueur de la colonne (cm)	97,34
Sommet du matériau p/r au plancher (cm)	102,94
Épaisseur de l'échantillon (cm)	83,94
Aire de la section de la colonne (cm ²)	665,08
Sortie d'eau p/r plancher (cm)	29

Temps (sec)	mesure	# bêcher	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
			bêcher	bêcher +eau	eau	mesuré	cumulé	(mL/min)
30	30	C1-1	81,4	767,6	692	694	694	1387,9
60	30	C1-2	81,2	771	689,8	691,8	1385,8	1383,5
90	30	C1-3	81,2	772,9	691,7	693,7	2079,5	1387,3
120	30	C1-4	81,3	759,1	677,8	679,7	2759,2	1359,5
150	30	C1-5	81,2	756,7	675,5	677,4	3436,6	1354,8
180	30	C1-6	81,3	741,7	660,4	662,3	4098,9	1324,6
240	60	B-2	172,8	1482,6	1309,8	1313,5	5412,4	1313,5
300	60	B-3	172,8	1453,5	1280,7	1284,3	6696,7	1284,3
360	60	B-4	172,9	1424,5	1251,6	1255,2	7951,9	1255,2
420	60	B-2	172,8	1229,2	1056,4	1059,4	9011,3	1059,4
480	60	B-3	172,8	949,2	776,4	778,6	9789,9	778,6
540	60	B-4	172,9	702,1	529,2	530,7	10320,6	530,7
600	60	B-2	172,8	532	359,2	360,2	10680,8	360,2
720	120	B-3	172,8	588	415,2	416,4	11097,2	208,2
840	120	B-4	172,9	402,6	229,7	230,4	11327,6	115,2
960	120	B-2	172,8	312,3	139,5	139,9	11467,5	69,9
1200	240	B-3	172,8	357,8	185	185,5	11653	46,4
1500	300	B-4	172,9	324,2	151,3	151,7	11804,7	30,3
1800	300	B-2	172,8	292,1	119,3	119,6	11924,3	23,9
2400	600	B-3	172,8	369,4	196,6	197,2	12121,5	19,7
3000	600	B-4	172,9	299,8	126,9	127,3	12248,8	12,7
3600	600	B-2	172,8	271,4	98,6	98,9	12347,7	9,9
5400	1800	B-3	172,8	377,7	204,9	205,5	12553,2	6,8
7260	1860	B-4	172,9	319,4	146,5	146,9	12700,1	4,7
11161	3901	B-2	172,8	383,2	210,4	211	12911,1	3,2
82200	71039	T1	262,4	1248,1	985,7	988,5	13899,6	0,8
167280	85080	T1	279,8	546,2	266,4	267,2	14166,8	0,2
251220	83940	T1	546,2	675,1	414,3	415,5	14582,3	0,3
777600	526380	T1	675,1	819,2	144,1	144,5	14726,8	0
1468800	691200	T1	278	278	0	0	14726,8	0

Échantillon	QIT1_P50_1
Masse initiale de la colonne (kg)	230,1
Masse finale de la colonne (kg)	247,13
Longueur de la colonne (cm)	98,16
Sommet du matériau p/r au plancher (cm)	106,04
Épaisseur de l'échantillon (cm)	84,51
Aire de la section de la colonne (cm ²)	672,83
Sortie d'eau p/r plancher (cm)	33

Temps (sec)	mesure	# bécher	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
			bécher	bécher + eau	eau	mesuré	cumulé	(mL/min)
20	20	C1-1	81,2	1307,3	1231,9	1235,3	1235,3	3705,82
40	20	C1-2	81,1	1300,2	1219,1	1222,4	2457,7	3667,31
60	20	C1-3	81,2	1281,1	1199,9	1203,2	3660,9	3609,55
80	20	C1-4	81,2	1248,5	1167,3	1170,5	4831,4	3511,49
100	20	C1-5	81,2	1249	1167,8	1171,0	6002,4	3512,99
120	20	C1-6	81,3	1205,8	1124,5	1127,6	7130,0	3382,73
140	20	C	98,1	1219,9	1121,8	1124,9	8254,8	3374,61
160	20	A	97,9	1067,1	969,2	971,9	9226,7	2915,56
180	20	Grand met	429,7	1279,6	849,9	852,2	10078,9	2556,68
200	20	Petit met	307,8	960,1	652,3	654,1	10733,0	1962,26
240	40	D	84,2	1068,6	984,4	987,1	11720,1	1480,64
300	60	C1-1	81,2	786,9	705,7	707,6	12427,7	707,63
360	60	C1-2	81,1	430,4	349,3	350,3	12778,0	350,26
540	60	C1-2	81,2	708,1	626,9	628,6	13406,6	209,54
780	240	C1-1	81,4	424,8	343,4	344,3	13750,9	86,09
1020	240	C1-2	81,2	298,5	217,3	217,9	13968,8	54,47
1260	240	C1-4	81,2	233,8	152,6	153,0	14121,9	38,25
1560	300	C1-1	81,4	229,4	148	148,4	14270,3	29,68
1860	300	C1-4	81,3	318,3	237	237,6	14507,9	47,53
2220	360	C1-1	81,4	280,6	199,2	199,7	14707,7	33,29
3000	780	C1-2	81,2	213,2	132	132,4	14840,0	10,18
3660	660	C1-4	81,3	194,6	113,3	113,6	14953,6	10,33
4320	660	C1-2	81,3	257,2	175,9	176,4	15130,0	16,03
5640	1320	C1-4	81,3	209	127,7	128,0	15258,1	5,82
6960	1320	C1-1	81,5	206	124,5	124,8	15382,9	5,67
8400	1440	C1-4	81,6	266,2	184,6	185,1	15568,0	7,71
10800	2400	C1-1	81,5	192,2	110,7	111,0	15679,0	2,78
13200	2400	Ballon 21	234,2	748,5	799,7	801,9	16480,9	20,05
76380	63180	Ballon 21	175	267	92	92,3	16573,1	0,09
87600	11220	Ballon 21	187,7	202,2	14,5	14,5	16587,7	0,08
91920	4320	Ballon 5	175,4	353,7	178,3	178,8	16766,5	2,48
158700	66780	Ballon 5	188,4	344,5	156,1	156,5	16923,0	0,14

suite

Temps (sec)		# bécher	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
mesure	entre les mesures		bécher	bécher + eau	eau	mesuré	cumulé	(mL/min)
417000	132240	tare	187,9	197,6	9,7	9,7	17000,2	0,00
443760	26760	tare	175,9	196,4	20,5	20,6	17020,8	0,05
594480	150720	tare	196,4	207,6	11,2	11,2	17032,0	0,00
613620	19140	tare	207,6	210,1	2,5	2,5	17034,5	0,01
681960	68340	tare	210,1	231,05	20,95	21,0	17055,5	0,02
772500	90540	tare	231,05	231,4	0,35	0,4	17055,9	0,00
1021320	248820	tare	231,4	236	4,6	4,6	17060,5	0,00
1107720	86400	tare	236	240,7	4,7	4,7	17065,2	0,00
1205100	97380	tare	240,7	248	7,3	7,3	17072,5	0,00
1294800	89700	tare	248	248	0	0,0	17072,5	0,00
1377600	82800	tare	248	248	0	0,0	17072,5	0,00

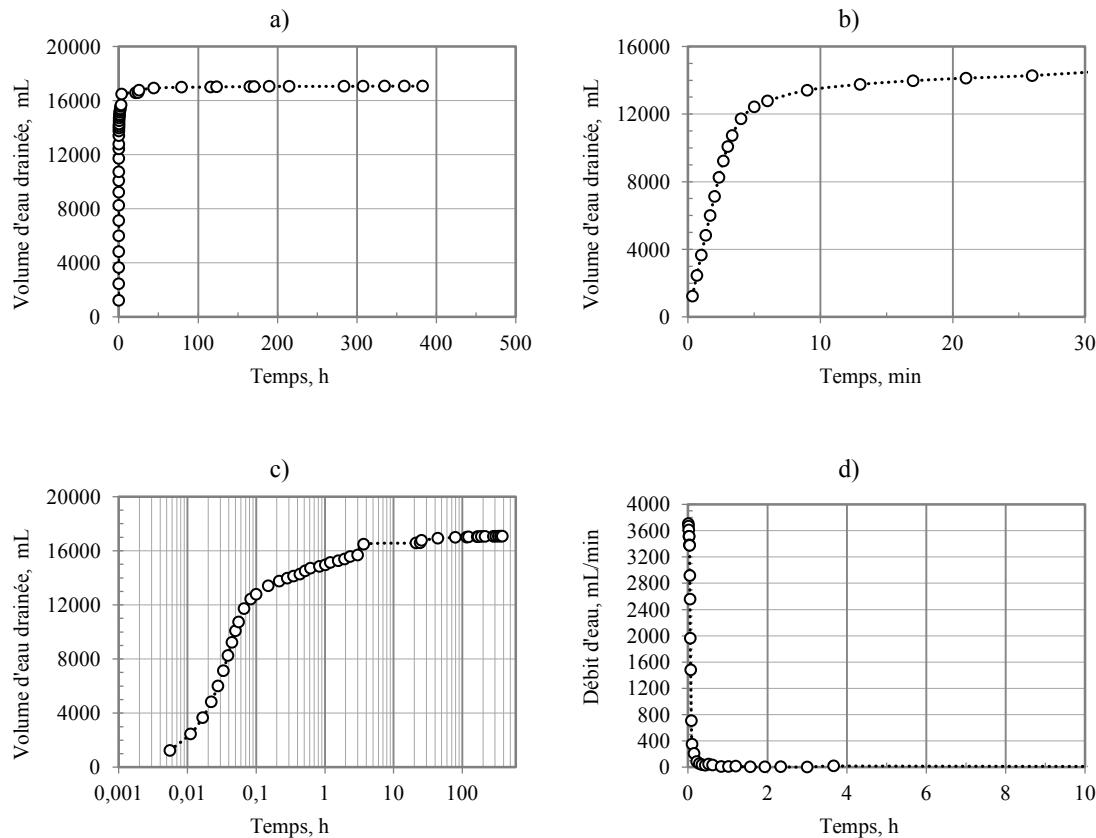


Figure A8.1 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P50_1 : a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique).

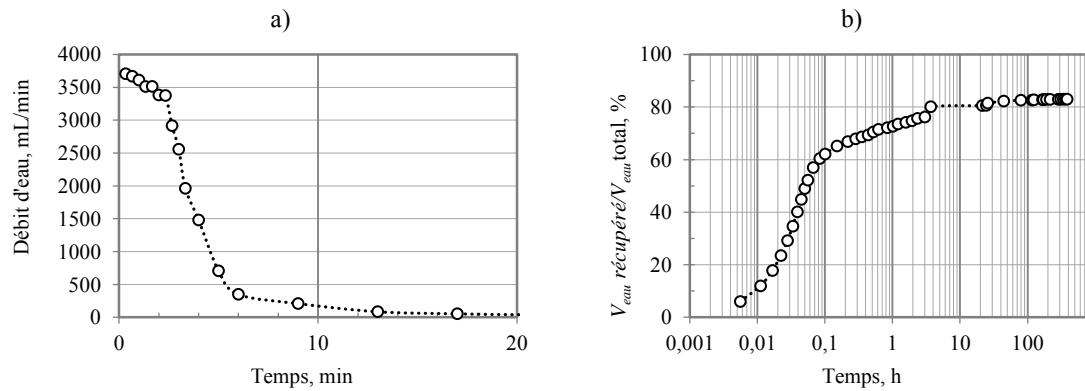


Figure A8.2 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P50_1 : a) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; b) V_{eau} récupérée/ V_{eau} total (dans la colonne) en fonction du temps.

Échantillon	QIT1_P19_f
Masse initiale de le colonne (kg)	218,8
Masse finale de la colonne (kg)	201,9
Longueur de la colonne (cm)	98,56
Sommet du matériau p/r au plancher (cm)	114,84
Épaisseur de l'échantillon (cm)	84,84
Aire de la section de la colonne (cm ²)	672,47
Sortie d'eau p/r plancher (cm)	35,5

Temps (sec)	mesure	# bécher	Masse (g)			Volume d'eau (mL)		Débit d'eau
			bécher	bécher +eau	eau	mesuré	cumulé	(mL/min)
10	10	C1-1	81,4	734,0	658,4	660,2	660,2	3961,1
20	10	C1-2	81,2	734,0	652,8	654,6	1314,7	3927,4
30	10	C1-3	81,2	752,4	671,2	673,0	1987,8	4038,1
40	10	C1-4	81,3	734,7	653,4	655,2	2642,9	3931,0
50	10	C1-5	81,2	725,0	643,8	645,5	3288,5	3873,3
60	10	C1-6	81,3	722,0	640,7	642,4	3930,9	3854,6
70	10	D	84,1	716,0	631,9	633,6	4564,5	3801,7
80	10	Gr.met.	433,2	1007,6	574,4	576,0	5140,5	3455,7
90	10	D2	154,2	835,8	681,6	683,4	5823,9	4100,7
100	10	D4	158,9	767,9	609,0	610,6	6434,6	3663,9
240	140	18+C1+C2	488,5	5151,7	4663,2	4675,8	11110,4	2003,9
360	120	18+16C	437,1	2390,4	1953,3	1958,6	13069,0	979,3
1080	720	18	325,9	1354,2	1028,3	1031,1	14100,1	85,9
2340	1260	D	84,1	570,0	485,9	487,2	14587,3	23,2
7620	5280	Gr.met.	433,2	1112,5	679,3	681,1	15268,4	7,7
10860	3240	D	84,1	277,5	193,4	193,9	15462,3	3,6
83880	73020	Gr.met.nuit	492,1	1561,1	1069,0	1071,9	16534,2	0,9
167400	83520	Gr.met.nuit	504,4	750,4	246,0	246,7	16780,9	0,2
607680	440280	Gr.met.nuit	750,4	930,4	180,0	180,5	16961,4	0,0

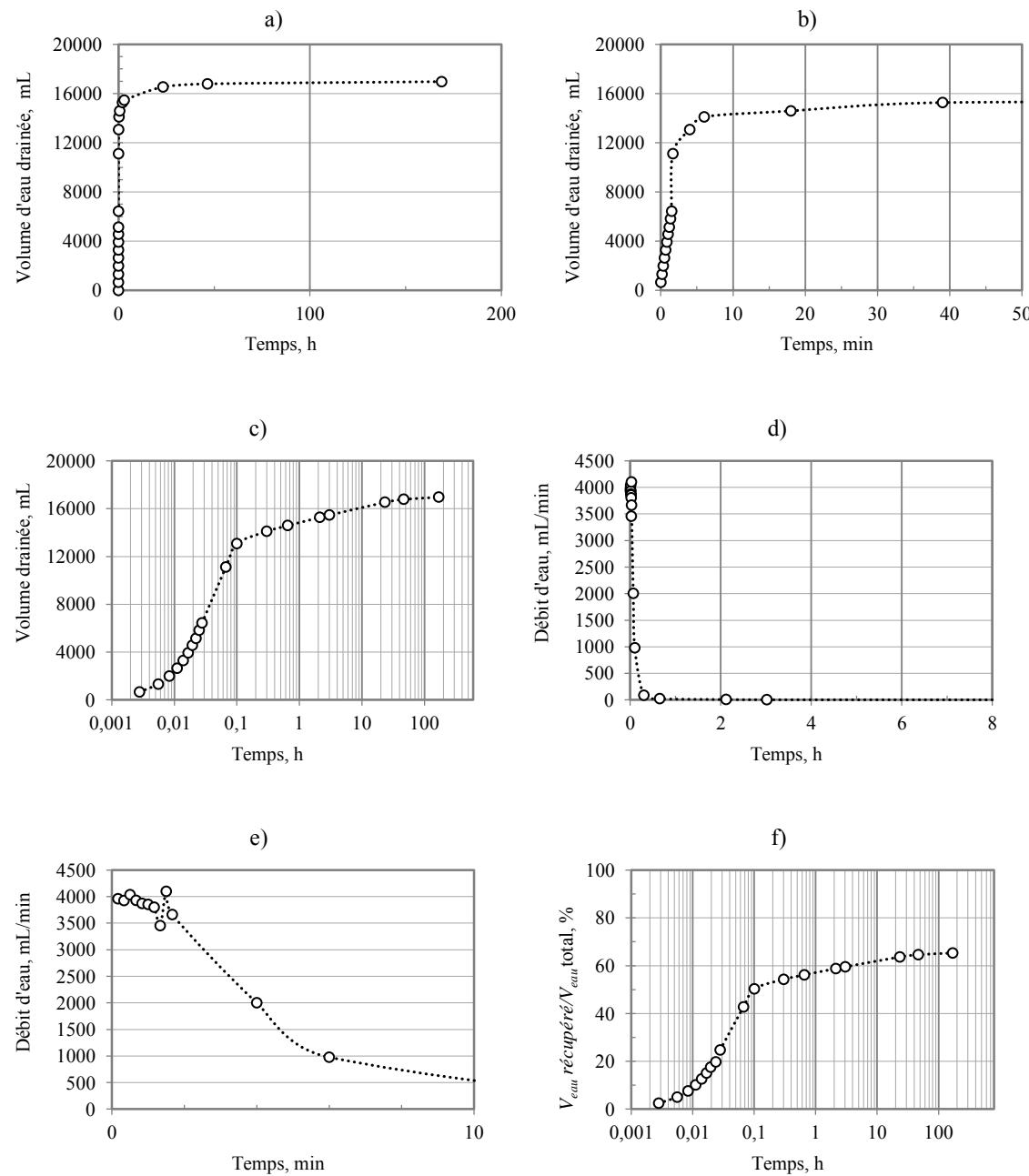


Figure A8.3 : Résultats de l'essai de drainage pour la colonne QIT1_P19_f: a) volume d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); b) volume d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; c) volume d'eau drainée en fonction du temps en échelle logarithmique; d) débit d'eau drainée en fonction du temps (échelle arithmétique); e) débit d'eau drainée en fonction du temps avec le début de l'essai présenté en détail; f) $V_{eau \text{ récupérée}}/V_{eau \text{ total}}$ (dans la colonne) en fonction du temps.

ANNEXE 9 : Courbes de rétention d'eau expérimentales.

Tableau A9.1 : Données sur les CRE expérimentales (obtenues au démontage des colonnes).

QIT1_P50_f2		QIT1_P50_f1		QIT1_P50_lâche		QIT1_P50_1	
Succion, cm	θ	Succion, cm	θ	Succion, cm	θ	Succion, cm	θ
72,0	0,051	76,5	0,064	51,9	0,045	70,3	0,053
65,3	0,051	72,5	0,057	44,3	0,050	67,0	0,044
59,5	0,057	67,7	0,066	36,6	0,051	62,9	0,046
53,3	0,057	63,3	0,065	29,3	0,056	58,4	0,050
44,9	0,059	58,7	0,065	22,9	0,071	53,9	0,052
37,1	0,064	54,4	0,065	18,0	0,076	49,5	0,048
31,5	0,068	49,9	0,066	14,0	0,063	44,8	0,049
23,0	0,070	45,5	0,065	9,7	0,104	40,0	0,051
14,2	0,072	41,1	0,064	3,7	0,30	35,6	0,061
8,3	0,084	36,8	0,072	0,0	0,30	30,9	0,055
3,4	0,122	32,0	0,069			26,2	0,065
0,7	0,21	25,2	0,068			21,7	0,062
0,0	0,21	18,6	0,069			17,6	0,062
		13,9	0,073			14,4	0,071
		8,2	0,090			11,7	0,071
		2,2	0,18			8,8	0,071
		0,0	0,18			6,4	0,073
						3,7	0,089
						1,2	0,117
						0,3	0,22
						0,0	0,22

QIT1_P28_f		QIT1_P28_l		QIT1_P19_f	
Succion, cm	θ	Succion, cm	θ	Succion, cm	θ
74,7	0,056	68,3	0,053	68,5	0,061
67,1	0,061	64,1	0,055	63,7	0,064
61,7	0,059	60,1	0,049	59,6	0,072
55,7	0,061	55,9	0,053	55,3	0,056
48,8	0,064	51,5	0,050	50,6	0,071
41,1	0,067	46,8	0,058	46,0	0,065
30,4	0,066	42,3	0,058	40,6	0,057
18,4	0,074	37,6	0,061	35,0	0,075
9,3	0,103	33,1	0,059	30,0	0,069
2,7	0,24	28,6	0,057	24,2	0,070
0,0	0,24	24,2	0,061	18,0	0,081
		19,9	0,065	12,6	0,077
		19,9	0,069	8,0	0,099
		14,5	0,082	4,7	0,223
		8,5	0,140	1,8	0,27
		2,8	0,20	0,0	0,27
		0,0	0,20		

QIT1_P10_f	
Succion, cm	θ
68,2	0,067
62,1	0,070
56,2	0,070
49,9	0,072
42,9	0,073
36,3	0,075
30,1	0,076
23,6	0,081
17,8	0,089
13,6	0,100
9,5	0,115
2,5	0,28
0,0	0,28

QIT1_P5_f	
Succion, cm	θ
125,4	0,084
111,6	0,077
95,5	0,082
77,7	0,086
63,1	0,098
50,4	0,106
38,2	0,113
28,8	0,122
18,6	0,148
10,9	0,230
4,4	0,31
0,0	0,31

ANNEXE 10 : Résultats des études préliminaires.

Données de laboratoire sur les stériles (QIT1) de la mine Tio, Havre-St-Pierre (Gaillet, 2007).

Tableau A10.1: Conductivité hydraulique saturée des stériles de la mine Tio, théoriques et mesurées des différentes colonnes (Gaillet, 2007).

QIT1	k_{sat} KC (cm/s)	k_{sat} KCM (cm/s)	k_{sat} charge constante (cm/s)			k_{sat} charge variable (cm/s)		
			moyen	min	max	moyen	min	max
Passant 50 mm	1,7E-03	1,0E-03	2,0E-01	1,1E-01	2,5E-01	6,2E-03	2,4E-03	1,5E-02
Passant 37,5mm	9,9E-03	7,0E-03	8,3E-01	3,0E-01	1,5E+00	5,6E-03	5,3E-03	5,9E-03
Passant 28 mm	7,9E-03	2,1E-03	2,5E-01	4,7E-02	6,6E-01	4,8E-02	3,6E-02	5,8E-02
Passant 10 mm	8,4E-04	2,5E-03	2,0E-03	3,4E-06	5,6E-03	8,0E-04	6,1E-04	1,0E-03

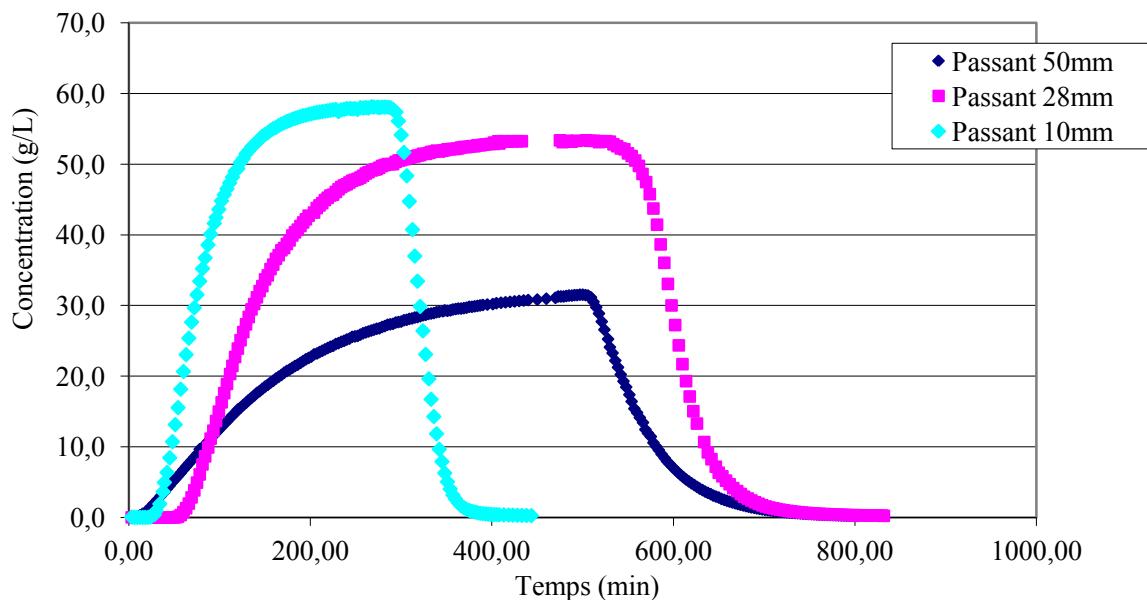
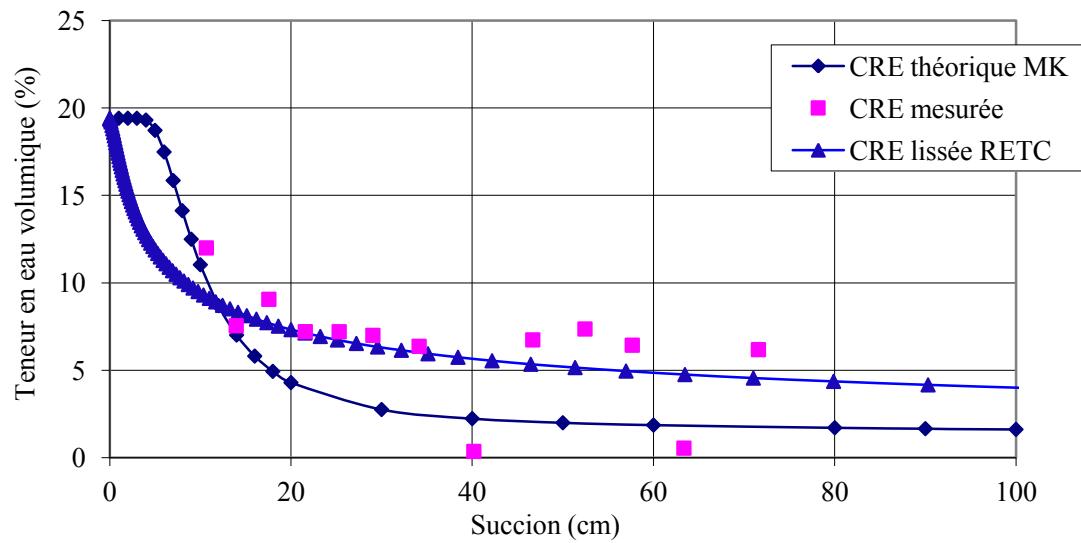


Figure A10.1 : Courbes d'essai de traceur pour les stériles de la mine Tio QIT1 (Gaillet, 2007) : quantité de sel utilisée pour chaque colonne : 4kg/60L = 66,6g/L pour le passant 10 mm et le passant 28 mm, et 2kg/60L = 33,3g/L pour le passant 50 mm.

A.



B.

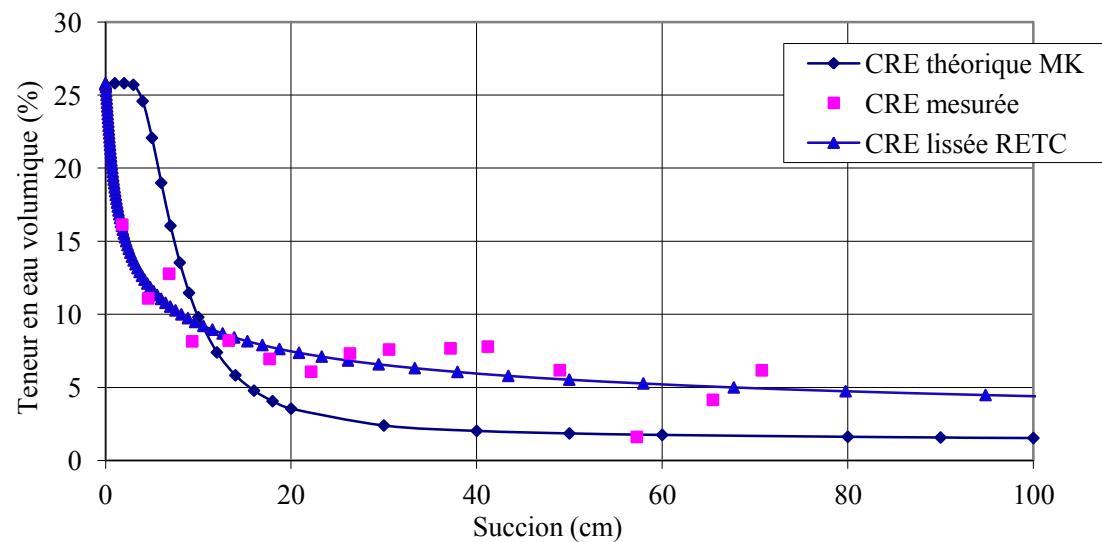


Figure A10.2 : Courbes de rétention d'eau (CRE) des stériles de la mine Tio QIT1 (Gaillot, 2007) : **A** : Passant 50 mm ; **B** : Passant 37,5 mm.

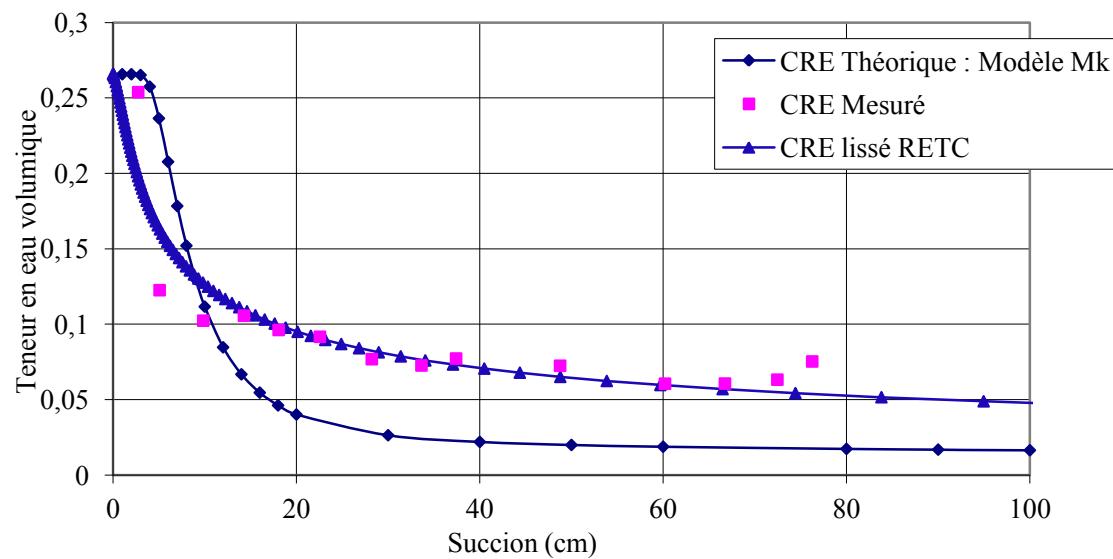


Figure A10.3 : Courbes de rétention d'eau (CRE) des stériles de la mine Tio QIT1 :

Passant 28 mm.

Données de laboratoire sur les stériles (QIT2) de la mine Tio, Havre-St-Pierre (Bourrel, 2008).

Tableau A10.2 : Conductivité hydraulique saturée des stériles de la mine Tio (QIT2), théoriques et mesurées des différentes colonnes (Bourrel, 2008).

Matériau	k_{sat} (cm/s)							
	KC	KCM	Charge constante			Charge variable		
			moyen	max	min	moyen	max	min
QIT2 pass25	1,7E-02	2,0E-03	1,4E-01	1,7E-01	8,7E-02	5,4E-02	5,6E-02	5,3E-02
QIT2 pass10 geot	1,1E-02	5,9E-04	1,4E-02	1,9E-02	9,8E-03	1,4E-02	1,4E-02	1,3E-02
QIT2 pass19 reut	1,7E-02	1,8E-03	7,2E-02	2,9E-01	1,0E-02	2,8E-02	2,8E-02	2,8E-02
QIT2 tout passant	2,2E-02	2,9E-03	5,1E-02	1,5E-01	2,4E-02	3,3E-02	3,4E-02	3,1E-02

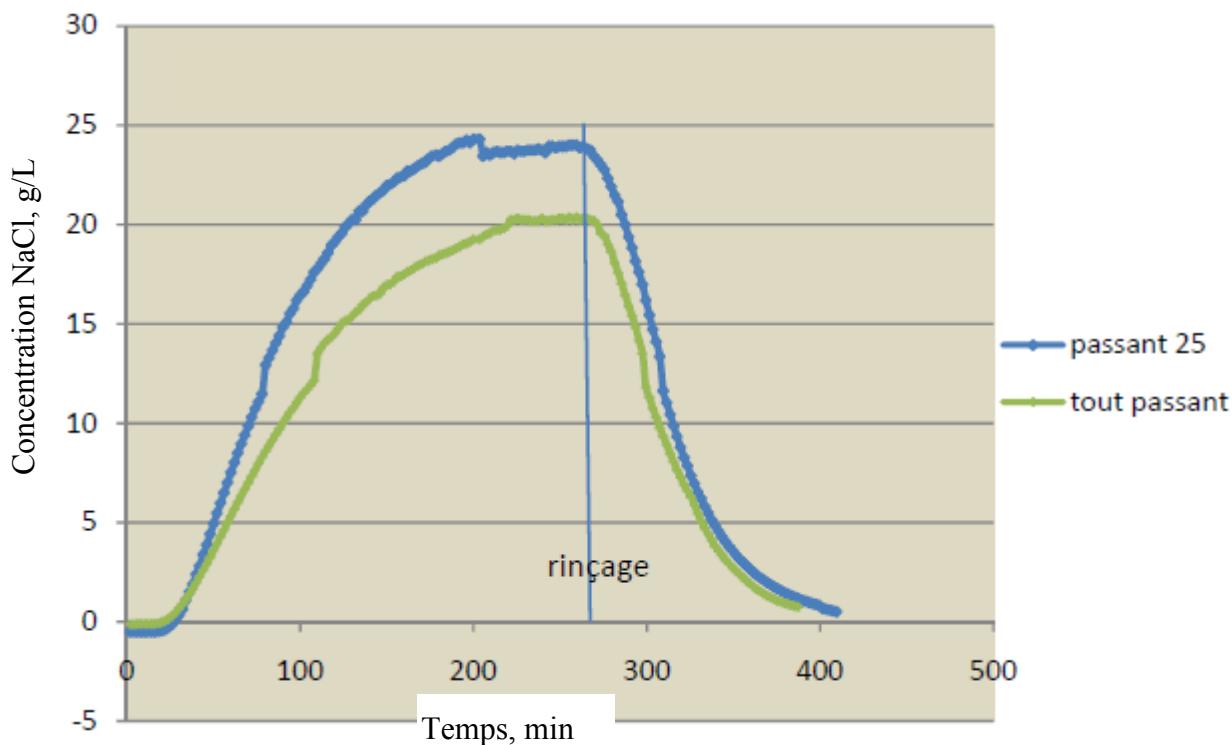


Figure A10.4 : Courbes d'essai de traceur pour les stériles de la mine Tio QIT2 (Bourrel, 2008).

Données de laboratoire sur les stériles de la mine Tio, Havre-St-Pierre (Intissar, 2009)

Tableau A10.3 : Propriétés physiques de base des matériaux dans des colonnes montées (Intissar, 2009).

Colonnes	D ₁₀ (cm)	D ₆₀ (cm)	C _U	Porosité moyenne au démontage	Densité relative
Passant 10 mm avec système d'électrodes (QIT2).	0,008	0,31	38,75	0,253	3,698
Passant 10 mm sans système d'électrode (QIT2)	0,008	0,31	38,75	0,269	3,698
Passant 10 mm, ilménite, avec système d'électrode (QIT1)	0,01	0,18	18	0,247	4,061
Colonne passant 19 mm (QIT2)	0,017	0,7	41,18	0,234	3,698

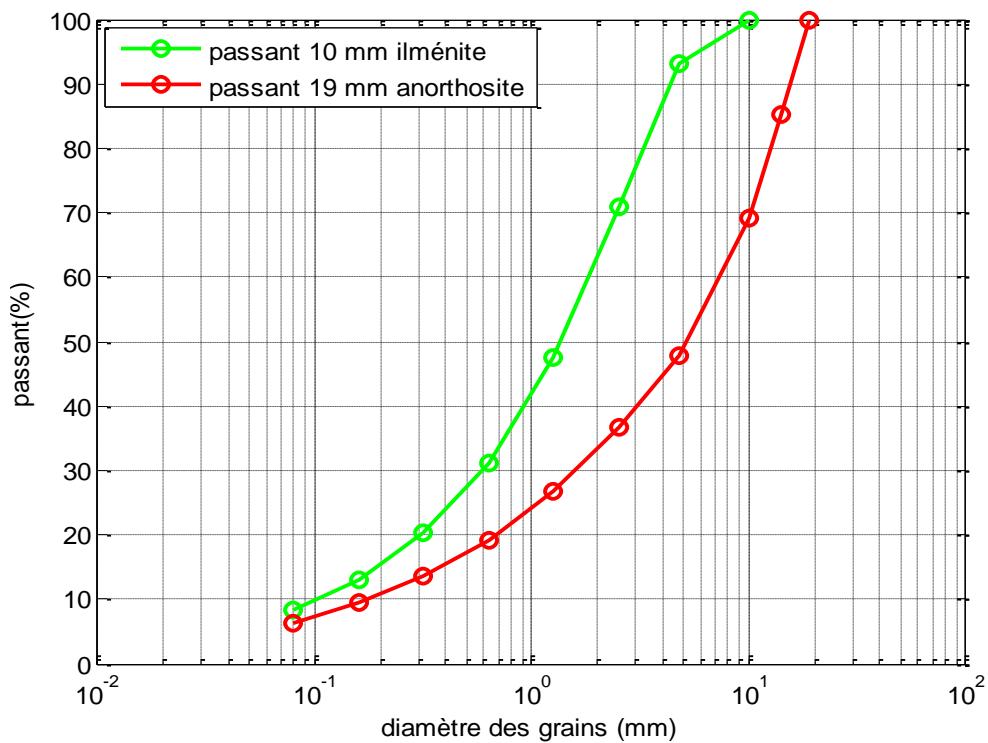


Figure A10.5 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie des matériaux utilisés dans les essais (passant 19 mm d'anorthosite (QIT2) et le passant 10 mm d'ilménite (QIT1)) (Intissar, 2009).

Tableau A10.4 : Comparaison des k_{sat} prédites et mesurées, pour les 4 colonnes montées (Intissar, 2009).

Colonnes	k_{sat} prédictive (cm/s)		k_{sat} : charge constante (cm/s) (4 essais)		k_{sat} : charge variable (cm/s) (4 essais)	
	KC	KCM	k_{sat} min	k_{sat} max	k_{sat} min	k_{sat} max
Colonne passant 10 mm avec le système d'électrodes	$1,15 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$
Colonne passant 10 mm sans système d'électrodes	$1,18 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$0,71 \times 10^{-2}$	$0,75 \times 10^{-2}$
Colonne passant 19 mm sans système des électrodes	$1,82 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-2}$	$4,71 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$
Colonne passant 10 mm, ilménite avec le système d'électrodes	$1,3 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-4}$	$9,85 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	$2,03 \times 10^{-2}$

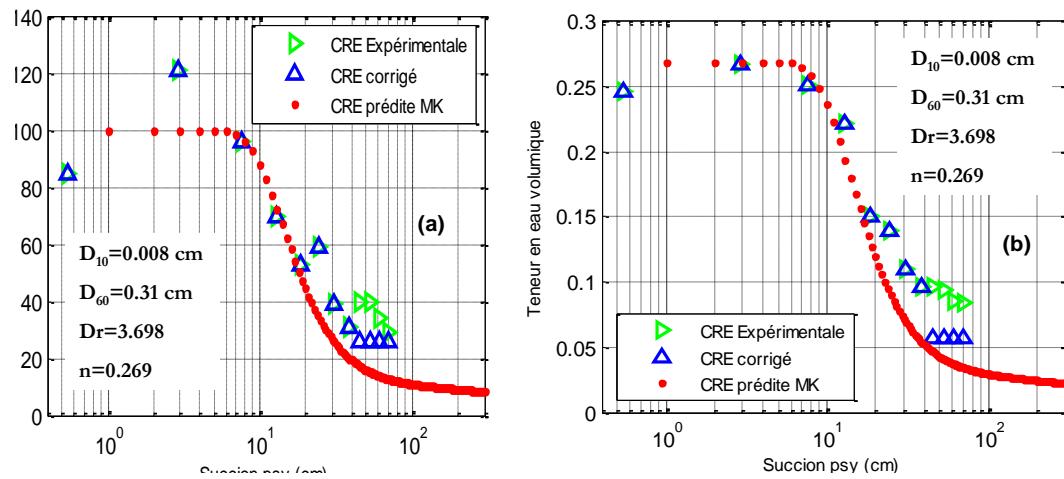


Figure A10.6 : Comparaison de la CRE mesurée et prédictie; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (sans système d'électrodes) (Intissar, 2009).

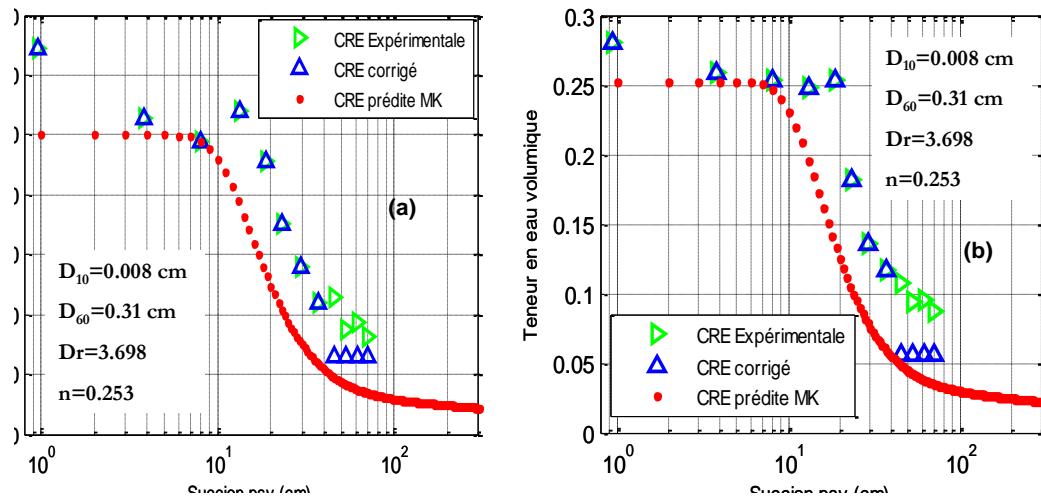


Figure A10.7 : Comparaison de la CRE mesurée et prédictie; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (avec système d'électrodes) (Intissar, 2009).

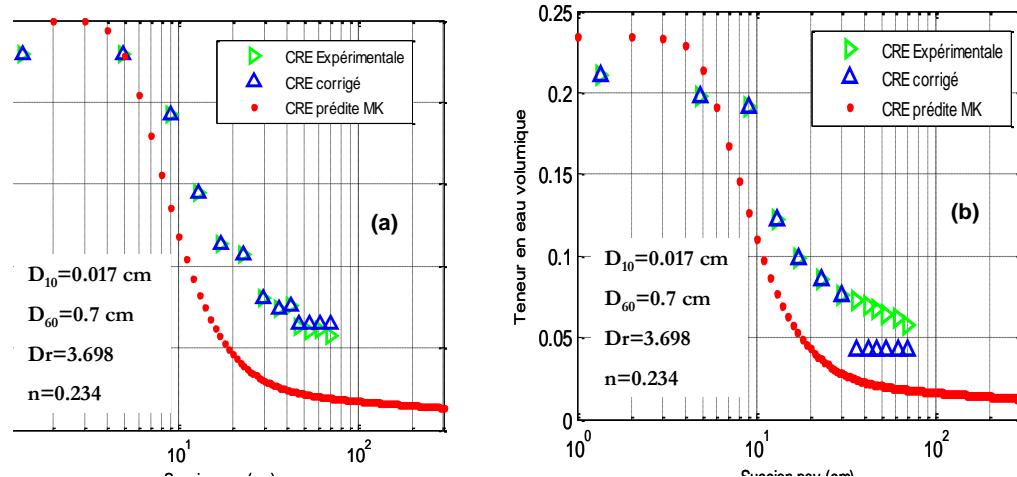


Figure A10.8 : Comparaison de la CRE mesurée et prédictée; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 19 mm (Intissar, 2009).

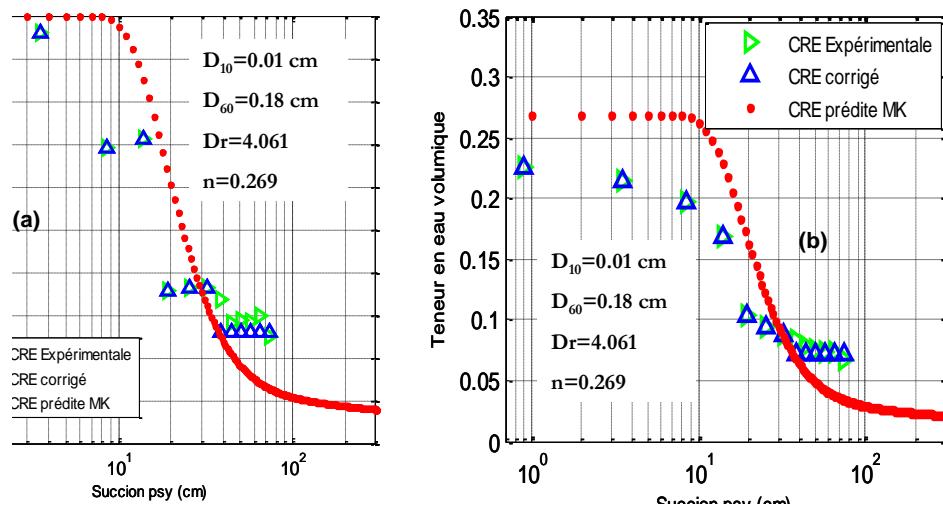


Figure A10.9 : Comparaison de la CRE mesurée et prédictée; (a) degré de saturation en fonction de la succion, (b) teneur en eau volumique en fonction de la succion, colonne avec le passant 10 mm (ilménite avec système d'électrodes) (Intissar, 2009).

Données de terrain sur les roches stériles de la mine Tio, Havre-St-Pierre (Lessard, 2011)

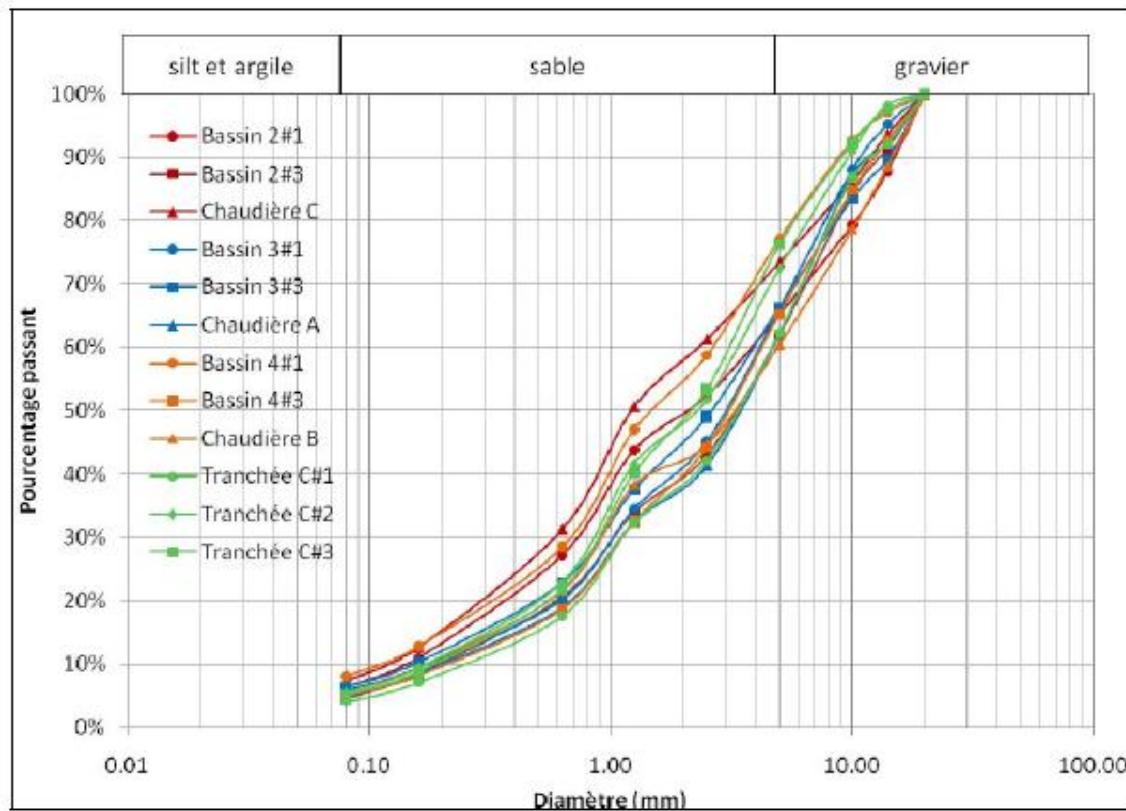


Figure A10.10 : Courbes granulométriques des matériaux prélevés dans la zone peu compactée de la halde Petit-Pas de la mine Tio (<20mm) (Lessard, 2011).

Tableau A10.6 : Paramètres issus des courbes granulométriques : stériles de la mine Ti (Lessard, 2011).

Échantillon	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _U (-)	C _c (-)	USCS
<i>Matériaux compactés</i>						
Bassin 2 #1	0.15	0.7	3.8	25.33	0.86	SP-SM
Bassin 2 #3	0.2	1.05	4.6	23.00	1.20	SW
Chaudière C(B2)	0.12	0.58	2.3	19.17	1.22	SW-SM
Bassin 3 #1	0.18	1.0	4.05	22.50	1.37	SW-SM
Bassin 3 #3	0.16	0.9	4.0	25.00	1.27	SW-SM
Chaudière A(B3)	0.19	1.15	4.7	24.74	1.48	SW
Bassin 4 #1	0.12	0.68	2.6	21.67	1.48	SW-SM
Bassin 4 #3	0.21	1.2	4.2	20.00	1.63	SW-SM
Chaudière B(B4)	0.16	0.9	4.95	30.94	1.02	SW-SM
Tranchée 1-C #1	0.24	1.1	4.6	19.17	1.10	SW
Tranchée 1-C #2	0.17	0.85	3.4	20.00	1.25	SW-SM
Tranchée 1-C #3	0.18	0.9	3	16.67	1.50	SW-SM
<i>Matériaux non-compactés</i>						
Bassin 5 #1	0.35	1.95	5	14.29	2.17	SW
Bassin 5 #3	0.29	1.8	5.4	18.62	2.07	SW
Chaudière E(B5)	0.28	1.5	5.6	20.00	1.43	SW
Bassin 6 #1	0.40	1.3	4.6	11.50	0.92	SP
Bassin 6 #3	0.39	1.9	6.1	15.64	1.52	SW
Chaudière D(B6)	0.24	1.05	3.6	15.00	1.28	SW
Bassin 7 #1	0.28	1.6	4.7	16.79	1.95	SW
Bassin 7 #3	0.24	1.3	3.7	15.42	1.90	SW
Chaudière F(B7)	0.17	0.9	3.7	21.76	1.29	SW-SM
Tranchée 2-NC #1	0.26	1.1	4.05	15.58	1.15	SW
Tranchée 2-NC #2	0.3	1.15	4.3	14.33	1.03	SW
Tranchée 2-NC #3	0.38	1.5	5.0	13.16	1.18	SW

Tableau A10.7 : Propriétés géotechniques des roches stériles de la mine Tio (Lessard, 2011)

<i>Échantillon</i>	ρ_d (g/cm^3)	n (%)	e (-)	S_r (%)	θ (-)
<i>Matériaux compactés</i>					
Bassin 2	1.64	59.9	1.50	6.67	0.040
	2.20	46.3	0.86	11.59	0.054
Bassin 3	1.74	57.3	1.34	5.85	0.033
	4.00 *	-	-	-	-
Bassin 4	2.01	51.4	1.06	7.71	0.040
	2.21	46.6	0.87	9.35	0.044
<i>Matériaux non-compactés</i>					
Bassin 5	1.58	62.2	1.64	4.33	0.027
	1.83	56.2	1.28	5.55	0.031
Bassin 6	1.86	54.9	1.22	3.87	0.021
	2.41	41.5	0.71	6.63	0.028
Bassin 7	1.80	56.7	1.31	4.03	0.023
	2.39	42.5	0.74	7.14	0.030

Tableau A10.8 : Compilation des taux d'infiltration finaux et des écarts pour les essais à grande et petite échelles sur les stériles de la mine Tio (Lessard, 2011).

<i>Grande échelle</i>	<i>Essai 1</i> (cm/s)	<i>Essai 2</i> (cm/s)	<i>Petite échelle</i>	<i>Essai 1</i> (cm/s)	<i>Essai 2</i> (cm/s)
<i>Matériaux compactés</i>					
Bassin 2	0.015	0.005	Chaudière C	0.3	0.05 ± 0.01
Bassin 3	0.020	0.006	Chaudière A	0.055 ± 0.025	0.055 ± 0.03
Bassin 4	0.008	0.004	Chaudière B	0.007 ± 0.005	0.005 ± 0.002
<i>Matériaux non-compactés</i>					
Bassin 5	0.01	0.01	Chaudière E	0.11 ± 0.02	0.05 ± 0.03
Bassin 6	0.03	0.03	Chaudière D	0.12 ± 0.03	0.06 ± 0.03
Bassin 7	0.02	0.02	Chaudière F	0.1 ± 0.025	0.05 ± 0.02

ANNEXE 11 : Données sur les courbes de rétention d'eau prédites selon le modèle MK.

Tableau A11.1. Données granulométriques utilisées et paramètres des CRE prédites avec le modèle MK avec ajustement du paramètre a_c .

		Échantillon	Méthode d'analyse granulo	Source du matériau	C_U	D_{10} (cm)	ψ_a (cm) à $S_r=90\%$	$\theta_s (=n)$	ψ_r (cm) éq. 2.21	θ_r	a_c
QIT1_P50_f2	Tamisage+sédimento	Tamisage+laser	Tamisage+sédimento	Couche du haut	23,9	0,028	5,7	0,21	60,14	0,05	0,031
				Couche du milieu	19,7	0,034	5,3	0,21	49,42	0,05	0,034
				Couche du bas	35,1	0,019	6,4	0,21	88,96	0,05	0,024
				Initial théorique	30,4	0,022	6,1	0,21	76,92	0,05	0,026
	Tamisage+sédimento	Tamisage+laser	Tamisage+sédimento	Couche du haut	23,9	0,028	5,6	0,21	60,14	0,05	0,03
				Couche du milieu	19,7	0,034	5,3	0,21	49,43	0,05	0,035
				Couche du bas	38,2	0,017	6,6	0,21	97,44	0,05	0,023
				Couche du haut	25,8	0,026	7,5	0,18	82,5	0,05	0,033
				Couche du milieu	21,3	0,032	7	0,18	67,9	0,05	0,037
				Initial théorique	31,9	0,021	8	0,18	102,7	0,05	0,029

Tableau A11.1 (suite). Données granulométriques utilisées et paramètres des CRE prédictes avec le modèle MK avec ajustement du paramètre a_c .

	Échantillon	Source du matériau	C_U	D_{I0} (cm)	ψ_a (cm) à $S_r=90\%$	$\theta_s (=n)$	ψ_r (cm) éq. 2.21	θ_r	a_c
QIT1_P28_f	Tamisage+sédimento	Couche du haut	15,3	0,033	5,4	0,24	44,1	0,05	0,037
		Couche du milieu	22,9	0,022	6,1	0,24	66,3	0,05	0,029
		Couche du bas	28,9	0,018	6,6	0,24	83,7	0,05	0,025
		Initial théorique	28,1	0,018	6,5	0,24	81,3	0,05	0,025
		Initial réel	31,6	0,016	6,8	0,24	91,7	0,05	0,023
	Tamisage+laser	Couche du haut	15,3	0,033	5,4	0,24	44,1	0,05	0,036
		Couche du milieu	21,3	0,024	6	0,24	61,5	0,05	0,03
		Couche du bas	25,3	0,02	6,3	0,24	73,00	0,05	0,027
	Tamisage+laser	Couche du haut	10,7	0,04	4,8	0,27	31,3	0,05	0,043
		Couche du milieu	4,5	0,1	3,6	0,27	13,1	0,05	0,072
		Couche du bas	17,9	0,021	6,4	0,27	61,4	0,05	0,029
		Initial théorique	25,3	0,015	7,1	0,27	87,4	0,05	0,023
		Initial réel	29,5	0,013	7,5	0,27	102,1	0,05	0,025

Tableau A11.1 (suite et fin). Données granulométriques utilisées et paramètres des CRE prédites avec le modèle MK avec ajustement du paramètre a_c .

Échantillon	Méthode d'analyse granulo	Source du matériau	C_U	D_{I0} (cm)	ψ_a (cm) à $S_r=90\%$	$\theta_s (=n)$	ψ_r (cm) éq. 2.21	θ_r	a_c
QIT1_P10_f	Tamisage+sédimento	Couche du haut	22,2	0,017	7,1	0,27	78,7	0,06	0,028
		Couche du milieu	20	0,019	6,8	0,27	69,5	0,06	0,03
		Couche du bas	20,7	0,017	6,8	0,27	72,4	0,05	0,028
		Initial théorique	25,8	0,013	7,8	0,27	97,7	0,05	0,024
	Tamisage+laser	Couche du haut	14,1	0,026	6,2	0,27	49,9	0,05	0,037
		Couche du milieu	13	0,029	6	0,27	45,4	0,06	0,039
		Couche du bas	11,9	0,030	6,1	0,27	44,6	0,06	0,039
QIT1_P5_f	Tamisage+sédimento	Couche du haut	25,4	0,007	12	0,31	163,6	0,07	0,022
		Couche du milieu	23,3	0,009	11	0,31	138,3	0,07	0,025
		Couche du bas	21,7	0,009	10,8	0,31	129,2	0,07	0,026
		Initial théorique	24,9	0,007	12,8	0,31	176,4	0,07	0,021
	Tamisage+laser	Couche du haut	11,1	0,017	9,2	0,31	71,4	0,07	0,036
		Couche du milieu	8,3	0,024	8	0,31	50,3	0,07	0,044
		Couche du bas	135,1	0,002	19,4	0,31	860,5	0,07	0,008

ANNEXE 12 : Estimation de l'effet du déplacement des particules fines sur la valeur de k_{sat} des stériles pour la colonne QIT1_P50_f2 (exemple du calcul).

Exemple de calcul:

1. Masse initiale de l'échantillon QIT1_P50_f2 : $M_{ini} = 181,33 \text{ kg}$
2. Admettons que la masse des particules lessivées $M_{PL} = 0,050 \text{ kg}$
3. Masse finale de l'échantillon : $M_{fin} = M_{ini} - M_{PL} = 181,33 - 0,050 = 181,28 \text{ kg}$
4. Indice des vides initial : $e = 0,2651$
5. Indice des vides final suite au lessivage des particules (selon l'équation 2.2)

$$e = Vv/Vs = Vt/Vs - I = Vt\rho_s/M_{fin} - I = 0,2655$$
6. Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) initiales et finales sont ensuite calculées selon l'équation 2.7 (modèle KC) et les valeurs de la surface spécifique présentées dans les tableaux A12.3 et A12.4 respectivement (calculées selon les courbes granulométriques déduites dans les tableaux A12.1 et A12.2).

Tableau A12.1. Distribution granulométriques des particules en suspension dans l'eau drainée récupérée lors des essais de perméabilité dans la colonne QIT1_P50_f2. Calcul de la masse des particules (par fraction) dans le cas du lessivage éventuel de 50g à 3200g du matériau.

Particules en suspension dans l'eau drainée		Masse des particules lessivées par fraction (g)						
d (mm)	% fraction	$\Sigma=50\text{g}$	$\Sigma=100\text{g}$	$\Sigma=200\text{g}$	$\Sigma=400\text{g}$	$\Sigma=800\text{g}$	$\Sigma=1600\text{g}$	$\Sigma=3200\text{g}$
0,498	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,419	0,43	0,21	0,43	0,85	1,71	3,41	6,83	13,65
0,352	0,86	0,43	0,86	1,71	3,43	6,85	13,71	27,41
0,296	1,78	0,89	1,78	3,56	7,12	14,24	28,48	56,96
0,249	3,20	1,60	3,20	6,40	12,80	25,60	51,20	102,40
0,209	4,28	2,14	4,28	8,56	17,12	34,24	68,48	136,96
0,176	4,25	2,13	4,25	8,51	17,01	34,03	68,05	136,11
0,148	3,62	1,81	3,62	7,25	14,49	28,99	57,97	115,95
0,125	3,16	1,58	3,16	6,31	12,63	25,25	50,51	101,01
0,105	3,11	1,56	3,11	6,23	12,45	24,91	49,81	99,63
0,088	3,42	1,71	3,42	6,83	13,67	27,33	54,67	109,33
0,074	3,90	1,95	3,90	7,79	15,59	31,17	62,35	124,69
0,062	4,36	2,18	4,36	8,72	17,44	34,88	69,76	139,52
0,052	4,73	2,36	4,73	9,45	18,91	37,81	75,63	151,25
0,044	4,96	2,48	4,96	9,91	19,83	39,65	79,31	158,61
0,037	4,90	2,45	4,90	9,79	19,59	39,17	78,35	156,69
0,031	4,93	2,46	4,93	9,85	19,71	39,41	78,83	157,65
0,026	4,65	2,33	4,65	9,31	18,61	37,23	74,45	148,91
0,022	4,30	2,15	4,30	8,61	17,21	34,43	68,85	137,71
0,019	3,94	1,97	3,94	7,87	15,75	31,49	62,99	125,97
0,016	3,60	1,80	3,60	7,21	14,41	28,83	57,65	115,31
0,013	3,31	1,65	3,31	6,61	13,23	26,45	52,91	105,81
0,011	3,05	1,52	3,05	6,09	12,19	24,37	48,75	97,49
0,009	2,86	1,43	2,86	5,73	11,45	22,91	45,81	91,63
0,008	2,85	1,42	2,85	5,69	11,39	22,77	45,55	91,09
0,007	3,09	1,55	3,09	6,19	12,37	24,75	49,49	98,99
0,006	3,56	1,78	3,56	7,11	14,23	28,45	56,91	113,81
0,005	3,81	1,91	3,81	7,62	15,24	30,48	60,96	121,92
0,004	3,21	1,61	3,21	6,43	12,85	25,71	51,41	102,83
0,003	1,90	0,95	1,90	3,79	7,59	15,17	30,35	60,69

Tableau A12.2. Distribution granulométrique initiale et finale de l'échantillon QIT1_P50_f2 dans le cas du lessivage éventuel de 50g à 3200g du matériau selon l'analyse granulométrique et la masse correspondante des particules lessivées par fraction (voir Tableau 12.1)

Tableau A12.3. Calcul de la surface spécifique de l'échantillon initial QIT1_P50_f2 selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992).

d (mm)	%passant	X= PN ₀ D - Pn ₀ d	S= 6/dρ _s	Surface spécifique= XS (m ² /kg)
50,00	100,00	-	-	-
37,50	94,96	0,0504	0,04	0,002
28,00	89,76	0,0520	0,05	0,003
19,00	81,94	0,0782	0,08	0,006
14,00	74,50	0,0744	0,11	0,008
10,00	68,74	0,0576	0,15	0,009
4,75	53,78	0,1496	0,31	0,047
2,50	39,36	0,1442	0,59	0,086
1,25	26,71	0,1264	1,19	0,150
0,6300	18,11	0,0861	2,35	0,203
0,3150	12,38	0,0573	4,71	0,270
0,1600	8,38	0,0400	9,27	0,371
0,0800	5,77	0,0261	18,54	0,485
0,0375	3,16	0,0261	39,51	1,029
0,0298	2,93	0,0023	49,82	0,114
0,0212	2,24	0,0069	69,85	0,480
0,0151	1,83	0,0041	98,29	0,405
0,0108	0,92	0,0092	137,45	1,259
0,0079	0,78	0,0014	187,90	0,258
0,0056	0,55	0,0023	265,00	0,607
0,0040	0,41	0,0014	374,15	0,514
d _{eq} =	0,0023	0,00	648,04	2,671
			Σ(XS)=	8,97

Tableau A12.4. Calcul de la surface spécifique de l'échantillon final QIT1_P50_f2 suite à éventuel lessivage de 0,050 kg de particules, selon la méthode de Chapuis et Légaré (1992).

d (mm)	%passant	X= PN ₀ D - Pn ₀ d	S= 6/dρ _s	Surface spécifique= XS (m ² /kg)
50,00	100,00	-	-	-
37,50	94,99	0,0501	0,04	0,002
28,00	89,78	0,0520	0,05	0,003
19,00	81,96	0,0782	0,08	0,006
14,00	74,52	0,0744	0,11	0,008
10,00	68,76	0,0576	0,15	0,009
4,75	53,80	0,1496	0,31	0,047
2,50	39,37	0,1443	0,59	0,086
1,25	26,72	0,1265	1,19	0,150
0,6300	18,11	0,0861	2,35	0,203
0,3150	12,38	0,0573	4,71	0,270
0,1600	8,38	0,0400	9,27	0,371
0,0800	5,76	0,0262	18,54	0,485
0,0375	3,16	0,0260	39,51	1,029
0,0298	2,93	0,0023	49,82	0,114
0,0212	2,24	0,0069	69,85	0,479
0,0151	1,83	0,0041	98,29	0,405
0,0108	0,92	0,0092	137,45	1,259
0,0079	0,78	0,0014	187,90	0,258
0,0056	0,55	0,0023	265,00	0,609
0,0040	0,41	0,0014	374,15	0,527
d _{eq} =	0,0023	0,00	648,04	2,639
			Σ(XS)=	8,96