POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale à la mine du lac Tio
Auteur: Author:	Marie-Lin Bréard Lanoix
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Bréard Lanoix, M.-L. (2017). Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale à la mine du lac Tio [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2590/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2590/
Directeurs de recherche: Advisors:	Thomas Pabst, & Michel Aubertin
Programme: Program:	Génie minéral

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES DE LA COUCHE DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS PLACÉE SUR LA HALDE À STÉRILES EXPÉRIMENTALE À LA MINE DU LAC TIO

MARIE-LIN BRÉARD LANOIX

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)

MAI 2017

© Marie-Lin Bréard Lanoix, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES DE LA COUCHE DE CONTRÔLE DES ÉCOULEMENTS PLACÉE SUR LA HALDE À STÉRILES EXPÉRIMENTALE À LA MINE DU LAC TIO

présenté par : BRÉARD LANOIX Marie-Lin

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

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

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph. D., président

M. PABST Thomas, Ph. D., membre et directeur de recherche

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

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

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Thomas Pabst pour sa disponibilité, son implication, ses encouragements et ses nombreux conseils. Je remercie aussi mon codirecteur de recherche Michel Aubertin de m'avoir guidé et supervisé tout au long du projet.

Je voudrais remercier Vincent Martin pour son aide et son support à toutes les étapes du projet, particulièrement pour la préparation et l'exécution des essais d'infiltration sur le terrain. La réussite des essais de terrain n'aurait pas été possible sans son aide et celle de Julien Dubuc, Yvan Poirier et Pierre-Alain Jacques.

Je tiens aussi à remercier Noura El-Harrak, Jean-Beket Dalce, Karim Essayad et tous les stagiaires pour leur aide au laboratoire.

Merci également à Dan Chen et à tous les autres employés de Rio Tinto Fer et Titane pour leur collaboration.

Merci aux autres étudiants de l'Institut de recherche en mines et environnement pour leurs conseils et encouragements. L'ambiance de travail n'aurait pas été aussi plaisante sans eux.

Je tiens aussi à souligner le support de ma famille qui m'a encouragé tout au long de mes études.

RÉSUMÉ

L'industrie minière génère des volumes importants de roches stériles, généralement entreposées en surface dans des haldes à stériles exposés aux conditions atmosphériques. Les minéraux réactifs (souvent sulfureux) parfois contenus dans ces stériles peuvent s'oxyder au contact de l'oxygène et de l'eau et générer du drainage minier acide (DMA) ou du drainage neutre contaminé (DNC).

La présente étude s'inscrit dans un projet plus vaste visant à évaluer une nouvelle approche de déposition des roches stériles, avec pour objectif de limiter la génération d'eaux de drainage contaminées pendant les opérations minières et après la fermeture du site. Il s'agit d'une méthode de gestion intégrée et progressive des stériles. Elle consiste notamment à installer une couche de contrôle des écoulements (CCE), normalement composée de matériaux fins, au-dessus de chaque banc afin de contrôler l'infiltration de l'eau dans les stériles réactifs placés au cœur de la halde. Une halde à stériles expérimentale instrumentée de 70 m de long, 10 m de large et 7 m en amont a été construite sur le site de la mine du Lac Tio (Rio Tinto Fer et Titane) afin d'évaluer la performance de cette méthode de construction à grande échelle.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de caractériser les propriétés hydrogéologiques du sable de la CCE installée sur la halde à stériles expérimentale au moyen de différents types d'essais au laboratoire et de terrain et à l'aide de simulations numériques.

De nombreux échantillons de sable ont été prélevés et caractérisés. Les analyses granulométriques ont permis de classifier le sable étudié comme un type SW-SP selon la classification USCS. Il s'agit d'un sable contenant peu de particules fines (< 75 μm) et relativement peu étalé. La densité relative moyenne des grains solides (D_r = 2,68) mesurée est typique d'un sable naturel. Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} mesurées au laboratoire sont aussi dans l'intervalle de valeurs attendues pour ce type de sable et suivent bien les modèles prédictifs Kozeny-Carman (KC, Chapuis et Aubertin, 2003) et Kozeny-Carman Modifié (KCM, Mbonimpa et al., 2002). Des essais de drainage en colonne et des essais en cellules Tempe ont été utilisés pour évaluer la courbe de rétention d'eau du sable. Les valeurs obtenues sont bien représentées par le modèle prédictif Kovacs modifié (MK; Aubertin et al., 2003).

Des essais d'infiltration *in situ* à petite et moyenne échelle ont été réalisés selon trois méthodes différentes (et appareils) : infiltromètre à simple anneau, infiltromètre à double anneau et perméamètre de Guelph. Les valeurs de la conductivité hydraulique à satiété déduites de ces

mesures sont comparables entre elles, pour les trois méthodes utilisées. Les résultats de terrain suivent assez bien les valeurs obtenues des modèles prédictifs KC et KCM, pour ce sable dense (comparativement aux conditions de laboratoire).

La conductivité hydraulique saturée a également été évaluée à partir des données de terrain par analyses numériques inverses réalisées avec le logiciel Seep/W (Geo-Slope International, 2007;2016). L'interprétation des simulations numériques mène généralement à des valeurs de k_{sat} plus faibles (d'un facteur de trois ou moins) que les valeurs de conductivité hydraulique à satiété déduite analytiquement.

Les simulations additionnelles réalisées à partir des données obtenues au laboratoire, sur le terrain et par analyses numériques inverses, suggèrent que la couche de sable *in situ* peut stocker l'eau efficacement, notamment en raison d'un effet de barrière capillaire qui se crée à l'interface sable-stériles.

Les résultats de cette étude peuvent être utiles pour construire les modèles numériques visant à évaluer l'écoulement de l'eau dans la halde expérimentale et pour analyser la réponse de cette méthode de contrôle des écoulements dans le cas des haldes de plus grandes dimensions.

ABSTRACT

The mining industry produces large volumes of waste rocks. These waste rocks are usually deposited on the surface in waste rock piles, exposed to natural conditions. Reactive (often sulfuric) minerals sometimes contained in waste rocks can oxidize when placed in contact with oxygen and water, and generate acid mine drainage (AMD) or contaminated neutral drainage (CND).

This study is part of a larger project aimed at evaluating a new integrated waste rock management method that leads to progressive pile reclamation. The objective of this new disposal approach is to limit the generation of contaminated drainage during mining operations and after mine closure. To do so, a flow control layer (FCL) composed of finer-grained material is installed at the surface of each bench, in order to control infiltration of water deep into the reactive waste rock placed at the core of the pile. A 70 m-long, 10 m-wide and 7 m upstream experimental waste rock pile was built at the Lac Tio mine (Rio Tinto Fer et Titane) to assess the performance of this construction method on a large scale.

The principal objective of this Master study was to characterize the hydrogeological properties of the sand cover (FCL) installed on the experimental waste rock pile using various laboratory, field tests and numerical simulations.

The sand used to construct the cover was sampled *in situ* and thoroughly characterized in the laboratory. The grain size analysis indicates that the classification of the sand is SW-SP according to the USCS; this poorly graded clean sand contains relatively few fine (< 75 μm) particles. The average relative density of the solid grains (D_r = 2.68) is typical of a natural sand. The saturated hydraulic conductivity k_{sat} measured in the laboratory is also typical of such type of sand; the experimental values correspond well to those predicted by the Kozeny-Carman (KC, Chapuis and Aubertin, 2003) and Kozeny-Carman Modified (KCM, Mbonimpa et al., 2002) models. Column tests and Tempe cell experiments were used to evaluate the water retention curve of the sand. This water retention curve correlates well with the predictive curve given by the Modified Kovacs model (Aubertin et al., 2003).

Small-scale and medium-scale infiltration tests were performed *in situ* using three different methods (and apparatus): single-ring infiltrometer, double-ring infiltrometer and Guelph permeameter. The three approaches give similar satiated hydraulic conductivity. Field results

follow quite well the predictive values obtained with the KC and KCM models for this denser sand (compared to laboratory conditions).

The saturated hydraulic conductivity was also evaluated from field data using inverse numerical analyses with the Seep/W software (Geo-Slope International, 2007; 2016). Numerical results generally gives k_{sat} values lower (by a factor of three or less) compared to the experimental satiated hydraulic conductivity obtained analytically.

Additional numerical analyses based on laboratory, field data and inverse numerical results suggest that the *in situ* sand can efficiently store water due to a strong capillary barrier effect induced at the interface with the underlying waste rock.

The results of this study should be useful for calibrating numerical models to evaluate water flows in experimental waste rock piles and develop this flow control method on a larger scale.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XVII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS (AVEC UNITÉS) XXVIII

LISTE DES ANNEXES XXXIV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Généralités 1

1.2 Objectifs du projet de recherche 2

1.3 Contenu du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4

2.1 Propriétés de base des stériles 4

2.2 Haldes à stériles 4

2.2.1 Caractéristiques de base 4

2.2.2 Méthodes de construction 5

2.2.3 Caractéristiques hydrogéologiques des haldes à stériles 6

2.3 Écoulement de l'eau en condition saturée et non saturée 7

2.3.1 Loi de Darcy 7

2.3.2 Conductivité hydraulique saturée 8

2.3.3 Courbe de rétention d'eau (CRE) 11

2.3.4 Fonction de perméabilité 16

2.4 Infiltration....16

2.4.1 Taux et capacité d'infiltration 17

2.4.2 Profil de teneur eau 18

2.4.3 Essais d'infiltration 18

2.5 Contrôle des écoulements et restauration des haldes à stériles 24

2.5.1 Équations d'infiltration 24

2.5.2 Drainage minier acide (DMA) et drainage neutre contaminé (DNC) 29

2.5.3 Méthode de contrôle et de restauration des haldes à stériles....31

2.5.4 Couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC) 33

2.5.5 CEBC et restauration des haldes à stériles 35

2.6 Halde expérimentale....37

2.6.1 Travaux antérieurs....38

2.6.2 Caractéristiques de la halde à stériles expérimentale 39

2.7 Modèles numériques 42

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE, PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSES NUMÉRIQUES…..……44

3.1 Préparation des matériaux au laboratoire 44

3.2 Analyses granulométriques 44

3.3 Densité relative des grains solides et essais de compactage 46

3.4 Mesure de la conductivité hydraulique saturée au laboratoire 46

3.5 Évaluation de la courbe de rétention d'eau 49

3.5.1 Essais de drainage en colonne....49

3.5.2 Cellule Tempe modifiée 52

3.6 Essais d'infiltration et autres mesures *in situ* 53

3.6.1 Infiltromètre à simple anneau....53

3.6.2 Infiltromètre à double anneau 55

3.6.3 Perméamètre de Guelph 57

3.7 Méthodologie pour estimer numériquement la conductivité hydraulique saturée du sable à partir des essais d'infiltration *in situ* 58

3.7.1 Analyses numériques des essais *in situ* 60

CHAPITRE 4 RÉSULATS DE LA CARACTÉRISATION AU LABORATOIRE..... 67

4.1 Analyses granulométriques 67

4.2 Densité relative des grains solides 71

4.3 Essais de compactage 72

4.4 Conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) 73

4.4.1 Essais aux perméamètres à paroi rigide 73

4.4.2 Essais en colonne 75

4.5 Courbe de rétention d'eau 77

4.5.1 Synthèse des résultats pour la CRE.....81

CHAPITRE 5 RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFILTRATION À ÉCHELLE INTERMÉDIAIRE MENÉS SUR LE TERRRAIN 82

5.1 Densité en place 82

5.2 Infiltromètre à simple anneau.....84

5.2.1 Rayon de 15 cm.....84

5.2.2 Rayon de 30 cm.....88

5.3 Infiltromètre à double anneau 93

5.4 Perméamètre de Guelph 97

5.5 Essais d'infiltration à une profondeur de 30 cm 102

CHAPITRE 6 INTERPRÉTATION, ANALYSES DES RÉSULTATS ET DISCUSSION . 108

6.1 Influence des conditions en place.....108

6.1.1 Influence de l'indice des vides sur la conductivité hydraulique saturée 108

6.1.2 Influence de la méthode de mesure *in situ* sur k_{sat} 110

6.1.3 Propriétés du sable non-saturé 114

6.1.4 Effet de la teneur en eau volumique initiale 116

6.1.5 Influence de la distance à l'interface avec les stériles 119

6.2 Infiltration à travers la couche de contrôle des écoulements 121

6.2.1 Effet de barrière capillaire 125

6.2.2 Influence du volume d'eau appliqué sur la couche de sable 130

6.2.3 Influence de l'indice des vides du sable sur l'infiltration 132

6.2.4 Influence de l'épaisseur de la couche de sable sur la performance de la CCE 134

6.2.5 Limitations des modèles numérique 135

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 136

BIBLIOGRAPHIE 140

ANNEXES 153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Valeurs de A_1, A_2, A_3 et A_4 en fonction du type de sol 21

Tableau 2.2 : Estimation de α* selon la catégorie et la structure du sol (Reynolds, 2008) 23

Tableau 2.3 : Caractéristiques du code numérique Seep/W (Geo-Slope Internaltional, 2007; 2016) 43

Tableau 3.1 : Emplacement des tensiomètres dans les colonnes 51

Tableau 3.2 : Caractéristiques des essais avec l'infiltromètre à simple anneau.....55

Tableau 3.3 : Caractéristiques des essais réalisés avec l'infiltromètre à double anneau 56

Tableau 3.4 : Caractéristiques des essais avec le perméamètre de Guelph.....58

Tableau 3.5 : Paramètres de la CRE des stériles QIT avec le modèle de van Genuchten (1980) selon les résultats de Peregoedova (2012) 64

Tableau 4.1 : Résultats des analyses granulométriques des échantillons HSP-A, HSP-B et HSP-C 68

Tableau 4.2 : Analyses granulométriques du sable *HSP-aut2015* 69

Tableau 4.3 : Analyses granulométriques *HSP-Lys* 70

Tableau 4.4 : Densités relatives des grains solides (D_r) : sable *HSP-A* 71

Tableau 4.5 : Densités relatives des grains solides : sable HSP-aut2015 71

Tableau 4.6 : Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique du sable *HSP-A* mesurées avec des perméamètres à paroi rigide 73

Tableau 4.7 : Conductivités hydrauliques saturées mesurées pour des essais à charge constante en colonne 75

Tableau 4.8 : Conductivités hydrauliques saturées mesurées par des essais à charge variable en colonne 75

Tableau 4.9 : Paramètre de la CRE ajustée avec le modèle de van Genuchten (1980) (éq. 2.7) du sable mesuré en colonne.....78

Tableau 4.10 : Paramètres des courbes de rétention d'eau (CRE) obtenues des mesures avec les cellules Tempe et ajustées avec le modèle van Genuchten (1980; éq. 2.7) 81

Tableau 5.1 : Principaux résultats des essais d'infiltration à simple anneau (rayon de 15 cm) (les résultats expérimentaux des essais correspondants sont détaillés à la figure 5.4) 85

Tableau 5.2 : Principaux résultats des essais d'infiltration à simple anneau (rayon de 30 cm) (voir figure 5.6) 89

Tableau 5.3 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec le double anneau (taux d'infiltration de l'anneau interne) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.10) 93

Tableau 5.4 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec le double anneau (taux d'infiltration de l'anneau externe) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.10) 94

Tableau 5.5 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec perméamètre de Guelph; les essais A et B considèrent le taux d'infiltration minimal, maximal pour le 1er palier (A) et le 2e palier (B) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.13).....98

Tableau 5.6 : Principaux résultats des essais d'infiltration réalisés à une profondeur de 30 cm (les essais correspondants sont détaillés aux figures 5.15, 5.16 et 5.17) 102

Tableau 6.1 : Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique saturée ajustée numériquement avec Seep/W en utilisant la CRE en mouillage ou en drainage 114

Tableau 6.2 : Propriétés du sable utilisées dans les simulations du comportement de la couche de contrôle des écoulements. 122

Tableau 6.3 : Volume d'eau pour le modèle 1D correspondant au flux unitaire appliquée durant une période de 3600s.....124

Tableau A.1 : Analyse granulométrique *HSP-A* (triplicata) 153

Tableau A.2 : Analyse granulométrique et calcul de la surface spécifique de l'échantillon *HSP-A-2* (triplicata).....154

Tableau A.3 : Analyse granulométrique et calcul de la surface spécifique de l'échantillon *HSP-A-3* (triplicata).....155

Tableau A.4 : Analyse granulométrique *HSP-B* (triplicata) 156

Tableau A.5 : Analyse granulométrique *HSP-C* (triplicata) 156

Tableau A.6 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-A*, *HSP-B* et *HSP-C* 157

Tableau A.7 : Analyse granulométrique *HSP-Aut2015* (triplicata) 158

Tableau A.8 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-Aut2015* 158

Tableau A.9 : Analyse granulométrique *HSP-Lys1 (*triplicata) 161

Tableau A.10 : Analyse granulométrique *HSP-Lys2 (*triplicata) 162

Tableau A.11 : Analyse granulométrique *HSP-Lys3 (*triplicata) 163

Tableau A.12 : Analyse granulométrique *HSP-Lys4 (*triplicata) 164

Tableau A.13 : Analyse granulométrique *HSP-Lys5 (*triplicata) 165

Tableau A.14 : Analyse granulométrique *HSP-Lys6 (*triplicata) 166

Tableau A.15 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-Lys*.....167

Tableau B.1 : Densité relative des grains solides *HSP-A* (triplicata).....168

Tableau B.2 : Densité relative des grains solides *HSP-B* (triplicata).....168

Tableau B.3 : Densité relative des grains solides *HSP-C* (triplicata).....169

Tableau B.4 : Densité relative des grains solides *HSP-B* (triplicata).....169

Tableau C.1 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-A* 170

Tableau C.2 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-Aut2015* 170

Tableau C.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-Aut2015* 170

Tableau C.4 : Analyses granulométriques des échantillons après Proctor modifié 171

Tableau D.1 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-1 172

Tableau D.2 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-1 (début).....173

Tableau D.3 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-2 175

Tableau D.4 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-2 (début).....176

Tableau D.5 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-3 178

Tableau D.6 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-3 (début).....179

Tableau D.7 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-4 181

Tableau D.8 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-4 (début).....182

Tableau D.9 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-5 184

Tableau D.10 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-5 (début).....185

Tableau D.11 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-6 187

Tableau D.12 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-6 (début).....188

Tableau E.1 : Analyses granulométriques des échantillons après drainage colonne No. 1 195

Tableau E.2 : Analyses granulométriques des échantillons après drainage colonne No. 2 197

Tableau E.3 : Résultats au démontage pour la colonne 1 (début) 198

Tableau E.4 : Résultats au démontage pour la colonne 2 (début) 200

Tableau E.5 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 1 partie 1 (début).....202

Tableau E.6 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 1 partie 2 204

Tableau E.7 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 2 (début) 205

Tableau E.8: Résultats de l'essai à charge variable colonne 1……..207

Tableau E.9 : Résultats de l'essai à charge variable colonne 2 (début) 209

Tableau F.1 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-1*.....212

Tableau F.2 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-2*.....213

Tableau F.3 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-3*.....214

Tableau F.4 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-4*.....215

Tableau G.1 : Résultats du nucléodensimètre avant les essais d'infiltration (Campagne du 24 mai – 11 juin 2016) 216

Tableau G.2 : Résultats du nucléodensimètre après les essais d'infiltration (Campagne du 24 mai – 11 juin 2016) 217

Tableau G.3 : Résultats du nucléodensimètre avant les essais d'infiltration (Campagne du 11 septembre - 2 octobre 2016) 218

Tableau G.4 : Résultats du nucléodensimètre après les essais d'infiltration (Campagne du 11 septembre - 2 octobre 2016) 219

Tableau G.5 : Résultats de densité à l'anneau avant les essais d'infiltration 220

Tableau H.1 : Résultats des essais d'infiltration à une profondeur Z=0 cm 221

Tableau H.2 : Résultats des essais d'infiltration à une profondeur Z=30 cm 222

Tableau I.1 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 45 cm de l'interface (début) 243

Tableau I.2 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 35 cm de l'interface (début) 245

Tableau I.3 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 30 cm de l'interface (début) 247

Tableau I.4 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 22 cm de l'interface 250

Tableau I.5 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 15 cm de l'interface (début) 252

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Déversement à la benne (*end-dumping)* (photo : Bussière et al., 2015).....6

Figure 2.2: Déversement avec épandage au butoir (*push dumping*) (photo : IRME) 6

Figure 2.3 : Courbe de rétention d'eau schématisée (tirée de Peregoedova, 2012) 11

Figure 2.4 : Taux d'infiltration en fonction du temps (selon Horton, 1933 et Koorevaar et al., 1983 tirée de Gitirana et al., 2006).....17

Figure 2.5 : Profil de teneur en eau lors de l'infiltration (tiré de Hillel, 1980).....18

Figure 2.6 : Illustration des principaux types d'essais d'infiltration sur le terrain (adapté de Day et Daniel, 1985).....19

Figure 2.7 : Composantes du perméamètre de Guelph (Eijkelkamp Agrisearch Equipment (EAE), 2011).....20

Figure 2.8 : Perméamètre de Guelph en cours d'utilisation sur le site de la halde expérimentale.20

Figure 2.9 : Schéma du mouvement du front de mouillage lors d'un essai avec infiltromètre à simple anneau (adapté de Dingman, 1994) 22

Figure 2.10 : Paramètres et profil de la teneur en eau selon le modèle de Green-Ampt (Ravi et Williams, 1998).....27

Figure 2.11 : Configuration idéalisée d'un recouvrement multicouche (proposé par Aubertin et Chapuis, 1991 et tiré de Aubertin et al., 1995, 2002a).....33

Figure 2.12 : Schématisation de l'écoulement dans une CEBC inclinée (adapté de Bussière, 1999 et Aubertin et al., 2009).....35

Figure 2.13 : Schéma d'une vue en coupe d'une halde composée de couches de contrôle des écoulements (CCE) (adapté de Aubertin, 2013) 36

Figure 2.14 : Localisation géographique de la mine du Lac Tio (tiré de Lessard, 2011) 38

Figure 2.15 : Vue de profil de la halde expérimentale 40

Figure 2.16 : Coupe transversale de la halde expérimentale et emplacement des instruments (modifié de Bussière et al., 2015) 41

Figure 2.17 : Halde expérimentale à la fin de la construction (Photo prise le 25 septembre 2015) 42

Figure 3.1 : Colonne 2 et emplacement des instruments utilisés 49

Figure 3.2 : Cellules Tempe avec tube de sortie d'eau (pour application d'une succion). L'intérieur des cellules est à la pression atmosphérique (valve ouverte au sommet).....52

Figure 3.3 : Cellules Tempe avec application d'une pression d'air; la sortie est à pression atmosphérique 52

Figure 3.4 : Infiltromètre à simple anneau (diamètre de 30 cm) placé à une profondeur de 30 cm dans le sable et enfoncer d'environ 10 cm 54

Figure 3.5: Essai avec l'infiltromètre à double anneau 56

Figure 3.6 : Installation du perméamètre de Guelph sur le terrain.....57

Figure 3.7 : Taux d'infiltration mesuré (courbe et points noirs) pour une charge imposée d'environ 6,3 cm (courbe et points rouges) comparé au taux d'infiltration ajusté avec Seep/W (courbe continue orange) (essai *Lys4-SA15*) 60

Figure 3.8 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration à simple anneau (rayon de 30 cm) avec une couche de sable de 60 cm.....62

Figure 3.9 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration à double anneau avec une couche de sable de 60 cm 62

Figure 3.10 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration avec le perméamètre de Guelph dans une couche de sable de 60 cm 63

Figure 3.11 : CRE des stériles QIT (0-50mm) (d'après Peregoedova, 2012) et du sable (e = 0,46) : modèle de van Genuchten (1980).....65

Figure 3.12 : Fonction de perméabilité des stériles QIT (0-50mm) et du sable (e = 0,46) 65

Figure 4.1 : Courbes granulométriques des échantillons homogénéisés des barils *HSP A, HSP B* et *HSP C* (essais en triplicata : 1 à 3) 67

Figure 4.2 : Courbes granulométriques du sable *HSP-aut2015* (triplicata) et *HSP-A* 69

Figure 4.3 : Masse volumique ρ_d en fonction de la teneur en eau massique ω obtenue des essais Proctor modifiés pour les échantillons de sable; on montre aussi les courbes théoriques pour divers degrés de saturation. 72

Figure 4.4 : Conductivité hydraulique saturée en fonction de l'indice des vides (perméamètre à paroi rigide) et comparée aux modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002) 74

Figure 4.5 : Indice des vides dans les colonnes 1 (A) et 2 (B) en fonction de l'élévation 76

Figure 4.6 : Courbe de rétention d'eau expérimentale obtenue avec les essais en colonne et prédite avec le modèle MK pour les indices des vides minimum et maximum mesurés dans les colonnes (Aubertin et al., 2003) 77

Figure 4.7 : Courbe de rétention d'eau obtenue en cellule de pression (A : Échantillon HSP-1) et CRE estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) 79

Figure 4.8 : Courbe de rétention d'eau en appliquant une pression d'air dans les cellules Tempe (A : Échantillon HSP-3, B : Échantillon HSP-4) et CRE estimée avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) 80

Figure 4.9 : Courbes de rétention d'eau du sable *HSP-A* mesurées au laboratoire exprimées dans le plan plan S_r-logψ (lissés avec RETC, 2009) et le modèle de van Genuchten, 1980) 81

Figure 5.1 : Masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau massique ω mesurée au nucléodensimètre avant les essais d'infiltration sur le sable de la CCE. Les résultats de terrain sont comparés aux courbes des essais Proctor modifié réalisés au laboratoire (voir figure 4.3) 83

Figure 5.2 : Indices des vides mesurés au nucléodensimètre sur la couche de sable de la CCE, au centre de chaque lysimètre; les barres d'erreurs représentent l'indice des vides minimal et maximal mesurés, les boîtes rectangulaires représentent le 1er et le 3e quartile, coupé par la médiane. 83

Figure 5.3 : Taux d'infiltration mesuré pour l'essai *Lys. 6-SA15*. Les valeurs minimales et maximales du taux d'infiltration lorsque la charge d'eau est quasi-constante sont indiquées 84

Figure 5.4 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon 15 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (début) 86

Figure 5.5 : Conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures avec l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 15 cm); valeurs obtenues au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM 88

Figure 5.6 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon 30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais 90

Figure 5.7 : Conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures avec l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 30 cm) obtenues au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM 91

Figure 5.8 : Taux d'infiltration en fonction de la charge pour les essais à l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 15 et 30 cm) 92

Figure 5.9 : Taux d'infiltration médian pour les deux rayons de l'infiltromètre à simple anneau 93

Figure 5.10 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noirs et rouges) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes pointillées) avec l'infiltromètre à double anneau est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais95

Figure 5.11 Comparaisons du taux d'infiltration de l'anneau interne et externe pour le même essai; les barres d'erreurs correspondent aux valeurs minimales et maximales du taux d'infiltration mesuré. 96

Figure 5.12 : Conductivité hydraulique à satiété (k_{fs}) mesuré avec l'infiltromètre à double anneau obtenu au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée obtenue par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM 97

Figure 5.13 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) appliquée avec le perméamètre de Guelph est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (début) 99

Figure 5.14 : Conductivité hydraulique à satiété avec le perméamètre de Guelph obtenue au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1992, éq. 2.34) (k_{fs}) et la conductivité hydraulique saturée obtenue par analyse inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM 101

Figure 5.15 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon de 15 ou 30 cm) à mi-hauteur de couche (Z=30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais.....103

Figure 5.16 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (points et courbes rouges) avec le perméamètre de Guelph à mi-hauteur de couche (Z=30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais 104

Figure 5.17 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noirs et rouges) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes pointillées) avec l'infiltromètre à double anneau à mi-hauteur de couche est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais 105

Figure 5.18 : Taux d'infiltration en fonction de la profondeur pour différents types d'essais; les barres d'erreurs représentent l'indice des vides minimal et maximal mesurés, les boîtes rectangulaires représentent le 1er et le 3e quartile, coupé par la médiane.....106

Figure 5.19 : Conductivité hydraulique à satiété à une profondeur de 30 cm mesurée avec les infiltromètres à simple et double anneau et le perméamètre de Guelph obtenue au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990,1992, éqs. 2.34 et 2.36) (k_{fs}) et la conducdivité hydraulique saturée obtenue par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM 107

Figure 6.1 : Conductivité hydraulique saturée déterminée expérimentalement *in situ* (en surface du sable, i.e. profondeur Z=0 cm) et au laboratoire en fonction de l'indice des vides. Les résultats

sont comparés aux valeurs prédites avec les modèles KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). 109

Figure 6.2 : Valeur de la conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures sur le terrain à la surface de la couche de sable (Z = 0 cm) pour différents types d'essais. Les résultats expérimentaux sont comparés aux valeurs prédites avec les modèles de KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). 111

Figure 6.3 : Conductivité hydraulique à satiété obtenue avec les équations de Reynolds et Elricks (éqs. 2.34 et 2.36) et la conductivité hydraulique saturée ajustée numériquement avec CRE en drainage (analyse inverse) 113

Figure 6.4: Courbes de rétention d'eau du sable en place estimées pour les indices des vides mesurés *in situ*. Les courbes pointillées sont les CRE obtenues de MK et les courbes pleines sont les CRE ajustées avec van Genuchten (vG) 115

Figure 6.5: Fonctions de perméabilité du sable estimées à partir des porosités mesurées sur le terrain. 116

Figure 6.6 : Conductivité hydraulique à satiété obtenue sur le terrain estimée au moyen des formules de Reynolds et Elrick en fonction de la teneur en eau initiale en place. 117

Figure 6.7 : Taux d'infiltration expérimental (points et courbe noire) en fonction de la teneur en eau initiale simulée avec Seep/W (θ_r=0,02 (courbe pointillée rouge); $\theta_{terrain}$=0,06 (courbe continue bleue) et θ_{sat}=0,27 (courbe pointillée verte) 119

Figure 6.8 : Taux d'infiltration expérimental (points et courbe noire) pour une teneur en eau initiale minimale (TEV=0,05, courbe pointillée rouge) et maximale (TEV= 0,17, courbe continue bleue) pour 2 TEV mesurée sur le terrain et simulée avec Seep/W 119

Figure 6.9 : Effet de la profondeur du test sur le taux d'infiltration simulé pour un essai à simple anneau (A) de 30 cm et (B) de 15 cm de diamètre (A : Lys. 4-SA30-Z30, B : Lys. 3-SA15-Z30); les données expérimentales réalisées à Z=30 cm (points et courbe noire) sont comparées au taux d'infiltration pour un essai réalisé à la surface (Z=0 cm) (courbe pointillée jaune) et un essai réalisé à une profondeur de 45 cm (Z=45 cm) (courbe continue bleue) 120

Figure 6.10 : Taux d'infiltration constant simulé dans une couche de sable de 60 cm en fonction de la distance à l'interface sable-stériles et de l'indice des vides 121

Figure 6.11 : Propriétés hydriques du sable utilisé dans les modèles numériques 1D; A) Les CRE sont obtenues à partir du modèle MK (Aubertin et al., 2003) et ajustées avec le modèle de van Genuchten (1980). B) Les fonctions de perméabilité sont estimées avec le modèle de Mualem (1976) et van Genuchten (1980) pour des indices des vides de 0,38, 0,42, 0,45 et 0,49 122

Figure 6.12 : Modèle 1D avec 60 cm de sable (CCE) sur 300 cm de stérile QIT.....123

Figure 6.13 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,38 et une précipitation de 117 mm en 3600 s. Les résultats après 1 h, 2 h, 1 jour et 14 jours sont présentés. 126

Figure 6.14 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 30 cm avec un indice des vides de 0,38 et une précipitation de 117 mm en 3600 s 127

Figure 6.15 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,49 et une précipitation de 117 mm en 3600 s 128

Figure 6.16 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 30 cm avec un indice des vides de 0,49 et une précipitation de 117 mm en 3600 s 129

Figure 6.17 : Quantité d'eau dans les stériles sous l'interface en fonction du volume d'eau appliqué (épaisseur de 60 cm) après 14 jours de drainage.....131

Figure 6.18 : Quantité d'eau dans les stériles sous l'interface en fonction du volume d'eau pour une précipitation de 1 heure, suivi de 14 jours de drainage (épaisseur de 60 cm et e=0,38).....131

Figure 6.19 : Profil de la teneur en eau volumique (A) et de la pression d'eau (B) en fonction de la précipitation après 14 jours de drainage pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,38.....132

Figure 6.20 : Quantité d'eau en pourcentage de la précipitation infiltrée dans les stériles en fonction de l'indice des vides du sable (épaisseur de 60 cm).....133

Figure 6.21 : Quantité d'eau infiltrée dans les stériles en fonction du temps pour une CCE avec des indices des vides de 0,38; 0,42;0,45 et 0,49 (épaisseur de 60 cm; précipitations de 117 mm en 3600 s) 133

Figure 6.22 : Quantité d'eau infiltrée dans les stériles en fonction de l'épaisseur de la couche de sable et des précipitations (A : e_{min}=0,38; B : e_{max}=0,49) 134

Figure A.1 : Comparaison des courbes granulométriques du sable de la couverture ; A) lysimètre 1, B) lysimètre 2, C) lysimètre 3, D) lysimètre 4, E) lysimètre 5 et F) lysimètre 6 (début) 159

Figure C.1 : Analyse granulométrique de l'échantillon HSP-A après l'essai Proctor 171

Figure E.1 : Teneur en eau massique lors du montage des colonnes (A : colonne No.1, B : colonne No. 2) 190

Figure E.2 : Masse de la colonne No. 2 au cours de l'essai 190

Figure E.3 : Masse d'eau cumulative à la sortie de la colonne No. 1 191

Figure E.4 : Masse d'eau cumulative à la sortie de la colonne No. 2 191

Figure E.5 : Pression enregistrée par les tensiomètres T1, T2, T3, T4 et T6 lors du drainage de la colonne No. 1 192

Figure E.6 : Pression enregistrée par les tensiomètres T1, T2, T3, T4 et T6 lors du drainage de la colonne No. 2 192

Figure E.7 : Courbes granulométriques au démontage de la colonne No. 1 193

Figure E.8 : Zoom sur les courbes granulométriques après essai de compaction 194

Figure E.9 : Courbes granulométriques au démontage de la colonne No. 2 195

Figure E.10 : Zoom sur les courbes granulométriques après essai de compaction 196

Figure F.1 : Courbe de rétention d'eau obtenue en cellule de pression (Échantillon HSP-2) et CRE estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) 214

Figure I.1 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 1L 223

Figure I.2 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 3L 223

Figure I.3 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 5L 224

Figure I.4: Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 1L 224

Figure I.5 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 3L 225

Figure I.6 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 5L 225

Figure I.7 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 7L 226

Figure I.8 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 1L 226

Figure I.9 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 3L 227

Figure I.10 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 5L 227

Figure I.11 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 7L 228

Figure I.12 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L 228

Figure I.13 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L 229

Figure I.14 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L 229

Figure I.15 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L 230

Figure I.16 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L 230

Figure I.17 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L 231

Figure I.18 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 7L 231

Figure I.19 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L 232

Figure I.20 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L 232

Figure I.21 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L 233

Figure I.22: Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 7L 233

Figure I.23 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 1L 234

Figure I.24 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 3L 234

Figure I.25 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 5L 235

Figure I.26 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 1L 235

Figure I.27 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 3L 236

Figure I.28 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 5L 236

Figure I.29 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 7L 237

Figure I.30 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 1L 237

Figure I.31 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 3L 238

Figure I.32 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 5L 238

Figure I.33 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 7L 239

Figure I.34 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L 239

Figure I.35 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L 240

Figure I.36 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L 240

Figure I.37 : Courbe de rétention d'eau en mouillage (CRE wet) estimée avec la méthode de Maqsoud et al. (2012) comparée à la CRE en drainage pour un e=0,44 241

Figure I.38 : Courbe de rétention d'eau en mouillage (CRE wet) estimée avec la méthode de Maqsoud et al. (2012) comparée à la CRE en drainage pour un e=0,42 242

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS (AVEC UNITÉS)

A	Section transversale, perpendiculaire à l'écoulement [L^2]
A*	Coefficient fonction de la teneur en eau volumique du modèle de Philip [$L \cdot T^{-1}$]
AEV	Valeur (ou pression) d'entrée d'air (*Air Entry Value*) [L]
a	Constante du modèle de Holtan [-]
a_c	Coefficient d'adhésion (modèle MK) [-]
a_f	Valeur approximative de ψ_a [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
a_{in}	Aire de la burette d'entrée [L^2]
a_{out}	Aire de la burette de sortie [L^2]
a*	Facteur de forme du modèle MK
b	Paramètre physique du modèle de Green et Ampt [$M^2 \cdot T^{-1}$]
b*	Facteur de forme du modèle de Holtan [-]
C	Constante du modèle de Kozeny-Carman [$L^2 \cdot M^{-1}$]
C_1	Constante de dimension semi-empirique du modèle de Reynolds et Elrick [-]
C_2	Constante de dimension semi-empirique du modèle de Reynolds et Elrick [-]
C_C	Coefficient de courbure [-]
CCE	Couche de contrôle des écoulements
CEBC	Couverture avec effet de barrière capillaire
C_G	Constante du modèle de Kozeny-Carman modifié [-]
$C(\psi)$	Fonction de correction du modèle de Fredlund et Xing [-]
CRE	Courbe de rétention d'eau
C_U	Coefficient d'uniformité [-]
DA	Infiltromètre à double anneau

DDL	*Down Dip Limit* ou longueur de diversion à partir duquel les effets de barrière capillaire disparaissent
D_H	Diamètre équivalent des grains du modèle MK
DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
D_r	Densité relative des grains solides [-]
DTS	*Distributed Temperature Sensing*
d	Profondeur de l'enfoncement de l'infiltromètre dans le sol [L]
d_{eq}	Diamètre équivalent des grains [L]
d_{min}	Diamètre des grains minimal mesuré [L]
d_{10}	Diamètre des grains correspondant à 10% passant [L]
d_{30}	Diamètre des grains correspondant à 30% passant [L]
d_{60}	Diamètre des grains correspondant à 60% passant [L]
e	Indice des vides [-]
e_{min}	Indice des vides minimal [-]
FCL	*Flow control layer*
G	Facteur de forme du modèle Bosch et West [-]
g	Constante gravitationnelle (9,81 m^2/s) [$L \cdot T^{-2}$]
H	Charge hydraulique [L]
H_f	Charge effective au front de mouillage [L]
H_0	Charge à la surface du sol [L]
h_{co}	Remontée capillaire équivalente [L]
I	Infiltration cumulée [L]
IRME	Institut de recherche en mines et environnement
i	Taux d'infiltration [$L \cdot T^{-1}$]

i_c	Capacité d'infiltration [$L \cdot T^{-1}$]
i_0	Infiltration au temps initial [$L \cdot T^{-1}$]
i_s	Taux d'infiltration lorsque celui-ci devient constant en fonction du temps [$L \cdot T^{-1}$]
KC	Modèle prédictif de Kozeny-Carman
KCM	Modèle prédictif Kozeny-Carman modifié
k	Conductivité hydraulique [$L \cdot T^{-1}$]
k_{fs}	Conductivité hydraulique saturée de terrain [$L \cdot T^{-1}$]
k_i	Conductivité hydraulique du sol à sa teneur en eau initiale [$L \cdot T^{-1}$]
k_r	Conductivité hydraulique relative [-]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [$L \cdot T^{-1}$]
L	Longueur entre deux manomètres [L]
L_D	Longueur de déviation [L]
Lys.	Lysimètre
M	Capacité de stockage de l'eau du modèle de Holtan par unité de surface [L]
M_1	Masse de la colonne vide et pièces connexes [M]
M_2	Masse de la colonne vide (et pièces connexes) remplie de sol sec [M]
M_e	Masse de la colonne (et pièces connexes) remplie d'eau désaéré uniquement [M]
MK	Modèle Kovács Modifié (ou *modified Kovàcs*)
Ms	Masse de solides [M]
M_{tot}	Masse totale de la colonne (sol et eau désaéré) avant l'essai [M]
m	Coefficient de distribution de la taille des pores du modèle de Kovács Modifié [-]
m_f	Paramètre de lissage de courbe (relié à la teneur en eau résiduelle et la fonction de correction $C(\psi)$ [-]
m_v	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
n	Porosité [-]

n_f	Paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau du modèle de Fredlund et Xing [-]
n_v	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
P_{NoD}	Pourcentage de la masse sèche pour un tamis de taille nominale D
P_{Nod}	Pourcentage de la masse sèche pour un tamis de taille nominale d
Q	Débit [$L^3 \cdot T^{-1}$]
q	Flux de Darcy ou vitesse de Darcy apparente [$L^3 \cdot T^{-1}$]
q_s	Taux d'infiltration constant dans l'infiltromètre [$L \cdot T^{-1}$]
RTFT	Rio Tinto Fer et Titane
r	Rayon du cylindre du perméamètre de Guelph [L]
r_a	Rayon intérieur de l'infiltromètre [L]
SA15	Infiltromètre à simple anneau avec un rayon de 15 cm
SA30	Infiltromètre à simple anneau avec un rayon de 30 cm
S_a	Degré de saturation dû à l'adhésion [-]
S_c	Degré de saturation dû à la capillarité [-]
SR	Couverture de type stockage et relargage
S_r	Degré de saturation [-]
S_s	Surface spécifique des grains solides [$L^2 \cdot M^{-1}$]
s	Sorptivité [$L \cdot T^{-1/2}$]
t	Temps [T]
t_{max}	Temps maximal [T]
V	Volume de l'échantillon [L^3]
WEV	Valeur (ou pression) d'entrée d'eau (*Water Entry Valu*) [L]
w	Teneur en eau massique [%]
w_{opt}	Teneur en eau massique optimale [%]

x	Paramètre de tortuosité du modèle [-]
Z	Profondeur [L]
α	Constante empirique du modèle de Kostiakov [-]
α_v	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [L^{-1}]
α_*	Nombre de sorption (*Soil sorptive number*) [L^{-1}]
β	Constante empirique du modèle de Kostiakov [-]
β_w	Angle de mouillage ou angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides [º]
γ	Constante empirique du modèle de Horton
γ_w	Poids volumique de l'eau (9,81 kN/m^3) [$(M \cdot L \cdot T^{-2}) \cdot L^{-3}$]
λ_c	Longueur capillaire microscopique estimée selon la texture et la structure du sol pour le calcul de la conductivité hydraulique du perméamètre de Guelph [L]
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3}$ Pa·s à 20º C) [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
ρ_d	Masse volumique sèche [$M \cdot L^{-3}$]
ρ_{dmax}	Masse volumique sèche maximale [$M \cdot L^{-3}$]
ρ_s	Masse volumique des grains solides [$M \cdot L^{-3}$]
ρ_w	Masse volumique de l'eau ($\approx$ 1000 kg/m^3 à 20º C) [$M \cdot L^{-3}$]
ψ	Succion matricielle [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
ψ_a	Pression d'entrée d'air [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
ψ_n	Paramètre de normalisation du modèle de Kovács Modifié [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
ψ_r	Succion résiduelle [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
ψ_0	Succion à l'état initial ($t = 0$) [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
σ_w	Tension de surface de l'eau (0,0073 N/m à 20º C)
θ	Teneur en eau volumique [$L^3 \cdot L^{-3}$]
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_s Teneur en eau volumique à saturation $[L^3 \cdot L^{-3}]$

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Analyses granulométriques 153

Annexe B – Densité relative des grains solides 168

Annexe C – Résultats essais de compactage (Proctor modifié) 170

Annexe D – Résultats essais de perméabilité 172

Annexe E – Résultats des essais en colonne 190

Annexe F – Résultats essais des essais en cellule tempe 212

Annexe G – Résultats de densité in situ 216

Annexe H – Résultats des essais d'infiltration 221

Annexe I – Résultats des analyses numériques 223

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

L'industrie minière occupe une place importante dans l'économie du Québec. On comptait en 2015 27 exploitations souterraines et à ciel ouvert dans la province, sans compter les usines de traitements minéralurgiques et les autres installations reliées au secteur minier (Gouvernement du Québec, 2016). Cette industrie génère cependant des volumes de rejets importants, dont la gestion à court, moyen et long termes peut être complexe et coûteuse.

Parmi ces rejets, la gestion des roches stériles représente un défi particulier en raison de leur granulométrie grossière et très étalée. Les roches stériles sont généralement entreposées en surface sous forme d'empilements appelés haldes à stériles. Elles contiennent parfois des minéraux sulfureux (tels que la pyrite et la pyrrhotite), qui, au contact avec l'eau et l'oxygène, peuvent s'oxyder et générer du drainage minier acide (DMA) (p.ex. Aubertin et al., 2002a, 2002b, 2008; Lefèvre et al., 2001). Le DMA est caractérisé par un pH faible (acide) et des concentrations élevées en métaux lourds et en sulfates. Les eaux de drainage peuvent aussi sous certaines conditions demeurer à des pH proches de la neutralité. C'est le cas en présence de minéraux neutralisants (tels que les carbonates) qui peuvent contribuer à neutraliser (ou tamponner) l'acide généré (pour des teneurs en sulfures relativement faibles). C'est aussi le cas en présence de sulfures métalliques qui ne génèrent pas d'acide par oxydation directe à des pH proches de la neutralité (p. ex. sphalérite, chalcopyrite, galène). Les concentrations de certains métaux solubles et mobiles à des pH proches de la neutralité (p.ex. As, Sb, Zn, Ni), peuvent malgré tout dépasser les limites permises (Bussière et al., 2005; Plante et al, 2010a, 2010b, 2011). Ce phénomène est appelé drainage neutre contaminé (DNC).

Plusieurs cas de DNC ont été observés au Canada et ailleurs dans le monde (Nicholson, 2004; Bay et al., 2009). C'est le cas de la mine du Lac Tio, située à 43 km au nord-est de la ville d'Havre-St-Pierre (Québec). Il s'agit du plus important gisement d'hémo-ilménite massive au monde, en exploitation depuis 1950 (Rio Tinto, 2017). La mine génère deux types de roches stériles : des stériles « minéralisés » considérés comme réactifs (hémo-ilménite) et des stériles non ou peu minéralisés, dits non réactifs (anorthosite). Des concentrations en nickel dépassant

occasionnellement les critères environnementaux ont été mesurées dans les eaux de lixiviation (Bussière et al., 2015).

Une solution pour limiter la génération de drainage contaminé consiste à réduire l'infiltration d'eau dans les haldes à stériles potentiellement génératrices de DMA ou DNC. Une nouvelle méthode d'entreposage a ainsi été proposée par la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestions des rejets miniers (Aubertin et al., 2002b, 2013). Cette approche repose sur l'installation d'une couche de contrôle des écoulements (CCE) au sommet de la halde. Cette couche inclinée est constituée d'un matériau plus fin et avec une meilleure capacité de rétention d'eau que les stériles sous-jacents, afin de développer un effet de barrière capillaire entre les deux matériaux. L'eau des précipitations peut ainsi théoriquement être déviée vers l'extérieur de la halde, tout en circulant principalement dans un matériau non réactif. Une CCE peut être installée au sommet de chaque banc (et de chaque « couche ») de la halde lors de sa construction ce qui permet une gestion intégrée des stériles au cours de leur production.

Une halde expérimentale a été construite sur le site de la mine du Lac Tio (propriété de Rio Tinto Fer et Titane, RTFT) afin d'évaluer l'efficacité de cette méthode à l'échelle d'un banc. La caractérisation minéralogique, géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine du Lac Tio (Pépin, 2009; Intissar, 2009; Plante, 2010a; Lessard, 2011; Peregoedova, 2012; Lévesque, 2015) et les simulations numériques de l'écoulement de l'eau dans les haldes (Aubertin et al., 2002b; Fala et al., 2002, 2005, 2006; Aubertin, 2013; Broda et al., 2013, 2014; Dawood et al., 2014) ont permis d'établir les dimensions et propriétés des matériaux appropriées pour la conception de la halde expérimentale. Le cœur de la halde est composé d'hémo-ilménite et son extrémité (en aval de la pente) est composée d'anorthosite. Le sol pulvérulent utilisé pour la CCE est un sable prélevé à proximité d'Havre-St-Pierre (à environ 43 km du site de la mine). Le sable a été placé directement sur les stériles et recouvert d'une couche d'anorthosite concassée. La caractérisation du sable s'est avérée nécessaire pour mieux comprendre et concevoir une CCE pour d'autres sites miniers.

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet est de caractériser les propriétés hydrogéologiques du sable servant de couche de contrôle de l'écoulement (CCE) dans la halde à stériles expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio. Les propriétés du sable servent à évaluer le développement d'un effet

de barrière capillaire entre la couverture et les stériles, et éventuellement le bon fonctionnement de la CCE. Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Caractériser le sable à partir d'essais au laboratoire (essais de caractérisation normalisés, essais en colonnes).
- Caractériser les propriétés hydrogéologiques du sable à l'aide d'essais d'infiltration sur le terrain.
- Évaluer l'homogénéité de la CCE sur la halde expérimentale.
- Comparer divers types d'essais d'infiltration (simple anneau, double anneau, perméamètre de Guelph).
- Déterminer les propriétés du sable par analyse inverse avec le logiciel Seep/W (Geo-Slope International, 2007, 2016).
- Simuler le comportement de la CCE à l'échelle locale (en 1D) sous divers régimes d'infiltration.

1.3 Contenu du mémoire

Ce mémoire comporte 7 chapitres. Après un chapitre d'introduction, le chapitre 2 présente l'état des connaissances sur l'entreposage des roches stériles et leur restauration. Les termes et les concepts miniers (stériles, haldes à stérile, drainage contaminé et CEBC), l'écoulement saturé et non saturé, ainsi que la théorie de l'infiltration de l'eau dans les sols y sont abordés. Le chapitre 3 présente la méthodologie et les protocoles expérimentaux des essais réalisés au laboratoire et sur le terrain. Les chapitres 4 et 5 sont consacrés aux résultats obtenus au laboratoire et sur le site de la halde expérimentale. Le chapitre 6 présente l'interprétation et l'analyse des résultats expérimentaux et numériques. Le chapitre 7 résume les résultats de la caractérisation du sable réalisée au laboratoire et sur le terrain et présente les conclusions issues de l'analyse de sensibilité à partir de simulations numériques et propose quelques recommandations pour les travaux futurs. Les détails des résultats des différents essais sont présentés aux annexes A à I.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Propriétés de base des stériles

Les roches stériles sont produites lors du processus d'extraction du minerai. Une quantité limitée de stériles peut être retournée sous terre pour remblayer les chantiers dans le cas d'une mine souterraine (Aubertin et al., 2002a), mais la majorité des stériles est entreposée en surface sous la forme d'empilements appelés haldes. En 2011, les haldes au Québec occupaient une superficie moyenne d'environ 20 hectares, soit 20 % de la superficie occupée par des rejets miniers (Aubertin et al., 2011a). Avec la croissance de l'industrie et la multiplication des opérations à ciel ouvert, le volume et la superficie des haldes à stériles tendent à augmenter.

Les roches stériles sont produites principalement par sautage, ce qui influence directement leurs propriétés. Les particules sont généralement plus anguleuses que celle d'un sol naturel. Elles ont une granulométrie grossière et très variable. Leur coefficient d'uniformité (C_U) est souvent supérieur ou égal à 20 (Aubertin et al., 2002b; Gamache-Rochette, 2004; Maknoon, 2016), ce qui indique une granulométrie très étalée. La taille des grains peut varier de moins de 1 µm à plus de 1 m (Martin 2003; Fala et al., 2005). Leur indice des vides (e) et leur porosité (n) en place peuvent être relativement élevés. La conductivité hydraulique des roches stériles est influencée par leur granulométrie et leurs propriétés en place (Peregoedova, 2012; Maknoon, 2016). Par exemple des conductivités hydrauliques de 10^{-7} cm/s pour des stériles plus argileux à 10^{0} cm/s pour des stériles provenant de roches ignées et métamorphiques ont pu être mesurées pour une porosité comprise entre 0,35 à 0,40 (Morin et al., 1991). La densité relative des grains solides (D_r ou G_s) des roches stériles peut varier de 2,6 à 4,8 ou plus (p. ex. Kesimal et al., 2004; Bruno, 2007).

2.2 Haldes à stériles

2.2.1 Caractéristiques de base

Une halde est un empilement de roches stériles. Ces structures sont souvent de grandes dimensions, pouvant aller jusqu'à 300 mètres de hauteur et plus et pouvant contenir plus de 500 millions de mètres cubes de stériles (McCarter, 1990). Leur superficie couvre souvent plusieurs dizaines d'hectares.

Une halde à stériles est souvent très hétérogène. La granulométrie, la porosité, les propriétés hydriques et la composition minéralogique peuvent varier significativement à l'intérieur des empilements. La méthode de construction a aussi un impact direct sur les propriétés et l'hétérogénéité des haldes : création de zones plus compactées, ségrégation le long des pentes ou encore présence de zones stratifiées (Morin et al., 1991; Fala, 2002; Aubertin et al., 2002a; Azam et al., 2007).

2.2.2 Méthodes de construction

Les principales méthodes pour la construction des haldes à stériles sont les suivantes (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a, 2002b, 2008; Fala, 2002, 2008; Martin, 2003) :

- Méthode I : déversement à la benne (*end-dumping*)
- Méthode II : déversement avec épandage au butoir (*push-dumping*)
- Méthode III : déversement à la benne avec régalage (*free-dumping*)
- Méthode IV : déversement avec une pelle à benne traînante (*drag-line*)

Le choix de la méthode dépend de la topographie du site (déposition dans une vallée, en travers d'une vallée, sur une pente, en crête, sur terrain plat), de l'équipement disponible et de la taille de l'opération. Chaque méthode entraîne une structure différente et influence la distribution interne des grains et le mouvement de l'eau et des gaz dans la halde.

Pour la méthode I (déversement à la benne), un camion porteur déverse les stériles le long de la crête de la halde. Cette méthode engendre une accumulation de particules fines près de la surface et de particules grossières à la base. Un granoclassement marqué est ainsi souvent observé.

Dans le cas de la méthode II (déversement avec épandage au butoir), les stériles sont déposés à la surface de la halde à l'aide de camions ou de convoyeurs, et poussés du haut de la crête avec un bélier mécanique. La ségrégation est usuellement moins marquée que pour la méthode I en raison de la plus faible vitesse angulaire initiale produite par le déversement. Environ 40% des particules grossières atteignent le pied de la halde (contre 75% avec la méthode I) (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002b; Fala, 2002).

Figure 2.1: Déversement à la benne (*end-dumping)* (photo : Bussière et al., 2015)

Figure 2.2: Déversement avec épandage au butoir (*push dumping*) (photo : IRME)

La méthode III (déversement à la benne avec régalage) consiste à déposer de petits empilements (tas) de stériles à la surface de la halde. La surface est ensuite nivelée et quelques fois compactée. Cette méthode produit une ségrégation plus faible et une densité en place des stériles plus élevée que les deux méthodes précédentes.

La méthode IV (déversement avec une pelle à benne traînante) produit une ségrégation assez faible, mais le stérile est moins dense qu'avec la méthode III. Elle est peu utilisée dans les mines en roches dures.

Une stratification horizontale dans la halde est souvent observée pour les méthodes I, II et III en raison de la circulation d'équipement lourd à la surface (Aubertin et al., 2002a; Fala et al., 2003, 2005). Cette stratification a une influence directe sur les propriétés hydrogéologiques et géotechniques de la halde.

2.2.3 Caractéristiques hydrogéologiques des haldes à stériles

Une halde à stériles, construite en surface, devient généralement partie intégrante du système hydrologique local. Elle est exposée aux précipitations et l'eau d'infiltration ou de ruissellement ayant été en contact avec les stériles rejoint ensuite la nappe phréatique ou les cours d'eau de surface environnants (Morin et al., 1991).

Dans une halde à stériles, les mouvements de l'eau sont influencés principalement par deux groupes de facteurs (Morin et al., 1991; Fala, 2002; Aubertin et al., 2002b) :

- Ceux liés à l'environnement autour de la halde : présence de zones de recharge, de décharge ou intermédiaires
- Ceux liés à la halde elle-même : matériaux, méthode de déposition, structure interne.

Les propriétés et les dimensions des haldes impliquent généralement des écoulements non saturés à l'intérieur des stériles. La grande variabilité granulométrique peut parfois également entraîner la formation de zones d'écoulements préférentiels localisés liés à l'accumulation de matériaux plus grossiers (Martin, 2003). Les passages répétés de la machinerie lourde peuvent aussi créer des zones plus compactées, plus denses et moins perméables en alternance avec des couches de matériaux plus lâches. Ces zones peuvent favoriser l'accumulation et l'écoulement préférentiel de l'eau dans les haldes à stériles, et entraîner la formation de zones avec des degrés de saturation plus élevés (Aubertin et al., 2002a, 2008).

2.3 Écoulement de l'eau en condition saturée et non saturée

Une halde se trouve généralement au-dessus de la nappe phréatique (conditions non saturées) ce qui affecte l'écoulement de l'eau dans les stériles. Les écoulements en conditions saturées et non saturées sont décrits ci-après.

2.3.1 Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau dans un milieu saturé est décrit par la loi de Darcy (p.ex. Todd et Mays, 2005) :

$$Q = k_{sat} A * \frac{\Delta H}{\Delta L} \tag{2.1}$$

Où,

Q : débit [$L^3 \cdot T^{-1}$]

A : section transversale, perpendiculaire à l'écoulement [L^2]

k_{sat} : conductivité hydraulique saturée [$L \cdot T^{-1}$]

$\frac{\Delta H}{\Delta L}$: gradient hydraulique [$L \cdot L^{-1}$], où ΔH est la différence de charge (en valeur absolue) [L] et ΔL est la distance [L] entre les deux points de mesure

Cette équation peut aussi être exprimée en fonction du flux ou vitesse de Darcy (apparente) (q), qui correspond au débit spécifique par unité de surface (Fetter, 2008).

$$q = -k_{sat} * \frac{\partial H}{\partial L} \tag{2.2}$$

L'équation de Darcy suppose que le milieu est saturé, mais la relation peut être étendue aux milieux non saturés avec la loi de Richards (1931) (Hillel, 1980; Warrick, 2003; Haverkamp et al., 2007). La conductivité hydraulique est alors variable et dépend du degré de saturation en eau (S_r). Cet aspect est vu plus en détail à la section 2.3.3.

2.3.2 Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) dépend à la fois des propriétés du milieu et du fluide. La valeur de k_{sat} est usuellement exprimée en cm/s ou m/s. La valeur de la conductivité hydraulique saturée peut être obtenue par des essais au laboratoire ou sur le terrain. Quelques-uns de ces essais sont discutés au chapitre 3. Elle peut également être estimée (ou prédite) au moyen de différents modèles basés sur les caractéristiques géotechniques des matériaux, comme la granulométrie et l'indice des vides.

Il existe différentes méthodes de prédiction de k_{sat}, comme celles de Hazen (1911), Taylor (1945), Navfac DM7 (1974) et Chapuis (2004). Les méthodes de Kozeny-Caman (KC) (Chapuis et Aubertin, 2003) et de Kozeny-Carman modifiée (KCM) (Mbonimpa et al., 2002) sont aussi utilisées pour la prédiction de k_{sat} pour les rejets miniers. Les modèles prédictifs sont des outils d'analyse préliminaire qui ne devraient cependant pas remplacer pas les essais au laboratoire ou sur le terrain.

La méthode de Kozeny-Carman (KC) s'applique à la plupart des sols (plastiques et non plastiques) et pour les résidus miniers (équation modifiée non présentée ici, voir Chapuis et Aubertin, 2003) pour des valeurs de conductivités hydrauliques comprises entre 10^{-1} à 10^{-11} m/s (Chapuis et Aubertin, 2003). Cette équation est basée sur l'hypothèse qu'un matériau poreux peut être représenté comme un assemblage de tubes. À partir de cette hypothèse, l'équation de Navier-Stokes permet d'établir la relation suivante par le modèle de Kozeny-Carman (KC) (Chapuis et Aubertin, 2003).

$$k_{sat} = \frac{C * g}{\mu_w \rho_w S_s^2 Dr^2} * \frac{e^3}{(1+e)} \tag{2.3}$$

Où,

k_{sat} : conductivité hydraulique saturée (cm/s)

C : constante du modèle (C=0,2*100 si k_{sat} est exprimé en cm/s)

g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s^2)

μ_w : viscosité dynamique de l'eau (≈10^{-3} Pa*s à 20°C)

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

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

D_r : densité relative des grains solides [-]

e : indice des vides [-]

Le modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) est en partie basé sur le modèle de KC (Aubertin et al., 1996). Il propose une relation explicite entre la tortuosité et l'indice des vides à partir du diamètre effectif (d_{10}) et du coefficient d'uniformité (C_U) pour les sols granulaires, et à partir de la limite de liquidité pour les matériaux plastiques et/ou cohésifs (Mbonimpa et al., 2002). Le modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) pour les sols granulaires (Mbonimpa et al., 2002) peut être exprimé par :

$$k_{sat} = C_G \frac{\gamma_w e^{3+x}}{\mu_w (1+e)} * C_U^{\frac{1}{3}} * d_{10}^2 \tag{2.4}$$

Où,

C_G : constante du modèle (C_G=0,1) [-]

γ_w : poids volumique de l'eau (9,81 kN/m^3)

x : paramètre de tortuosité du modèle (x ≈2 pour les sols granulaires (Mbonimpa et al., 2002)) [-]

Les versions du modèle KCM adaptées pour les sols fins (Mbonimpa et al., 2002) et pour les roches stériles (Peregoedova, 2012) ne sont pas présentés ici, car il ne sont pas utilisés dans ce travail.

Évaluation de la surface spécifique

La surface spécifique (S_s) du matériau est requise pour le calcul de prédiction de k_{sat} avec la méthode KC (Chapuis et Aubertin, 2003). Elle est implicitement incluse dans l'équation KCM (Mbonimpa et al., 2002). La surface spécifique est définie comme la surface externe totale des particules par unité de masse. Chapuis et Légaré (1992) ont proposé une méthode pour estimer la surface spécifique (S_s) à partir de la courbe granulométrique des sols non plastiques :

$$S_S = \frac{6}{\rho_s} \sum \left[(P_{NoD} - P_{Nod)} / d \right] \tag{2.5}$$

Où

S_s : surface spécifique (m^2/kg)

ρ_S : masse volumique des grains solides (kg/m^3)

P_{NoD} - P_{Nod}: pourcentage de la masse sèche entre deux tamis consécutifs de taille nominale D et d

Pour la fraction de taille inférieure au diamètre minimum (d_{min}), Chapuis et Légaré (1992) ont défini un diamètre équivalent (d_{eq}) :

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{d_{min}^2}{3}} \tag{2.6}$$

Où

d_{eq} : diamètre équivalent des grains (mm)

d_{min} : diamètre minimal mesuré (mm)

Les modèles KC et KCM ont été validés à de nombreuses reprises pour plusieurs matériaux, notamment par Aubertin et al. (1996), Mbonimpa et al. (2002) et Chapuis et Aubertin (2003). Ces

prédictions ont fréquemment donné des valeurs comparables aux résultats mesurés au laboratoire et sur le terrain.

2.3.3 Courbe de rétention d'eau (CRE)

La courbe de rétention d'eau exprime usuellement la relation entre la teneur en eau volumique θ [-] et la succion ψ [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]. La CRE est caractérisée par divers paramètres comme la pression d'entrée d'air (AEV ou ψ_a de l'anglais *Air Entry Value)*, la pression résiduelle (WEV ou ψ_r de l'anglais *Water Entry Value*) et la teneur en eau résiduelle θ_r [-].

La courbe de rétention d'eau comporte trois zones principales (figure 2.3) (p. ex. Peregoedova, 2012):

- *Zone de saturation (I) :* La zone de saturation est la portion de la courbe de rétention d'eau où la teneur en eau est égale à la teneur en eau à saturation (θ_s=n) et où la succion ne dépasse pas la pression d'entrée d'air ($\psi < \psi_a \equiv$AEV).
- *Zone transitoire (II) :* Cette zone correspond à la partie de la courbe de rétention d'eau où la teneur en eau varie en fonction de la succion. Cette zone transitoire est délimitée par l'AEV et la WEV (i.e. $\psi_a \leq \psi \leq \psi_r$).
- *Zone résiduelle (III) :* La zone résiduelle est la portion de la courbe de rétention d'eau où la teneur en eau est proche ou inférieure à la teneur en eau résiduelle ($\theta \leq \theta_r$, pour $\psi \geq \psi_r$).

Figure 2.3 : Courbe de rétention d'eau schématisée (tirée de Peregoedova, 2012)

Plus spécifiquement, la pression d'entrée d'air correspond à la succion à laquelle la teneur en eau commence à diminuer significativement (i.e. $\theta \leq \theta_S = n$). À partir de cette pression, les forces de rétention capillaire des plus gros pores ne sont plus assez élevées pour garder le matériau saturé et la désaturation commence. L'AEV est usuellement définie par l'intersection des tangentes pour les zones saturées et transitoires (droites en pointillés dans la figure 2.3). La succion résiduelle (ψ_r) correspond au point où la teneur en eau volumique (θ) atteint la teneur en eau résiduelle (θ_r). L'eau résiduelle est retenue dans les matériaux granulaires par des forces de capillarité et d'adhésion (Kovács, 1981, tiré de Peregoedova, 2012).

La courbe de rétention d'eau peut être mesurée au laboratoire (Aubertin et al., 1995; Delage et Cui, 2000; Chapuis et al., 2006; ASTM D6836, 2008) et sur le terrain (Bussière et al., 2007). Des modèles descriptifs ont été proposés pour décrire la courbe de rétention d'eau, incluant par exemple les modèles de Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994). Les trois premiers sont des modèles de loi de puissance et le dernier est un modèle hybride entre le modèle exponentiel et de puissance (Bussière, 1999; Martin, 2003). Le modèle de van Genuchten (1980) et celui de Fredlund et Xing (1994) sont détaillés ici.

Modèle descriptif de van Genuchten (1980)

$$\theta = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^n]^m}\right) + \theta_r \tag{2.7}$$

Où,

θ : teneur en eau volumique [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_S : teneur en eau volumique à saturation [$L^3 \cdot L^{-3}$]

θ_r : teneur en eau volumique résiduelle [$L^3 \cdot L^{-3}$]

α_v : paramètre d'ajustement du modèle (≈1/AEV) [L^{-1}]

ψ : charge de succion matricielle [L]

n_v : paramètre d'ajustement du modèle [-]

m_v : paramètre d'ajustement du modèle (a utilisé souvent m_v=1-1/n_v, van Genuchten et Nielsen (1985))

Modèle descriptif de Fredlund et Xing (1994)

$$\theta = C(\psi)\frac{\theta_S}{\left(ln\left[e + (\psi/a_f)^{n_f}\right]\right)^{m_f}} \tag{2.8}$$

Avec

$$C(\psi) = 1 - \frac{ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{ln[1 + (1000000/\psi_r)]} \tag{2.9}$$

Où,

e: nombre népérien (2,71828) [-]

a_f : valeur approximative de ψ_a [kPa]

n_f : paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau [-]

m_f : paramètre de lissage de courbe (relié à la teneur en eau résiduelle et la fonction de correction C(ψ) [-]

Le modèle de van Genuchten (1980) diffère du modèle de Fredlund et Xing (1994) surtout au niveau de la partie résiduelle de la CRE. Pour le modèle de Fredlund et Xing (1994), la teneur en eau volumique tend vers 0 à de fortes succions (théoriquement $\psi \approx 10^6$ kPa), tandis que dans le modèle de van Genuchten (1980) la teneur en eau reste constante et égale à θ_r une fois la succion résiduelle atteinte. Le modèle de van Genuchten (1980) a pour avantage d'avoir des paramètres d'ajustement relativement simples (α_v, m_v et n_v) qui sont déduits facilement à l'aide de données expérimentales. Ce modèle descriptif a été utilisé dans cette étude pour décrire les courbes de rétentions d'eau obtenues expérimentalement.

La courbe de rétention d'eau peut aussi être déterminée au moyen de modèles prédictifs à partir des propriétés hydrogéotechniques des matériaux (Arya et Paris, 1981; Haverkamp et Parlange, 1986; Aubertin et al., 1998). Les modèles prédictifs ont pour avantage de fournir une estimation de la CRE plus rapidement, sans faire d'essai de succion. Le modèle de Kovacs modifié (MK) (Aubertin et al., 1998, 2003) prédit la CRE pour un matériau granulaire à partir des propriétés géotechniques de bases d'un matériau (porosité et la granulométrie). Ce modèle a aussi été modifié afin de tenir compte du diamètre équivalent des roches stériles (modèle Kovacs modifié ajusté (MKs) (Peregoedova, 2012)) et des effets d'hystérésis (Maqsoud et al., 2012) .

Le modèle MK est utilisé dans ce projet pour estimer la CRE du sable utilisé dans la CCE sur la halde expérimentale; il est décrit plus en détail ci-dessous.

Modèle prédictif de Kovacs modifié

Le modèle Kovacs modifié (MK) (Aubertin et al., 1998, 2003), est basé sur le modèle de Kovacs (1981). Il permet d'estimer la courbe de rétention d'eau à partir de la courbe granulométrique, de l'indice des vides et de la densité relative des grains.

Le degré de saturation (S_r) est calculé comme la somme du degré de saturation dû aux forces d'adhésion (S_a) et du degré de saturation dû à la capillarité (S_c) à une succion donnée.

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - (1 - S_c)\langle 1 - S_a \rangle \tag{2.10}$$

Où,

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m exp[-m(h_{co}\psi)^2] \tag{2.11}$$

Avec :

m: coefficient de distribution de la taille des pores [-]

h_{co} : remontée capillaire équivalente [L]

< > : Crochets de Macauley où $< y >= 0{,}5(y + |y|)$

La valeur du degré de saturation due à l'adhésion (S_α) peut être exprimée par (Aubertin et al., 1998, 2003) :

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \tag{2.12}$$

Où,

a_C: coefficient d'adhésion (0,01 pour des matériaux granulaires (Aubertin et al., 2003)), [-]

ψ_n : paramètre de normalisation (ψ_n= 1 cm lorsque la charge de succion est exprimée en cm)

Avec (de Fredlund et Xing, 1994) :

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_0/\psi_r)} \tag{2.13}$$

Où,

ψ_0: succion initiale (cm)

ψ_r : succion résiduelle (cm)

Dans le modèle MK, on considère (Aubertin et al., 2003) :

$$\psi_r = \frac{0{,}42}{(eD_H)^{1.26}} \tag{2.14}$$

La remontée capillaire équivalente (h_{co}) et le diamètre équivalent des grains (D_H) peuvent être obtenus avec les équations suivantes (Aubertin et al., 1998):

$$h_{co,G} = \frac{\sigma_w cos\beta_w}{\gamma_w} \frac{a^*}{eD_H} = \frac{b}{ed_{10}} \tag{2.15}$$

$$D_H = [1 + 1{,}17 \log(C_U)/d_{10}] \tag{2.16}$$

Où,

a*: facteur de forme (≈ 10 pour $h_{co,G}$ exprimé en cm) [-]

σ_w : tension de surface de l'eau (0,0073 N/m à 20º C)

β_w : angle de mouillage ou angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides ($\beta_w \approx 0º$ en drainage et $\beta_w \approx 60º$ en mouillage pour des sols granulaires (Maqsoud et al., 2012))

γ_w : poids volumique de l'eau (9,81 kN/m^3 à 20º C)

2.3.4 Fonction de perméabilité

La fonction de perméabilité décrit la variation de conductivité hydraulique en fonction de la succion. Elle est généralement obtenue à partir de la courbe de rétention d'eau. Il existe différents modèles statistiques comme ceux de Child et Collis-George (1950), Burdine (1953), Mualem (1976) et Fredlund et al. (1994) qui permettent d'estimer la fonction de perméabilité. Le modèle de Mualem (1976) combiné avec celui de van Genuchten (1980) est fréquemment utilisé (p.ex. Bussière 1999; Zhuang et al., 2001; Pabst, 2011; Lévesque 2015) :

$$k_r = \theta_e^{1/2}\left[1-(1-\theta_e^{1/m_v})^{m_v}\right]^2 \tag{2.17}$$

Où,

k_r : conductivité hydraulique relative (=k/k_{sat}) [-]

m_v : constante du modèle de van Genuchten [-]

Ce modèle a entre autres été utilisé par Bussière (1999) et Lévesque (2015) pour simuler avec le logiciel Seep/W l'infiltration dans une CEBC et des stériles. Les résultats simulés se sont avérés similaires aux résultats d'infiltration réalisée en laboratoire ou sur le terrain. Ce modèle est utilisé dans ce mémoire.

2.4 Infiltration

Comme mentionné précédemment, l'apport en eau dans une halde se fait essentiellement par infiltration lors des précipitations (Morin et al., 1991). La CCE vise à limiter la percolation des eaux de précipitation dans le cœur de la halde. L'étude du comportement hydrique en conditions non saturées lors de l'infiltration est donc nécessaire à l'évaluation de l'efficacité de la CCE.

2.4.1 Taux et capacité d'infiltration

L'infiltration peut se produire de façon relativement homogène à la surface d'un sol suite à une précipitation ou lors d'une accumulation d'eau (Hillel, 1980) . L'eau peut aussi s'infiltrer de façon non homogène par des fissures et des irrégularités du sol. L'infiltration dans les sols homogène et granulaire peuvent aussi présenter des fronts de mouillage instable ou irrégulier (p. ex. Hill et Parlange, 1972; Liu et al., 1994). On parle alors parfois de digitation (fingering). Ces irrégularités se forment en milieu non saturé lorsque la force gravitaire d'écoulement domine la force capillaire.

Le taux d'infiltration [$L \cdot T^{-1}$] est le flux unitaire qui pénètre dans le sol pour une surface donnée en fonction du temps. Le taux d'infiltration dépend principalement de la teneur en eau initiale, de la charge en surface, de la succion et de la conductivité hydraulique du sol, mais aussi de sa texture, de sa structure et de son uniformité. Il varie en fonction du temps de façon non linéaire (figure 2.4). Lorsque l'apport en eau excède la capacité d'infiltration du sol, il y a accumulation d'eau à la surface du sol, puis ruissellement. On atteint alors ce que Horton (1940) nomme la capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité (Hillel, 1980).

Figure 2.4 : Taux d'infiltration en fonction du temps (selon Horton, 1933 et Koorevaar et al., 1983 tirée de Gitirana et al., 2006)

Au début de l'infiltration (avant l'apparition d'un front de mouillage), le taux d'infiltration est plus élevé en raison du fort gradient de charge d'eau appliqué à la surface, particulièrement lorsque le sol est sec. Il tend ensuite à diminuer jusqu'à une valeur constante égale à la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) (Hillel, 1980; Miyazaki, 2006). Ainsi, plus la conductivité hydraulique saturée d'un sol est élevée, plus le taux d'infiltration sera élevé à long terme.

2.4.2 Profil de teneur eau

Le profil de teneur en eau lors de l'infiltration dans un sol non saturé a été présenté par Hillel (1980) (figure 2.5). Ce profil a été décrit préalablement par Bodman et Coleman (1944). La position initiale de la nappe équivaut à la relation $u=P_{atm}$. Pour un sol homogène, le sommet du profil est quasi saturé (zone de saturation) (Williams et al., 1998). Sous cette zone, la teneur en eau diminue rapidement sur quelques centimètres (zone de transition). Au-delà de cette zone, la teneur en eau diminue lentement en fonction de la profondeur. Le front de mouillage est la limite entre le sol humide et le sol à l'état initial. Le gradient hydraulique est principalement contrôlé par la force gravitationnelle (zone de transmission), et la vitesse de diffusion du front de mouillage dépend de la taille et de la distribution des pores dans le sol, ainsi que de la fonction de perméabilité (Radcliffe et Rasmussen, 2002).

Figure 2.5 : Profil de teneur en eau lors de l'infiltration (tiré de Hillel, 1980)

2.4.3 Essais d'infiltration

Il existe de nombreux types d'essais d'infiltration sur le terrain qui permettent de mesurer le taux d'infiltration dans un sol (ou des rejets miniers). L'objectif de ces essais est d'estimer le taux d'infiltration, d'évaluer l'écoulement de l'eau en milieu non saturé et d'en déduire la conductivité hydraulique en place. Différentes méthodes et échelles peuvent être utilisées. Par exemple, des essais à grande échelle peuvent impliquer la construction de bassins (Gamache-Rochette, 2004;

Fala, 2008; Lessard, 2011). Des essais à petite et moyenne échelle peuvent être réalisés à l'aide de perméamètres et d'infiltromètres (Gamache-Rochette, 2004; Gribb et al., 2004; Dagenais, 2005; Gupta et al., 2006; Lessard, 2011). Les essais peuvent aussi être effectués à charges constantes ou variables. Plus la charge constante est maintenue longtemps, plus les conditions de l'essai se rapprochent des conditions saturées en surface et plus la vitesse d'infiltration tend vers la valeur de conductivité hydraulique saturée. Plusieurs facteurs (charge appliquée, profondeur d'enfoncement, rayon de l'anneau, etc.) peuvent influencer la mesure du taux d'infiltration.

On distingue principalement trois types d'essais (Day et Daniel, 1985): les tests de percolation (A), l'infiltromètre à simple anneau (B) et l'infiltromètre à double anneau (C). La figure 2.6 présente schématiquement ces méthodes réalisées dans une couche de sable disposée sur des stériles (cas de la CCE sur la halde expérimentale à la mine du Lac Tio).

Figure 2.6 : Illustration des principaux types d'essais d'infiltration sur le terrain (adapté de Day et Daniel, 1985)

Essai de percolation

L'essai de percolation consiste à forer un trou à la tarière dans le sol (profondeur et diamètre variables) et à le remplir d'eau (Day et Daniel, 1985). La variation du niveau de l'eau dans le trou en fonction du temps permet d'estimer le taux de percolation [$T \cdot L^{-1}$] (temps requis pour que l'eau s'abaisse d'une hauteur donnée). Le perméamètre de Guelph peut être utilisé pour réaliser une variante de l'essai de percolation. L'instrument est installé dans le trou de forage et permet de maintenir une charge constante. La vitesse d'infiltration est mesurée au cours de l'essai. Le

perméamètre de Guelph peut être installé facilement à différentes profondeurs (Kanwar et al., 1989; Havlena et Stephens, 1992; Gribb et al., 2004). Les conductivités hydrauliques mesurées donneraient des résultats acceptables pour tous les types de sols (Eijkelkamp Agrisearch Equipment (EAE), 2011), mais montrent une meilleure précision avec des matériaux fins (Havlena et Stephens, 1992). Les composantes du perméamètre de Guelph sont présentées à la figure 2.7 et l'équipement utilisé sur la halde expérimentale est présenté à la figure 2.8.

Figure 2.7 : Composantes du perméamètre de Guelph (Eijkelkamp Agrisearch Equipment (EAE), 2011)

Figure 2.8 : Perméamètre de Guelph en cours d'utilisation sur le site de la halde expérimentale

Reynolds et Elrick (1992) ont proposé une procédure pour déterminer avec le perméamètre de Guelph la valeur de la conductivité hydraulique saturée *in situ* (k_{fs}) en tenant compte d'un facteur géométrique (G) fonction du type de sol (Radcliffe et Rasmussen, 2002).

$$k_{fs} = \frac{i_s}{1+\frac{H\lambda_c}{G\pi r^2}+\frac{H^2}{G\pi r^2}} \tag{2.18}$$

Où,

k_{fs} : conductivité hydraulique saturée du sol sur le terrain [$L \cdot T^{-1}$]

i_s : taux d'infiltration lorsque celui-ci devient constant en fonction du temps [$L \cdot T^{-1}$]

H : charge maintenue dans le trou de tarière [L]

r : rayon du cylindre [L]

G : coefficient de forme et de la taille (dépend du type de sol) [-]

λ_c: longueur capillaire estimée selon la texture et la structure du sol [L]

Le facteur géométrique *(G)* peut être estimé selon l'équation polynomiale proposée par Bosch et West (1997) (Radcliffe et Rasmussen, 2002) :

$$G = \frac{1}{2\pi}\left[A_1 + A_2\frac{H}{r} + A_3\left(\frac{H}{r}\right)^2 + A_4\left(\frac{H}{r}\right)^3\right] \tag{2.19}$$

Où, pour H/r < 10 (critère d'utilisation de l'équation 2.35):

Tableau 2.1 : Valeurs de A_1, A_2, A_3 et A_4 en fonction du type de sol

Texture/structure du sol	A_1	A_2	A_3	A_4
Sable	0,079	0,516	-0,048	0,002
Loam et argile structurée	0,083	0,514	-0,053	0,002
Argile non structurée	0,094	0,489	-0,053	0,002

Infiltromètre à simple anneau

L'infiltromètre à simple anneau (figure 2.9) permet d'obtenir des mesures directes de la capacité d'infiltration d'un sol en surface (Dingman, 1994). L'aire est délimitée par une frontière imperméable, constituée habituellement d'un anneau en plastique ou en métal. L'anneau est inséré à une profondeur de 5 à 10 cm dans le sol (Bouwer, 1995). L'essai se déroule d'abord en condition d'accumulation d'eau (*condition of ponding*), et une charge constante est appliquée et maintenue durant l'essai (Dingman, 1994).

La figure 2.9 présente de façon schématique l'avancée du front de mouillage pour des temps t_1 à t_4 [T] lors d'un essai avec un infiltromètre à simple anneau. La remontée de l'eau vers la surface est un risque avec cette méthode d'infiltration.

Figure 2.9 : Schéma du mouvement du front de mouillage lors d'un essai avec infiltromètre à simple anneau (adapté de Dingman, 1994)

Dans un essai d'infiltration à simple anneau (figure 2.9), l'eau s'infiltre verticalement et latéralement dans le sol sous l'effet des forces de gravité et de capillarité (Dingman, 1994). Il est généralement recommandé d'utiliser un anneau de plus grand diamètre, pour diminuer l'influence des écoulements horizontaux dans le sol autour de l'anneau (Bouwer, 1995; Fala, 2008). On peut aussi utiliser un infiltromètre à double anneau (voir la section suivante) pour obtenir un résultat plus réaliste et représentatif du taux d'infiltration vertical. Si l'anneau est enfoncé à travers l'épaisseur totale de la couche de sol, l'écoulement se fera de façon unidimensionnelle dans ce matériau.

Pour un essai à simple anneau, Reynolds et Elrick (1990) ont proposé une équation empirique pour le calcul de la conductivité hydraulique saturée sur le terrain k_{fs} [$L \cdot T^{-1}$] (Reynolds, 2008).

$$k_{fs} = \frac{q_s}{[H/(C_1 d + C_2 r_a)] + \{1/[\alpha^*(C_1 d + C_2 r_a)]\} + 1} \tag{2.20}$$

Où,

q_s : taux d'infiltration constant dans l'infiltromètre en fonction du temps [$L \cdot T^{-1}$]

C_1 : Constante de dimension semi-empirique ; 0,316π [-]

C_2 : Constante de dimension semi-empirique ; 0,184π [-]

r_a : rayon intérieur de l'anneau [L]

H : charge dans l'anneau [L]

d : profondeur de l'enfoncement de l'anneau dans le sol [L]

α* : Nombre de sorption (*Soil sorptive number*) [L^{-1}] représentant les propriétés capillaires du sol et introduit par Philip (1985); α* est estimé selon la texture et la structure du sol (voir tableau 2.2). Pour le sable à l'étude un nombre de sorption de 4 m^{-1} a été utilisé.

Tableau 2.2 : Estimation de α* selon la catégorie et la structure du sol (Reynolds, 2008)

Texture et structure du sol	Nombre de sorption α* (m^{-1})
Compact, dépourvu de structure, matériel argileux ou silteux (p.ex., sédiments marin ou lacustre)	1
Sol avec une texture fine (argileuse ou silteuse) et sans structure; sable fin	4
Sol structuré argileux à limon; sable moyen à grossier sans structure; souvent appliqué pour les sols d'agriculture	12
Sable grossier et graveleux; fortement structuré ou agrégat; sol avec de larges et/ou nombreux macropores	36

Infiltromètre à double anneau

L'infiltromètre à double anneau est composé de deux anneaux concentriques métalliques (figure 2.6). La taille des anneaux peut varier, mais le diamètre de l'anneau interne est généralement inférieur à 20 cm et celui de l'anneau externe excède rarement 50 cm (Day et Daniel, 1985). Le diamètre de l'anneau interne et externe utilisé dans ce projet était de 30 et 60 cm (voir aussi section 3.6).

La charge dans l'anneau interne et dans la zone entre les deux anneaux est maintenue constante et égale. L'eau contenue dans l'anneau central s'infiltre principalement verticalement et les écoulements horizontaux sont limités par l'infiltration de l'eau dans l'anneau externe. Les mesures d'infiltrations dans l'anneau interne sont donc plus représentatives d'un taux d'infiltration vertical (Dingman, 1994).

L'équation 2.36 est aussi utilisée pour le calcul de la conductivité hydraulique saturée de terrain (k_{fs}) pour l'infiltromètre à double anneau (Reynolds et Elrick, 2005).

Comparaison des méthodes

Le perméamètre de Guelph peut être installé plus facilement à différentes profondeurs que les essais avec un infiltromètre, et la durée des essais est généralement plus courte (quelques minutes ou heures) (Kanwar et al., 1989; Havlena et Stephens, 1992; Gribb et al., 2004). Le perméamètre de Guelph ne permet par contre d'investiguer qu'un petit volume de sol. Avec un infiltromètre à simple ou double anneau, le volume de sol testé varie selon le diamètre des anneaux utilisés. Ces trois méthodes donnent généralement de bons résultats pour des sols avec des conductivités hydrauliques supérieures à environ 10^{-7} cm/s (Daniel, 1989).

Plusieurs résultats de terrain réalisés avec les 3 méthodes présentées plus haut ont été compilés et comparés à des essais de laboratoire (p. ex. Daniel, 1989). La conductivité hydraulique saturée déduite des mesures au perméamètre de Guelph peut être jusqu'à dix fois supérieure aux valeurs mesurées au laboratoire. Les résultats obtenus avec l'infiltromètre à simple anneau et à double anneau sont souvent plus proches des valeurs mesurées au laboratoire. La principale limitation de ces méthodes *in situ* est la saturation incomplète du sol lors des essais.

Le perméamètre de Guelph, l'infiltromètre à simple anneau et l'infiltromètre à double anneau ont été utilisés dans cette étude.

2.5 Contrôle des écoulements et restauration des haldes à stériles

2.5.1 Équations d'infiltration

Plusieurs modèles ont été proposés pour représenter mathématiquement en 1D l'infiltration (i) dans un sol homogène en fonction du temps (t) et de la capacité d'infiltration (i_c). Les équations

empiriques de Kostiakov (1932), Horton (1940) et Holtan (1961) et les équations analytiques de Green-Ampt (1911) et de Philip (1957) sont par exemple fréquemment employées pour exprimer le taux d'infiltration. La plupart des modèles considèrent que l'infiltration se fait de façon constante sur une longue période de temps et qu'une charge d'eau initiale est appliquée au début du processus d'infiltration (Fala, 2008). Les principaux modèles sont présentés sommairement dans ce qui suit.

Modèles empiriques

Kostiakov (1932) :

Le modèle de Kostiakov est défini comme suit (Ravi et Williams, 1998) :

$$i(t) = \alpha t^{-\beta} \tag{2.21}$$

Où, le taux d'infiltration i [L·T^{-1}] est fonction du temps t [T] et des constantes empiriques α (α > 0) [-] et β (0 < β <1) [-]. L'infiltration cumulative I(t) [L·T^{-1}] peut être exprimée par l'intégration de l'équation (2.21).

$$I(t) = \frac{\alpha}{1-\beta} t^{(1-\beta)} \tag{2.22}$$

Les constantes α et β sont déterminées par l'ajustement de la courbe obtenue avec l'équation 2.19 avec les données expérimentales de l'infiltration cumulative. Le modèle de Kostiakov (1932) devient moins précis à des temps plus importants (t_{max}) (Ravi et Williams, 1998). Les équations 2.18 et 2.19 sont donc valides pour $t < t_{max}$ (Ravi et Williams, 1998):

$$t_{max} = (\alpha / k_{sat})^{(1-\beta)} \tag{2.23}$$

Horton (1940) :

L'équation de Horton est définie comme suit (Hillel, 1980) :

$$i\,(t) = i_c + (i_0 - i_c)e^{-\gamma t} \tag{2.24}$$

Cette équation est établie avec trois paramètres évalués expérimentalement : i_c, i_0 et γ. Les paramètres i_0 et i_c sont respectivement le taux d'infiltration au temps initial et à la fin de l'essai [$L \cdot T^{-1}$] et γ [-] est un paramètre d'ajustement.

Holtan (1961) :

L'équation de Holtan est définie comme suit (Ravi et Williams, 1998) :

$$i\ (t) = i_c + ab^*(M - I)^{1,4} \tag{2.25}$$

Où, i_c est le taux d'infiltration à la fin de l'essai [$L \cdot T^{-1}$], a [-] est une constante relative aux conditions de surfaces comprise entre 0,25 à 0,8, b^* [-] est un facteur de forme et M (cm) représente la capacité de stockage de l'eau pour un sol par unité de surface d'une section transversale. Cette équation est valide seulement si $0 \leq I \leq M$ (Hillel, 1980).

Ces modèles empiriques sont de moins en moins utilisés en raison de leurs limitations (hypothèses simplificatrices, difficultés à déterminer certains paramètres). Les modèles mathématiques de Green et Ampt (1911) et de Philip (1957) leur sont préférés (Fala, 2008), car ils proposent des solutions analytiques avec des paramètres mesurables ou estimables du sol (comme la variation de teneur en eau volumique, la conductivité hydraulique saturée et la succion au front de mouillage) (Fala, 2008; Lessard, 2011). Les modèles de Green et Ampt (1911) et de Philip (1957) sont présentés sommairement dans ce qui suit.

Modèles mathématiques

Green-Ampt (1911) :

L'équation de Green et Ampt est basée sur le modèle physique d'un piston (profil d'infiltration vertical) et sur l'équation de Darcy. Il permet d'estimer le taux d'infiltration i(t) et l'infiltration cumulative I(t) en fonction du temps. Cette équation a été développée pour un sol profond et homogène, où le front de mouillage est bien défini avec une progression connue. L'équation de Green et Ampt (1911) peut être exprimée comme suit (Miyazaki, 2006):

$$i = i_c + b/I \tag{2.26}$$

Avec (Warrick, 2003) :

$$b = k_{sat}\Delta H \Delta\theta \tag{2.27}$$

Où, ΔH [L] représente variation entre la charge initiale et finale (H_0-H_f) et $\Delta\theta$ [-], la variation entre les teneurs en eau volumique saturée et initiale (θ_s -θ_0). En utilisant la loi de Darcy, l'équation peut s'écrire ainsi :

$$i = k_{sat}\left(\frac{H_0 - H_f + Z}{Z}\right) \tag{2.28}$$

Où (figure 2.10),

H_0 : charge à la surface du sol [L]

H_f : charge effective au front de mouillage [L]

Z : distance de la surface au front de mouillage [L]

Figure 2.10 : Paramètres et profil de la teneur en eau selon le modèle de Green-Ampt (Ravi et Williams, 1998)

L'augmentation de la teneur en eau volumique dans la zone de mouillage est exprimée par la différence entre les teneurs en eau volumique $\Delta\theta$ (= θ_s - θ_0), représentée à la figure 2.10. L'infiltration (i) est liée à $\Delta\theta$ par la relation suivante :

$$i = \frac{dI}{dt} = \Delta\theta \frac{dZ}{dt} \tag{2.29}$$

En intégrant l'équation (2.26), on obtient l'expression suivante pour l'infiltration cumulative (entre l'état initial et l'avancement du front de mouillage) :

$$I = Z\Delta\theta \; ; \; \Delta\theta = \theta_s - \theta_0 \tag{2.30}$$

En combinant les équations (2.30) et (2.29), on obtient :

$$\frac{k_{sat}}{\Delta\theta} dt = \frac{Z}{H_o - H_f + Z} dZ \tag{2.31}$$

En intégrant l'équation précédente, on obtient (Miyazaki, 2006) :

$$\frac{k_{sat}}{\Delta\theta} t = Z - \left(H_o - H_f\right) * ln\left(1 + \frac{Z}{H_0 - H_f}\right) \tag{2.32}$$

Finalement, en substituant Z de l'équation 2.29 par *(I/Δθ)* et en isolant *I*, on obtient l'équation usuelle de Green et Ampt (1911) pour l'infiltration cumulative (Miyazaki, 2006):

$$I = k_{sat} t + \Delta\theta \left(H_o - H_f\right) * ln\left(1 + \frac{I}{\Delta\theta \, (H_0 - H_f)}\right) \tag{2.33}$$

Philip (1957) :

Le modèle de Philip présente une solution pour un écoulement vertical (1D) dans un sol homogène dont la teneur en eau volumique initiale est uniforme et connue (Dingman, 1994). Le taux d'infiltration peut s'écrire (Hillel, 1980) :

$$i(t) = i_c + s/2t^{1/2} \tag{2.34}$$

Où,

s : sorptivité (capacité du sol à absorber l'eau par capillarité) [$L \cdot T^{-1/2}$]

t : temps [T]

i_c : capacité d'infiltration [$L \cdot T^{-1}$]

L'infiltration cumulative *I* peut s'exprimer comme suit (Espinoza, 1999) :

$$I = s \cdot t^{1/2} + A^{*}t \qquad 0 < t < t_c \tag{2.35}$$

Avec (Espinoza, 1999) :

$$t_c = \frac{s^2}{4(k_i - A^{*})^2} \tag{2.36}$$

Où,

k_i : conductivité hydraulique du sol à sa teneur en eau initiale [$L \cdot T^{-1}$]

A* : coefficient fonction de la teneur en eau volumique [$L \cdot T^{-1}$]

L'avantage du modèle de Philip (1957) est qu'il ne pose aucune restriction ou hypothèse quant au profil de teneur en eau durant l'infiltration (Fala, 2008). Les paramètres de sorptivité et le coefficient A* sont cependant difficiles à obtenir dans la pratique (Fala, 2008).

Le modèle de Green et Ampt (1911) est le modèle qui représente de manière la plus réaliste une infiltration verticale 1D en mode transitoire avec un infiltromètre (Reynolds, 2008). Ce modèle n'est toutefois pas utilisé dans ce projet, car le front de mouillage n'est pas mesuré sur le terrain. Les équations utilisées (section 2.4.3) pour estimer la conductivité hydraulique saturée à partir des mesures expérimentales sont basées principalement sur le modèle de Philip (1957) (Radcliffe et Rasmussen, 2002). Le modèle de Philip (1957) a été validé à plusieurs reprises par des essais expérimentaux et numériques (Young, 1957; Philip, 1957; Brutsaert, 1968; Talsma et Parlange, 1972; Warrick et al., 1985; Davidoff et Selim, 1986 cités par Fala, 2008).

2.5.2 Drainage minier acide (DMA) et drainage neutre contaminé (DNC)

Les roches stériles contiennent parfois des minéraux sulfureux qui peuvent (sous certaines conditions) générer du drainage minier acide (DMA) ou du drainage neutre contaminé (DNC). Le drainage minier acide se produit lorsque des minéraux sulfureux (principalement la pyrite et la pyrrhotite) contenus dans la roche entrent en contact avec l'eau et l'air, ce qui peut entraîner l'oxydation des sulfures réactifs et la génération d'acide sulfurique. L'acide généré abaisse le pH et augmente la solubilité des métaux. Les eaux de lixiviations du DMA sont caractérisées par un

faible pH (pH inférieur à 3-4) et une haute concentration en métaux (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni, As, etc.) et en sulfates (Aubertin et al., 2002a; Lindsay et al., 2015; Nordstrom et al., 2015).

Plusieurs sulfures peuvent être à la source de la génération de DMA. La pyrite (FeS_2) est le sulfure le plus commun et le plus souvent utilisé pour décrire la formation de DMA. Les principales équations d'oxydation de la pyrite peuvent s'écrire (Singer et Stumm, 1970; Kleinmann et al., 1981; Aubertin et al., 2002a; Bussière et al., 2005; Fala, 2008; Pabst, 2011; Lindsay et al., 2015; Nordstrom et al. 2015) :

Oxydation directe :

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \quad (2.37)$$

$$2Fe^{2+} + 1/2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \quad (2.38)$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad (2.39)$$

Réaction globale :

$$FeS_2 + 15/4O_2 + 7/2H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4 \quad (2.40)$$

Oxydation indirecte :

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \quad (2.41)$$

L'équation d'oxydation directe de la pyrite (éq. 2.37) indique qu'en présence d'oxygène et d'eau, il y a production de fer ferreux (Fe^{2+}). Le fer ferreux en solution est ensuite oxydé en fer ferrique (Fe^{3+}) (éq. 2.38). Lorsque le pH est supérieur ou égal à environ 3,5, le fer ferrique tend à précipiter sous forme d'hydroxydes (éq. 2.39). Quand le pH est inférieur à 3,5, le fer ferrique en solution devient l'oxydant principal de la pyrite (éq. 2.41). Cette réaction d'oxydation, dite indirecte, est plus rapide que la réaction d'oxydation directe et produit plus de protons (16 H^+).

Lorsque des minéraux neutralisants (tels que des carbonates) sont présents en quantité suffisante, le pH peut rester proche de la neutralité ($6 < pH < 9$). C'est aussi le cas en présence de sulfures métalliques autres que des sulfures de fer et qui ne génèrent pas d'acide à des pH neutres. La plupart des métaux précipitent dans ces conditions ou ne passent pas en solution (Appelo et Postma, 2005).

Certains minéraux comme le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le zinc (Zn), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb) (Plante, 2010a; Peregoedova, 2012) sont cependant relativement solubles à ces pH et peuvent atteindre des concentrations assez élevées dans les eaux de drainage. Lorsque les concentrations de ces métaux dépassent les normes environnementales, on parle de drainage neutre contaminé (DNC).

Du DNC est actuellement généré sur le site de la mine du Lac Tio, où la concentration en nickel dans l'eau au pied des haldes est occasionnellement plus élevée que la valeur prescrite par la directive 019 (Gouvernement du Québec, 2012) et le règlement sur les effluents des mines de métaux (REMM) (Gouvernement du Canada, 2016) ([Ni] > 0,5 mg/L).

2.5.3 Méthode de contrôle et de restauration des haldes à stériles

Pour réduire la production de DMA ou de DNC, les réactions d'oxydation des sulfures doivent être limitées à la source (Aubertin et al., 2002a, 2015, 2016). En réduisant l'apport d'oxygène et/ou d'eau, la réaction d'oxydation directe (éq. 2.37), et donc la génération de DMA et de DNC, sont contrôlées.

Diverses techniques de contrôle et de restauration peuvent être utilisées sur les sites d'entreposage de rejets miniers réactifs (SRK, 1991; Aubertin et al., 2002a):

- Recouvrement visant à limiter l'infiltration d'eau (barrière à l'eau)
- Recouvrement visant à limiter le flux d'oxygène (barrière à l'oxygène)
- Recouvrement de type consommation d'oxygène (composé par exemple de copeaux de bois ou de boues de papeterie.)

Le choix de la méthode de restauration dépend principalement du potentiel de génération d'acide et de neutralisation, de la nature et des propriétés des rejets miniers, du climat, des conditions de terrains (p.ex. profondeur de la nappe), de la disponibilité des matériaux et des coûts.

Au Québec, quelques méthodes de gestion des stériles ont été suggérées pour réduire les risques de génération de DMA et de DNC (Aubertin et al., 2002a, 2011b, 2013; Gouvernement du Québec, 2016) :

- L'utilisation des stériles comme remblai souterrain ou dans le remblayage des fosses

- La séparation des stériles selon le potentiel de génération d'acide ou le potentiel de lixiviation de métaux
- L'ennoiement des stériles (ex. sous terre ou dans les fosses, sous le niveau de la nappe phréatique)
- Recouvrement (barrière à l'eau et à l'oxygène)

Un recouvrement multicouche peut être efficace en climat humide (comme au Québec) pour limiter la migration de l'oxygène grâce à la superposition de matériaux naturels avec de forts contrastes de propriétés (p.ex. silt, sable, gravier, roches concassées, etc.) (Aubertin et al., 2002a, 2015). La couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC) en est un bon exemple (détails à la section 2.5.4).

La co-disposition des stériles miniers sous forme d'inclusions dans les parcs à résidus peut également aider à gérer et restaurer une partie des stériles produits (Aubertin et al., 2002c; James et Aubertin, 2009). Les stériles peuvent aider à la consolidation et au drainage des résidus et contribuer à réduire les risques environnementaux et géotechniques reliés à leur entreposage en surface, tout en étant maintenus sous l'eau et donc préservés des réactions d'oxydation.

L'utilisation des stériles réactifs dans la composition de *Paste rock* pourrait aussi permettre de limiter le drainage contaminé (Longo et Wilson, 2007). Ce mélange de roches stériles et de résidus est généralement dense, faiblement perméable et limite efficacement les flux d'oxygène et les mouvements d'eau, permettant ainsi un meilleur contrôle de la stabilité géochimique des rejets. Le coût du mélange et de la transformation des résidus en pâte, et l'influence de la taille et des caractéristiques des résidus et stériles sur l'applicabilité de la méthode représentent cependant des limitations importantes de la méthode.

Les méthodes de co-disposition ainsi que les méthodes de disposition des stériles sous terre ne permettent pas de gérer la totalité des roches stériles produites (Aubertin et al., 2002a). Une fraction non négligeable de stériles potentiellement générateurs de DMA ou DNC doit souvent être déposée dans des haldes en surface. Il est possible de traiter chimiquement l'effluent final, mais ce n'est pas une solution de restauration à long terme (Aubertin et al., 2002a, 2015).

La méthode de restauration étudiée dans ce mémoire est une approche de gestion intégrée qui vise à contrôler les écoulements d'eau pendant et après la déposition des rejets. Elle se base sur

l'utilisation d'une couche de contrôle des écoulements (CCE) installée au sommet de chaque banc de roches stériles (Aubertin et al., 2002b, 2013). Cette approche est assez similaire dans son principe aux couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) utilisées pour la restauration des parcs à résidus. Le fonctionnement de la CEBC et de la CCE est présenté plus en détail ci-dessous.

2.5.4 Couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC)

Une couverture multicouche peut être constituée de cinq couches (figure 2.11) : la couche superficielle (A), de protection (B), de drainage (C), de faible perméabilité (D) et de support (E). Les couches de drainage (C) et de faible perméabilité (D) constituent la barrière capillaire de la CEBC. Chaque couche a un rôle particulier et certaines couches peuvent être combinées (ex. B et C) (Aubertin et al., 2002a).

Figure 2.11 : Configuration idéalisée d'un recouvrement multicouche (proposé par Aubertin et Chapuis, 1991 et tiré de Aubertin et al., 1995, 2002a)

La couche superficielle (A) protège le reste du recouvrement contre l'érosion et limite les effets de fluctuation de température et d'humidité dans les couches sous-jacentes. Celle-ci est souvent composée de sol organique avec une épaisseur entre 15 et 20 cm (qui peut parfois atteindre 50 à 90 cm).

La couche de protection (B) aide à protéger les couches sous-jacentes des intrusions (animales, végétales et humaines) et des effets des cycles de mouillage-séchage et gel-dégel. Elle est typiquement composée d'un matériau contenant un fort pourcentage en cailloux ou de roches concassées. Son épaisseur usuelle varie entre 30 à 50 cm et peut aller jusqu'à 1 m.

La couche drainante (C) aide à contrôler l'infiltration dans la couche inférieure. Une inclinaison minimale de 2 à 5% permet de favoriser les écoulements horizontaux et la déviation latérale de l'eau. La couche drainante réduit les remontées capillaires et l'assèchement de la couche de faible perméabilité (D); elle a également un rôle de barrière à l'évaporation. Elle diminue aussi les pressions interstitielles dans le recouvrement afin d'améliorer sa stabilité. Elle est composée de sols pulvérulents (sable et/ou gravier), ou de matériaux synthétiques ou composites conçus pour le drainage.

La couche de faible perméabilité (D) ou de rétention d'eau minimise les infiltrations d'eau et la migration des gaz. Elle peut être composée de sols fins (sols argileux ou silteux), ou, en théorie, de géosynthétiques ou d'une combinaison de ces matériaux (ex. géomembrane et argile).

La couche de support (E) soutient physiquement le reste de la couverture et favorise la rétention d'eau dans la couche de faible perméabilité. Elle est composée de sols granulaires (sable et/ou gravier) ou de stériles.

Les couches C, D et E constituent le cœur d'une CEBC. Les contrastes entre les caractéristiques hydriques (fonction de perméabilité et courbe de rétention d'eau) des différents matériaux de ces trois couches permettent de contrôler l'écoulement de l'eau et de l'oxygène. La superposition d'un matériau fin sur un matériau grossier en conditions non saturées peut créer un effet de barrière capillaire (Nicholson et al., 1989; Bussière et al., 2003). La désaturation du matériau grossier crée un contraste entre les conductivités hydrauliques des matériaux. Pour une même succion, le matériau grossier est beaucoup moins perméable que le matériau fin, ce qui restreint l'écoulement vertical à l'interface. Le matériau fin peut ainsi maintenir un haut degré de saturation (S_r) et empêcher la migration de l'oxygène (Aubertin et al., 1995, 1996b).

À l'interface entre les deux matériaux, l'eau qui s'infiltre s'accumule jusqu'à ce que la succion approche de la pression d'entrée d'eau (WEV) du matériau grossier (Aubertin et al., 2009). Si la pression d'entrée d'eau est dépassée, il peut y avoir percolation/drainage à travers le matériau grossier. Afin d'éviter la dissipation de l'effet de barrière capillaire, l'eau peut être déviée latéralement et rapidement afin d'éviter qu'elle ne s'accumule à l'interface.

2.5.5 CEBC et restauration des haldes à stériles

Il est généralement plus facile de réduire l'apport en eau que l'apport en oxygène dans le cas des haldes à stériles.

Un système de recouvrement de type stockage et relargage (SR) est usuellement utilisé en climat semi-aride et aride. Il doit pouvoir emmagasiner l'eau lors de fortes précipitations et évacuer celle-ci par évaporation le plus rapidement possible avant la prochaine précipitation (Bossé et al., 2015). Son fonctionnement repose également sur un contraste des propriétés hydriques entre les matériaux de la couverture : une couche de matériau fin est placée sur une couche de matériau grossier pour créer un effet de barrière capillaire et diminuer la percolation de l'eau. L'efficacité d'une couverture SR a notamment été démontrée au moyen d'essais de terrain (Zhan et al., 2000; Bossé et al., 2015).

En climat humide, les précipitations sont plus abondantes et l'évaporation est moins importante. Une couverture inclinée permet d'évacuer l'eau des précipitations en favorisant un drainage latéral vers le bas de la pente. L'eau aura ainsi tendance à s'écouler dans la couche drainante et dans la couche de rétention d'eau plutôt que de s'infiltrer dans les stériles.

Lors d'une précipitation significative, l'humidité dans la couche de matériaux fins (CCE) tend à s'accumuler le long de la pente et la pression d'eau peut atteindre (et dépasser) la valeur d'entrée d'eau (WEV). L'infiltration d'eau dans le matériau grossier sous la CCE devient plus significative à partir de ce point (DDL de l'anglais *down dip limit*) comme représenté à la figure 2.12. La longueur de déviation (ou effective) (L_D) représente la distance entre le haut de la pente et le point DDL (figure 2.12) (Bussière, 1999; Aubertin et al., 2009).

Figure 2.12 : Schématisation de l'écoulement dans une CEBC inclinée (adapté de Bussière, 1999 et Aubertin et al., 2009)

Le DDL est en réalité une zone (plutôt qu'un point) où l'effet de barrière capillaire est réduit progressivement. Dans cette zone, la CEBC devient moins efficace à limiter l'infiltration d'eau (Aubertin et al., 2009). L'emplacement de cette zone dépend de l'épaisseur de la couverture, des conditions climatiques, des propriétés du sol et de l'inclinaison de la pente (Cifuentes et al., 2006). En général la valeur de L_D diminue lorsque les précipitations augmentent et augmente lorsque la pente est plus prononcée (Aubertin et al., 2009).

La couche de contrôle des écoulements (CCE) dans une halde utilise le principe des effets de barrières capillaires. Un matériau relativement fin est placé sur les stériles qui jouent le rôle de couche bris capillaire (faible perméabilité). Le contraste des propriétés hydrogéologiques et l'inclinaison de la CCE permettent une déviation de l'eau jusqu'au DDL. Dans le cas d'une halde complète, une répétition de plusieurs bancs composés chacun d'une couche de contrôle de l'écoulement (CCE) inclinée est requise (Aubertin et al., 2013) (figure 2.13).

Figure 2.13 : Schéma d'une vue en coupe d'une halde composée de couches de contrôle des écoulements (CCE) (adapté de Aubertin, 2013)

Des simulations numériques de l'écoulement dans une halde à stériles ont été réalisées pour concevoir les dimensions et les performances d'une CCE pour la halde expérimentale (suite aux travaux de Fala et al., 2003, 2005, 2006). Les effets de barrières capillaires en 1D et 2D et le comportement hydrogéologique des haldes à stériles ont été analysés numériquement dans l'objectif de mieux contrôler l'écoulement et limiter la génération de DMA et le DNC dans les

haldes. Des simulations avec les logiciels Seep/W (Geo-Slope International, 2007) et Hydrus 2D (Simunek et al, 2007) ont montré que des couches de matériaux fins inclinées entre 5 et 10% permettraient de contrôler l'écoulement de l'eau vers l'extérieur d'une halde (Fala, 2002). À l'inverse, des couches horizontales pourraient favoriser la percolation d'eau dans la halde et contribuer à la génération de DMA ou de DNC. Des analyses ont aussi montré que la variation de la taille des grains et des pores influençait de manière significative la conductivité hydraulique et la rétention d'eau dans une halde (Fala et al., 2005). Une structure homogène présente selon les résultats numériques un front de mouillage et une distribution des teneurs en eau plus uniforme qu'une structure hétérogène. Ces simulations suggèrent ainsi que les écoulements dans les haldes pourraient être contrôlés par l'utilisation de couches inclinées de matériaux fins installées sur des matériaux grossiers (développement d'une barrière capillaire à l'interface des deux matériaux) (Aubertin et al., 2002b, 2013).

Des simulations réalisées avec le code numérique HydroGeoSphère (Therrien et al., 2010) ont démontré que la présence de fractures (macropores) pouvait altérer l'efficacité des barrières capillaires à l'interface des stériles compactés, car elles favoriseraient un écoulement préférentiel vers la base de la halde (Broda et al., 2013, 2014). Une proportion beaucoup plus élevée de l'eau de pluie s'infiltrait dans le centre de la halde lorsque des fractures étaient simulées.

La présence d'une couche de surface de sable compacté, inclinée de 5%, d'une épaisseur d'environ 1 m sur une halde à stériles homogène permettrait de limiter l'infiltration au cœur de la halde (Broda et al., 2014; Bussière et al., 2015). L'inclinaison d'une telle couche favoriserait aussi l'écoulement de l'eau vers l'extérieur de la halde.

Ces simulations numériques ont permis de concevoir la halde expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio (voir résumé à la section 2.6).

2.6 Halde expérimentale

Une halde expérimentale a été construite sur le site de la mine du Lac Tio (Rio Tinto Fer et Titane) afin d'évaluer l'efficacité de cette nouvelle méthode d'entreposage des stériles. La mine du Lac Tio est située à 43 km au nord-est de la ville de Havre-Saint-Pierre, Québec (figure 2.14). Ce gisement d'hémo-ilménite massif en exploitation depuis les années 1950 est le plus important au monde (Rio Tinto, 2017). On distingue sur le site deux types de roches stériles avec des

compositions minéralogiques différentes : l'hémo-ilménite (stériles minéralisés) et l'anorthosite (stériles non minéralisés). Les caractéristiques de ces roches stériles ont été évaluées au laboratoire par Peregoedova (2012) et Lévesque (2015). Les caractéristiques chimiques et minéralogiques ont également été évaluées et peuvent être trouvées dans Plante et al. (2010b).

Figure 2.14 : Localisation géographique de la mine du Lac Tio (tiré de Lessard, 2011)

2.6.1 Travaux antérieurs

Plusieurs études ont été réalisées au cours des dernières années sur les stériles de la mine du lac Tio. Des cellules de terrain ont été construites afin d'étudier le comportement géochimique des stériles de la halde Petit-Pas (stériles minéralisés) et la génération de DNC (Pépin, 2009). Les résultats ont montré que la concentration en nickel mesurée était fonction de l'altération des stériles étudiés.

Des travaux sur les phénomènes géochimiques liés au DNC, principalement pour des roches stériles contenant du nickel, ont été réalisés par Plante (2010a). Ces travaux ont confirmé que les roches

stériles n'étaient pas génératrices d'acide à long terme et que la sorption du nickel était importante dans le processus de génération du DNC observé à la mine du Lac Tio.

Des essais de caractérisation au laboratoire et des relevés géophysiques (résistivité) sur la halde Petit-Pas ont permis d'identifier les zones de rétentions d'eau et la structure interne des stériles de la halde (Intissar, 2009) et de simuler les écoulements dans cette halde de façon générique (Dawood et al., 2011, 2014).

Des essais d'infiltration à grande et à petite échelle ont été réalisés sur la halde Petit-Pas pour étudier les propriétés hydrogéologiques des stériles (Lessard, 2011). Les essais à grande échelle (bassins) ont montré un taux d'infiltration minimal de l'ordre de 1×10^{-2} cm/s dans des stériles compactés et peu compactés. Les essais à petite échelle (chaudières en plastiques de 30 cm de diamètre) ont montré une grande variabilité des taux d'infiltration et des valeurs souvent dix fois plus élevées que pour les essais à plus grande échelle.

Une caractérisation des propriétés hydrogéologiques des stériles minéralisés (hémo-ilménite) a été réalisée au laboratoire par Peregoedova (2012). Les courbes de rétention d'eau obtenues indiquent une pression d'entrée d'air faible (AEV < 10 cm) et une teneur en eau volumique résiduelle relativement élevée ($\theta_r \approx 0{,}06 - 0{,}08$) pour une granulométrie tronquée à 50 mm.

Une caractérisation des propriétés hydrogéologiques des stériles non minéralisés (anorthosite) concassés a aussi été réalisée au laboratoire au moyen d'essais en colonne et d'essais d'infiltrations à simple anneau avec des charges constantes et variables (Lévesque, 2015). La conductivité hydraulique saturée mesurée variait entre 6×10^{-4} et 2×10^{-2} cm/s et les courbes de rétention d'eau donnaient une pression d'entrée d'air inférieure à 10 cm et un teneur en eau volumique résiduelle d'environ 0,08.

2.6.2 Caractéristiques de la halde à stériles expérimentale

La construction de la halde expérimentale a débuté à l'été 2014 (17 juillet 2014) et s'est poursuivie jusqu'à l'automne 2015 (23 septembre 2015). Six lysimètres de 10 m par 10 m ont été installés puis recouverts d'une géomembrane. Les stériles ont ensuite été déposés avec la méthode d'épandage au butoir (voir section 2.2.2) à partir d'une rampe d'accès (Bussière et al., 2015).

La halde expérimentale mesure 70 m de long, 30 m de largeur et a une hauteur maximale de 7 m (figure 2.15). Elle est composée de stériles minéralisés au-dessus des cinq premiers lysimètres

(situés du côté amont de la pente) et de stériles non minéralisés (anorthosite) au bas de la pente (lysimètre No. 6).

La couche de contrôle des écoulements (CCE) placée à la surface des stériles est composée d'une couche de sable d'une épaisseur variant entre 0,585 à 0,746 m, et inclinée d'environ 5%. Des stériles non minéralisés (anorthosite) concassés à une taille inférieure à 10 mm ont été placés au-dessus de la CCE sur une épaisseur variant entre 0,237 à 0,302 m.

Figure 2.15 : Vue de profil de la halde expérimentale

La halde a été instrumentée afin de suivre en continu le comportement hydrique des stériles et de la couche de contrôle des écoulements. La figure 2.16 présente une coupe transversale de la halde expérimentale et indique l'emplacement des différents instruments installés. Ces instruments mesurent la teneur en eau volumique (GS3, Decagon), les succions (MPS-2, Decagon), et les débits d'eau à la base de la halde (débitmètre à auget). Des analyses chimiques de l'eau sont réalisées de façon régulière sur des échantillons prélevés à la base de la halde (à la sortie des lysimètres).

Figure 2.16 : Coupe transversale de la halde expérimentale et emplacement des instruments (modifié de Bussière et al., 2015)

La halde expérimentale est aussi instrumentée au moyen d'un câble DTS (*Distributed Temperature Sensing*) installé à trois élévations différentes (Bussière et al., 2015). Le DTS utilise le principe d'impulsion laser au travers une fibre optique pour émettre deux types de fréquences (Stokes et anti-Stokes) (Selker et al., 2006; Sayde et al., 2010). Le ratio de ces deux fréquences permet de déterminer la température le long du câble. La température est ensuite corrélée à la teneur en eau volumique. L'écoulement de l'eau dans la halde expérimentale peut ainsi être suivi (travaux en cours par Robert Wu).

Un total de 192 électrodes de géophysiques a aussi été installé dans la halde expérimentale afin de réaliser des mesures de tomographie électrique pour suivre la distribution de la résistivité électrique dans la halde. Les résultats peuvent être corrélés à la teneur en eau volumique, permettant ainsi de suivre l'écoulement de l'eau dans la halde (Dimech et al., 2017).

La figure 2.17 présente une vue d'ensemble de la halde expérimentale à la fin de la construction à l'automne 2015.

Figure 2.17 : Halde expérimentale à la fin de la construction (Photo prise le 25 septembre 2015)

2.7 Modèles numériques

L'écoulement de l'eau se fait usuellement en conditions non saturées dans une halde à stériles. L'utilisation de modèles numériques est donc nécessaire afin d'analyser les mouvements de l'eau dans les haldes. Les simulations numériques permettent de mieux comprendre les phénomènes hydrogéologiques et de tester l'impact de différents paramètres sur l'écoulement. Elles permettent également d'interpréter certains essais et de réaliser des analyses inverses afin de déterminer certains paramètres (comme la conductivité hydraulique saturée, la CRE ou la fonction de perméabilité). Des logiciels comme Hydrus (Simunek et al, 2007), Seep/W (Geo-Slope Internaltional, 2007, 2016), HydroGeoSphère (Therrien et al., 2010) ou SoilCover (Geo-Analysis2000 Ltd., 1997) permettent de tenir compte des paramètres non saturés des matériaux dans les calculs d'écoulement. Plusieurs simulations du comportement de l'écoulement dans les haldes ont été réalisées avec SoilCover (Zhan et al., 2000, 2001a, 2001b), Hydrus (Fala et al., 2002, 2005, 2008; Dawood, 2011, 2014) et HydroGéoSphère (Broda et al., 2013, 2014).

Pour ce projet le logiciel Seep/W (Geo-Slope Internaltional, 2007, 2016) a été utilisé afin de simuler des essais d'infiltrations selon un modèle 2D. Ce code de calcul par éléments finis basé sur les équations de Darcy et de Richards (1931) a été validé en régime permanent et transitoire entre autres par Chapuis et al., (2001) et Chapuis (2009). Les principales caractéristiques du code Seep/W (adapté de Fala, 2002 et Pabst, 2011) sont présentées au tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristiques du code numérique Seep/W (Geo-Slope Internaltional, 2007; 2016)

Propriétés	Seep/W
Méthode de résolution	Résidus pondérés (Galerkin)
Éléments	Quadratique et triangulaire (avec ou sans nœud secondaire)
Fonction d'interpolation	Linéaire ou quadratique
Intégration dans l'espace	Intégration numérique de Gauss
Intégration dans le temps	Différences arrières
Résolution matricielle	Élimination Gausienne
Convergence	Tolérance sur la norme du vecteur pression
Effet d'hystérisis	Non

Le logiciel Seep/W a aussi été utilisé à plusieurs reprises pour simuler l'infiltration d'eau dans des stériles ou des CEBC. Le comportement hydrique d'une CEBC a été simulé et validé avec des modèles 1D (essai en colonne) et en 2D (Bussière 1999; Fala, 2002; Bussière et al., 2003). Les modèles 2D ont permis de simuler des essais menés dans des montages au laboratoire (boîte inclinée), des cellules expérimentales de terrain, des digues ou des haldes à stériles. L'importance de la géométrie (notamment l'inclinaison de la pente) d'une CEBC (ou d'une CCE) a aussi été de démontrée au moyen des simulations réalisées avec Seep/W.

La simulation d'un banc d'une halde avec Seep/W a permis de comprendre l'écoulement de l'eau à l'intérieur des haldes (Fala, 2002; Martin, 2003). La pression d'entrée d'eau (WEV) des stériles a pu être étudiée pour déterminer le DDL (le point à partir duquel l'eau commence à s'infiltrer dans les stériles sous une couverture, voir section 2.5.5) (Martin 2003; Cifuentes et al., 2006; Aubertin et al., 2009).

Ces simulations réalisées avec le logiciel Seep/W permettent ainsi de représenter de façon réaliste l'écoulement de l'eau dans des stériles en condition non saturée à condition d'utiliser des propriétés représentatives des matériaux. Les propriétés des matériaux et les caractéristiques (géométrie, conditions aux frontières) des modèles numériques de cette étude sont présentées à la section 3.7.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE, PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSES NUMÉRIQUES

3.1 Préparation des matériaux au laboratoire

Le sable utilisé pour la couche de contrôle des écoulements sur la halde expérimentale de la mine du Lac Tio a été analysé au laboratoire. Il provient de la sablière du fournisseur de services Richard Boudreau située à 650 m à l'Est de la ville de Havre-Saint-Pierre, Québec.

Le sable analysé au laboratoire a été prélevé par Rio Tinto Fer et Titane (RTFT) à la sablière et envoyé au laboratoire de l'Institut de recherche en mines et environnement (IRME) à l'École Polytechnique de Montréal en juillet 2015. Le matériel est arrivé dans 3 barils de 50 gallons, par la suite identifiés: *HSP-A, HSP-B* et *HSP-C*. D'autres échantillons de sable ont été prélevés directement sur la halde expérimentale lors de campagnes de terrain ultérieures. Ceux-ci ont été identifiés *HSP-aut2015* (échantillon prélevé sur la CCE à l'automne 2015) et *HSP-Lys* (échantillons prélevés sur la couche de sable de la CCE au-dessus de chaque lysimètre à l'été 2016).

La caractérisation initiale du matériel a été réalisée sur les échantillons *HSP-A, HSP-B* et *HSP-C*. Le sable des barils *HSP-A, HSP-B* et *HSP-C* ont été séché à l'air libre au laboratoire de l'IRME. Deux semaines ont été nécessaires pour obtenir un matériel sec ($w \leq 1\%$). Les échantillons *HSP-aut2015* et *HSP-Lys* ont été séchés au four.

Chaque échantillon de sable a été uniformisé au moyen d'un séparateur mécanique (ASTM C702/C702M, 2011), constitué de huit ouvertures pour les agrégats de plus de 9,5 mm et de douze ouvertures pour les particules inférieures à 9,5 mm. Un séparateur mécanique à douze ouvertures a été utilisé dans ce travail. Cette méthode permet de diviser l'échantillon initial en deux parties représentatives et uniformes. Le procédé a été répété autant de fois que nécessaire pour obtenir la masse désirée pour réaliser les analyses granulométriques, de densité relative des grains solides, de compaction et de perméabilité.

3.2 Analyses granulométriques

Différentes analyses granulométriques ont été réalisées sur le sable ayant servi à la construction de la couche de contrôle des écoulements (CCE) sur la halde expérimentale. Des analyses granulométriques ont été réalisées sur les échantillons de sables provenant des trois barils de la

sablière (*HSP-A, HSP-B* et *HSP-C*). De nouvelles analyses granulométriques ont été réalisées sur le sable échantillonné directement sur le site de la halde expérimentale à l'automne 2015 (*HSP-*aut2015) et à l'été 2016 (*HSP-Lys)* afin d'évaluer si le matériau *in situ* avait les mêmes propriétés que le sable échantillonné préalablement à la sablière et si celui-ci était homogène sur l'ensemble de la CCE.

Des analyses granulométriques ont aussi été réalisées après les essais de compaction en laboratoire et les essais de drainage en colonne, afin d'identifier d'éventuelles variations ou modifications des propriétés du sable.

La distribution de la taille des grains a été analysée par tamisage et sédimentométrie selon la norme ASTM D422 (2007). Le tamisage permet de caractériser les particules grossières (retenues au tamis No. 200 (0,075 mm)) et l'utilisation de la méthode de l'hydromètre est nécessaire pour les particules plus fines (passant le tamis No. 200).

Le coefficient d'uniformité (C_U) du sol est déterminé à partir de la courbe granulométrique.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{3.1}$$

Où,

d_{10} : diamètre des grains correspondant à 10% passant [L]

d_{60} : diamètre des grains correspondant à 60% passant [L]

Plus le coefficient C_U est faible, plus le sol est uniforme. Un coefficient de C_U inférieur à 3 indique que le sol est peu étalé, alors qu'un coefficient C_U supérieur à 6 indique que le sol est étalé (Holtz et Kovacs, 2010).

Le coefficient de courbure (C_C) est estimé à partir du diamètre (d_{30}) des grains (diamètre correspondant à 30% de passant). Pour un sable, un coefficient de courbure compris entre 1 et 3 indique que la granulométrie est bien répartie (Holtz et Kovacs, 2010).

$$C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} * d_{10}} \tag{3.2}$$

3.3 Densité relative des grains solides et essais de compactage

La densité relative des grains solides (D_r ou G_s) a été mesurée au moyen d'un pycnomètre à eau selon la norme ASTM D854 (2014). Trois échantillons représentatifs (homogénéisés) provenant des barils *HSP-A*, *HSP-B* et *HSP-C*, ainsi qu'un échantillon de sable *HSP-aut2015* ont été analysés. L'écart admissible pour des valeurs de D_r mesurées par un seul manipulateur varie entre 0,02 et 0,03 selon le type de sol et entre 0,02 et 0,08 pour des essais réalisés par différents utilisateurs et/ou laboratoires (ASTM D854, 2014).

L'essai Proctor modifié est un essai de compactage normalisé (ASTM D1557, 2012) qui permet de déterminer la masse volumique (ou densité) sèche maximale ρ_{dmax} et la teneur en eau optimale ω_{opt} de compactage. L'essai a été réalisé sur du sable à différentes teneurs en eau pour obtenir au minimum cinq points sur la courbe de compaction (masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau ω). L'indice des vides minimal e_{min} [-] peut être obtenu avec l'équation 3.3, grâce au degré de saturation S_r [-], à la densité des grains solides [-] et à la teneur en eau optimale ω_{opt} [-].

$$e_{min}S_r = \omega_{opt}D_r \tag{3.3}$$

La méthode *A* de la norme ASTM D1557 a été utilisée dans ce projet, car 25% et moins de matériaux ont été retenus au tamis No. 4 (4,75 mm). La méthode *A* nécessite un moule de diamètre de 4 pouces et 25 coups par couche (ASTM D1557, 2012). Un essai Proctor modifié a été réalisé sur chacun des trois échantillons *HSP-A*, *HSP-aut2015* et *HSP-Lys*.

3.4 Mesure de la conductivité hydraulique saturée au laboratoire

La conductivité hydraulique saturée du sable a été mesurée avec un perméamètre à paroi rigide (diamètre ≈ 10 cm; hauteur ≈ 15 cm) et avec une colonne (diamètre ≈ 14 cm; hauteur ≈ 132 cm). Dans les deux cas, des essais à charge constante et à charge variable ont été être réalisés selon les normes ASTM D2434 (2006) et ASTM D5856 (2007). L'équation 3.4 est utilisée pour obtenir la conductivité hydraulique saturée k_{sat} [$L \cdot T^{-1}$] avec une charge constante (ASTM D2434, 2006).

$$k_{sat} = QL/\Delta HA \tag{3.4}$$

Où,

Q : débit d'eau [$L^3 \cdot T^{-1}$]

L : longueur entre deux manomètres [L]

ΔH : variation de la charge hydraulique entre deux manomètres [L]

A : section transversale, perpendiculaire à l'écoulement [L^2]

L'équation 3.5 est utilisée pour obtenir la conductivité hydraulique saturée k_{sat} [$L \cdot T^{-1}$] avec une charge variable (ASTM D5856, 2007).

$$k_{sat} = \frac{a_{in} a_{out} L}{A(t_2 - t_1)(a_{in} + a_{out})} \cdot \ln\left(\frac{\Delta H_1(t_1)}{\Delta \mathrm{H}_2(t_2)}\right) \tag{3.5}$$

Où,

a_{in} : aire de la burette d'entrée [L^2]

a_{out} : aire de la burette de sortie [L^2]

H_1 : charge hydraulique au temps t=1[L]

H_2 : charge hydraulique au temps t=2 [L]

Les échantillons de sable utilisés dans les perméamètres à paroi rigide ont été compactés dans le moule à la teneur en eau massique optimale ω_{opt} estimée par l'essai Proctor modifié. Une succion de 600 kPa, puis un faible gradient hydraulique ont ensuite été appliqués au sommet de l'échantillon afin de le saturer.

Le protocole utilisé pour le montage des colonnes est décrit par Lévesque (2015). Un faible gradient hydraulique a été appliqué à la base de chaque colonne afin de saturer les échantillons. Le degré de saturation S_r [-] du sable a été calculé avec l'équation 3.6 (Chapuis et al., 2006) avant de débuter les essais de perméabilité à charge constante et variable.

$$S_r = \frac{M_{tot} - M_e + V\rho_w - M_s}{\rho_{w[V-(M_s-\rho_s)]}} \tag{3.6}$$

Où,

M_{tot} : masse totale de la colonne (sol et eau désaérée) avant l'essai (g)

M_e : masse de la colonne (et des pièces connexes) remplie d'eau désaérée uniquement (g)

M_s : masse des solides (M_2-M_1) (g)

M_1 : masse de la colonne vide et pièces connexes (g)

M_2 : masse de la colonne (et des pièces connexes) remplie de sol sec (g)

ρ_w : masse volumique de l'eau (g/cm^3)

ρ_s : masse volumique du solide (g/cm^3)

V : volume de l'échantillon (cm^3)

Pour les essais de perméabilité en colonne à charge constante, deux méthodes de calcul ont été utilisées pour estimer la conductivité hydraulique saturée. Dans un premier temps, k_{sat} a été calculé en utilisant la différence de charge ΔH entre la charge amont fixée dans la cellule de Mariotte et la charge aval imposée par l'élévation du tuyau de sortie. La valeur de k_{sat} a également été déterminée en mesurant la différence de charge entre les tensiomètres installés le long de la colonne. Il est donc possible d'obtenir les valeurs de k_{sat} entre différentes paires de tensiomètres. L'emplacement des tensiomètres est indiqué à la figure 3.1 et au tableau 3.1. La dernière méthode est privilégiée considérant qu'elle réduit les incertitudes liées aux pertes de charges dans les connexions (Duhaime et al., 2015).

La conductivité hydraulique saturée a également été mesurée par des essais à charge variable selon l'équation 3.5. Dans ce cas, la différence de charge a été estimée avec deux burettes connectée au sommet et à la base de la colonne.

3.5 Évaluation de la courbe de rétention d'eau

3.5.1 Essais de drainage en colonne

Deux essais en colonnes (duplicatas) ont été utilisés pour mesurer la courbe de rétention d'eau du sable mis en place sur la halde expérimentale (*HSP-A*). Les essais ont été réalisés selon la méthode décrite par Chapuis et al. (2006). Le protocole utilisé pour le montage et le démontage des colonnes s'inspire des travaux réalisés par Hernandez (2007), Peregoedova (2012) et Lévesque (2015), aussi décrit par Chapuis et al. (2006). La figure 3.1 présente une des colonnes (colonne 2), avec les 5 tensiomètres (T1, T2, T3, T4 et T6) utilisés pour enregistrer les succions lors de l'essai de drainage.

Figure 3.1 : Colonne 2 et emplacement des instruments utilisés

Montage des colonnes :

Le choix de la taille et du diamètre des colonnes dépend en partie de la taille maximale des grains et des paramètres de la courbe de rétention d'eau (AEV et WEV estimées). Puisque des essais de perméabilité sont également réalisés sur les mêmes colonnes, leur diamètre doit aussi satisfaire aux normes des essais de perméabilité à charge constante (ASTM D2434, 2006) et à charge variable (ASTM D5856, 2007). Selon la norme ASTM D2434 (2006), le diamètre de la colonne doit être au moins 8 à 12 fois supérieur à la taille du plus gros grain. Selon la norme ASTM D5856 (2007), le diamètre maximal des particules doit être au plus 1/6 du diamètre et de la hauteur de la colonne. Les colonnes choisies satisfont les critères les plus restrictifs : le diamètre maximal des grains est de 0,5 cm et les colonnes ont un diamètre de 14,4 cm et une hauteur de 132 cm.

Une plaque perforée et un géotextile ont été placés à la base de la colonne pour éviter une migration des particules fines dans le tuyau de sortie. La colonne a été montée par couches de 5 cm compactées (25 coups par couche, avec le marteau de l'essai Proctor modifié) à une teneur en eau massique d'environ 10% (proche de l'optimum Proctor modifié ω_{opt}) (les résultats des teneurs en eau massique par couche sont détaillés en Annexe E.1). L'épaisseur totale de l'échantillon dans la colonne est de 105 cm. Un géotextile et une plaque perforée, surmontés d'un ressort et d'un couvercle ont été installés au-dessus du sable compacté. La teneur en eau massique a été mesurée tous les 5 cm lors du montage pour s'assurer de l'homogénéité de la teneur en eau du sable. Un petit échantillon (moyenne de 45 g) a été prélevé et pesé pour déduire la teneur en eau massique du sable à chaque couche. La position de la nappe phréatique dans la colonne est imposée au moyen d'un tuyau de sortie en « U » (tel que décrit par exemple par Hermandez (2007) et Peregoedova (2012)) placé 20 cm sous la base de la colonne 1 et 10 cm au-dessus la base de la colonne 2 (voir figure 3.1). La position de sortie du tuyau a été abaissée (colonne 1) afin de simuler une succion plus importante.

Essai de drainage en colonne :

Les 2 essais de drainage ont été réalisés après la mesure de la conductivité hydraulique saturée (section 3.4). Les valves situées au sommet et au bas de chaque colonne (figure 3.1) ont été ouvertes au début de l'essai ; les débits de sortie ont été mesurés (masse) en continu jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique soit atteint (ce qui peut prendre plusieurs semaines selon les propriétés

hydrauliques du matériau). Des tensiomètres Omega PX243A-5BG5V (± 5 psi) et Omega PX243A-15BG (± 15 psi) préalablement calibrés et saturés ont été placés à 5 hauteurs différentes le long de la colonne (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Emplacement des tensiomètres dans les colonnes

# tensiomètre		Colonne 1	Colonne 2
		Hauteur par rapport à la sortie d'eau (cm)	Hauteur par rapport à la sortie d'eau (cm)
T1	PX243A-5BG5V	-1,0	7,0
T2	PX243A-5BG5V	8,5	12,2
T3	PX243A-5BG5V	28,0	30,2
T4	PX243A-5BG5V	59,0	59,7
T6	PX243A-15BG	78,5	81,2

Démontage des colonnes :

Les colonnes ont été démontées par couche de 5 cm. La masse volumique sèche moyenne ρ_{dmoy} était de 1730 kg/m^3 pour la colonne 1 et de 1762 kg/m^3 pour la colonne 2 ce qui correspond à un indice des vides moyen e_{moy} de respectivement 0,52 et 0,51 pour la colonne 1 et 2. Toutes les mesures effectuées au démontage sont présentées en Annexe E.4. Une mesure de densité en place avec anneau a été réalisée au sommet et au centre de la colonne. La teneur en eau volumique (θ) a été calculée, sachant que :

$$\theta = w(1-n)\,D_r \tag{3.7}$$

La migration des particules fines peut modifier localement les propriétés du matériau (surface spécifique et porosité), et parfois créer des chemins préférentiels d'écoulement (Peregoedova, 2012). Des analyses granulométriques ont donc été réalisées au bas, au centre et au haut de chaque colonne avant et après l'essai de drainage (voir aussi section 3.2). Les résultats (présentés à l'Annexe E.3) n'ont montré aucune modification significative de la granulométrie au cours de l'essai.

3.5.2 Cellule Tempe modifiée

La CRE du sable a également été mesurée au moyen d'une cellule Tempe modifiée. Quatre essais ont été réalisés en cellules Tempe avec le sable *HSP-A* en suivant le protocole adapté par Pabst (2011). Les échantillons de sable (environ 32 mm d'épaisseur pour 67 mm de diamètre) avaient préalablement été saturés ($S_r \approx 100\%$) dans un perméamètre à paroi rigide, puis placé entre deux céramiques (AEV = 15 bar) dans la cellule sous pression. 11 à 21 paliers ont été appliqués, en se concentrant sur les pressions d'air comprises entre 1 et 80 kPa afin d'obtenir l'ensemble de la courbe de rétention d'eau (incluant la partie résiduelle). Les paliers de pression ont été appliqués pour des durées comprises entre 1 et 30 jours.

Le panneau de pression au laboratoire ne permet pas d'appliquer avec précision des pressions d'air inférieures à 5 kPa. L'AEV du sable a été obtenu en appliquant directement des succions à la base de la cellule avec un tube de sortie en « U » (voir figure 3.2). Le reste des points de la CRE ont été obtenus en appliquant des pressions d'air (voir figure 3.3) sans l'utilisation du tube de sortie en « U ».

Figure 3.2 : Cellules Tempe avec tube de sortie d'eau (pour application d'une succion). L'intérieur des cellules est à la pression atmosphérique (valve ouverte au sommet)

Figure 3.3 : Cellules Tempe avec application d'une pression d'air; la sortie est à pression atmosphérique

3.6 Essais d'infiltration et autres mesures *in situ*

Des essais d'infiltration ont été réalisés sur le terrain au moyen de trois méthodes : l'infiltromètre à simple anneau, l'infiltromètre à double anneau et le perméamètre de Guelph. Les tests d'infiltration ont été réalisés dans la couche de sable (CCE) à la verticale des sondes (GS-3 et MPS-2, Decagon) installées dans la halde à 6 endroits différents (vis-à-vis les lysimètres 1 à 6) et à deux profondeurs (à la surface (Z=0 cm) et à mi-hauteur de la couche de sable (Z=30 cm)).

La couche d'anorthosite concassée a été retirée sur une aire d'environ 4 m^2 aux emplacements des essais d'infiltration pour atteindre la couche de sable. La densité sèche ρ_d et la teneur en eau massique ω du sable ont été mesurées avec un nucléodensimètre avant chaque essai (l'instrument était calibré quotidiennement selon la norme ASTM D6938 (2015)). La valeur mesurée correspond à une moyenne sur les 30 premiers centimètres de la couche de sable (Troxler, 2007).

3.6.1 Infiltromètre à simple anneau

Neuf essais ont été réalisés avec un perméamètre à simple anneau lors d'une première campagne de terrain (24 mai – 11 juin 2016) (tableau 3.2). Parmi ces essais, cinq ont été réalisés avec l'anneau interne du perméamètre à double anneau (diamètre de 30 cm) et quatre avec l'anneau externe (diamètre de 60 cm). Ces anneaux sont en métal, et donc peu déformables. Des valves à la base des anneaux permettent de les connecter à des cellules de Mariotte et d'appliquer une charge constante pendant l'essai (figure 3.4).

Suite aux mesures de densité en place, l'infiltromètre à simple anneau est enfoncé à la surface du sable à une profondeur variant de 9 à 17 cm. Une profondeur de 15 cm est habituellement considérée adéquate (ASTMD3385, 2009). Un sac en plastique a été installé à l'intérieur de l'anneau afin d'ajuster la charge initiale sans affecter la teneur en eau initiale du sable. Lorsque la charge d'eau initiale est ajustée, le sac de plastique est retiré et l'essai débute.

Les volumes d'eau dans le réservoir sont mesurés régulièrement (intervalles de 1, 2, 5, puis 10 minutes selon la variation du taux d'infiltration). Le niveau d'eau dans l'anneau est également mesuré régulièrement. Les charges constantes maintenues dans l'anneau sont comprises entre 4,6 et 10 cm (voir tableau 3.2). Pour quatre essais (lysimètres 1 et 3 avec un diamètre de 30 cm et lysimètres 1 et 2 avec un diamètre de 60 cm), la charge a été augmentée de quelques centimètres une fois le débit d'infiltration quasi-constant (en général après 30 à 60 minutes). La température de

l'eau et le taux d'évaporation ont été mesurés dans une chaudière remplie d'eau placée à proximité de l'essai.

Deux essais à simple anneau (30 cm et 60 cm de diamètre) ont été réalisés au-dessus du centre des lysimètres 3 et 4 lors d'une deuxième campagne de terrain (11 septembre - 2 octobre 2016) (tableau 3.2). Les essais ont été réalisés à une profondeur d'environ 30 cm sous la surface de la couche de sable (environ à mi-hauteur de la couche de sable). La figure 3.4 présente le montage sur le terrain avec les cellules de Mariotte utilisées.

Figure 3.4 : Infiltromètre à simple anneau (diamètre de 30 cm) placé à une profondeur de 30 cm dans le sable et enfoncer d'environ 10 cm

Le tableau 3.2 présente les caractéristiques des essais d'infiltration réalisés avec l'infiltromètre à simple anneau. La durée totale de l'essai représente le temps entre le début et la fin de l'essai (incluant les cas où la charge d'eau dans l'anneau a été augmentée; voir plus haut).

Tableau 3.2 : Caractéristiques des essais avec l'infiltromètre à simple anneau

Nom de l'essai	Date de l'essai (jj-mm-aa)	Rayon infiltromètre (cm)	Profondeur de la surface d'infiltration (cm)	Charge constante 1 (cm)	Charge constante 2 (cm)	Durée totale de l'essai (min)
Lys. 1- SA15	08-06-16	15	0	5,0	7,5	74
Lys.2- SA15	03-06-16	15	0	10,0	-	110
Lys.3- SA15	01-06-16	15	0	5,0	7,0	100
Lys. 4- SA15	03-06-16	15	0	6,4	-	120
Lys 3-SA15-Z30	21-09-16	15	30	8,0	-	270
Lys. 6-SA15	07-06-16	15	0	9,6	-	72
Lys. 1-SA30	27-05-16	30	0	5,0	5,5	125
Lys. 2-SA30	01-06-16	30	0	3,2	5,0	188
Lys. 5-SA30	06-06-16	30	0	4,6	-	147
Lys. 6-SA30	08-06-16	30	0	7,2	-	120
Lys 4-SA30-Z30	21-09-16	30	30	7,4	-	270

3.6.2 Infiltromètre à double anneau

Deux essais ont été réalisés avec le perméamètre à double anneau lors de la première campagne de terrain (24 mai - 11 juin 2016) (tableau 3.3 et figure 3.5). Les essais ont été réalisés au-dessus des lysimètres 3 et 4. Le protocole des essais suit la norme ASTM D3385 (2009). Les débits d'infiltration ont été mesurés avec les cellules de Mariotte; les charges ont été mesurées dans les anneaux interne et externe. La figure 3.5 présente les différentes composantes utilisées pour les essais avec l'infiltromètre à double anneau.

Figure 3.5: Essai avec l'infiltromètre à double anneau

Quatre essais à double anneau ont été réalisés au-dessus des lysimètres 3 et 4 lors de la deuxième campagne de terrain (11 septembre - 2 octobre 2016): deux essais à la surface de la couche de sable et deux essais à 30 cm au-dessus de l'interface avec les stériles (à mi-hauteur de la couche de sable) (tableau 3.3). Le tableau 3.3 présente les caractéristiques des essais d'infiltration avec l'infiltromètre à double anneau.

Tableau 3.3 : Caractéristiques des essais réalisés avec l'infiltromètre à double anneau

Nom de l'essai	Date de l'essai (jj-mm-aa)	Profondeur (cm)	Charge constante interne (cm)	Charge constante externe (cm)	Durée totale de l'essai (min)
Lys. 3- DA	30-05-16	0	-	5,5	60
Lys. 4- DA	31-05-16	0	9,5	8,5	290
Lys. 3-DA-2	16-09-16	0	7,6	7,2	360
Lys. 4-DA-2	15-09-16	0	8,2	8,1	240
Lys. 3-DA-Z30	19-09-16	30	8,0	6,5	240
Lys. 4-DA-Z30	20-09-16	30	7,4	7,0	270
Lys. 4-DA2-Z30	22-09-16	30	4,5	3,5	150

3.6.3 Perméamètre de Guelph

Six essais ont été réalisés avec le perméamètre de Guelph lors de la première campagne de terrain (24 mai - 13 juin 2016) (tableau 3.4). Un essai a été effectué au-dessus de chacun des six lysimètres. Le protocole expérimental suit la méthode proposée par le manuel d'utilisation du fabricant (Eijkelkamp Agrisearch Equipment (EAE), 2011).

L'essai avec le perméamètre de Guelph nécessite de creuser un trou à la terrière. Lors des essais, la profondeur du trou de forage variait de 16 à 26 cm et le diamètre de 5,5 à 10,0 cm. Un échantillon de sable a été prélevé avant chaque essai pour déterminer sa teneur en eau massique initiale (en plus de la mesure au nucléodensimètre). La charge désirée est ajustée au début de l'essai. Le volume d'eau dans le réservoir est suivi en continu. La charge a été augmentée de 3 cm dans les essais Lys.3-Guelph, Lys.4-Guelph et Lys.5-Guelph après que la charge et le débit soient devenus constants. La figure 3.6 montre le perméamètre de Guelph installé sur la halde expérimentale.

Figure 3.6 : Installation du perméamètre de Guelph sur le terrain

Quatre essais avec le perméamètre de Guelph ont été réalisés au centre des lysimètres 3 et 4 à des profondeurs de forage de 16, 29, 39 et 54 cm lors de la deuxième campagne de terrain (11 septembre - 2 octobre 2016) (tableau 3.4). Le tableau 3.4 présente les caractéristiques des essais d'infiltration avec le perméamètre de Guelph. La durée totale de l'essai représente le temps entre le début et la fin de l'essai (incluant parfois une variation de charge d'eau dans le trou de forage).

Tableau 3.4 : Caractéristiques des essais avec le perméamètre de Guelph

Nom de l'essai	Date de l'essai (jj-mm-aa)	Profondeur (cm)	Diamètre trou de forage (cm)	Charge constante 1 (cm)	Charge constante 2 (cm)	Charge constante 3 (cm)	Durée totale de l'essai (min)
Lys. 1-Guelph	31-05-16	25,7	10,0	5	-	-	60
Lys. 2-Guelph	02-06-16	20,0	7,0	5	-	-	90
Lys. 3-Guelph	02-06-16	19,0	7,0	5	8	-	112
Lys. 4-Guelph	02-06-16	16,5	7,0	2	3	5	120
Lys. 5-Guelph	07-06-16	25,0	5,5	5	8	-	114
Lys. 6-Guelph	03-06-16	16,0	6,0	10	-	-	20,5
Lys. 3-Guelph-2	15-09-16	16,0	5,5	3	-	-	210
Lys. 4-Guelph-2	16-09-16	29,0	6,5	3	-	-	295
Lys. 3-Guelph-Z30	20-09-16	45,0	6,3	3	-	-	50
Lys. 4-Guelph-Z30	19-09-16	54,0	6,0	3	-	-	220

3.7 Méthodologie pour estimer numériquement la conductivité hydraulique saturée du sable à partir des essais d'infiltration *in situ*

Les essais d'infiltrations réalisés sur le terrain permettent entre autres de mesurer le taux d'infiltration de l'eau en fonction du temps dans le sable de la CCE. La conductivité hydraulique saturée expérimentale peut être calculée à partir du taux d'infiltration (constant, à l'état stationnaire) au moyen d'équations analytiques (présentées à la section 2.4.3). La conductivité hydraulique saturée et la fonction de perméabilité du sable de la couche de contrôle des écoulements (CCE) peuvent aussi être déterminées numériquement par analyse inverse en simulant les différents essais d'infiltrations réalisés sur le terrain.

Chaque essai d'infiltration a été simulé avec le logiciel Seep/W (Geo-Slopes Internationnal, 2007, 2016). La géométrie des modèles présentée à la section 3.7.1 diffère selon le type d'essai (infiltromètres à simple anneau et double anneau et perméamètre de Guelph). Les courbes de rétention d'eau du sable mesurées au laboratoire sont bien décrites par le modèle MK (Aubertin et al., 2003) (résultats présentés à la section 4.5). Les CRE du sable utilisées dans les modèles numériques ont donc été déterminées selon le modèle MK, puis lissées avec le modèle de van Genuchten (1980, éq. 2.7) en fonction de l'indice des vides mesuré avec le nucléodensimètre avant chaque essai. La fonction de perméabilité est estimée dans Seep/W selon le modèle de Mualem (1976) combiné avec celui de van Genuchten (1980) (éq. 2.17) à partir de la CRE. La valeur de k_{sat} utilisée dans l'estimation de la fonction de perméabilité est la valeur de k_{fs} déduite avec les équations analytiques de Reynolds et Elrick (1990, 1992, éqs. 2.34 et 2.36).

Le taux d'infiltration simulé est ensuite comparé au taux d'infiltration obtenu expérimentalement (terrain). La valeur de k_{sat} est ajustée afin que la courbe du taux d'infiltration simulée représente bien le taux d'infiltration mesurée (figure 3.7). La corrélation se base essentiellement sur la fin de l'essai, lorsque le taux d'infiltration tend vers une valeur quasi-constante.

L'indicateur de précision RMSE est utilisé pour valider la corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques (selon une approche utilisée entre autres par Aachib et al., 2004) :

$$RMSE = [MD\ ]^{0,5} \tag{3.8}$$

Où,

$$MD = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i) \tag{3.9}$$

La valeur de N [-] est le nombre de pair de valeur prédite P_i et de valeur expérimentale O_i évalué. Les unités de P_i et O_i dépendent des valeurs comparées. Dans ce travail les valeurs de P_i et O_i représentent le taux d'infiltration à un temps donné et s'expriment en cm/s.

Une corrélation parfaite entre les valeurs mesurées sur le terrain et simulées équivaudrait à un MD de 0 (Aachib et al., 2004). Une valeur positive ou négative de MD correspond respectivement à une surévaluation ou une sous-évaluation du taux d'infiltration. Plus la valeur du RMSE est faible, meilleure est la corrélation. Il n'existe toutefois pas de critère pour évaluer l'acceptabilité des

facteurs, qui dépend des paramètres évalués. Ici, des valeurs de RMSE inférieures 0,20 cm/s ont été jugées satisfaisantes. Ce critère est plus strict que dans d'autres études, puisqu'un RMSE de 0,44 m/s a par exemple donné de bonnes corrélations entre des valeurs de conductivité hydraulique calculées et mesurées (p. ex. Doussan et Ruy, 2009).

À titre d'exemple, dans le cas de l'essai *Lys4-SA15* présenté à la figure 3.7, la valeur de k_{sat} ajustée avec Seep/W est de 4×10^{-2} cm/s, les courbes du taux d'infiltration simulées et mesurées donnent un indicateur de précision jugé acceptable (MD= -2×10^{-2} cm/s, RMSE=0,13 cm/s).

Figure 3.7 : Taux d'infiltration mesuré (courbe et points noirs) pour une charge imposée d'environ 6,3 cm (courbe et points rouges) comparé au taux d'infiltration ajusté avec Seep/W (courbe continue orange) (essai *Lys4-SA15*)

3.7.1 Analyses numériques des essais *in situ*

Géométrie et conditions aux frontières

Les modèles numériques des essais d'infiltration sont axisymétriques; ils ont une largeur de 110 cm et une hauteur de 330 ou 360 cm selon la profondeur des essais. Une épaisseur de 30 ou 60 cm de sable recouvre 300 cm de stériles (figures 3.8, 3.9 et 3.10). La taille des modèles a été choisie de sorte que les conditions aux frontières latérales (côté droit sur les figures 3.8 à 3.10) et inférieures n'influencent pas les résultats. La taille des éléments du maillage est comprise entre

1 et 2 cm dans le sable, dans les stériles sous la zone d'infiltration et à l'interface sable et stériles. Ce maillage respecte les critères recommandés par Chapuis (2012) qui suggère que la hauteur des éléments n'excède pas la valeur donnant un changement maximal d'un ordre de grandeur pour la conductivité hydraulique k. Le maillage est un peu plus grossier (5 cm) dans les zones éloignées de la zone d'infiltration.

Les conditions initiales des modèles ont été ajustées en fonction de la teneur en eau volumique initiale (θ_i) mesurée sur le terrain au moyen d'une fonction spatiale (*Spatial function*). Une faible précipitation ($q=1\times10^{-10}$ cm/s) en régime permanent a été imposée à la frontière supérieure lorsque la teneur en eau volumique initiale (θ_i) est égale à la teneur en eau volumique résiduelle (θ_r) afin d'améliorer la convergence. Une charge hydraulique constante de 100 cm est imposée à la base du modèle (u=-300 cm) pour simuler une nappe phréatique suffisamment en profondeur (située à 400 cm sous la surface des stériles). Les autres frontières des modèles sont imperméables.

Un drainage libre est imposé à la base du modèle en régime transitoire. Les essais d'infiltration sont simulés au moyen d'une condition représentant la charge d'eau mesurée durant les essais. Elle est appliquée sur un rayon de 15 ou 30 cm pour le simple anneau (figure 3.8), de 30 cm pour le double anneau (figure 3.9) et un rayon équivalent au trou de forage pour le perméamètre de Guelph (figure 3.10).

Figure 3.8 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration à simple anneau (rayon de 30 cm) avec une couche de sable de 60 cm

Figure 3.9 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration à double anneau avec une couche de sable de 60 cm

Figure 3.10 : Modèle conceptuel axisymétrique pour un essai d'infiltration avec le perméamètre de Guelph dans une couche de sable de 60 cm

Paramètre de convergence et propriétés des matériaux

Un maximum de 500 itérations et une tolérance de 0,11 ont été fixés pour les paramètres de convergence du modèle. Les pas de temps sont adaptatifs et varient de 1 à 100 secondes. Ils sont évalués selon la charge de pression aux nœuds avec une variation maximale acceptable de 1%. Ces paramètres ont permis une bonne convergence pour tous les modèles.

Les propriétés du sable *HSP-A* et du stérile QIT d'hémo-ilménite (caractérisé par Peregoedova, 2012) ont été incluses dans les modèles. Ces deux matériaux sont considérés homogènes.

Les propriétés hydrogéologiques du sable utilisé pour la couche de rétention d'eau proviennent de la caractérisation au laboratoire de l'échantillon de sable *HSP* présenté au chapitre 4. Les courbes de rétention d'eau utilisées sont ajustées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) en fonction de la porosité mesurée en place avant chaque essai d'infiltration, puis lissées avec le modèle van Genuchten (1980). Les fonctions de perméabilités sont ensuite obtenues avec le modèle de Mualem (éq. 2.17) en utilisant un k_{sat} initial équivalent à celui obtenu sur le terrain avec les équations de

Reynolds et Elrick (1990, 1992) (éqs. 2.34 et 2.36). La CRE et la fonction de perméabilité sont présentées aux figures 3.11 et 3.12. La conductivité hydraulique saturée du sable est ensuite ajustée afin que les taux d'infiltration simulés correspondent bien aux valeurs mesurées sur le terrain.

Les caractéristiques des stériles QIT (0 à 50 mm) ont été obtenues par Peregoedova (2012). Les résultats obtenus pour une granulométrie 0-50 mm a été préférée à celle des autres échantillons (0-28 mm, 0-19 mm, 0-10 mm et 0-5 mm), car jugées plus représentatives des conditions de terrain. Parmi les stériles QIT caractérisés, l'échantillon QIT-P50-F2, retenu dans la présente étude, a une granulométrie étalée (variant de 0 à 50 mm). La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) mesurée est de 1×10^{-1} cm/s. Les paramètres de la courbe de rétention d'eau (CRE) décrite par le modèle van Genuchten (1980) sont présentés au tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Paramètres de la CRE des stériles QIT avec le modèle de van Genuchten (1980) selon les résultats de Peregoedova (2012)

Paramètres	Valeur
α (m^{-1})	41,9
n (-)	2,194
m (-)	0,54421
θ_r (-)	0,05
θ_s (-)	0,21

La valeur de la teneur en eau à saturation (égale à la porosité du stérile) est de 0,21 et la valeur de la teneur en eau résiduelle (θ_r) est de 0,05. La courbe de la conductivité hydraulique non saturée (figure 3.12) est obtenue à partir de la courbe de rétention d'eau (figure 3.11), de k_{sat} et de θ_r par le modèle de Mualem (1976) et van Genuchten (1980) (éq. 2.17). Une limite inférieure de la conductivité hydraulique est imposée à environ 10^{-11} cm/s (10^{-13} m/s) (Fredlund et al., 1994; Mbonimpa et al., 2006).

Figure 3.11 : CRE des stériles QIT (0-50mm) (d'après Peregoedova, 2012) et du sable (e = 0,46) : modèle de van Genuchten (1980)

Figure 3.12 : Fonction de perméabilité des stériles QIT (0-50mm) et du sable (e = 0,46)

Validation des modèles numériques

La validation des modèles numériques est une étape essentielle pour s'assurer de la fiabilité des résultats numériques (Chapuis et al., 2001). Pour cette étude les points suivants ont été vérifiés :

- Validation de la CRE expérimentale avec la CRE appliquée aux modèles numériques.
- Raffinement du maillage, réduction du pas de temps pour améliorer la convergence.
- Variation de la charge ou flux appliqués au modèle et vérification du volume d'eau entrant.
- Modélisation d'une colonne de sable pour valider avec les résultats d'essais de drainage réalisés au laboratoire.
- Validation du taux d'infiltration obtenu numériquement et des taux d'infiltration expérimentaux obtenus par Gamache-Rochette (2004) et Lessard (2011).
- Comparaison du profil d'infiltration numérique avec les modèles théoriques d'infiltration
- Validation des teneurs en eau volumique prises à la fin de l'essai (avec le nucléodensimètre) avec les teneurs en eau numérique après la même durée d'essai.
- Application de recharge initiale pour avoir la teneur en eau résiduelle en condition initiale
- Validation visuelle des profils de succions et teneur en eau (pas d'anomalie de convergence).
- Validation des volumes d'eau calculée avec le logiciel Vadaose/W (Geo-Slopes International, 2016).

CHAPITRE 4 RÉSULATS DE LA CARACTÉRISATION AU LABORATOIRE

4.1 Analyses granulométriques

Plusieurs analyses granulométriques ont été réalisées pour caractériser le sable de la couche de contrôle des écoulements installée sur la halde expérimentale. Les essais ont été mesurés sur :

- 3 échantillons de sable provenant de la sablière (barils) (Été 2015) : *HSP A,B,C*
- 3 échantillons de sable prélevés sur la halde expérimentale (Automne 2015) : *HSP-aut2015*
- 6 échantillons prélevés à la verticale de chaque lysimètre (1 par lysimètre) (Lys 1 à 6) (Été 2016) : *HSP-Lys*

Échantillons de sable fournis par la sablière (HSP) :

La figure 4.1 présente les trois analyses granulométriques (triplicata) effectuées sur chacun des trois barils *HSP A*, *HSP B* et *HSP C* provenant directement de la sablière pour un total de 9 essais.

Figure 4.1 : Courbes granulométriques des échantillons homogénéisés des barils *HSP A*, *HSP B* et *HSP C* (essais en triplicata : 1 à 3)

Le tableau 4.1 présente pour chacun des neuf essais les valeurs des diamètres correspondant aux 5, 10, 30 et 60 % passants et les valeurs du coefficient d'uniformité (C_U) et du coefficient de courbure (C_C) (éqs. 3.1 et 3.2).

Tableau 4.1 : Résultats des analyses granulométriques des échantillons HSP-A, HSP-B et HSP-C

Échantillon	**d_5 (mm)** (min-max)	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_U (-)**	**C_C (-)**	**< 75 µm (#200) (%)**
HSP-A	(0,034- 0,034)	0,083	0,166	0,280	3,37	1,19	9.2
HSP-B	(0,042-0,053)	0,087	0,170	0,281	3,23	1,18	8.3
HSP-C	(0,040-0,056)	0,081	0,165	0,278	3,43	1,21	9.8
Moyenne	**0,044**	**0,084**	**0,167**	**0,280**	**3,35**	**1,19**	**9.1**

Les valeurs moyennes de d_5, d_{10}, d_{30} et d_{60} pour les 9 essais sont de 0,044, 0,084, 0,167 et 0,230 mm respectivement. Le coefficient d'uniformité (C_U) est compris entre 3,23 à 3,43 (moyenne de 3,35) et le coefficient de courbure (C_C) entre 1,18 à 1,21 (moyenne de 1,19). Ces valeurs permettent de caractériser le sable comme relativement peu étalé.

L'échantillon est un sable de type SW-SP selon la classification USCS (Holtz et Kovacs, 2010). Le matériel est grossier (plus de la moitié de l'échantillon est retenu au tamis #200 (75µm)) et correspond aux critères d'un sable (plus de la moitié de la fraction grossière passe par l'ouverture du tamis #4 (4,75 mm)). Il s'agit d'un cas limite entre le sable SW et SP, car 8.3 à 9.2 % des particules passent le tamis #200 (75µm).

Échantillons de sable provenant de la couche de contrôle des écoulements (HSP-aut2015) :

Une analyse granulométrique (triplicata) a été réalisée sur le sable échantillonné sur la halde expérimentale en septembre 2015. Les courbes granulométriques sont présentées à la figure 4.2 et sont comparées au sable *HSP-A.* Le sable *HSP-A* est le sable utilisé pour tous les essais réalisés au laboratoire (voir section 3.3, 3.4 et 3.5).

Figure 4.2 : Courbes granulométriques du sable *HSP-aut2015* (triplicata) et *HSP-A*

Le tableau 4.2 présente pour chacun des échantillons *HSP-aut2015* (3 essais) les valeurs moyennes des diamètres correspondant aux 5, 10, 30 et 60 % passants et les valeurs moyennes du coefficient d'uniformité et du coefficient de courbure.

Tableau 4.2 : Analyses granulométriques du sable *HSP-aut2015*

Échantillon	**d_5 moyen (mm)**	**d_{10} moyen (mm)**	**d_{30} moyen (mm)**	**d_{60} moyen (mm)**	**C_U moyen (-)**	**C_C moyen (-)**	**< 75 µm (#200) (%)**
HSP-aut2015	0,042	0,098	0,190	0,304	3,10	1,21	6.4
HSP-A	0,034	0,083	0,166	0,280	3,37	1,19	9.2

Les valeurs des d_5, d_{10}, d_{30} et d_{60} de l'échantillon *HSP-aut2015* sont de 0,042, 0,098, 0,190 et 0,304 mm respectivement. Les résultats moyens permettent de constater que le sable *HSP-aut2015* est légèrement plus grossier que le sable *HSP-A* (figure 4.2 et tableau 4.2). La portion de particules fines (< 75µm) des deux sables est similaire et est d'environ 6.4 % pour le sable HSP-aut2015 et 9.2 % pour le sable *HSP-A*.

Échantillons de sable HSP-Lys (Été 2016) :

Six analyses granulométriques ont été réalisées sur le sable échantillonné sur la halde expérimentale au-dessus de chaque lysimètre en juin 2016 lors de la première campagne de terrain. Les principaux résultats sont présentés au tableau 4.3 et l'ensemble des courbes granulométriques sont présentées à l'Annexe A.3.

Tableau 4.3 : Analyses granulométriques *HSP-Lys*

Nom de l'essai	**d_5 (mm)** (min-max)	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_U**	**C_C**	**< 75 µm (#200) (%)**
HSP-Lys-1	0,059-0,064	0,096	0,190	0,306	3,18	1,23	6.9
HSP-Lys-2	0,058-0,072	0,096	0,191	0,307	3,19	1,24	7.0
HSP-Lys-3	0,047-0,068	0,102	0,195	0,307	3,01	1,21	6.0
HSP-Lys-4	0,068-0,069	0,093	0,189	0,304	3,27	1,26	7.6
HSP-Lys-5	0,059-0,071	0,096	0,188	0,301	3,13	1,22	6.8
HSP-Lys-6	0,067-0,072	0,097	0,192	0,307	3,16	1,24	6.7
Moyenne	**0,064**	**0,097**	**0,191**	**0,305**	**3,16**	**1,23**	**6.8**

Les valeurs moyennes de d_5, d_{10}, d_{30} et d_{60} pour les 6 échantillons sont de 0,064, 0,097, 0,191 et 0,305 mm respectivement. Le coefficient d'uniformité (C_U) est compris entre 3,01 à 3,27 (moyenne de 3,16) et le coefficient de courbure (C_C) entre 1,21 à 1,26 (moyenne de 1,23). L'écart moyen entre les échantillons est de 0,002 pour d_{10}, d_{30} et d_{60} et de 0,004 pour d_5. La granulométrie du sable de la couche de contrôle des écoulements est donc relativement homogène sur l'ensemble de la halde.

4.2 Densité relative des grains solides

Trois essais (en triplicata) pour évaluer la densité relative des grains solides (D_r) ont été réalisés. Le tableau 4.4 présente les valeurs mesurées et moyennes de D_r pour le *sable HSP-A*.

Tableau 4.4 : Densités relatives des grains solides (D_r) : sable *HSP-A*

Échantillon	**D_r**	**Échantillon**	**D_r**	**Échantillon**	**D_r**
HSP-A-1	2,62	HSP-B-1	2,65	HSP-C-1	2,65
HSP-A-2	2,68	HSP-B-2	2,67	HSP-C-2	2,67
HSP-A-3	2,72	HSP-B-3	2,74	HSP-C-3	2,74
D_r moyen	**2,67**	**D_r moyen**	**2,69**	**D_r moyen**	**2,69**

On obtient une valeur de D_r moyen de 2,68 avec un écart moyen de 3,4 % entre les neuf échantillons.

Pour le sable *HSP-aut2015*, la densité relative moyenne des grains solides est de 2,67 avec un écart moyen de 5,8 % entre les trois échantillons.

Tableau 4.5 : Densités relatives des grains solides : sable HSP-aut2015

Échantillon	**D_r**
HSP-aut2015-1	2,58
HSP-aut2015-2	2,68
HSP-aut2015-3	2,74
D_r moyen	**2,67**

Les résultats montrent une différence de 0,01 entre la moyenne des échantillons *HSP-A* ($D_{r\ moyen}$ = 2,68) et le sable *HSP-aut2015* ($D_{r\ moyen}$ = 2,67). Les différences entre les valeurs de D_r sont légèrement supérieures à l'écart de 0,02 admis pour un sol de type SP (ASTM D854, 2002), mais sont jugées acceptables.

4.3 Essais de compactage

Trois essais de compactage Proctor modifié ont été réalisés sur les échantillons de sable : *HSP-A*, *HSP-aut2015* et *HSP-Lys* La figure 4.3 présente les masses volumiques obtenues pour différentes teneurs en eau massique.

Figure 4.3 : Masse volumique ρ_d en fonction de la teneur en eau massique ω obtenue des essais Proctor modifiés pour les échantillons de sable; on montre aussi les courbes théoriques pour divers degrés de saturation.

Les trois essais de compaction menés avec la méthode du Proctor modifié ont permis d'estimer la teneur en eau massique optimale w entre 11,0 et 11,5 % et une masse volumique à l'optimum entre 1802 et 1829 kg/m^3. Une différence de 0,5 % et de 27 kg/m^3 entre les valeurs de teneur en eau massique et de masse volumique est considérée comme acceptable selon la norme ASTM D1557 (2015). Le degré de saturation à l'optimum des échantillons varie entre 61 et 65 %, l'indice des

vides minimal est de 0,47 à 0,48. Pour des teneurs en eau massique inférieures à environ 8 %, on observe un plateau typique d'un matériau uniforme, c'est le cas avec le sable étudié.

4.4 Conductivité hydraulique saturée (k_{sat})

La conductivité hydraulique saturée a été mesurée par des essais à charges constantes et variables. Ces essais (décrits à la section 3.4) ont été réalisés avec des perméamètres à paroi rigide et en colonnes.

4.4.1 Essais aux perméamètres à paroi rigide

Le tableau 4.6 présente les conductivités hydrauliques mesurées par essais à charges constantes et à charges variables dans des perméamètres à paroi rigide (ASTM D2434 (2006); ASTM D5856 (2007)), pour différents indices des vides.

Tableau 4.6 : Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique du sable *HSP-A* mesurées avec des perméamètres à paroi rigide

Nom de l'essai	**Essai à charge constante**		**Charge variable moyenne**		**Indice des vides**	**Degré de saturation**
	Différence de charge ΔH (cm)	Conductivité hydraulique moyenne k (cm/s)	Différence de charge ΔH (cm) (min-max)	Conductivité hydraulique moyenne k (cm/s)	e (-)	S_r (%)
HSP-A1	3,3	4×10^{-3}	19,7-42.4	6×10^{-3}	0,55	100
HSP-A2	4,3	4×10^{-3}	9,5-31,2	4×10^{-3}	0,60	98
HSP-A3	1,3	2×10^{-2}	11,1-33,0	4×10^{-3}	0,55	90
HSP-A4	2,8	1×10^{-2}	7,4-29,5	7×10^{-3}	0,67	100
HSP-A5	4,6	5×10^{-3}	12,7-37,5	4×10^{-3}	0,71	100
HSP-A6	9,1	3×10^{-3}	3,5-38,5	4×10^{-3}	0,56	90
Moyenne	**4,2**	**6×10^{-3}**	**3,5-42,4**	**5×10^{-3}**	**0,61**	**96**

La conductivité hydraulique saturée moyenne pour le sable *HSP*-A est de 6×10^{-3} cm/s pour un essai à charge constante et de 5×10^{-3} cm/s pour un essai à charge variable. Ces valeurs correspondent à la conductivité hydraulique saturée attendue pour un sable propre (10^{-4} à 10^{-1} cm/s) (Freeze et Cherry, 1979; Todd et Mays, 2005). Les valeurs de conductivité hydraulique saturées ont été

comparées aux valeurs prédites par les modèles de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003) et Kozeny-Carman modifé (Mbonimpa et al., 2002) (éq. 2.3 et 2.4) sur la figure 4.4. Les détails du calcul des surfaces spécifiques (S_S) sont présentés à l'Annexe A.

Figure 4.4 : Conductivité hydraulique saturée en fonction de l'indice des vides (perméamètre à paroi rigide) et comparée aux modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002)

Dans l'ensemble, les mesures de conductivité hydraulique saturée obtenues avec le perméamètre à paroi rigide correspondent bien aux valeurs prédites par les modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002) (figure 4.4). L'écart typique acceptable se situe entre 1/3 et 3 fois le k_{sat} mesuré au laboratoire (Chapuis et Aubertin, 2003), ce qui est validé pour toutes les mesures (sauf une, *HSP-A3*).

4.4.2 Essais en colonne

Les conductivités hydrauliques saturées ont été mesurées en colonne par des essais à charges constantes (tableau 4.7) et des essais à charges variables (tableau 4.8). Le degré de saturation des colonnes 1 et 2 avant l'essai de perméabilité était respectivement de 98 % et 100 % (éq. 3.6).

Tableau 4.7 : Conductivités hydrauliques saturées mesurées pour des essais à charge constante en colonne

Colonne	**Indice des vides moyen**	**Mariotte** (mesures entrée-sortie)		**Mesures aux Tensiomètres***		**Modèles prédictifs**	
		Différence de charge	**k_{sat} moyen**	**Différence de charge**	**k_{sat} moyen**	**KC** (Chapuis et Aubertin, 2003)	**KCM** (Mbonimpa et al., 2002)
	e (-)	ΔH (cm)	(cm/s)	ΔH (cm)	(cm/s)	k_{sat} (cm/s)	k_{sat} (cm/s)
1	0,52	135	7×10^{-4}	1,0	3×10^{-2}	3×10^{-3}	2×10^{-3}
2	0,51	111	7×10^{-3}	12,0	2×10^{-2}		

*Voir l'emplacement des tensiomètres au tableau 3.1

Tableau 4.8 : Conductivités hydrauliques saturées mesurées par des essais à charge variable en colonne

Colonne	**k_{sat} moyen**	**Indice des vides moyen**	**Différence de charge**
	(cm/s)	e (-)	ΔH (cm) (min-max)
1	2×10^{-4}	0,52	38,4-42,4
2	2×10^{-3}	0,51	28,0-37,6

L'indice des vides a été mesuré au démontage des colonnes pour chaque couche de 5 cm est présenté à la figure 4.5. Les indices des vides sont compris entre 0,30 et 0,66 (moyenne de 0,52 et écart-type de 0,09) pour la colonne 1 et entre 0,37 à 0,64 (moyenne de 0,51 et écart-type de 0,07) pour la colonne 2. Les écarts des indices des vides sont probablement dus à l'imprécision de la méthode de mesure utilisée lors du démontage de chaque couche.

Figure 4.5 : Indice des vides dans les colonnes 1 (A) et 2 (B) en fonction de l'élévation

Les conductivités hydrauliques saturées mesurées avec les essais à charges constantes et variables varient de 2×10^{-4} à 3×10^{-2} cm/s pour la colonne 1 et de 2×10^{-3} à 2×10^{-2} cm/s pour la colonne 2 (Annexe E). Les valeurs de k_{sat} globales (mesurées entre la tête et la base de l'échantillon) diffèrent des valeurs locales (mesurées avec les tensiomètres), de plus d'un ordre de grandeur pour la colonne 1 et d'un facteur de 4 pour la colonne 2. Les valeurs mesurées pour la colonne 1 sont très variables (2 ordres de grandeur) et ne correspondent pas bien aux valeurs prédites avec les modèles de KC et KCM. Les valeurs mesurées pour la colonne 2 sont par contre proches des valeurs obtenues avec les perméamètres à paroi rigide et prédites avec les modèles de KC et KCM.

La plus grande variabilité d'indice des vides dans la colonne 1 (figure 4.5) pourrait expliquer en partie les différences entre les conductivités hydrauliques saturées mesurées en colonne et dans les perméamètres à paroi rigide. De plus, la faible conductivité hydraulique des céramiques utilisées avec les tensiomètres pourrait avoir entrainé un écart dans la mesure des charges, ce qui pourrait avoir affecté l'estimation de k_{sat}.

Les résultats restent néanmoins dans l'ordre de grandeur attendu pour un sable propre (10^{-4} à 10^{-1} cm/s) (Freeze et Cherry, 1979; Todd et Mays, 2005). Ces résultats ne seront cependant pas utilisés dans la suite de l'analyse en raison de leur plus grande variabilité; on préférera se fier aux valeurs obtenues dans les perméamètres à paroi rigide.

4.5 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) a été obtenue au moyen de deux essais de drainage en colonne et quatre essais en cellule Tempe. Les succions associées aux teneurs en eau volumiques mesurées dans les colonnes et les courbes de rétentions obtenues du modèle MK (Aubertin et al., 2003) pour les indices des vides minimum et maximum sont présentées à la figure 4.6. Les données obtenues avec les essais en colonne ont permis de déterminer une pression d'entrée d'air (AEV) d'environ 40 cm (figure 4.6). Les données expérimentales coïncident en partie avec la courbe de rétention d'eau estimée avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) (section 2.3.3).

Figure 4.6 : Courbe de rétention d'eau expérimentale obtenue avec les essais en colonne et prédite avec le modèle MK pour les indices des vides minimum et maximum mesurés dans les colonnes (Aubertin et al., 2003)

Les paramètres de la courbe ajustée selon le modèle de van Genuchten (1980) (éq. 2.7) sont présentés au tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Paramètre de la CRE ajustée avec le modèle de van Genuchten (1980) (éq. 2.7) du sable mesuré en colonne

Paramètres	Valeur
α (kPa^{-1})	0,1674
n (-)	4,99035
m (-)	0,1667
θ_R (-)	0,03
θ_S (-)	0,37
AEV (cm)	40

La partie résiduelle de la courbe de rétention d'eau a été obtenue de manière plus précise avec les cellules Tempe. Quatre essais en cellules Tempe ont été réalisés pour comparer avec les données obtenues avec les essais en colonne et pour obtenir la partie résiduelle de la courbe de rétention d'eau. La figure 4.7 présente un essai en cellules Tempe où les résultats obtenus à de faibles succions ont été réalisés en appliquant des succions avec un tube en « U » et où les résultats pour des succions plus importantes (à partir de 15,4 kPa) ont été obtenus en appliquant des pressions (voir détails section 3.5.2).

Figure 4.7 : Courbe de rétention d'eau obtenue en cellule de pression (A : Échantillon HSP-1) et CRE estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003)

La figure 4.7 indique que courbe de rétention d'eau du sable *HSP* est assez bien prédite par le modèle MK (Aubertin et al., 2003), avec une pression d'entrée d'air (AEV) d'environ 35 cm, une teneur en eau résiduelle (θ_r) de 0,04 et une pression résiduelle (ψ_r) d'environ 100 cm. Un autre essai (Échantillon *HSP-2*) montre une allure peu réaliste pour les succions supérieures à 80 cm (teneur en eau trop élevée). Ces erreurs sont sans doute dues à la très longue durée de l'essai (quatre mois et demi). La CRE de l'échantillon *HSP-2* n'est donc pas utilisée dans la suite de cette étude (CRE de l'échantillon *HSP-2* présentée à l'Annexe F).

Une série d'essais avec les cellules Tempe a également été réalisée en appliquant des pressions supérieures à l'AEV entre 3,2 et 80,1 kPa (31 à 786 cm). La figure 4.8 présente les données obtenues.

Figure 4.8 : Courbe de rétention d'eau en appliquant une pression d'air dans les cellules Tempe (A : Échantillon HSP-3, B : Échantillon HSP-4) et CRE estimée avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003)

Il n'est pas possible d'appliquer des pressions inférieures à 3,2 kPa (31 cm) avec le montage au laboratoire. La pression d'entrée d'air (AEV) du sable a été estimée autour de 30 cm par la méthode des tangentes. Une teneur en eau volumique résiduelle d'environ 0,04 et une succion résiduelle d'environ 100 cm ont été déterminées expérimentalement pour les deux essais. Les résultats montrent une très bonne corrélation avec le modèle prédictif MK (Aubertin et al., 2003) et l'essai *HSP-1*.

Le tableau 4.10 présente les paramètres des courbes de rétentions d'eau ajustées avec le modèle de van Genuchten (1980) (éq. 2.7).

Tableau 4.10 : Paramètres des courbes de rétention d'eau (CRE) obtenues des mesures avec les cellules Tempe et ajustées avec le modèle van Genuchten (1980; éq. 2.7)

Paramètres	Cellule HSP-1	Cellule HSP-3	Cellule HSP-4
α (kPa^{-1})	0,1821	0,1870	0,2002
n (-)	4,17554	4,28787	4,24149
m (-)	0,1667	0,1667	0,1667
Θ_r(-)	0,04	0,04	0,04
θ_S (-)	0,37	0,33	0,35
AEV (cm)	35	33	31

4.5.1 Synthèse des résultats pour la CRE

Les différentes courbes de rétention d'eau présentées plus haut ont été exprimées en fonction du degré de saturation ($S_r = \theta/n$) du sable et comparées entre elles en supposant que le sable est incompressible ($\Delta n = 0$) (figure 4.9). La pression d'entrée d'air (AEV) est comprise entre 30 et 40 cm et la pression d'entrée d'eau (WEV) entre 80 à 110 cm. La figure 4.9 indique que les CRE mesurées sont très proches. Les courbes ont été lissées avec le modèle de van Genuchten (1980).

Figure 4.9 : Courbes de rétention d'eau du sable *HSP-A* mesurées au laboratoire exprimées dans le plan plan S_r-logψ (lissés avec RETC, 2009) et le modèle de van Genuchten, 1980)

CHAPITRE 5 RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFILTRATION À ÉCHELLE INTERMÉDIAIRE MENÉS SUR LE TERRRAIN

Ce chapitre présente les principaux résultats des essais d'infiltration à échelle intermédiaire menés sur le terrain. Les protocoles expérimentaux de ces essais sont présentés à la section 3.6. Les mesures de densité en place réalisées avec le nucléodensimètre sur l'ensemble de la couche de sable de la halde expérimentale sont présentées à la section 5.1 et comparées aux courbes de densité obtenue avec l'essai du Proctor modifié (section 4.3). Les résultats des essais d'infiltration pour les trois types d'essais réalisés sur le terrain sont détaillés aux sections 5.2 à 5.5.

5.1 Densité en place

La densité en place de la couche de sable a été mesurée au nucléodensimètre à une profondeur de 20 cm avant et après chaque essai (détails des résultats en Annexe G). Le sable sur le terrain était souvent plus dense comparativement aux densités expérimentales obtenues par les essais Proctor modifiés (section 4.3, figure 4.3). Les masses volumiques sèches mesurées sur le terrain sont comprises entre 1750 et 2000 kg/m^3 (moyenne de 1884 kg/m^3 et écart-type de 64 kg/m^3), avec des teneurs en eau massiques comprises entre 2,4 % et 9,1 % (moyenne de 5,3 % et un écart-type de 1,6 %) (figure 5.1). Ces valeurs se trouvent du côté sec ($\omega < \omega_{opt}$) des courbes obtenues au Proctor modifié. L'énergie de compaction appliquée sur le terrain (rouleau compacteur avec vibration) pourrait expliquer ces différences.

Les résultats obtenus avec le nucléodensimètre permettent de déterminer les conditions initiales (indice des vides et teneur en eau volumique) avant les essais d'infiltration. Les mesures ont été prises à proximité des essais d'infiltration (moins de 30 cm de distance). Ces résultats ont été utilisés comme conditions initiales dans les modèles numériques. L'indice des vides *e* est compris entre 0,34 et 0,49 sur l'ensemble de la couche de contrôle des écoulements (CCE) à la surface et entre 0,41 à 0,53 à une profondeur de 30 cm (figure 5.2). On ne note pas de tendances ou de corrélations spatiales particulières.

Figure 5.1 : Masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau massique ω mesurée au nucléodensimètre avant les essais d'infiltration sur le sable de la CCE. Les résultats de terrain sont comparés aux courbes des essais Proctor modifié réalisés au laboratoire (voir figure 4.3)

Figure 5.2 : Indices des vides mesurés au nucléodensimètre sur la couche de sable de la CCE, au centre de chaque lysimètre; les barres d'erreurs représentent l'indice des vides minimal et maximal mesurés, les boîtes rectangulaires représentent le 1er et le 3e quartile, coupé par la médiane.

La densité en place a aussi été mesurée avec des anneaux métalliques avant les essais (sauf pour les essais au perméamètre de Guelph). Les masses volumiques sèches ρ_d sont généralement plus élevées que les mesures prises au nucléodensimètre (Annexe G). Étant donné que le nucléodensimètre est reconnu pour être précis dans le sable (ASTM-D6938, 2015) et que l'instrument a été calibré avant chaque essai, les résultats mesurés à l'anneau n'ont pas été retenus pour les simulations.

5.2 Infiltromètre à simple anneau

5.2.1 Rayon de 15 cm

Des essais d'infiltration à simple anneau avec un rayon de 15 cm ont été réalisés au-dessus des lysimètres 1, 2, 3, 4 et 6 durant la première campagne de terrain (du 24 mai au 11 juin 2016). Les résultats obtenus sont présentés au tableau 5.1 et à la figure 5.4. Les taux d'infiltration minimal et maximal correspondent aux valeurs extrêmes lorsque le taux d'infiltration devient constant. Par exemple pour l'essai *Lys. 6-SA15*, la valeur du taux d'infiltration varie entre $1{,}6\times10^{-3}$ cm/s et $3{,}1\times10^{-3}$ cm/s lorsque la charge est quasi-constante et égale à environ 9,6 cm (figure 5.3).

Figure 5.3 : Taux d'infiltration mesuré pour l'essai *Lys. 6-SA15*. Les valeurs minimales et maximales du taux d'infiltration lorsque la charge d'eau est quasi-constante sont indiquées

Tableau 5.1 : Principaux résultats des essais d'infiltration à simple anneau (rayon de 15 cm) (les résultats expérimentaux des essais correspondants sont détaillés à la figure 5.4)

Nom	Charge constante 1 (cm)	Charge constante 2 (cm)	Taux d'infiltration minimal (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (cm/s)	Taux d'infiltration médian (cm/s)
Lys. 1- SA15	5,0	7,5	$7{,}8\times10^{-4}$	$1{,}6\times10^{-3}$	$1{,}2\times10^{-3}$
Lys.2- SA15	10,0	-	$1{,}6\times10^{-3}$	$1{,}6\times10^{-3}$	$1{,}6\times10^{-3}$
Lys.3- SA15	5,0	7,0	$6{,}2\times10^{-4}$	$1{,}9\times10^{-3}$	$1{,}3\times10^{-3}$
Lys. 4- SA15	6,4	-	$9{,}3\times10^{-4}$	$1{,}2\times10\text{-}^{3}$	$1{,}1\times10^{-3}$
Lys. 6 - SA15	9,6	-	$1{,}6\times10^{-3}$	$3{,}1\times10^{-3}$	$2{,}4\times10^{-3}$

Tous les essais d'infiltration réalisés sur le terrain ont été simulés avec le logiciel Seep/W (Geo-Slope International, 2007) (voir méthodologie détaillée à la section 3.7). Les courbes du taux d'infiltration en fonction du temps obtenues avec Seep/W sont comparées aux données expérimentales sur la figure 5.4. Les indicateurs de précision MD et RMSE sont utilisés pour assurer la qualité de l'ajustement des modèles numériques.

La charge d'eau a été augmentée au cours des essais *Lys.1-SA15* et *Lys.3-SA15*. Le pic du taux d'infiltration expérimental durant ces essais (respectivement aux temps 2700 et 1980 s; figure 5.4) représente le volume d'eau nécessaire pour augmenter la charge d'eau dans l'anneau. La courbe du taux d'infiltration simulé ne suit pas le taux d'infiltration expérimental pendant ce temps (ajustement de la charge).

Pour l'ensemble des résultats présentés à la figure 5.4, les courbes du taux d'infiltration suivent la tendance théorique des modèles d'infiltration (section 2.4) à savoir que le taux d'infiltration est plus élevé en début d'essai et diminue progressivement pour atteindre une valeur quasi-constante, lorsque le sol est (quasi) saturé.

Figure 5.4 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon 15 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (début)

Figure 5.4 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon 15 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (suite et fin)

Les conductivités hydrauliques expérimentales de terrain (k_{fs}) ont été calculées avec l'équation de Reynolds et Elricks (1990) (éq. 2.36). Elles sont comprises entre 9×10^{-4} et 2×10^{-3} cm/s (figure 5.5). Les conductivités hydrauliques saturées ajustées numériquement ($k_{sat\ ajustée}$) ont été déduites avec le logiciel Seep/W (méthodologie, section 3.7). Ces valeurs sont comprises entre 4×10^{-4} et 7×10^{-4} cm/s (figure 5.5). Les valeurs expérimentales (k_{fs}) sont plus élevées que les résultats numériques et se rapprochent davantage des modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). La différence entre les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) et numériques ($k_{sat\ ajustée}$) semble assez constante (elle sera discuté plus en détail au chapitre 6). Les indices des vides minimaux et maximaux (calculés à partir des résultats obtenus avec le nucléodensimètre) et les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) minimales et maximales sont également indiqués sur la figure 5.5 sous forme de barres d'erreur.

Figure 5.5 : Conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures avec l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 15 cm); valeurs obtenues au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM

5.2.2 Rayon de 30 cm

Des essais d'infiltration à simple anneau avec un rayon de 30 cm ont été réalisés au-dessus des lysimètres 1, 2, 5 et 6 pendant la première campagne de terrain (du 24 mai au 11 juin 2016). Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2 et la figure 5.6. Les indicateurs de précision MD et RMSE sont utilisés pour l'ajustement des modèles numériques.

Tableau 5.2 : Principaux résultats des essais d'infiltration à simple anneau (rayon de 30 cm) (voir figure 5.6)

Nom	Charge constante 1 (cm)	Charge constante 2 (cm)	Taux d'infiltration minimal (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (cm/s)	Taux d'infiltration médian (cm/s)
Lys. 1-SA30	5,0	5,5	$1{,}1\times10^{-3}$	$1{,}8\times10^{-3}$	$1{,}5\times10^{-3}$
Lys. 2- SA30	3,2	5,0	$3{,}9\times10^{-4}$	$1{,}2\times10^{-3}$	$8{,}0\times10^{-4}$
Lys. 5- SA30	4,6	-	$5{,}8\times10^{-4}$	$7{,}8\times10^{-4}$	$6{,}8\times10^{-4}$
Lys. 6 - SA30	7,2	-	$1{,}1\times10^{-3}$	$1{,}4\times10^{-3}$	$1{,}3\times10^{-3}$

La charge d'eau a été augmentée au cours des essais *Lys.1-SA30* et *Lys.2-SA30*. Le pic du taux d'infiltration expérimental durant ces essais (respectivement aux temps 3420 et 3720 s; figure 5.6) représente le volume d'eau utilisé pour augmenter la charge d'eau dans l'anneau. La courbe du taux d'infiltration simulé ne suit pas le taux d'infiltration expérimentale pendant ce temps (ajustement de la charge).

Le taux d'infiltration initial mesuré semble être généralement plus faible par rapport au taux d'infiltration initial simulé pour l'ensemble des courbes des essais avec l'infiltromètre à simple anneau d'un rayon de 30 cm (figure 5.6). Il était en effet plus difficile avec l'infiltromètre de plus grand rayon (30 cm) de débuter l'essai (prise de mesures) au même moment que le début de l'infiltration dans le sable. Les modèles numériques ont cependant été ajustés sur le taux d'infiltration en fin d'essai et l'estimation de k_{sat} n'est donc pas influencée par les différences observées au début de l'essai.

Figure 5.6 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon 30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais

Les conductivités hydrauliques à satiété déterminées à partir des mesures expérimentales (k_{fs}) ont été calculées avec l'équation de Reynolds et Elricks (1990) (éq. 2.36). Elles sont comprises entre 6×10^{-4} et 1×10^{-3} cm/s (figure 5.7). Les conductivités hydrauliques saturées ajustées numériquement ($k_{sat\ ajustée}$) ont été déduites avec le logiciel Seep/W (méthodologie section 3.7). Les valeurs sont comprises entre 3×10^{-4} et 6×10^{-4} cm/s (figure 5.7). Ces valeurs expérimentales (k_{fs}) sont plus élevées que les résultats numériques ($k_{sat\ ajustée}$) et se rapprochent davantage des modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). Les indices des vides minimaux et maximaux (calculés à partir des résultats obtenus avec le nucléodensimètre) et les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) minimales et maximales sont également indiqués sur la figure 5.7 sous forme de barres d'erreur.

Figure 5.7 : Conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures avec l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 30 cm) obtenues au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM

Le taux d'infiltration mesuré avec les essais d'infiltration à simple anneau (rayon de 15 et 30 cm) tend à augmenter avec la charge d'eau appliquée (figure 5.8). Un taux d'infiltration plus élevé donne une valeur de k_{fs} plus élevée (éq. 2.36). Le taux d'infiltration médian pour un infiltromètre à simple anneau (rayon de 15 ou 30 cm) varie entre $6{,}8\times10^{-4}$ et $2{,}4\times10^{-3}$ cm/s pour une valeur moyenne (géométrique) de $1{,}3\times10^{-3}$ cm/s (figure 5.8).

Figure 5.8 : Taux d'infiltration en fonction de la charge pour les essais à l'infiltromètre à simple anneau (rayon de 15 et 30 cm)

Les essais réalisés avec l'infiltromètre à simple anneau dont le rayon est de 30 cm semblent donner des taux d'infiltrations plus faibles (facteur d'environ 1/2) (sauf pour le lysimètre 1) qu'avec un anneau de 15 cm de rayon (figure 5.9). Cette observation concorderait ainsi avec la théorie présentée à la section 2.4. Plus le rayon de l'infiltromètre est grand, moins le taux d'infiltration mesuré est influencé par les écoulements latéraux et plus l'infiltration est faible (en général). Ces différences demeurent cependant dans la marge d'erreur des mesures et ces observations doivent donc être considérées avec précaution. Les résultats avec l'infiltromètre à simple anneau montrent aussi une bonne homogénéité de la CCE (figure 5.9).

Figure 5.9 : Taux d'infiltration médian pour les deux rayons de l'infiltromètre à simple anneau

5.3 Infiltromètre à double anneau

Quatre essais d'infiltration à double anneau ont été réalisés aux lysimètres 3 et 4 pendant la première (du 24 mai au 11 juin 2016) et la deuxième campagne (du 11 septembre au 2 octobre 2016) de terrain. Le taux d'infiltration a été mesuré dans l'anneau interne et externe. Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 5.3, 5.4 et à la figure 5.10.

Tableau 5.3 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec le double anneau (taux d'infiltration de l'anneau interne) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.10)

Nom	Charge interne constante (cm)	Taux d'infiltration minimal (interne) (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (interne) (cm/s)	Taux d'infiltration médian (interne) (cm/s)
Lys. 4- DA	9,5	$3{,}1\times10^{-4}$	$8{,}3\times10^{-4}$	$5{,}7\times10^{-4}$
Lys 3-DA-2	7,6	$2{,}4\times10^{-4}$	$7{,}3\times10^{-4}$	$4{,}8\times10^{-4}$
Lys 4-DA-2	8,2	$4{,}8\times10^{-4}$	$1{,}2\times10^{-3}$	$8{,}5\times10^{-4}$

Tableau 5.4 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec le double anneau (taux d'infiltration de l'anneau externe) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.10)

Nom	Charge externe constante (cm)	Taux d'infiltration minimale (externe) (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (externe) (cm/s)	Taux d'infiltration médian (externe) (cm/s)
Lys. 3- DA	5,5	$1{,}0\times10^{-3}$	$2{,}6\times10^{-3}$	$1{,}8\times10^{-3}$
Lys. 4- DA	8,5	$9{,}0\times10^{-4}$	$1{,}0\times10^{-3}$	$9{,}5\times10^{-4}$
Lys. 3-DA-2	7,2	$5{,}7\times10^{-4}$	$1{,}2\times10^{-3}$	$8{,}9\times10^{-4}$
Lys. 4-DA-2	8,1	$5{,}7\times10^{-4}$	$2{,}2\times10^{-3}$	$1{,}4\times10^{-3}$

Les courbes du taux d'infiltration (en fonction du temps) obtenues avec Seep/W (méthodologie, section 3.7) sont comparées avec les données expérimentales sur la figure 5.10. Les indicateurs de précision MD et RMSE sont utilisés pour assurer la qualité de l'ajustement des modèles numériques.

Les essais *Lys. 3-DA* et *Lys. 4-DA* réalisé lors de la première campagne de terrain ont rencontré quelques difficultés à maintenir la charge constante dans l'anneau interne. La valve du réservoir interne a été temporairement fermée pour essayer de réparer la cellule de Mariotte défectueuse, ce qui explique le taux d'infiltration égal à 0 cm/s sur la figure 5.10 entre 660 et 1500 s pour l'essai *Lys. 3-DA* et 3600 et 7500 s pour l'essai *Lys. 4-DA*. Dans le cas de l'essai Lys. 3-DA, le taux d'infiltration n'a pas atteint l'état stationnaire et la conductivité hydraulique saturée n'a pas pu être évaluée.

Les essais *Lys. 3-DA-2* et *Lys. 4-DA-2* réalisés durant la deuxième campagne de terrain ont donné de meilleurs résultats, grâce notamment au remplacement des cellules de Mariotte. Le taux d'infiltration de l'anneau externe est plus élevé et décroît à la même vitesse que le taux d'infiltration de l'anneau interne (figure 5.10). L'essai *Lys. 3-DA-2* montre un taux d'infiltration quasi-constant sur une longue période de temps (4200 à 21600 s) (figure 5.10). L'ensemble des résultats présentés à la figure 5.10 permettent d'obtenir le taux d'infiltration quasi-constant dans l'anneau interne (sauf l'essai *Lys. 3-DA*) et dans l'anneau externe.

Figure 5.10 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noirs et rouges) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes pointillées) avec l'infiltromètre à double anneau est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais

Le taux d'infiltration dans l'anneau interne est compris entre $4{,}8\times10^{-4}$ et $8{,}5\times10^{-4}$ cm/s pour des charges variant de 7,6 à 8,2 cm. Le taux d'infiltration de l'anneau externe est compris entre $8{,}9\times10^{-4}$ et $1{,}4\times10^{-3}$ cm/s pour des charges variant de 5,5 à 8,5 cm.

Le taux d'infiltration de l'anneau interne et externe sont comparés à la figure 5.11. Le taux d'infiltration est plus élevé dans l'anneau externe que dans l'anneau interne pour tous les essais.

Figure 5.11 Comparaisons du taux d'infiltration de l'anneau interne et externe pour le même essai; les barres d'erreurs correspondent aux valeurs minimales et maximales du taux d'infiltration mesuré.

Les conductivités hydrauliques à satiété obtenues des mesures expérimentales (k_{fs}) ont été calculées avec l'équation de Reynolds et Elricks (1990) (éq. 2.36). Elles sont comprises entre 3×10^{-4} et 6×10^{-3} cm/s pour l'anneau interne et entre 7×10^{-4} à 1×10^{-3} cm/s pour l'anneau externe (figure 5.12). Les conductivités hydrauliques saturées ajustées numériquement ($k_{sat\ ajustée}$) ont été déduites pour l'anneau interne avec le logiciel Seep/W (méthodologie section 3.7). Ces valeurs sont comprises entre 1×10^{-4} et 4×10^{-4} cm/s; elles sont aussi montrées à la figure 5.12. Les valeurs de k_{fs} sont plus élevées que les résultats numériques ($k_{sat\ ajustée}$) et se rapprochent davantage des modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). Les indices

des vides minimaux et maximaux (calculés à partir des résultats obtenus avec le nucléodensimètre) et les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) minimales et maximales sont également indiqués sur la figure 5.12 sous forme de barres d'erreur.

Figure 5.12 : Conductivité hydraulique à satiété (k_{fs}) mesuré avec l'infiltromètre à double anneau obtenu au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990, éq. 2.36) (k_{fs}) et conductivité hydraulique saturée obtenue par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM

5.4 Perméamètre de Guelph

Des essais d'infiltration avec le perméamètre de Guelph ont été réalisés au-dessus des lysimètres 1 à 6. Le tableau 5.5 et la figure 5.13 présentent les principaux résultats.

Tableau 5.5 : Principaux résultats des essais d'infiltration avec perméamètre de Guelph; les essais A et B considèrent le taux d'infiltration minimal, maximal pour le 1er palier (A) et le 2e palier (B) (les essais correspondants sont détaillés à la figure 5.13)

Nom de l'essai	Charge constante 1 (cm)	Charge constante 2 (cm)	Charge constante3 (cm)	Taux d'infiltration minimal (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (cm/s)	Taux d'infiltration médian (cm/s)
Lys. 1-Guelph	5	-	-	$1,7\times10^{-3}$	$2,7\times10^{-3}$	$2,2\times10^{-3}$
Lys. 2-Guelph	5	-	-	$9,2\times10^{-3}$	$1,2\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$
Lys. 3-Guelph-A	5	-	-	$1,0\times10^{-2}$	$1,3\times10^{-2}$	$1,2\times10^{-2}$
Lys. 3-Guelph-B	-	8	-	$6,1\times10^{-3}$	$7,6\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$
Lys. 4-Guelph-A	2	-	-	$4,6\times10^{-3}$	$7,6\times10^{-3}$	$6,1\times10^{-3}$
Lys. 4-Guelph-B	-	3	5	$7,6\times10^{-3}$	$1,0\times10^{-2}$	$8,9\times10^{-3}$
Lys. 5-Guelph-A	5	-	-	$9,9\times10^{-3}$	1.5×10^{-2}	$1,2\times10^{-2}$
Lys. 5-Guelph-B	-	8	-	$1,5\times10^{-2}$	$1,7\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$
Lys. 6-Guelph	10	-	-	$6,2\times10^{-2}$	$7,5\times10^{-2}$	$6,9\times10^{-2}$
Lys. 3-Guelph-2	3	-	-	$3,7\times10^{-3}$	$4,5\times10^{-3}$	$4,1\times10^{-3}$
Lys. 4-Guelph-2	3	-	-	$9,2\times10^{-3}$	$1,2\times10^{-2}$	$1,1\times10^{-2}$

Les courbes du taux d'infiltration en fonction du temps obtenue avec Seep/W (voir méthodologie à la section 3.7) ont été comparées avec les données expérimentales à la figure 5.13. Les indicateurs de précision MD et RMSE sont utilisés pour assurer la qualité de l'ajustement des modèles numériques.

La charge d'eau a été augmentée au cours des essais *Lys. 3-Guelph*, *Lys.4.-Guelph* et *Lys. 5-Guelph* (respectivement au temps 3120, 1800 et 2700 s pour *Lys.4.-Guelph* et 2700 s; figure 5.13). Le taux d'infiltration numérique a été ajusté en fonction de chaque palier (tableau 5.5 et figure 5.13). Les essais réalisés avec le perméamètre de Guelph présentent une diminution du taux d'infiltration en début d'essai moins marquée qu'avec les infiltromètres à simple et double anneau et tendent vers une valeur quasi-constante après un certain temps (temps équivalent aux infiltromètres à simple et double anneau).

Figure 5.13 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) appliquée avec le perméamètre de Guelph est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (début)

Figure 5.13 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) appliquée avec le perméamètre de Guelph est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais (suite et fin)

Les conductivités hydrauliques à satiété déduites des mesures expérimentales (k_{fs}) ont été calculées avec l'équation de Reynolds et Elricks (1992) (éq. 2.34). Elles sont comprises entre 2×10^{-4} et 2×10^{-3} cm/s (figure 5.14). Les conductivités hydrauliques saturées ajustées numériquement ($k_{sat\ ajustée}$) ont été déduites avec le logiciel Seep/W (méthodologie section 3.7). Ces valeurs sont comprises entre 2×10^{-4} et 1×10^{-3} cm/s (figure 5.14). Les résultats expérimentaux (k_{fs}) sont généralement plus élevés que les résultats numériques ($k_{sat\ ajustée}$) et se rapprochent davantage des modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). Les indices des vides minimaux et maximaux (calculés à partir des résultats obtenus avec le nucléodensimètre) et les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) minimales et maximales sont également indiqués sur la figure 5.14 sous forme de barres d'erreur.

Figure 5.14 : Conductivité hydraulique à satiété avec le perméamètre de Guelph obtenue au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1992, éq. 2.34) (k_{fs}) et la conductivité hydraulique saturée obtenue par analyse inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM

5.5 Essais d'infiltration à une profondeur de 30 cm

Sept essais d'infiltration utilisant les mêmes méthodes (infiltromètre à simple et double anneau et perméamètre de Guelph) ont été réalisés à une profondeur de 30 cm sous la surface du sable (voir méthodologie à la section 3.7). Le tableau 5.6 et les figures 5.15 à 5.17 présentent ces résultats. Les indicateurs de précision MD et RMSE sont utilisés pour assurer la qualité de l'ajustement des modèles numériques

Tableau 5.6 : Principaux résultats des essais d'infiltration réalisés à une profondeur de 30 cm (les essais correspondants sont détaillés aux figures 5.15, 5.16 et 5.17)

Nom	Charge constante (cm)	Charge (DA-externe) (cm)	Taux d'infiltration minimal (cm/s)	Taux d'infiltration maximal (cm/s)	Taux d'infiltration médian (cm/s)
Lys. 3-SA15-Z30	8,0	-	$1,2\times10^{-3}$	$1,7\times10^{-3}$	$1,5\times10^{-3}$
Lys. 4-SA30-Z30	5,7	-	$6,1\times10^{-4}$	$1,1\times10^{-3}$	$8,6\times10^{-4}$
Lys. 3-Guelph-Z30	3,0	-	$2,5\times10^{-2}$	$2,9\times10^{-2}$	$2,7\times10^{-2}$
Lys. 4-Guelph-Z30	3,0	-	$1,9\times10^{-2}$	$2,3\times10^{-2}$	$2,1\times10^{-2}$
Lys. 3-DA-Z30	8,0	6,5	$4,8\times10^{-4}$	$7,3\times10^{-4}$	$6,1\times10^{-4}$
Lys. 4-DA-Z30	7,4	7,0	$2,4\times10^{-4}$	$1,2\times10^{-3}$	$7,2\times10^{-4}$
Lys. 4-DA2-Z30	4,6	3,5	$7,3\times10^{-4}$	$1,3\times10^{-3}$	$1,0\times10^{-3}$

Le taux d'infiltration initial de l'essai *Lys. 3-SA30-Z30* est bien simulé par la courbe du taux d'infiltration ajustée numériquement (figure 5.15). Le taux d'infiltration initiale pour l'essai *Lys. 4-SA30-Z30* est plus faible contrairement au taux d'infiltration simulé numériquement dû à la difficulté du protocole expérimental pour un infiltromètre de plus grand rayon (rayon de 30 cm). Il était en effet plus difficile avec l'infiltromètre de plus grand rayon (30 cm) d'initialiser l'essai avec le début de l'infiltration d'eau dans le sable. Les essais avec l'infiltromètre à simple anneau réalisés à mi-hauteur de couche (Z=30 cm) ont atteint un état stationnaire (respectivement aux temps 6600 et 4800 s; figure 5.15).

Figure 5.15 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes rouges) dans l'anneau simple (rayon de 15 ou 30 cm) à mi-hauteur de couche (Z=30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais

Le taux d'infiltration de l'essai *Lys.3-Guelph-Z30* est bien simulé par la courbe du taux d'infiltration ajustée numériquement pour une charge constante de 3 cm (figure 5.16). Le taux d'infiltration initiale pour l'essai *Lys.4-Guelph-Z30* augmente au lieu de décroitre, ce qui ne suit pas la théorie (section 2.4) ni la courbe du taux d'infiltration ajustée numériquement. Cela pourrait être dû à une difficulté expérimentale en début d'essai (figure 5.16).

Figure 5.16 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noires) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (points et courbes rouges) avec le perméamètre de Guelph à mi-hauteur de couche (Z=30 cm) est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais

Le taux d'infiltration des essais réalisés avec l'infiltromètre à double anneau à une profondeur de mi-couche (Z=30 cm) ont donnés des courbes de taux d'infiltration en fonction du temps qui concordent avec les courbes ajustées numériquement (figure 5.17). Le taux d'infiltration de l'anneau externe est plus élevé et décroît à la même vitesse que le taux d'infiltration de l'anneau interne (figure 5.17). Les essais *Lys.3-DA-Z30, Lys.4-DA-Z30 et Lys.4-DA2-Z30* montrent un taux d'infiltration quasi-constant sur de longues périodes de temps (sur une durée d'environ 2 à 3 heures) (figure 5.17).

Figure 5.17 : Taux d'infiltration mesurés (points et courbes noirs et rouges) et ajustés numériquement (traits oranges), la charge hydraulique (courbes pointillées) avec l'infiltromètre à double anneau à mi-hauteur de couche est aussi montrée en fonction du temps pour tous les essais

Figure 5.18 : Taux d'infiltration en fonction de la profondeur pour différents types d'essais; les barres d'erreurs représentent l'indice des vides minimal et maximal mesurés, les boîtes rectangulaires représentent le 1er et le 3e quartile, coupé par la médiane.

Les résultats des essais réalisés à la surface (Z=0 cm) et à mi-hauteur de la couche de sable (Z=30 cm) ont été comparés à la figure 5.18. Le taux d'infiltration médian est compris entre $6{,}1\times10^{-4}$ et $9{,}6\times10^{-3}$ cm/s pour les essais réalisés à Z=0 cm et entre $7{,}3\times10^{-4}$ à $2{,}4\times10^{-2}$ cm/s pour les essais réalisés à Z=30 cm. L'intervalle du taux d'infiltration médian pour les essais réalisés à la surface est légèrement inférieur à l'intervalle pour les essais réalisés à mi-hauteur de couche. Ces résultats sont toutefois très proches en considérant les taux d'infiltration minimaux et maximaux mesurés sur le terrain, ainsi que l'erreur sur la mesure.

Les valeurs de la conductivité hydraulique à satiété obtenues de mesures expérimentales (k_{fs}) ont été calculées avec les équations de Reynolds et Elricks (éq. 2.34 et 2.36). Elles sont comprises entre 4×10^{-4} et 2×10^{-3} cm/s (figure 5.19). Les conductivités hydrauliques saturées ajustées numériquement ont été déduites avec le logiciel Seep/W (section 3.7). Les valeurs sont comprises entre 4×10^{-4} et 7×10^{-4} cm/s (figure 5.19). Les résultats déduits des essais (k_{fs}) sont plus élevés que les résultats numériques ($k_{sat\ ajustée}$) et se rapprochent davantage des modèles prédictifs KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002). Les indices des vides minimaux et maximaux

(calculés à partir des résultats obtenus du nucléodensimètre) et les conductivités hydrauliques expérimentales (k_{fs}) minimales et maximales sont également indiqués sur la figure 5.19 sous forme de barres d'erreur.

Figure 5.19 : Conductivité hydraulique à satiété à une profondeur de 30 cm mesurée avec les infiltromètres à simple et double anneau et le perméamètre de Guelph obtenue au moyen de la formule de Reynolds et Elrick (1990,1992, éqs. 2.34 et 2.36) (k_{fs}) et la conducdivité hydraulique saturée obtenue par analyse numérique inverse ($k_{sat\ ajustée}$); ces valeurs sont comparées aux modèles prédictifs KC et KCM

CHAPITRE 6 INTERPRÉTATION, ANALYSES DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'écoulement de l'eau dans la couche de contrôle des écoulements (CCE) est influencé par les propriétés hydrogéotechniques du sable (granulométrie, porosité ou indice des vides, courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité). La caractérisation des propriétés hydrogéologiques du sable au laboratoire et *in situ* permet de mieux comprendre l'influence des différents paramètres qui régissent le comportement du sable.

Ce chapitre traite de l'influence de l'indice des vides (ou de la porosité) sur la conductivité hydraulique saturée, la courbe de rétention d'eau et la fonction de perméabilité *in situ*. On analyse aussi l'effet de la teneur en eau volumique initiale et de la distance à l'interface sable-stériles sur le taux d'infiltration. Les différentes méthodes d'essais et d'interprétation sont comparées et discutées. Les résultats obtenus au laboratoire (chapitre 4) et sur le terrain (chapitre 5) sont utilisés pour évaluer la performance de la CCE et discuter des implications de ces travaux.

6.1 Influence des conditions en place

6.1.1 Influence de l'indice des vides sur la conductivité hydraulique saturée

L'indice des vides a été mesuré lors des essais réalisés au laboratoire et sur le terrain. Il est compris entre 0,51 et 0,71 au laboratoire (section 4.4.1) et entre 0,34 à 0,53 sur la halde expérimentale (section 5.1). Le sable était usuellement plus dense sur le terrain, probablement en raison de la machinerie utilisée lors de la compaction de la couche (comme discuté à la section 5.1).

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) est généralement plus faible lorsque l'indice des vides (et la porosité) diminue conformément aux relations déjà établies entre e et k_{sat} (p.ex. Mbonimpa et al., 2002; McCarthy, 2002; Chapuis et al., 2003). Les conductivités hydrauliques saturées k_{sat} mesurées respectent cette tendance.

Les résultats des essais de perméabilité réalisés au laboratoire sont présentés à la figure 6.1. Les valeurs moyennes de k_{sat} au laboratoire sont comprises entre 3×10^{-3} et 2×10^{-2} cm/s et suivent de façon générale les relations déjà établies entre e et k_{sat}.

Les conductivités hydrauliques *in situ* sont considérées dans un premier temps indépendamment du type d'essai d'infiltration utilisé (figure 6.1). Les différentes méthodes utilisées pour déterminer

la conductivité hydraulique *in situ* sont comparées et discutées à la section 6.1.2. Les valeurs moyennes de k_{sat} pour le sable sur le terrain sont comprises entre 2×10^{-4} et 2×10^{-3} cm/s (figure 6.1). Les barres d'erreurs verticales représentent les k_{sat} calculés avec les taux d'infiltration minimaux et maximaux et les barres d'erreurs horizontales représentent les indices des vides minimaux et maximaux mesurés avant chaque essai.

Figure 6.1 : Conductivité hydraulique saturée déterminée expérimentalement *in situ* (en surface du sable, i.e. profondeur Z=0 cm) et au laboratoire en fonction de l'indice des vides. Les résultats sont comparés aux valeurs prédites avec les modèles KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002).

La tendance moyenne des conductivités hydrauliques saturées mesurées *in situ* suit mieux le modèle prédictif KCM (Mbonimpa et al., 2002), où k_{sat} est fonction de la relation $e^5/(1+e)$ (éq. 2.4). Les mesures de terrain sont usuellement plus faibles par rapport au modèle prédictif KC (Chapuis et Aubertin, 2003). L'écart entre les valeurs mesurées et prédites reste dans tous les cas inférieur à un facteur de 5.

Les résultats de k_{sat} mesurés *in situ* à une profondeur de 30 cm (Z=30 cm) ne sont pas présentés à la figure 6.1, car la profondeur des essais d'infiltration peut avoir une influence sur les résultats (voir section 6.1.5).

6.1.2 Influence de la méthode de mesure *in situ* sur k_{sat}

Les conductivités hydrauliques à satiété estimées à partir des essais de terrain, en utilisant les équations de Reynolds et Elricks (1990, 1992, éqs. 2.34 et 2.36), ont été comparées afin d'évaluer l'influence du type d'essai d'infiltration.

On constate que les essais d'infiltration avec l'infiltromètre à double anneau (anneau interne) et le perméamètre de Guelph donnent des conductivités hydrauliques usuellement plus faibles (moins d'un demi-ordre de grandeur) que les essais à simple anneau (indépendamment du diamètre). La conductivité hydraulique de l'infiltromètre à double anneau (anneau interne) est plus faible en raison de l'anneau externe qui limite l'écoulement latéral (voir aussi section 2.4.). Les essais à l'infiltromètre à simple anneau donnent des conductivités hydrauliques *in situ* plus élevées lorsque l'interprétation est basée sur l'équation de Reynolds et Elrick, 1992 (éq. 2.36). Les essais au perméamètre de Guelph mènent à une conductivité hydraulique qui se rapproche davantage d'un écoulement tridimensionnel (en raison de l'infiltration d'eau par les parois du trou de forage) par rapport à l'infiltromètre à simple ou double anneau. Des conductivités hydrauliques plus élevées pourraient être obtenues, mais l'équation empirique de Reynolds et Elrick (1990) (éq. 2.34) corrige en partie ces résultats (Radcliffe et Rasmussen, 2002) et donne ici des valeurs de k_{fs} comparables à celles obtenues avec l'infiltromètre à double anneau (anneau interne)

Figure 6.2 : Valeur de la conductivité hydraulique à satiété déduite des mesures sur le terrain à la surface de la couche de sable (Z = 0 cm) pour différents types d'essais. Les résultats expérimentaux sont comparés aux valeurs prédites avec les modèles de KC (Chapuis et Aubertin, 2003) et KCM (Mbonimpa et al., 2002).

Les conductivités hydrauliques mesurées *in situ* (k_{fs}) avec l'infiltromètre à simple anneau d'un rayon de 15 cm (SA15) varient de 9×10^{-4} à 2×10^{-3} (plage varie d'un facteur de 3) pour un indice des vides compris entre 0,38 et 0,48. Les valeurs de k_{fs} avec l'infiltromètre à simple anneau d'un rayon de 30 cm (SA30) sont comprises entre 6×10^{-4} et 1×10^{-3} (facteur de 4) pour des indices des vides entre 0,37 et 0,49. Les valeurs de k_{fs} avec l'infiltromètre à double anneau (DA-interne) sont comprises entre 3×10^{-4} et 7×10^{-4} (plage varie d'un facteur de 4) pour des indices des vides entre 0,38 et 0,44. Les valeurs de k_{fs} avec le perméamètre de Guelph montrent une plus grande variabilité et sont comprises entre 2×10^{-4} et 2×10^{-3} (plage de variation d'un ordre de grandeur) pour des indices des vides entre 0,36 et 0,44.

Le modèle prédictif KC (Chapuis et Aubertin, 2003) donne des conductivités hydrauliques saturées plus élevées que k_{fs} d'un facteur d'environ 2 pour l'infiltromètre à simple anneau SA15, d'un facteur entre 1 et 5 pour l'infiltromètre à simple anneau SA30, d'un facteur entre 4 et 7 pour l'infiltromètre à double anneau et d'un facteur entre 1 et 9 pour le perméamètre de Guelph (figures 6.2). Le modèle prédictif KCM (Mbonimpa et al., 2002) suit la tendance moyenne de toutes les valeurs de k_{fs} (figures 6.2). La variation totale des valeurs de k_{fs} est limitée à moins d'un ordre de grandeur avec des résultats prédits relativement proches des valeurs mesurées.

Les équations de Reynolds et Elricks (éq. 2.34 et 2.36) utilisent des constantes définies pour un type et une structure de sol donnée (Radcliffe et Rasmussen, 2002). Or le sable utilisé pour la CCE de la halde expérimentale pourrait différer des caractéristiques du sable utilisé pour établir le facteur géométrique G (éq. 2.35, tableau 2.1) et la constante α^* (éq. 2.36, tableau 2.2), ce qui pourrait expliquer en partie la différence entre les valeurs mesurées et prédites.

Comme indiqué plus haut, il est aussi possible de déterminer la conductivité hydraulique saturée par analyse inverse au moyen de modèles numériques (voir section 3.7). Les valeurs de k_{sat} obtenues numériquement sont généralement plus faibles que les conductivités hydrauliques calculées avec les équations analytiques (k_{fs}). La différence est comprise entre un facteur de 1/3 et 3 et semble suivre une tendance constante (figure 6.3). Les valeurs de k_{fs} déterminées par les équations de Reynolds et Elrick (1990, 1992, éqs. 2.34 et 2.36) sont comparées entre-elles à a figure 6.3.

Figure 6.3 : Conductivité hydraulique à satiété obtenue avec les équations de Reynolds et Elricks (éqs. 2.34 et 2.36) et la conductivité hydraulique saturée ajustée numériquement avec CRE en drainage (analyse inverse)

Les essais d'infiltrations pour obtenir le k_{fs} (analytique) dépendent des propriétés en mouillage du sable. Les courbes de rétention d'eau utilisées dans Seep/W pour obtenir le k_{sat} (numérique) sont les courbes de rétention d'eau en drainage, basées sur les mesures au laboratoire. Les CRE en drainage ont une pression d'entrée d'air (AEV) et une pression d'entrée d'eau (WEV) plus élevées que les courbes de rétention d'eau en mouillage (Maqsoud et al., 2012). En utilisant les CRE en mouillage estimée avec la méthode décrite par Maqsoud et al., (2012) plutôt qu'en drainage dans les simulations numériques, le k_{sat} (numérique) augmente d'un facteur d'environ de 1,5 (tableau 6.1) et se rapproche davantage du k_{fs} (analytique). La différence entre les valeurs obtenues numériquement (k_{sat}) et analytiquement (k_{fs}) peuvent donc en partie être expliquée par le phénomène d'hystérésis. Les CRE utilisées sont présentées à l'Annexe I. Les valeurs de la

conductivité hydraulique déterminées numériquement avec une CRE en mouillage et une CRE en drainage sont présentée au tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Valeurs moyennes de la conductivité hydraulique saturée ajustée numériquement avec Seep/W en utilisant la CRE en mouillage ou en drainage

Type d'essai	k_{fs} (min-max) (cm/s)	$k_{sat\ num}$ (CRE en drainage) (cm/s)	$k_{sat\ num}$ (CRE en mouillage) (cm/s)	Facteur ($k_{sat\ num}$ mouillage / $k_{sat\ num}$ drainage)
Simple anneau avec un rayon de 15 cm	9×10^{-4} à 9×10^{-3}	$5{,}5\times10^{-4}$	$6{,}5\times10^{-4}$	1,2
Simple anneau avec un rayon de 30 cm	6×10^{-4} à 1×10^{-3}	$2{,}5\times10^{-4}$	$4{,}0\times10^{-4}$	1,6
Double anneau	3×10^{-4} à 7×10^{-4}	$1{,}0\times10^{-4}$	$1{,}5\times10^{-4}$	1,5
Perméamètre de Guelph	2×10^{-4} à 2×10^{-3}	$3{,}0\times10^{-4}$	$4{,}5\times10^{-4}$	1,5
Moyenne	**-**	**-**	**-**	**1,5**

6.1.3 Propriétés du sable non-saturé

Les courbes de rétention d'eau (CRE) en drainage mesurées au laboratoire sont bien décrites par le modèle MK (Aubertin et al., 2003) (section 4.5). La courbe de rétention d'eau est toutefois influencée, entre autres, par la porosité et la granulométrie de l'échantillon. Les mesures de laboratoire ont donc été corrigées pour les conditions de terrain au moyen du modèle MK (figure 6.4). Les CRE pour le sable de la halde expérimentale ont ainsi été estimées pour l'intervalle des porosités mesurées sur le terrain (n compris entre 0,27 à 0,34 correspondant à un indice des vides e compris en 0,37 et 0,52) avec le modèle de van Genuchten (1980) à partir de celles calculées avec MK (figure 6.4). La courbe de rétention d'eau en mouillage n'a pas été mesurée ou évaluée au laboratoire, et le phénomène d'hystérésis a été négligé dans ces simulations (mais cet aspect a été traité dans la section précédente).

Figure 6.4: Courbes de rétention d'eau du sable en place estimées pour les indices des vides mesurés *in situ*. Les courbes pointillées sont les CRE obtenues de MK et les courbes pleines sont les CRE ajustées avec van Genuchten (vG)

La pression d'entrée d'air (AEV), déterminée au moyen de la méthode des tangentes, est environ égale à 30 cm (≈ 3 kPa) pour l'intervalle des porosités mesurées sur le terrain. Cette valeur est proche de l'AEV mesuré au laboratoire (AEVlab compris entre 31 et 40 cm). La teneur en eau volumique pour des pressions inférieures à l'AEV est pratiquement égale à la porosité du sable (θ_s=n).

La capacité de rétention d'eau est plus grande pour un matériau avec une porosité plus faible, car la dimension des pores influence la capacité de rétention. Par exemple, pour les CRE exprimées selon le modèle de MK (Aubertin et al., 2003), pour une succion de 100 cm, le sable avec une

porosité de 0,34 a une teneur en eau volumique de 0,07 (Sr=21 %) et le sable avec une porosité de 0,27 a une teneur en eau volumique de 0,10 (Sr=37 %).

La fonction de perméabilité est exprimée ici à partir de la courbe de rétention d'eau et de k_{sat} et donc implicitement de la porosité et de la granulométrie. Cette fonction a été estimée avec le modèle de van Genuchten (1980) et Mualem (1976) (éq. 2.17). L'intervalle des fonctions de perméabilité estimées pour les conditions de terrain est présenté à la figure 6.5. La différence de conductivité hydraulique entre le sable ayant une porosité de 0,29 et 0,34 est relativement faible pour des succions inférieures à l'AEV. Une variation de la porosité de 0,05 peut par contre induire des différences de conductivité hydrauliques supérieures à trois ordres de grandeur pour de fortes succions (succion > 50 kPa). La porosité influence la valeur de la conductivité hydraulique saturée. Plus la porosité est élevée, plus la conductivité hydraulique saturée sera élevée.

Figure 6.5: Fonctions de perméabilité du sable estimées à partir des porosités mesurées sur le terrain.

6.1.4 Effet de la teneur en eau volumique initiale

La teneur en eau volumique du sable avant chaque essai d'infiltration a été évaluée à partir des teneurs en eau massique et des masses volumiques sèches mesurées avec le nucléodensimètre

(éq. 3.7). Les conductivités hydrauliques à satiété calculées au moyen des formules de Reynolds et Elrick (1990, 1992, éq. 2.34 et 2.36) (k_{fs}) pour tous les essais ont été comparées pour diverses teneurs en eau volumique initiales (θ_i) (figure 6.6). Les résultats ne montrent pas de tendance ou de corrélation particulière entre la conductivité hydraulique à satiété (k_{fs}) et la teneur en eau volumique initiale. La teneur en eau initiale influence toutefois le taux d'infiltration initial et le temps requis pour atteindre l'état stationnaire (analysé plus loin). La valeur de k_{sat} estimée à partir des essais d'infiltration n'est donc pas influencée par la teneur eau initiale du sable (figure 6.6).

Figure 6.6 : Conductivité hydraulique à satiété obtenue sur le terrain estimée au moyen des formules de Reynolds et Elrick en fonction de la teneur en eau initiale en place.

L'effet de la teneur en eau volumique initiale (θ_i) sur le taux d'infiltration et l'estimation de la conductivité hydraulique saturée a aussi été étudié au moyen de simulations numériques. Un même essai d'infiltration a été simulé pour trois teneurs en eau volumiques initiales différentes (θ_r=0,02; $\theta_{terrain}$=0,06 et θ_{sat}=0,27) avec le logiciel Seep/W (figure 6.7). Une différence significative est observée durant les premières secondes de l'essai. Un essai réalisé avec une teneur en eau initiale égale à la teneur en eau résiduelle donne un taux d'infiltration initial de $1{,}0\times10^{-2}$ cm/s. Il diminue

ensuite rapidement pour rejoindre la valeur du taux d'infiltration de terrain ($5{,}2\times10^{-3}$ cm/s) simulée avec une teneur en eau initiale de 0,06. Pour une teneur en eau initiale à saturation (θ_{sat}=0,27) le taux d'infiltration est constant ($1{,}2\times10^{-3}$ cm/s) tout au long de l'essai. La teneur en eau initiale a donc un impact direct sur le taux d'infiltration initial (avant que le matériau ne soit saturé). Par contre, le taux d'infiltration tend après un certain temps vers une valeur constante indépendamment de sa teneur en eau initiale (d'autant plus long que le matériau est initialement plus sec).

La teneur en eau volumique initiale sur le terrain est comprise entre 0,05 et 0,17 (chapitre 5). Elle n'aurait donc pas d'influence sur le taux d'infiltration constant (figure 6.8) et sur la conductivité hydraulique estimée. Par contre, le taux d'infiltration avec une teneur en eau initiale de 0,05 est plus élevé (initialement) et prend plus de temps pour se stabiliser (+ 23 min que pour θ_i = 0,17) et atteindre un plateau (état stationnaire) (figure 6.8).

Figure 6.7 : Taux d'infiltration expérimental (points et courbe noire) en fonction de la teneur en eau initiale simulée avec Seep/W (θ_r=0,02 (courbe pointillée rouge); $\theta_{terrain}$=0,06 (courbe continue bleue) et θ_{sat}=0,27 (courbe pointillée verte)

Figure 6.8 : Taux d'infiltration expérimental (points et courbe noire) pour une teneur en eau initiale minimale (TEV=0,05, courbe pointillée rouge) et maximale (TEV= 0,17, courbe continue bleue) pour 2 TEV mesurée sur le terrain et simulée avec Seep/W

6.1.5 Influence de la distance à l'interface avec les stériles

Le sable de la couche de contrôle des écoulements (CCE) a été placé directement au-dessus des stériles de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio. L'épaisseur totale de la couche de sable est d'environ 60 cm. Le taux d'infiltration mesuré dans le sable pourrait être influencé par la présence de l'interface sable-stérile et les stériles sous-jacents. L'influence de la distance à l'interface a été étudiée expérimentalement et numériquement.

Une série d'essais d'infiltration selon les 3 méthodes décrites à la section méthodologie (infiltromètres à simple et double anneau et perméamètre de Guelph) ont été réalisés à mi-hauteur de la couche de sable (Z=30 cm) (section 5.5). L'intervalle du taux d'infiltration médian pour les essais réalisés à la surface est légèrement inférieur à l'intervalle pour les essais réalisés à mi-hauteur de couche (résumé des résultats à la figure 5.18).

L'influence de la distance à l'interface a également été étudiée au moyen de modèles numériques. Trois profondeurs d'essais (Z=0 (surface), 30 et 45 cm) ont ainsi été simulées pour un même type d'essai d'infiltration (figure 6.9). Les propriétés des modèles numériques et des matériaux simulés sont les mêmes que celles présentées à la section 3.7, seule la distance avec l'interface sable-stériles est modifiée dans les simulations.

Figure 6.9 : Effet de la profondeur du test sur le taux d'infiltration simulé pour un essai à simple anneau (A) de 30 cm et (B) de 15 cm de diamètre (A : Lys. 4-SA30-Z30, B : Lys. 3-SA15-Z30); les données expérimentales réalisées à Z=30 cm (points et courbe noire) sont comparées au taux d'infiltration pour un essai réalisé à la surface (Z=0 cm) (courbe pointillée jaune) et un essai réalisé à une profondeur de 45 cm (Z=45 cm) (courbe continue bleue)

Les résultats des modèles numériques indiquent qu'un essai réalisé plus près de l'interface sable-stérile montre un taux d'infiltration plus faible pour un sable ayant les mêmes propriétés (CRE, k_{sat}, fonction de perméabilité). L'effet de barrière capillaire à l'interface des deux matériaux (qui retient l'eau) semble donc réduire le taux d'infiltration dans le sable près de l'interface sable-stériles.

Le taux d'infiltration à l'état stationnaire en fonction de la profondeur de l'essai a été simulé numériquement pour différent indice des vides (figure 6.10) (détails des résultats en Annexe I). La mesure du taux d'infiltration simulé à l'état stationnaire (ici à 9000 s) dans le sable n'est pas affectée par les stériles sous-jacents pour une distance à l'interface d'au moins 35 cm et plus. Le taux d'infiltration simulé diminue lorsque les essais d'infiltration sont réalisés à une distance à l'interface inférieure à 35 cm. Il serait donc préférable de réaliser des essais d'infiltration à au moins 35 cm d'une interface avec un autre matériau pour éviter l'interférence des propriétés des stériles dans le calcul de la conductivité hydraulique saturée du sable.

Figure 6.10 : Taux d'infiltration constant simulé dans une couche de sable de 60 cm en fonction de la distance à l'interface sable-stériles et de l'indice des vides

6.2 Infiltration à travers la couche de contrôle des écoulements

La réponse de la couche de contrôle des écoulements utilisée sur le site de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio a été analysée au moyen de modèles numériques 1D construits avec Seep/W. Les propriétés du sable ont été déterminées à partir des essais de caractérisation au laboratoire et sur le terrain décrits plus haut. Les indices des vides dans les modèles sont compris entre 0,38 et

0,49 (tableau 6.2), soit les valeurs minimales et maximales pour 86 % de l'ensemble des analyses présentées à la figure 6.2. Dans le tableau 6.2 les valeurs de conductivité hydraulique de terrain (k_{fs}) sont déduites de la figure 6.2 et les conductivités hydrauliques saturées Seep/W ($k_{sat\ ajustée}$) sont obtenues de la relation de la figure 6.3.

Tableau 6.2 : Propriétés du sable utilisées dans les simulations du comportement de la couche de contrôle des écoulements.

Indice des vides (e)	**Porosité (n)**	**Conductivité hydraulique de terrain (k_{fs})**	**Conductivité hydraulique saturée Seep/W ($k_{sat\ ajustée}$)**
(-)	(-)	(cm/s)	(cm/s)
0,38	0,28	4×10^{-4}	$1,5\times10^{-4}$
0,42	0,30	6×10^{-4}	$2,0\times10^{-4}$
0,45	0,31	8×10^{-4}	$3,5\times10^{-4}$
0,49	0,33	1×10^{-3}	$4,5\times10^{-4}$

Les propriétés hydriques du sable (CRE et fonction de perméabilité) pour des indices des vides de 0,38, 0,42, 0,45 et 0,49 sont présentées à la figure 6.11.

Figure 6.11 : Propriétés hydriques du sable utilisé dans les modèles numériques 1D; A) Les CRE sont obtenues à partir du modèle MK (Aubertin et al., 2003) et ajustées avec le modèle de van Genuchten (1980). B) Les fonctions de perméabilité sont estimées avec le modèle de Mualem (1976) et van Genuchten (1980) pour des indices des vides de 0,38, 0,42, 0,45 et 0,49

Un modèle vertical 1D (largeur = 6 cm ; profondeur = 100 cm et hauteur = 360 cm) a été construit (figure 6.12) selon l'approche utilisée pour les modèles précédents (section 3.7). Les paramètres de convergence sont également identiques; les élévations du maillage ont une hauteur de 2 cm. Dans ce modèle, 60 cm de sable (épaisseur moyenne de la couche de sable installée sur la halde expérimentale) recouvrent 3 m de roches stériles. Cette épaisseur de 3 m de stériles a été choisie pour faciliter les comparaisons avec les modèles d'infiltration utilisés précédemment (section 3.7) et pour réduire l'influence des conditions à la frontière du bas sur les propriétés hydriques à l'interface sable-stériles. Les propriétés des stériles utilisées dans l'ensemble des analyses numériques sont présentées à la section 3.7 et elles ne sont pas modifiées d'un modèle à l'autre tel que mentionné. Les CRE du sable utilisées sont obtenues avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003) et lissées avec le modèle de van Genuchten (1980) (figure 6.11).

Figure 6.12 : Modèle 1D avec 60 cm de sable (CCE) sur 300 cm de stérile QIT

Un faible flux unitaire (q = 1×10^{-12} m/s) est initialement appliqué en condition permanente au sommet du modèle afin d'obtenir la teneur en eau résiduelle du sable dans la couverture. Un flux unitaire plus important est ensuite appliqué au sommet du modèle en condition transitoire pour simuler l'infiltration nette d'eau suite à un événement avec recharge (tableau 6.3). L'eau s'infiltre verticalement dans le sable. Après un certain temps, elle atteint les stériles, mais est retenue à l'interface par effet de barrière capillaire dans la couche de sable tant que les pressions à l'interface sable-stériles n'excèdent pas la pression d'entrée d'eau (WEV) des stériles (Aubertin et al., 1996, 2009). Plusieurs épaisseurs de la couche de sable ont été simulées, soient 30, 40, 50 et 60 cm, pour différents indices des vides (présentés au tableau 6.2). Le temps et le volume d'eau nécessaire pour que l'eau s'infiltre dans les stériles varient en fonction de l'indice des vides et de l'épaisseur de la couche de sable.

Des volumes d'eau correspondant à 17, 50, 83 et 117 mm de pluie ont été appliqués aux modèles numériques, soit (pour la section du modèle testé) des volumes d'environ 1, 3, 5 et 7 litres. Rappelons qu'une précipitation de 117 mm équivaut à 40 % de la précipitation maximale probable (PMP) en 24 heures sur le site de la mine du Lac Tio (Hatch, 2015). Le flux unitaire (q) a été appliqué pour une durée de 3600 secondes (soit 1 h). Les volumes d'eau appliqués convertis en flux unitaire sont présentés au tableau 6.3. Le modèle a ensuite été soumis à un drainage gravitaire pendant 14 jours afin d'analyser les effets d'infiltration dans les stériles. La quantité d'eau infiltrée dans les stériles (volume d'eau cumulatif sur 14 jours) a été calculée pour chacune des simulations et exprimée en fonction du volume d'eau appliqué en surface (en %).

Tableau 6.3 : Volume d'eau pour le modèle 1D correspondant au flux unitaire appliquée durant une période de 3600s

Épaisseur d'eau répartie en surface (mm)	**Volume d'eau** (L)	**Flux unitaire** q (cm/s)
17	1	$4{,}63\times10^{-4}$
50	3	$1{,}39\times10^{-3}$
83	5	$2{,}31\times10^{-3}$
117	7	$3{,}24\times10^{-3}$

6.2.1 Effet de barrière capillaire

L'effet de barrière capillaire entre le sable plus fin et les stériles plus grossiers a été analysé numériquement. Au total, 40 cas ont été simulés en faisant varier l'indice des vides (tableau 6.2), l'épaisseur de la couche (30, 40, 50 et 60 cm) et les précipitations (tableau 6.3). Seuls 4 cas représentatifs des cas limites pour une précipitation maximale de 117 mm sont présentés ici. Les autres résultats sont disponibles à l'annexe I. Les profils du degré de saturation et de pression au cours du temps ont été tracés pour les 4 cas suivants :

- Cas 1 : Couche de sable d'une épaisseur de 60 cm avec un indice des vides de 0,38
- Cas 2 : Couche de sable d'une épaisseur de 30 cm avec un indice des vides de 0,38
- Cas 3 : Couche de sable d'une épaisseur de 60 cm avec un indice des vides de 0,49
- Cas 4 : Couche de sable d'une épaisseur de 30 cm avec un indice des vides de 0,49

Les résultats indiquent que dans tous les cas simulés, le contraste entre les propriétés du sable et des stériles permet de développer un effet de barrière capillaire (figures 6.13, 6.14, 6.15 et 6.16) et ainsi de limiter l'infiltration d'eau dans les stériles.

Cas 1 : Couche de sable d'une épaisseur de 60 cm avec un indice des vides de 0,38

Le degré de saturation des stériles (S_r) atteint un maximum de 35 % sur une épaisseur de 60 cm sous la CCE (après un jour de drainage), puis diminue par la suite jusqu'à environ 30 % sur l'ensemble du profil (après 14 jours de drainage) (figure 6.13). Lors des précipitations (1 heure), les stériles restent à la teneur en eau équivalente à un degré de saturation d'environ 25 %, car la pression d'entrée d'eau WEV des stériles n'est pas atteinte (≈0,8 m). Des pressions d'eau positives dans la couverture indiquent que le sable est saturé.

Figure 6.13 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,38 et une précipitation de 117 mm en 3600 s. Les résultats après 1 h, 2 h, 1 jour et 14 jours sont présentés.

Cas 2 : Couche de sable d'une épaisseur de 30 cm avec un indice des vides de 0,38

Avec une épaisseur de couche de 30 cm, la couche de sable est saturée (S_r=1) après une précipitation de 1 heure et l'eau a commencé à s'infiltrer dans les stériles. Le degré de saturation (S_r) des stériles atteint un maximum de 65 % sur 1 m sous la CCE (à la fin des précipitations, soit après 1h) puis diminue par la suite jusqu'à environ 30 % sur l'ensemble du profil (après 14 jours de drainage) (figure 6.14). Des pressions d'eau positives dans la couverture indiquent que le sable est saturé. L'effet de barrière capillaire permet tout de même de limiter l'infiltration de l'eau dans les stériles. L'influence de l'épaisseur de la couche de sable sera analysée et discutée plus en détail à la section 6.2.4.

Figure 6.14 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 30 cm avec un indice des vides de 0,38 et une précipitation de 117 mm en 3600 s

Cas 3 : Couche de sable d'une épaisseur de 60 cm avec un indice des vides de 0,49

Pour une épaisseur de couche de 60 cm et un indice des vides plus élevé (e= 0,49), le degré de saturation des stériles (S_r) atteint un maximum de 30 % sur une épaisseur de 70 cm sous la CCE (après 14 jours de drainage) (figure 6.15). Le front de mouillage s'infiltre sur environ 70 cm dans les stériles après 14 jours de drainage. L'eau des précipitations est maintenue dans la couche de sable jusqu'à 1 jour, car la WEV des stériles n'est pas atteinte (≈0,8 m). Des pressions d'eau positives dans la couverture indiquent que le sable est saturé. L'influence de l'indice des vides sera analysée et discutée plus en détail à la section 6.2.3.

Figure 6.15 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,49 et une précipitation de 117 mm en 3600 s

Cas 4 : Couche de sable d'une épaisseur de 30 cm avec un indice des vides de 0,49

Pour une épaisseur de couche de 30 cm et un indice des vides de 0,49, le degré de saturation des stériles (S_r) atteint un maximum de 66 % sur une épaisseur de 35 cm sous la CCE (après les précipitations, soit 1 heure) (figure 6.16). Des pressions d'eau positives dans la couverture indiquent que le sable est saturé. Les stériles se drainent et le degré de saturation diminue jusqu'à environ 30% sur l'ensemble du profil (après 14 jours de drainage). Le front de mouillage ne dépasse pas 70 cm de profondeur dans les stériles après 14 jours de drainage.

Figure 6.16 : Évolution du profil du degré de saturation et de la pression d'eau au cours du temps pour une couche de sable de 30 cm avec un indice des vides de 0,49 et une précipitation de 117 mm en 3600 s

6.2.2 Influence du volume d'eau appliqué sur la couche de sable

La figure 6.17 présente la quantité d'eau (en %) infiltrée dans les stériles (sous l'interface) en fonction de la précipitation pour les indices des vides minimaux (e= 0,38) et maximaux (e= 0,49). La figure 6.18 présente la quantité d'eau (en %) infiltrée dans les stériles en fonction du temps pour les différentes précipitations. La quantité d'eau infiltrée dans les stériles (exprimée en % du volume d'eau appliqué) augmente en fonction de la quantité d'eau appliquée sur la CCE en suivant une fonction qui semble exponentielle (figure 6.17). Par exemple, pour une infiltration équivalente à 17 mm et d'une durée de 1 heure avec un indice des vides e=0,38, 0,54 % des précipitations s'infiltrent dans les stériles comparativement à 19,24 % pour une précipitation de 117 mm après 14 jours de drainage. Pour un indice des vides de 0,49, l'augmentation de la percolation dans les stériles avec l'infiltration des précipitations est également observable, mais elle est moins prononcée. Par exemple, 5,77 % des précipitations sont infiltrés dans les stériles pour une précipitation de 117 mm.

Figure 6.17 : Quantité d'eau dans les stériles sous l'interface en fonction du volume d'eau appliqué (épaisseur de 60 cm) après 14 jours de drainage

Figure 6.18 : Quantité d'eau dans les stériles sous l'interface en fonction du volume d'eau pour une précipitation de 1 heure, suivi de 14 jours de drainage (épaisseur de 60 cm et e=0,38)

La figure 6.19 présente les profils de teneur en eau volumique et de pression pour différentes précipitations après 14 jours de drainage. Le sable simulé a un indice des vides de 0,38 et l'épaisseur de la couche est de 60 cm. Le volume d'eau appliqué à une influence sur le pourcentage d'eau infiltré dans les stériles (figure 6.19). Une plus forte précipitation (p.ex. 83 et 117 mm) sature le sable à l'interface plus rapidement, ce qui explique que le volume d'eau infiltré dans les stériles est plus important. La pression d'entrée d'eau des stériles (WEV≈ 0,8 m) n'est pas atteinte pour des précipitations de 17 et 50 mm après 14 jours, ce qui limite l'infiltration d'eau dans les stériles. Il n'y a donc presque pas de différence entre la percolation dans les stériles en fonction du temps pour des précipitations de 17 et 50 mm.

Figure 6.19 : Profil de la teneur en eau volumique (A) et de la pression d'eau (B) en fonction de la précipitation après 14 jours de drainage pour une couche de sable de 60 cm avec un indice des vides de 0,38

6.2.3 Influence de l'indice des vides du sable sur l'infiltration

L'effet de l'indice des vides a été simulé dans les modèles numériques pour évaluer l'impact de la compacité du matériau sur la capacité de rétention d'eau de la CCE. Le pourcentage d'eau infiltré dans les stériles par rapport au volume d'eau des précipitations appliquées au modèle a été estimé avec Seep/W pour différent indice des vides (voir résultats aux figures 6.20 et 6.21).

Figure 6.20 : Quantité d'eau en pourcentage de la précipitation infiltrée dans les stériles en fonction de l'indice des vides du sable (épaisseur de 60 cm)

Figure 6.21 : Quantité d'eau infiltrée dans les stériles en fonction du temps pour une CCE avec des indices des vides de 0,38; 0,42;0,45 et 0,49 (épaisseur de 60 cm; précipitations de 117 mm en 3600 s)

La quantité d'eau infiltrée dans les stériles sous l'interface est moins importante pour un sol moins compact (e=0,49) (figures 6.20 et 6.21). Un sol avec un indice des vides plus élevée a un plus grand volume de pores disponibles pour emmagasiner l'eau. La couche de sable avec e=0,38 se sature ainsi plus rapidement et l'eau s'infiltre à la vitesse de la conductivité hydraulique saturée du matériau. La conductivité hydraulique saturée du matériau avec e=0,38 (k_{sat}=1,5×10^{-4} cm/s) est plus élevée que la conductivité non-saturée du matériau avec un e=0,49 lorsque les succions sont supérieures à 3 kPa comme ici. Pour une précipitation de 50 mm et moins, la CCE avec un sable dont l'indice des vides est de 0,38 n'est pas saturée et le pourcentage d'eau infiltré équivaut à celui du sable avec un indice des vides de 0,49 (figure 6.20). L'écart marqué du résultat avec e=0,38 n'est toutefois pas expliqué et pourrait être liée à des problèmes numériques.

La variation du volume d'infiltration d'eau (en %) pour des précipitations de 83 et 117 mm ne diminue pas de manière monotone, mais semble fluctuer autour d'une valeur moyenne pour des

indices des vides supérieurs à 0,4. Cette variation pourrait être due aux limitations d'un modèle numérique 1D discutées plus loin.

6.2.4 Influence de l'épaisseur de la couche de sable sur la performance de la CCE

L'épaisseur de la couche de sable peut aussi avoir un impact sur la quantité d'eau infiltrée dans les stériles. Des épaisseurs de 30, 40, 50 et 60 cm ont été simulées pour les indices des vides correspondant aux valeurs minimales et maximales mesurées sur la halde expérimentale (e_{min}=0,38 et e_{max}=0,49) (figure 6.22).

Figure 6.22 : Quantité d'eau infiltrée dans les stériles en fonction de l'épaisseur de la couche de sable et des précipitations (A : e_{min}=0,38; B : e_{max}=0,49)

Le pourcentage d'eau infiltré dans les stériles après 14 jours par rapport au volume d'eau des précipitations appliquées au modèle a été évalué avec Seep/W pour différent indice des vides. Plus l'épaisseur de la couche de sable est élevée, plus le pourcentage d'eau infiltrée dans les stériles est faible pour un même temps de drainage. Une couche de 60 cm comparativement à 30 cm d'épaisseur aura une capacité de stockage d'eau plus grande (voir figures 6.13 et 6.14) avant d'atteindre une plus grande saturation pour un même indice des vides.

6.2.5 Limitations des modèles numérique

L'approche 1D utilisée dans les modèles de la section 6.2 ne permet pas de simuler l'écoulement latéral ni la déviation de l'eau. L'eau finira donc par s'écouler dans les stériles, car la WEV des stériles sera nécessairement atteinte à long terme. Un modèle 2D est nécessaire pour évaluer l'influence d'une déviation de l'eau latéralement. La géométrie du modèle 1D est aussi limitée, car la largeur des éléments doit être assez étroite (ici 6 cm) pour éviter les problèmes de convergences. Le logiciel Seep/W ne tient pas compte du tout de l'évaporation et les matériaux utilisés sont considérés homogènes sur l'ensemble du modèle, ce qui n'est pas nécessairement représentatif des conditions de terrain. Les propriétés des stériles utilisés dans ce travail ont également été considérées identiques pour l'ensemble des modèles afin de simplifier la comparaison des résultats. Or, l'effet de barrière capillaire observé dans cette analyse dépend fortement du contraste des propriétés du sable et des stériles utilisés et le comportement hydrique à l'interface pourrait varier pour des stériles différents.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les roches stériles sont générées en parallèle avec l'extraction du minerai. Elles sont entreposées en surface sous forme d'empilement rocheux. Ces empilements ou haldes à stériles sont généralement exposés aux conditions atmosphériques. Les stériles qui contiennent des minéraux sulfureux peuvent s'oxyder et générer du drainage minier acide (DMA) ou du drainage neutre contaminé (DNC).

La présente étude a été réalisée en partenariat avec la mine du Lac Tio (Rio Tinto Fer et Titane (RTFT)) où la génération de DNC (nickel) a été observée au bas des haldes à stériles. La méthode de déposition proposée est une nouvelle méthode de gestion intégrée des stériles. Elle consiste à installer une (ou plusieurs) couche de contrôle des écoulements (CCE) composée de matériaux plus fins au-dessus de chaque banc et sur les pourtours de la halde afin de limiter l'infiltration de l'eau dans les stériles réactifs (placés au cœur de la halde). Une halde à stériles expérimentale a été construite sur le site de la mine afin d'évaluer la performance de cette méthode de construction. Cette halde expérimentale représente un banc composé de stériles minéralisés (hémo-ilménite) et de stériles non minéralisé à l'extrémité (anorthosite). La CCE est ici composée de sable de provenance locale (environ 60 cm d'épaisseur) et recouverte d'environ 25 cm d'anorthosite concassée.

L'objectif spécifique de ce projet était de caractériser les propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale. La granulométrie, la densité relative des grains solides, la densité après compactage, la conductivité hydraulique saturée et la courbe de rétention d'eau ont été mesurées au laboratoire. Des essais d'infiltration à petite et moyenne échelle ont été réalisés avec un infiltromètre à simple anneau, un infiltromètre à double anneau et un perméamètre de Guelph au cours de deux campagnes de terrain. Les résultats des essais de laboratoire et des essais d'infiltration ont été utilisés pour déterminer la conductivité hydraulique saturée par méthodes analytiques et par analyse inverse avec le logiciel Seep/W (Geo-Slope International, 2007, 2016).

Le sable utilisé sur la halde expérimentale est un sable de type SW-SP selon la classification USCS. Il s'agit d'un sable propre contenant peu de particules fines (8 %). Le coefficient d'uniformité (C_U) est compris entre 3,0 et 3,4 et le coefficient de courbure (C_C) est égal à environ 1,2. Il s'agit donc d'un matériau relativement peu étalé. La densité relative moyenne des grains solides (D_r) est égale

à 2,68 ± 0,01, ce qui est typique d'un sable. Des essais de compactage avec la méthode du Proctor modifié ont permis de situer la teneur en eau massique optimale entre 11,0 et 11,5 % pour une masse volumique variant entre 1802 et 1833 kg/m^3 et un indice des vides optimal de 0,47 à 0,48.

Des perméamètres à paroi rigide ont été utilisés pour réaliser des essais de perméabilité à charges constantes et à charges variables. Les conductivités hydrauliques saturées mesurées pour des indices des vides variant entre 0,55 et 0,71 sont de l'ordre de 5×10^{-3} cm/s et suivent bien les modèles prédictifs Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003) et Kozeny-Carman modifié (Mbonimpa et al., 2002).

Des essais de drainage en colonne et des essais avec des cellules Tempe ont été utilisés pour évaluer la courbe de rétention d'eau du sable. Les valeurs obtenues sont bien prédites par le modèle prédictif Kovacs modifié (Aubertin et al., 2003). La valeur de pression d'entrée d'air (AEV) est comprise entre 30 et 35 cm et la pression d'entrée d'eau (WEV) entre 80 et 100 cm. La teneur en eau volumique résiduelle est d'environ 0,04.

Des essais d'infiltration *in situ* ont été réalisés sur la couche de sable à différents endroits et à deux profondeurs. Les teneurs eau massique et les masses volumiques sèches ont été mesurées avant et après chaque essai d'infiltration. L'indice des vides *in situ* était compris entre 0,34 et 0,49 à la surface de la CCE et entre 0,41 et 0,53 à mi-hauteur de la couche de sable (30 cm au-dessus de l'interface sable-stérile). Le taux d'infiltration a été mesuré en fonction du temps et de la charge d'eau appliquée (constante pour chaque essai). La conductivité hydraulique à satiété du sable a ensuite été calculée avec les équations de Reynolds et Elrick (1990, 1992) en tenant compte du taux d'infiltration constant. Les trois méthodes utilisées (infiltromètre à simple anneau, infiltromètre à double anneau et perméamètre de Guelph) donnent des conductivités hydrauliques à satiété proches, comprises entre 2×10^{-4} et 2×10^{-3} cm/s.

Les essais d'infiltration ont également été simulés numériquement avec le logiciel Seep/W. Les paramètres du sable mesurés au laboratoire et les propriétés des stériles (QIT 0-50 mm) rapportées par Peregoedova (2012) ont été utilisés dans les modèles. La valeur de la conductivité hydraulique saturée a été ajustée dans le modèle pour que le taux d'infiltration simulé soit pratiquement identique aux courbes du taux d'infiltration mesurées sur le terrain. Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée estimées numériquement sont généralement plus faibles (d'un facteur de 3) que les valeurs calculées avec les équations empiriques de Reynolds et Elricks (1990, 1992). Les

modèles numériques utilisés sont cependant simplifiés et considèrent des matériaux homogènes, sans évaporation, sans inclinaison de la CCE et sans effet d'hystérésis, ce qui pourrait expliquer les différences observées entre les k_{fs} analytiques et k_{sat} numériques.

Avec les résultats obtenus au laboratoire, sur le terrain et numériquement, une analyse de sensibilité des propriétés géotechniques du sable a été réalisée. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Plus l'indice des vides et la porosité sont faibles, plus la conductivité hydraulique saturée est faible.
- La teneur en eau volumique initiale n'a pas d'influence sur l'estimation de la conductivité hydraulique saturée *in situ*.
- Plus la teneur en eau initiale est faible, plus le taux d'infiltration initial est rapide, puis décroît jusqu'à atteindre un taux d'infiltration constant. Par contre, une teneur en eau initiale plus faible prendra légèrement plus de temps pour atteindre un taux d'infiltration quasi-constant.
- L'infiltration réalisée près de l'interface (moins de 35 cm) semble être influencée par les effets de barrière capillaire qui se développent à l'interface du sable et des stériles. L'infiltration réalisée plus près de l'interface sable-stérile (moins de 35 cm de l'interface) présente ainsi un taux d'infiltration plus faible ce qui entraine la sous-estimation de la conductivité hydraulique.

L'évaluation des propriétés de la CCE installée sur la halde expérimentale de la mine du Lac Tio a pu être réalisée à l'aide de modèles numériques (1D) tenant compte des paramètres hydrogéotechniques du sable. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Un plus grand volume d'eau appliqué sur une même période de temps s'infiltre davantage dans les stériles, car le sable à l'interface se sature plus rapidement.
- Un sol compact a une meilleure capacité de rétention et se sature plus rapidement. Pour un grand volume d'eau, la pression d'entrée d'eau (WEV) des stériles est atteinte plus rapidement et la quantité d'eau infiltrée dans les stériles est plus importante.
- Plus la couche de sable est épaisse, plus le pourcentage d'eau infiltré dans les stériles est faible, car la capacité de stockage d'eau augmente.

Un effet de barrière capillaire a été observé dans les modèles numériques entre le sable utilisé sur la halde expérimentale et les stériles caractérisés par Peregoedova (2012).

Pour appliquer cette méthode de conception à un autre site, le choix des paramètres de conception (épaisseur, matériau, compaction, inclinaison de la pente) dépend des propriétés hydrogéotechniques des stériles du site et des conditions météorologiques.

Recommandations

- L'analyse de sensibilité a montré que les essais réalisés à plus grande profondeur (plus proche de l'interface sable-stérile) donnaient une conductivité hydraulique saturée plus faible. Sur le terrain, les essais réalisés à une profondeur de 30 cm n'ont pas permis de confirmer cette observation. Il serait intéressant d'effectuer des essais plus près de l'interface et en plus grande quantité afin de valider les résultats de l'analyse de sensibilité. Ces analyses permettraient également de mettre en évidence l'effet de barrière capillaire développé à l'interface.
- Il serait intéressant de faire varier les propriétés des stériles dans les modèles utilisés pour mieux analyser l'influence de leurs propriétés sur les effets de barrières capillaires à l'interface sable-stériles.
- Il semble d'après les résultats présentés dans ce mémoire que l'eau provenant des précipitations soit déviée latéralement vers l'extrémité de la halde expérimentale. Il serait par contre nécessaire de déterminer la zone équivalente au DDL pour savoir à quelle distance installer le matériau non générateur de drainage contaminé. Des travaux sur le sujet sont actuellement en cours (Medina, 2017; Dubuc, 2017).
- Il est enfin recommandé de réaliser un modèle numérique complet de la halde expérimentale en incluant les données météorologiques réelles et l'évaporation. Ce modèle, plus complet, permettrait d'analyser l'écoulement global et pourrait être corrélé à l'instrumentation installée sur la halde (géophysique, DTS). Des travaux en ce sens sont également actuellement en cours.

BIBLIOGRAPHIE

Aachib, M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturared Media, with Applications to Soil Covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156, 163-193.

Appelo, C. A. J. et Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and pollution (Second éd*.). Great Britain: A.A. Balkema Publishers.

Arya, L. M. et 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 D2434. (2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D5856. (2007). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D3385. (2009). Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C702/C702M (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D1557. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)). ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D6938. (2015). Standard Test Methods for In-Plance Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallaow Depth). ASTM International, West Conshohocken, PA.

Aubertin, M. (2013). Waste rock disposal to improve the geotechnical and geochemical stability of piles. *In proceedings of the World Mining Congress*, Montréal, Canada.

Aubertin, M. & Chapuis, R.P. (1991). Considérations hydrogéotechniques pour l'entreposage des résidus minier dans le nord-ouest du Québec. C.R. 2e conf. Int. *Réduction des eaux de Drainages Acides*, Vol. 3, 1-22.

Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.-F. & Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. École Polytechnique de Montréal, CDT P1622, Rapport final soumis au Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier (MEND/NEDEM).

Aubertin, M., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rocks mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 470-482.

Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R.P. & Crespo J.R. (1996b). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, no 1, 3-13.

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.

Aubertin, M., Bussière, B. & Bernier, L. (2002a). *Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur CD-ROM*. Presses Internationales Polytechnique, Montréal.

Aubertin, M., Fala, O., Bussière, B., Martin, V., Campos, D., Gamache-Rochette, A., Chouteau, M. & Chapuis, R. P. (2002b). Analyse des écoulements 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.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R.P., James, M., et Riffon, O. (2002c). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. *Symposium 2002 sur l'Environnement et les Mines*, Rouyn-Noranda, QC, Canada.

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*, Vol. 40, 1104-1122.

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez Orellana, A. M., Chapuis, R.P., Bussière, B., Lahmira, B. & Lefebvre, R. (2008). Caractérisation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Symposium 2008 sur l'environnement et les mines*, Canada.

Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S. A., Bussière, B., Molson, J., & Chapuis, R. P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), 1146-1164.

Aubertin, M., Bussière, B. & Zagury, G. (2011a). La gestion des rejets miniers au Québec. *L'État du Québec*, 225-232.

Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E.M., Martin, V., Pépin, N. , Mbonimpa, M. & Chapuis, R.P. (2011b). Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. *Symposium 2011 sur l'environnement et les mines*, Canada.

Aubertin, M., Maknoon, M. & Bussière, B. (2013). *Recommandations pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles*. Communication présentée à GEO Montréal.

Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. & Maqsoud, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateur de DMA. *Symposium 2015 sur l'environnement et les mines*, Canada.

Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M. & Mbonimpa, M. (2016). Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. *Geo-Chicago 2016: Sustainability, Energy, and the Environment*, 343-358.

Azam, S., Ward Wilson, G., Herasymuik, G. Nichol, C. & Barbour, L.S. (2007). Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Envrironment*, 66, 259-268.

Bay, D.S., Peterson, H.E., Singurindy, O., Aranda, C., Dockrey, J.W., Sifuentes, V.F., Mayer, K.U., Smith, L., Klein, B., Beckie, R.D. (2009). Assessment of neutral pH drainage from three experimental waste-rock piles at the Antamina Mine, Peru, 8th ICARD, Skelleftea, Sweden.

Bossé, B., Bussière, B, Hakkou, R., Maqsoud, A. & Benzaazoua, M. (2015). Field experimental cells to asses hydrogeological behaviour of store-and-release covers made with phosphate mine waste. NRC Research Paper, *Canadian Geotechnical Journal*, J. 52: 1255–1269.

Bouwer, H. (1995). Estimating the Ability of the Vadose Zone to Transmit Liquids. Dans L. G. E. L.G. Wilson, Sephen J. Cullen (édit.), Handbook of Vadose Zone Characterization & Monitoring, Lewis Publishers, 177-188.

Broda, S., Hirthe, E., Blessent, D., Aubertin, M., & Graf, T. (2013). Using random discrete fractures for representing preferential flow in waste rock piles with compacted layers. Communication présentée à GEO Montréal.

Broda, S., Aubertin, M., Blessent, D., Graf, T., & Hirthe, E. (2014). Improving control of contamination from waste rock piles. *Environmental Geotechnics*.

Bruno, B. (2007). Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.

Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couverture avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Bussière, B., Aubertin, M. & Chapuis, R.P. (2003). The bahavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 512-535.

Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G. J., Potvin, R. et Benzaazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnés. *Symposium 2005 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, Institut canadien des mines, de la métallurgie et du pétrole (ICM) [sur CD Rom].

Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J.W. & Chapuis, R.P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, 245-265.

Bussière, B., Plante, B., Broda, S., Aubertin, M., Chen, D., & Medina, F. (2015). Contrôle des infiltrations d'eau dans les haldes à stériles à l'aide des effets de barrière capillaire: Design, construction et instrumentation de la halde expériementale de la mine Tio. Communication

présentée à Symposium 2015 - Rouyn-Noranda sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Qc.

Chapuis, R. P. et Légaré, P. 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, 1147*, 177-186.

Chapuis, R. P., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M., & Crespo, R. (2001). A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1113-1126.

Chapuis, R. P. et Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(3), 616-628.

Chapuis, R. P., Masse, I., Madinier, B., & Aubertin, M. (2006). A Drainage Column Test for Determining Unsaturated Properties of Coarse Materials. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 30(2).

Chapuis, R. P. (2009). Numerical modeling of reservoirs or pipes in groundwater seepage. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 895-901.

Chapuis, R. P. (2012). Influence of element size in numerical studies of seepage: Unsaturated zones, transient conditions. *Geotechnical news, 30*(3), 15-18.

Cifuentes, E., Aubertin, M., Chapuis, R., Molson, J., & Bussière, B. (2006). Analyses of the water diversion length of inclined, layered soil covers. Communication présentée à P*roceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference* and the *7th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Specialty Conference*, Sea to Sky Geotechnique, Vancouver, BC, 1-4.

Dagenais, A. M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires*. Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Daniel, D. E. (1989). In Situ Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9), 1205-1226.

Dawood, I. Aubertin, M., Intissar, R. & Chouteau, M. (2011). A combined hydrogeological-geophysical approach to evaluate unsaturated flow in a large waste rock pile. Geotechnical conference Pan-Am CGS 2011.

Dawood, I. et Aubertin, M. (2014). Effect of dense material layers on unsaturated water flow inside a large waste rock pile: A numerical investigation. *Mine Water Environment*, 33, 24-38.

Day, S. R. et Daniel, D. E. (1985). Field Permeability Test for Clay Liners. Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, 276-288.

Delage, P. et Cui, Y. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur. Construction.* Vol. 1, No. C301, C-301-1 à C-301-20.

Dimech, A., Chouteau, M., Chou, E.T., Aubertin, M., Martin, V., Bussière, B. & Plante, B. (2017). Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection. Communication à SAGEEP 2017, Denver, Colorado, USA.

Dingman, S. L. (1994). Physical Hydrology. United States of America: Engewood Cliffs : Prentice Hall.

Doussan, C. et Ruy, S. (2009). Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity. *Water Ressources Research*, 45, W10408.

Duhaime, F., Chapuis, R.P. & Weber, S. (2015). Parasitic head losses during laboratory permeability tests. *Geotechnical Testing Journal*, 38, 2, 255-260.

Eijkelkamp Agrisearch Equipment (EAE). (2011). Operating Instructions 09.07 Guelph Permeameter. Netherlands:

Espinoza, R. D. (1999). Infiltration. Dans J. W. Delleur (édit.), The Handbook of Groundwater Engineering. Chapitre 6, États-Unis: CRC Press LLC.

Fala, O. (2002). *Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal. Département des génies civil géologique et des mines.

Fala, O., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., Wilson, G.W., Chapuis, R.P. & Martin, V. (2003). Numerical modelling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australia, Vol. 3, 895-902.

Fala, O., Molson, J., 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.

Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (2006). Numerical simulations of long term unsaturated flow and acid mine drainage at waste rock piles. 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 582-597.

Fala.O. (2008). *Analyses des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Fetter, C. W. (2008). *Contaminant Hydrogeology* (Seconde éd.). Waveland Press Inc., États-Unis, 500p.

Fredlund, D.G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil‐water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533‐546.

Freeze, R.A. et Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, N.J. 604p.

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 en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Geo-Analysis 2000 Ltd. (1997). [Logiciel], SoilCover, Canada.

Geo-Slope International. (2007, 2016). [Logiciel], Geostudio. Canada.

Gitirana, G. J., Fredlund, M. D., & Fredlund, D. G. (2006). Infiltration-runoff boundary conditions in seepage analysis. Saskatoon, Canada, 8p.

Gouvernement du Canada. (2016). Règlement sur les effluents des mines de métaux (REMM).

Gouvernement du Québec. (2012). Directve 019 sur l'industrie minière, Ministère du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques (MDDELCCC).

Gouvernement du Québec. (2016). Mines en chiffres, Rapport d'investissement minier au Québec en 2015, Institut de la statistique du Québec, Novembre 2016, 12 p.

Gouvernement du Québec. (2016). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, No. M08-03-1611, 82 p.

Gribb, M. M., Kodesova, R., & Ordway, S. E. (2004). Comparison of soil hydraulic property measurement methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *130*(10), 1084-1095.

Gupta, N., Rudra, R.P. & Parkin, G. (2006). Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering*, Vol. 48, 1.55-1.62.

Hacth. (2015). Rio Tinto Fer et Titane: Snowmelt and rainfall design parameters. 14 p.

Haverkamp, R. et Parlange, J. Y. (1986). Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142(6), 325-339.

Haverkamp, R., Debionne, S., Viallet, P., Angulo-Jaramillo, R. & De Condappa, D. (2007). Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. Dans J.W. Delleur (édit.), The Handbook of Groundwater Engineering. Chapitre 6, 2e Édition, États-Unis: CRC Press LLC.

Havlena, J. A. et Stephens, D. B. (1992). Vadose Zone Characterization Using Field Permeameters and Instrumentation. Current Practices in Ground Water and Vadose Zone Investigations, ASTM STP1118, 93-110.

Hernandez Orellana, A. M. (2007). *Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Hill D.E. et Parlange, J. Y. (1972). Wetting front instability in homogeneous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 36(5), 697-702.

Hillel, D. (1980). Applications of Soil Physics. USA: Academic Press Inc.

Holtz, R. D. et Kovacs, W. D. (2010). Introduction à la géotechnique. Montréal, Qc.: Presses internationales Polytechnique.

Intissar, R. (2009). *Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

James, M., & Aubertin, M. (2009). The use of waste rock inclusions in tailings impoundments to improve geotechnical and environmental performance. Proc. Tailings and Mine Waste 09, 233-245.

Kanwar, R.S., Ahmed, M., Horton Jr., R. & Marley, S.J. (1989). Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using Guelph and Velocity Permeameters. *Agricultural and Biosystems Engineering*, 32, 6, 1885-1890.

Kesimal, A., Yilmaz, E., & Ercikdi, B. (2004). Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1817-1822.

Kleinmann, R.L.P, Crera, D., & Pacelli, R.R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Eng*., 33, 300-306.

Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J. & Gélinas, P. (2001). Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage 1: Conceptual model and system characterization. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(2001), 137-164.

Lessard, G. (2011). *Essais d'infiltration sur la halde à stérile Petit-Pas de la mine Tio, Havre-St-Pierre*. Rapport de maîtrise, École polytechnique de Montréal. Département des génies civil géologique et des mines.

Lévesque, I. (2015). *Caractérisation hydrogéotechnique des roches stériles tamisées et compactées à l'aide d'essais de laboratoire à une échelle intermédiaire*, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Lindsay, M. B.J., Moncur, M. C., Bain, J. G., Jambor, J.L., Ptacek, C.J. & Blowes D.W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, 157-177.

Liu, Y., Steenhuis, T.S. & Parlange, J.Y. (1994). Formation and persistence of fingered fow fields in coarse grained soils under different moisture contents. *Journal of Hydrology*, 159, 187-195.

Longo, S. et Wilson, W. (2007). Paste Rock: Part of the Future for Mine Waste Management? Canadian Mining Journal, Oct. 2007, 128 (8), s4-s25.

Maknoon, M. (2016). *Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. & Mbonimpa, M. (2012). Predicting hysteresis of the water retention curve from basic properties of granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159.

Martin, V. (2003). *Étude des propriétés non saturées des stériles miniers*, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

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.

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.

McCarter, M.K. (1990). Design and operating considerations for mine waste embankments. Surface Mining (2nd ed.), Kennedy, B.A. (ed.).SME, 890-899.

McCarthy, D.F. (2002). Essentials of soil mechanics and foundations, 6e edition, Prentice Hall, États-Unis, 788p.

Miyazaki, T. (2006). Water Flow in Soils (Second Edition^{e} éd.): CRC Press Taylor & Francis Group.

Morin, K.A., Gerencher, E., Jones, C.E., Konasewich, D.E. (1991). *Critical literature review of acid drainage from waste-rock.* 193p. Rapport NEDEM 1.11.1.

Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A. & Reardon, E.J. (1989).Reduction of acid mine generation in mine tailings through the use of moisture-retaining layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 1-8.

Nicholson, R.V. (2004). Review of water quality issue in neutral pH drainage: Examples and emerging priorities for the mining industry in Canada. MEND Report 10.1. Secrétariat CANMET, Ottawa.

Nordstrom, D.K., Blowes D.W. & Ptacek, C.J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16.

Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Pépin, 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 en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Peregoedova, A. (2012). *Étude experimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermediaire de laboratoire*. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines.

Philip, J.R. (1985). Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil. *Water Ressources Research*, 21, 7, 1025-1033.

Plante, B. (2010a). *Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé*. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Plante, B., Benzaazoua, M., Bussière B., Biesinger, M.C. & Pratt, A.R. (2010b). Study of nickel sorption onto Tio mine waste rock surfaces. *Applied Geochemistry*, 25, 1830-1844.

Plante, B., Benzaazoua, M. & Bussière, B. (2011). Predicting geochimical behaviour of waste rock with low acid generating potential using laboratory kinetic tests. *Mine Water Environment*, 30, 2-21.

Radcliffe, D. E. et Rasmussen, T. C. (2002). Soil Water Movement. Dans A. W. Warrick (édit.), Soil Physics Companion. U.S. CRC Press LLC, 85-126.

Ravi, V. et Williams, J. R. (1998). Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models (Rapport n° EPA/600/R-97/128a). USA: United States Environmental Protection Agency (EPA).

RETC (2009). Version 6.02 [Logiciel], PC-Progress.

Reynolds, W. D. et Elrick, D. E. (2005). Measurement and Characterization of Soil Hydraulic Properties. Dans J. Alvarez-Benedi & R. Munoz-Carpena (édit.), Soil-Water-Solute Process Characterization: An Integrated Approach. USA: CRC Press.

Reynolds, W. D. (2008). Saturated Hydraulic Properties Ring Infiltrometer. Dans M. R. Carter & E. G. Gregorich (édit.), Soil Sampling and Methods of Analysis (Second Edition[e] éd.). U.S.A.: CRC Press.

Richards, L., (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. J. Physics, Issue 1, 318-333.

Rio Tinto. (2017). Établissement. Tiré de http://www.riotinto.com/canada/rtft/locations-15134-fr.aspx

Sayde, C., Gregory, C., Gil - Rodriguez, M., Tufillaro, N., Tyler, S., van de Giesen, N., English, M., Cuenca, R. & Selker, J. S. (2010), Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics, *Water Ressources Research*, 46, W06201.

Selker, J.S., Thevenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westthoff, M. & Parlange, M.B. (2006). Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Ressources Research*, 42, W12202.

Simunek, J., Sejna, M., et van Genuchten, Th.M., (2007). The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiole solutes in variably-saturated media. Version 2.0. U.S. Salinity Laboratory.

Singer, P.C., et Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage, the rate determining step. *Science*,167, 1121-1123.

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

Therrien R, McLaren RG, Sudicky EA and Panday SM (2010). HydroGeoSphere – A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully-Integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport Model. Université Laval, QC, Canada and University of Waterloo, ON, Canada.

Todd, D. K. et Mays, L. W. (2005). Groundwater hydrology (3rd^{e} éd.). Hoboken, N.J.: Wiley.

Troxler. (2007). Application Brief Troxler model 3440 Nuclear Moisture Density Gauge. Troxler Electronic Laboratories Inc., États-Unis.

van Genuchten, M.Th. et Nielsen, D.R. (1985). On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annals of Geophysics*, 3, 615-628.

Warrick, A. W. (2003). Soil Water Dynamics: Oxford University Press.

Williams, J. R., Ouyang, Y., & Chen, J. S. (1998). Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Application of Selected Mathematical Models (Rapport n^{o} EPA/600/R-97/128b). USA: United States Environmental Protection Agency (EPA).

Zhan, G., Mayer, A., McMullen, J. & Aubertin, M. (2000). Capillary cover design for spent leach pad. *Proceedings international symposium hydrogeology & environment*, p. 144-150.

Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A. Burke, K., & McMullen, J. (2001a). Capillary cover design for leach pad closure. *SME Transaction*, 310, p. 104-110.

Zhan, G., Mayer, A., McMullen, J. & Aubertin, M. (2001b). Slope effect study on the capillary cover design for spent leach pad. Proceedings CD-ROM 01-137 (AIME).

Zhuang, J., Nakayama, G.R., Yu, T. & Myazaki, T. (2001). Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties. *Soil & Tillage Research*, 59, 143-154.

ANNEXE A – ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

A.1 Échantillons de sable HSP-A, HSP-B et HSP-C :

Tableau A.1 : Analyse granulométrique *HSP-A* (triplicata)

	D (mm)	% passant	Différence X	Ss (m²/kg)	XSs (m²/kg)
	5.000	100.000			
	2.500	99.794	0.002	0.889	0.002
	1.250	99.334	0.005	1.778	0.008
	0.630	96.284	0.031	3.527	0.108
	0.315	69.292	0.270	7.055	1.904
	0.160	28.440	0.409	13.889	5.674
	0.080	9.216	0.192	27.778	5.340
	0.066	8.781	0.004	33.463	0.145
	0.048	6.899	0.019	46.781	0.880
	0.034	5.018	0.019	65.601	1.234
	0.024	3.136	0.019	92.005	1.731
	0.017	1.882	0.013	129.404	1.623
	0.013	1.254	0.006	176.713	1.108
	0.009	1.254	0.000	249.910	0.000
	0.006	1.254	0.000	353.426	0.000
	0.004	1.254	0.000	499.820	0.000
	0.003	1.254	0.000	706.853	0.000
	0.002	1.254	0.000	999.641	0.000
Diamètre équivalent (d_{eq}) mm	0.001	-	0.013	1731.429	21.719
Surface spécifique (S_S) (m²/kg)					41.478

Tableau A.2 : Analyse granulométrique et calcul de la surface spécifique de l'échantillon *HSP-A-2* (triplicata)

	D (mm)	**% passant**	**Différence X**	**Ss (m^2/kg)**	**XSs (m^2/kg)**
	5.000	100.000			
	2.500	99.794	0.002	0.889	0.002
	1.250	99.334	0.005	1.778	0.008
	0.630	96.284	0.031	3.527	0.108
	0.315	69.292	0.270	7.055	1.904
	0.160	28.440	0.409	13.889	5.674
	0.080	9.216	0.192	27.778	5.340
	0.066	8.916	0.003	33.507	0.101
	0.047	7.005	0.019	46.843	0.895
	0.034	5.095	0.019	65.688	1.255
	0.024	1.910	0.032	91.623	2.917
	0.017	1.274	0.006	129.223	0.823
	0.013	1.274	0.000	176.946	0.000
	0.009	1.274	0.000	250.240	0.000
	0.006	1.274	0.000	353.893	0.000
	0.004	1.274	0.000	500.480	0.000
	0.003	0.637	0.006	705.877	4.495
	0.002	0.637	0.000	998.261	0.000
Diamètre équivalent (d_{eq}) mm	0.001		0.006	1729.039	11.011
Surface spécifique (S_S) (m^2/kg)					34.533

Tableau A.3 : Analyse granulométrique et calcul de la surface spécifique de l'échantillon *HSP-A-3* (triplicata)

	D (mm)	**% passant**	**Différence X**	**Ss (m²/kg)**	**XSs (m²/kg)**
	5.000	100.000			
	2.500	99.794	0.002	0.889	0.002
	1.250	99.334	0.005	1.778	0.008
	0.630	96.284	0.031	3.527	0.108
	0.315	69.292	0.270	7.055	1.904
	0.160	28.440	0.409	13.889	5.674
	0.080	9.216	0.192	27.778	5.340
	0.066	8.848	0.004	33.507	0.123
	0.048	6.320	0.025	46.710	1.181
	0.034	5.056	0.013	65.688	0.830
	0.024	2.528	0.025	91.874	2.322
	0.017	1.896	0.006	129.575	0.819
	0.013	1.264	0.006	176.946	1.118
	0.009	1.264	0.000	250.240	0.000
	0.006	1.264	0.000	353.893	0.000
	0.004	1.264	0.000	500.480	0.000
	0.003	0.632	0.006	705.877	4.461
	0.002	0.632	0.000	998.261	0.000
Diamètre équivalent (d_{eq}) mm	0.001		0.006	1729.039	10.927
				Surface spécifique (S_S) (m²/kg)	34.816

Tableau A.4 : Analyse granulométrique *HSP-B* (triplicata)

HSP B-1		**HSP B-2**		**HSP B-3**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.841	5.000	99.841	5.000	99.841
2.500	99.765	2.500	99.765	2.500	99.765
1.250	99.367	1.250	99.367	1.250	99.367
0.630	96.201	0.630	96.201	0.630	96.201
0.315	69.184	0.315	69.184	0.315	69.184
0.160	27.357	0.160	27.357	0.160	27.357
0.080	8.276	0.080	8.276	0.080	8.276
0.069	6.359	0.069	6.306	0.069	6.926
0.049	4.769	0.049	4.730	0.049	4.617
0.035	4.239	0.035	4.204	0.035	4.040
0.025	1.060	0.025	1.051	0.025	1.154
0.018	1.060	0.018	1.051	0.018	1.154
0.013	1.060	0.013	1.051	0.013	0.000
0.009	1.060	0.009	1.051	0.009	0.577
0.006	1.060	0.006	1.051	0.006	0.000
0.005	1.060	0.005	1.051	0.005	0.577
0.003	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000

Tableau A.5 : Analyse granulométrique *HSP-C* (triplicata)

HSP C-1		**HSP C-2**		**HSP C-3**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
5.000	99.962	5.000	99.962	5.000	99.962
2.500	99.902	2.500	99.902	2.500	99.902
1.250	99.592	1.250	99.592	1.250	99.592
0.630	96.742	0.630	96.742	0.630	96.742
0.315	69.827	0.315	69.827	0.315	69.827
0.160	28.654	0.160	28.654	0.160	28.654
0.080	9.794	0.080	9.794	0.080	9.794
0.069	7.463	0.068	8.075	0.069	7.463
0.049	4.353	0.049	5.768	0.049	3.731
0.035	3.731	0.035	4.614	0.035	3.109
0.025	1.244	0.025	1.154	0.025	1.244
0.018	0.622	0.018	1.154	0.018	1.244
0.013	0.000	0.013	0.000	0.013	1.244
0.009	0.622	0.009	1.154	0.009	0.000
0.006	0.000	0.006	0.000	0.006	0.000

Tableau A.6 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-A*, *HSP-B* et *HSP-C*

Échantillon	**d_5 (mm)**	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_u (-)**	**C_c (-)**
HSP-A-1	0.034	0.083	0.166	0.280	3.37	1.19
HSP-A-2	0.034	0.083	0.166	0.280	3.37	1.19
HSP-A-3	0.034	0.083	0.166	0.280	3.37	1.19
HSP-B-1	0.042	0.087	0.170	0.281	3.23	1.18
HSP-B-2	0.052	0.087	0.170	0.281	3.23	1.18
HSP-B-3	0.053	0.087	0.170	0.281	3.23	1.18
HSP-C-1	0.053	0.081	0.165	0.278	3.43	1.21
HSP-C-2	0.040	0.081	0.165	0.278	3.43	1.21
HSP-C-3	0.056	0.081	0.165	0.278	3.43	1.21
Moyenne	0.044	0.084	0.167	0.280	3.345	1.192

A.2 Échantillons de sable HSP-Aut2015 :

Tableau A.7 : Analyse granulométrique *HSP-Aut2015* (triplicata)

HSP-Aut2015-1		**HSP-Aut2015-2**		**HSP-Aut2015-3**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.172	5.000	99.172	5.000	99.172
2.500	98.878	2.500	98.878	2.500	98.878
1.250	98.229	1.250	98.229	1.250	98.229
0.630	94.363	0.630	94.363	0.630	94.363
0.315	62.982	0.315	62.982	0.315	62.982
0.160	22.142	0.160	22.142	0.160	22.142
0.080	6.428	0.080	6.428	0.080	6.428
0.067	6.388	0.067	6.388	0.067	6.388
0.048	5.324	0.048	5.856	0.048	4.791
0.034	4.259	0.034	5.324	0.034	4.259
0.024	3.194	0.024	2.662	0.024	3.194
0.017	2.129	0.017	2.129	0.017	2.129
0.013	2.129	0.013	1.065	0.013	1.065
0.009	1.065	0.009	1.065	0.009	1.065
0.006	1.065	0.006	0.532	0.006	0.532
0.004	0.532	0.004	0.532	0.004	0.000
0.003	0.532	0.003	0.000	0.003	0.000
0.002	0.213	0.002	0.000	0.002	0.532
0.001	1.065	0.001	1.065	0.001	1.065

Tableau A.8 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-Aut2015*

Échantillon	**d_5 (mm)**	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_u (-)**	**C_c (-)**
HSP-Aut2015-1	0.043	0.098	0.190	0.304	3.10	1.21
HSP-Aut2015-2	0.033	0.098	0.190	0.304	3.10	1.21
HSP-Aut2015-3	0.050	0.098	0.190	0.304	3.10	1.21
Moyenne	0.042	0.098	0.190	0.304	3.10	1.21

A.3 Échantillon de sable HSP-Lys :

Figure A.1 : Comparaison des courbes granulométriques du sable de la couverture ; A) lysimètre 1, B) lysimètre 2, C) lysimètre 3, D) lysimètre 4, E) lysimètre 5 et F) lysimètre 6 (début)

Figure A.1 : Comparaison des courbes granulométriques du sable de la couverture ; A) lysimètre 1, B) lysimètre 2, C) lysimètre 3, D) lysimètre 4, E) lysimètre 5 et F) lysimètre 6 (suite et fin)

Tableau A.9 : Analyse granulométrique *HSP-Lys1 (*triplicata)

HSP-Lys1-A		**HSP-Lys1-B**		**HSP-Lys1-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	98.922	5.000	98.922	5.000	98.922
2.500	98.246	2.500	98.246	2.500	98.246
1.250	97.308	1.250	97.308	1.250	97.308
0.630	93.425	0.630	93.425	0.630	93.425
0.315	62.314	0.315	62.314	0.315	62.314
0.160	22.126	0.160	22.126	0.160	22.126
0.080	6.942	0.080	6.942	0.080	6.942
0.067	5.625	0.068	5.179	0.067	5.190
0.048	4.091	0.048	4.143	0.048	4.152
0.034	2.045	0.034	2.072	0.034	2.076
0.024	1.534	0.024	1.036	0.024	1.038
0.017	2.045	0.017	1.036	0.017	1.038
0.013	1.023	0.013	1.036	0.013	1.038
0.009	0.511	0.009	1.036	0.009	1.038
0.006	0.511	0.006	1.036	0.006	1.038
0.004	0.511	0.004	0.518	0.004	0.000
0.003	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000
0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000
0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000

Tableau A.10 : Analyse granulométrique *HSP-Lys2 (*triplicata)

HSP-Lys2-A		**HSP-Lys2-B**		**HSP-Lys2-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	98.886	5.000	98.886	5.000	98.886
2.500	98.100	2.500	98.100	2.500	98.100
1.250	96.966	1.250	96.966	1.250	96.966
0.630	93.049	0.630	93.049	0.630	93.049
0.315	62.014	0.315	62.014	0.315	62.014
0.160	21.993	0.160	21.993	0.160	21.993
0.080	6.966	0.080	6.966	0.080	6.966
0.067	5.566	0.068	4.285	0.068	3.911
0.048	4.453	0.048	3.213	0.048	3.422
0.034	2.226	0.034	2.142	0.034	2.445
0.024	1.113	0.024	2.142	0.024	1.467
0.017	1.113	0.017	1.071	0.017	0.978
0.013	1.113	0.013	1.071	0.013	0.978
0.009	1.113	0.009	1.071	0.009	0.978
0.006	0.557	0.006	1.071	0.006	0.978
0.004	0.000	0.004	1.071	0.004	0.489
0.003	0.557	0.003	1.071	0.003	0.489
0.002	0.000	0.002	1.071	0.002	0.489
0.001	0.000	0.001	1.071	0.001	0.489

Tableau A.11 : Analyse granulométrique *HSP-Lys3 (*triplicata)

HSP-Lys3-A		**HSP-Lys3-B**		**HSP-Lys3-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.560	5.000	99.560	5.000	99.560
2.500	99.197	2.500	99.197	2.500	99.197
1.250	98.528	1.250	98.528	1.250	98.528
0.630	94.819	0.630	94.819	0.630	94.819
0.315	62.225	0.315	62.225	0.315	62.225
0.160	20.608	0.160	20.608	0.160	20.608
0.080	5.984	0.080	5.984	0.080	5.984
0.068	5.023	0.067	7.144	0.067	7.151
0.048	4.395	0.048	5.196	0.048	4.597
0.034	1.256	0.035	0.000	0.034	1.022
0.024	2.511	0.024	1.299	0.024	1.022
0.017	2.511	0.017	0.649	0.017	1.022
0.013	1.256	0.013	0.649	0.013	1.532
0.009	1.256	0.009	1.299	0.009	1.022
0.006	1.256	0.006	1.299	0.006	1.532
0.004	1.256	0.004	1.299	0.004	1.226
0.003	1.256	0.003	1.299	0.003	1.022
0.002	1.256	0.002	1.299	0.002	1.022
0.001	0.628	0.001	0.649	0.001	1.022

Tableau A.12 : Analyse granulométrique *HSP-Lys4 (*triplicata)

HSP-Lys4-A		**HSP-Lys4-B**		**HSP-Lys4-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.266	5.000	99.266	5.000	99.266
2.500	98.550	2.500	98.550	2.500	98.550
1.250	97.615	1.250	97.615	1.250	97.615
0.630	93.890	0.630	93.890	0.630	93.890
0.315	62.826	0.315	62.826	0.315	62.826
0.160	22.569	0.160	22.569	0.160	22.569
0.080	7.560	0.080	7.560	0.080	7.560
0.068	5.041	0.068	4.633	0.067	4.810
0.048	3.780	0.048	3.971	0.048	3.848
0.035	0.000	0.035	0.000	0.034	0.962
0.025	0.630	0.024	1.324	0.024	0.962
0.017	0.000	0.017	0.662	0.017	0.962
0.013	0.630	0.013	0.662	0.013	0.481
0.009	1.260	0.009	1.324	0.009	1.443
0.006	1.260	0.006	1.324	0.006	1.443
0.005	0.630	0.004	1.324	0.004	0.962
0.003	0.630	0.003	1.324	0.003	0.962
0.002	1.260	0.002	0.662	0.002	0.481
0.001	0.630	0.001	0.662	0.001	0.962

Tableau A.13 : Analyse granulométrique *HSP-Lys5 (*triplicata)

HSP-Lys5-A		**HSP-Lys5-B**		**HSP-Lys5-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.522	5.000	99.522	5.000	99.522
2.500	99.189	2.500	99.189	2.500	99.189
1.250	98.398	1.250	98.398	1.250	98.398
0.630	94.841	0.630	94.841	0.630	94.841
0.315	63.761	0.315	63.761	0.315	63.761
0.160	22.530	0.160	22.530	0.160	22.530
0.080	6.803	0.080	6.803	0.080	6.803
0.067	5.369	0.067	5.634	0.067	4.272
0.048	3.759	0.048	4.098	0.048	3.738
0.034	2.685	0.034	2.049	0.034	1.068
0.024	2.685	0.024	2.049	0.024	1.602
0.017	2.148	0.017	1.024	0.017	1.068
0.013	0.537	0.013	1.024	0.013	1.068
0.009	0.537	0.009	0.000	0.009	0.534
0.006	1.074	0.006	1.024	0.006	1.068
0.004	1.074	0.004	1.024	0.004	1.068
0.003	1.074	0.003	1.024	0.003	1.068
0.002	1.074	0.002	1.024	0.002	1.068
0.001	0.000	0.001	1.024	0.001	0.534

Tableau A.14 : Analyse granulométrique *HSP-Lys6 (*triplicata)

HSP-Lys6-A		**HSP-Lys6-B**		**HSP-Lys6-C**	
D (mm)	% passant	D (mm)	% passant	D (mm)	% passant
10.000	100.000	10.000	100.000	10.000	100.000
5.000	99.525	5.000	99.525	5.000	99.525
2.500	98.669	2.500	98.669	2.500	98.669
1.250	97.600	1.250	97.600	1.250	97.600
0.630	93.702	0.630	93.702	0.630	93.702
0.315	62.048	0.315	62.048	0.315	62.048
0.160	21.744	0.160	21.744	0.160	21.744
0.080	6.749	0.080	6.749	0.080	6.749
0.067	4.439	0.067	5.073	0.068	3.891
0.048	3.170	0.048	3.170	0.048	3.242
0.034	1.268	0.034	2.536	0.035	-0.648
0.024	1.268	0.024	2.536	0.024	0.648
0.017	1.268	0.017	1.902	0.017	0.648
0.013	1.268	0.013	0.000	0.013	0.648
0.009	1.268	0.009	0.634	0.009	0.000
0.006	0.634	0.006	1.268	0.006	0.648
0.004	1.268	0.004	1.268	0.004	1.297
0.003	1.268	0.003	1.268	0.003	1.297
0.002	1.268	0.002	1.268	0.002	1.297
0.001	0.634	0.001	0.634	0.001	0.648

Tableau A.15 : d_5, d_{10}, d_{30}, d_{60}, C_u et C_c du sable *HSP-Lys*

Échantillon	**d_5 (mm)**	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_u**	**C_c**
HSP Lys 1- A	0.059	0.096	0.190	0.306	3.18	1.23
HSP Lys 1- B	0.064	0.096	0.190	0.306	3.18	1.23
HSP Lys 1- C	0.064	0.096	0.190	0.306	3.18	1.23
HSP Lys 2- A	0.058	0.096	0.191	0.307	3.19	1.24
HSP Lys 2- B	0.071	0.096	0.191	0.307	3.19	1.24
HSP Lys 2- C	0.072	0.096	0.191	0.307	3.19	1.24
HSP Lys 3- A	0.068	0.102	0.195	0.307	3.01	1.21
HSP Lys 3- B	0.047	0.102	0.195	0.307	3.01	1.21
HSP Lys 3- C	0.051	0.102	0.195	0.307	3.01	1.21
HSP Lys 4- A	0.068	0.093	0.189	0.304	3.27	1.26
HSP Lys 4- B	0.069	0.093	0.189	0.304	3.27	1.26
HSP Lys 4- C	0.068	0.093	0.189	0.304	3.27	1.26
HSP Lys 5- A	0.063	0.096	0.188	0.301	3.13	1.22
HSP Lys 5- B	0.059	0.096	0.188	0.301	3.13	1.22
HSP Lys 5- C	0.071	0.096	0.188	0.301	3.13	1.22
HSP Lys 6- A	0.071	0.097	0.192	0.307	3.16	1.24
HSP Lys 6- B	0.067	0.097	0.192	0.307	3.16	1.24
HSP Lys 6- C	0.072	0.097	0.192	0.307	3.16	1.24

ANNEXE B – DENSITÉ RELATIVE DES GRAINS SOLIDES

Tableau B.1 : Densité relative des grains solides *HSP-A* (triplicata)

Date:	27-juil-15		
Numéro pycnomètre	15	14	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)	720.03	734.43	732.5
Température (°C)	26.3	26.3	26.3
Masse pycnomètre + eau (g)	672.17	677.30	672.87
Numéro tare	64	21	63
Masse de la tare + sol sec (g)	395.22	258.28	409.1
Masse de la tare (g)	317.91	167.14	314.95
Masse du sol sec (g)	77.31	91.14	94.15
Coefficient de température (K)	0.998	0.99848	0.99848
Masse volumique de l'eau	1.000	1.00000	1.00000
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0.99821	0.99821	0.99821
Densité relative	2.625	2.680	2.728
Densité relative corrigé @ 20°C	2.62	2.68	2.72
Moyenne (densité relative corrigé):	2.67		

Tableau B.2 : Densité relative des grains solides *HSP-B* (triplicata)

Date:	24-juil-15		
Numéro pycnomètre	15	14	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)	725.36	735.05	732.86
Température (°C)	26.5	25.3	25.7
Masse pycnomètre + eau (g)	672.17	677.40	672.92
Numéro tare	19	T2	T3
Masse de la tare + sol sec (g)	237.92	248.68	322.3
Masse de la tare (g)	152.54	156.57	227.9
Masse du sol sec (g)	85.38	92.11	94.40
Coefficient de température (K)	0.998	0.99873	0.99863
Masse volumique de l'eau	1.000	1.00000	1.00000
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0.99821	0.99821	0.99821
Densité relative	2.653	2.673	2.739
Densité relative corrigé @ 20°C	2.65	2.67	2.74
Moyenne (densité relative corrigé):	2.69		

Tableau B.3 : Densité relative des grains solides *HSP-C* (triplicata)

Date:	27-juil-15		
Numéro pycnomètre	15	14	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)	732.68	735.89	725.7
Température (°C)	25.1	25	25.7
Masse pycnomètre + eau (g)	672.19	677.43	672.92
Numéro tare	63	64	21
Masse de la tare + sol sec (g)	412.05	411	250.26
Masse de la tare (g)	315.04	318	167.4
Masse du sol sec (g)	97.01	93	82.86
Coefficient de température (K)	0.999	0.99881	0.99863
Masse volumique de l'eau	1.000	1.00000	1.00000
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0.99821	0.99821	0.99821
Densité relative	2.656	2.693	2.754
Densité relative corrigé @ 20°C	2.65	2.69	2.75
Moyenne (densité relative corrigé):	2.69		

Tableau B.4 : Densité relative des grains solides *HSP-B* (triplicata)

Date:	04-déc-15		
Numéro pycnomètre	15	14	21
Masse pycnomètre + eau + sol (g)	722.94	729.02	725.62
Température (°C)	25.4	25.5	25.8
Masse pycnomètre + eau (g)	672.19	677.38	672.92
Numéro tare	65	62	65
Masse de la tare + sol sec (g)	447.17	403	447.17
Masse de la tare (g)	364.28	320.72	364.28
Masse du sol sec (g)	82.89	82.28	82.89
Coefficient de température (K)	0.999	0.99868	0.99861
Masse volumique de l'eau	1.000	1.00000	1.00000
Masse volumique de l'eau @ 20°C	0.99821	0.99821	0.99821
Densité relative	2.579	2.685	2.746
Densité relative corrigé @ 20°C	2.58	2.68	2.74
Moyenne (densité relative corrigé):	2.67		

ANNEXE C – RÉSULTATS ESSAIS DE COMPACTAGE (PROCTOR MODIFIÉ)

C.1 Résultats des essais Proctor modifié

Tableau C.1 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-A*

Teneur en eau massique (%)	**Poids Volumique (kN/m^3)**	**Masse volumique (Mg/m^3)**	**Masse volumique (kg/m^3)**
7.7	17.39	1.773	1773
9.8	17.59	1.793	1793
12.1	17.64	1.798	1798
12.6	17.58	1.792	1792
13.2	17.53	1.787	1787

Tableau C.2 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-Aut2015*

Teneur en eau massique (%)	**Poids Volumique (kN/m^3)**	**Masse volumique (Mg/m^3)**	**Masse volumique (kg/m^3)**
4.1	17.82	1.817	1817
6.3	17.83	1.817	1817
8.6	17.91	1.826	1826
10.0	17.91	1.826	1826
11.1	17.94	1.828	1828
14.2	17.85	1.819	1819

Tableau C.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié de l'échantillon *HSP-Aut2015*

Teneur en eau massique (%)	**Poids Volumique (kN/m^3)**	**Masse volumique (Mg/m^3)**	**Masse volumique (kg/m^3)**
5.8	17.67	1.801	1801
7.9	17.67	1.801	1801
9.7	17.81	1.815	1815
11.4	17.87	1.821	1821
12.1	17.86	1.821	1821

C.2 Analyse granulométrique après l'essai de compaction HSP-A :

Figure C.1 : Analyse granulométrique de l'échantillon HSP-A après l'essai Proctor

Tableau C.4 : Analyses granulométriques des échantillons après Proctor modifié

Échantillon	**d_5 (mm)**	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_u**	**C_c**
HSP-A-10%	0.043	0.080	0.161	0.276	3.45	1.17
HSP-A-12%	0.033	0.081	0.162	0.277	3.42	1.17
HSP-A-13%	0.033	0.081	0.162	0.276	3.41	1.17
HSP-A-14%	0.033	0.081	0.163	0.277	3.42	1.18
HSP-A-16%	0.045	0.080	0.160	0.275	3.44	1.16

ANNEXE D – RÉSULTATS ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Tableau D.1 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-1

Date	14-août-15		Échantillon	**HSP-1**	
Indice des vides	0.55		Degré de saturation	1.00	
Distance entre manomètre:			Surface (A)	79.37	cm^2
Extérieur	82.69	mm	Diamètre moyen	100.528	mm
Intérieur	69.68	mm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	23.4		Température (°C)	24.1	
Burette tête (cm)	28.5		Burette tête (cm)	28.5	
Burette base (cm)	25.2		Burette base (cm)	25.2	
Cellule Mariotte (cm)	29.6		Cellule Mariotte (cm)	29.6	
Sortie (cm)	24.0		Sortie (cm)	24.0	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
6.35	1	0.157480315	6.62	1	0.151057402
11.99	2	0.166805671	12.24	2	0.163398693
18.4	3	0.163043478	18.58	3	0.16146394
24.34	4	0.164338537	24.53	4	0.163065634
31.41	5	0.159184973	30.69	5	0.162919518
36.68	6	0.163576881	36.95	6	0.162381597
42.8	7	0.163551402	43.04	7	0.162639405
48.73	8	0.164169916	48.93	8	0.163498876
54.81	9	0.164203612	55.25	9	0.162895928
60.93	10	0.164122764	61.39	10	0.162892979
ΔH (cm)	3.3		ΔH (cm)	3.3	
Débit (cm^3/s)	0.16304776		Débit (cm^3/s)	0.1616214	
k_{sat} (cm/s)	4.74E-03		k_{sat} (cm/s)	4.70E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	4.40E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	4.29E-03	

Tableau D.2 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-1 (début)

Date	14-août-15		Échantillon	**HSP-1**	
Indice des vides	0.55			Degré de saturation	1.00
Longueur Éch.	13.7125	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	79.37	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	55	cm	a_{in}	1.818	cm^2
Long. Burette base	55.4	cm	a_{out}	1.805	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	23.4				
H(0) burette entrée	71.1	cm	H(100) burette entrée	16.1	cm
H(0) burette sortie	70.6	cm	H(100) burette sortie	15.2	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	71.1	28.7	42.4	0	
1.21	70	29.9188	40.0812	0.056240966	
2.8	68.9	31.1376	37.7624	0.115834464	
4.31	67.8	32.2456	35.5544	0.176084444	
5.95	66.7	33.3536	33.3464	0.240198542	
7.66	65.6	34.4616	31.1384	0.308706578	
9.38	64.5	35.5696	28.9304	0.382255417	
11.36	63.4	36.6776	26.7224	0.461646197	
13.47	62.3	37.8964	24.4036	0.5524177	
15.62	61.2	39.0044	22.1956	0.647254291	
18.05	60.1	39.8908	20.2092	0.741010416	

Tableau D.2 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-1 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
	Température (°C)	23.4			
H(0) burette entrée	71.1	cm	H(100) burette entrée	16.1	cm
H(0) burette sortie	70.6	cm	H(100) burette sortie	15.2	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	71.1	28.7	42.4	0	
1.48	70	30.4728	39.5272	0.07015932	
2.77	68.9	31.5808	37.3192	0.127640423	
4.78	67.8	32.6888	35.1112	0.188628194	
6.26	66.7	33.7968	32.9032	0.253578445	
7.84	65.6	34.9048	30.6952	0.323042072	
9.66	64.5	36.0128	28.4872	0.397693499	
11.85	63.4	37.1208	26.2792	0.47837061	
14	62.3	38.2842	24.0158	0.568436415	
16.19	61.2	39.3368	21.8632	0.662343504	
18.53	60.1	40.4448	19.6552	0.768806428	

Essai 1		**Essai 2**	
k_{sat} (cm/s)	6.42E-03	k_{sat} (cm/s)	6.38E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	5.95E-03	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	5.92E-03

Tableau D.3 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-2

Date	06-10-2015		Échantillon	**HSP-2**	
Indice des vides	0.60		Degré de saturation		0.98
Distance entre manomètre:			Surface (A)	79.13	cm^2
Extérieur	68.57	mm	Diamètre moyen	100.373	mm
Intérieur	56	mm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	25.5		Température (°C)	25.5	
Burette tête (cm)	29.1		Burette tête (cm)	29.1	
Burette base (cm)	24.8		Burette base (cm)	24.8	
Cellule Mariotte (cm)	31.9		Cellule Mariotte (cm)	31.9	
Sortie (cm)	20.5		Sortie (cm)	20.5	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
19.81	5	0.252397779	4.55	1	0.21978022
40.19	10	0.248818114	8.64	2	0.231481481
61.1	15	0.245499182	12.77	3	0.234925607
81.97	20	0.243991704	16.73	4	0.239091452
82.9	25	0.301568154	20.85	5	0.239808153
124	30	0.241935484	25.12	6	0.238853503
144.58	35	0.242080509	29.26	7	0.23923445
165.5	40	0.241691843	33.39	8	0.239592692
185.24	45	0.242928093	37.78	9	0.238221281
206.91	50	0.241650959	41.71	10	0.239750659
ΔH (cm)	4.3		ΔH (cm)	3.3	
Débit (cm^3/s)	0.25025618		Débit (cm^3/s)	0.23607395	
k_{sat} (cm/s)	4.58E-03		k_{sat} (cm/s)	4.32E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	4.05E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	3.82E-03	

Tableau D.4 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-2 (début)

	06-10-2015		Échantillon	**HSP-2**	
Indice des vides	0.60			Degré de saturation	0.98
Longueur Éch.	11.04	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	79.13	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	53.7	cm	a_{in}	1.862	cm^2
Long. Burette base	55.2	cm	a_{out}	1.812	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.5				
H(0) burette entrée	72.8	cm	H(100) burette entrée	19.1	cm
H(0) burette sortie	73.5	cm	H(100) burette sortie	18.3	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	72.8	41.6	31.2	0	
2.31	71.726	42.5936	29.1324	0.068567138	
4.82	70.652	43.6976	26.9544	0.146271545	
7.64	69.578	44.8016	24.7764	0.230526508	
10.74	68.504	45.9056	22.5984	0.322538988	
13.89	67.43	47.0096	20.4204	0.423883694	
17.46	66.356	48.1136	18.2424	0.53666954	
21.69	65.282	49.2176	16.0644	0.663812451	
26.37	64.208	50.3216	13.8864	0.809508151	
32.01	63.134	51.4256	11.7084	0.980111562	
38.61	62.06	52.5296	9.5304	1.185931405	

Tableau D.4 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-2 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
	Température (°C)	25.5			
H(0) burette entrée	72.8	cm	H(100) burette entrée	19.1	cm
H(0) burette sortie	73.5	cm	H(100) burette sortie	18.3	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
38.61	72.8	41.6	31.2	0	
40.14	71.726	42.5936	29.1324	0.068567138	
42.8	70.652	43.6424	27.0096	0.144225736	
45.5	69.578	44.8016	24.7764	0.230526508	
48.51	68.504	45.9056	22.5984	0.322538988	
51.9	67.43	47.0096	20.4204	0.423883694	
55.45	66.356	48.0584	18.2976	0.533648191	
59.39	65.282	49.1072	16.1748	0.656963619	
63.96	64.208	50.2112	13.9968	0.801589363	
69.47	63.134	51.3152	11.8188	0.970726611	
76.1	62.06	52.4192	9.6408	1.174414002	

Essai 1		**Essai 2**	
k_{sat} (cm/s)	3.94E-03	k_{sat} (cm/s)	3.98E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	3.49E-03	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	3.52E-03

Tableau D.5 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-3

Date	09-10-2015		Échantillon	**HSP-3**	
Indice des vides	0.55		Degré de saturation		0.90
Distance entre manomètre:			Surface (A)	79.50	cm^2
Extérieur	82.44	mm	Diamètre moyen	100.612	mm
Intérieur	69.45	mm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	25.7		Température (°C)	25.7	
Burette tête (cm)	30.4		Burette tête (cm)	30.3	
Burette base (cm)	29.1		Burette base (cm)	29.1	
Cellule Mariotte (cm)	32.1		Cellule Mariotte (cm)	32.1	
Sortie (cm)	22.3		Sortie (cm)	22.3	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
4.16	1	0.240384615	3.42	1	0.292397661
8	2	0.25	7.27	2	0.275103164
11.71	3	0.256191289	11.19	3	0.268096515
15.34	4	0.260756193	14.93	4	0.267916946
19.36	5	0.258264463	18.98	5	0.263435195
23.18	6	0.258843831	22.73	6	0.263968324
26.97	7	0.259547646	26.43	7	0.264850549
30.8	8	0.25974026	30.27	8	0.264288074
34.76	9	0.258918297	34.34	9	0.262085032
38.52	10	0.2596054	38.21	10	0.261711594
ΔH (cm)	1.3		ΔH (cm)	1.2	
Débit (cm^3/s)	0.2562252		Débit (cm^3/s)	0.26838531	
k_{sat} (cm/s)	1.88E-02		k_{sat} (cm/s)	2.14E-02	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	1.66E-02		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	1.88E-02	

Tableau D.6 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-3 (début)

Date	09-10-2015		Échantillon	**HSP-3**	
Indice des vides	0.55			Degré de saturation	0.90
Longueur Éch.	12.843	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	79.50	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	54.8	cm	a_{in}	1.825	cm^2
Long. Burette base	54.8	cm	a_{out}	1.825	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.5				
H(0) burette entrée	71.0	cm	H(100) burette entrée	16.2	cm
H(0) burette sortie	70.8	cm	H(100) burette sortie	16.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln (Δh0/Δh)**	
0	71	38	33	0	
2.13	69.904	39.1508	30.7532	0.070513508	
4.42	68.808	40.2468	28.5612	0.144458408	
6.87	67.712	41.3428	26.3692	0.224310899	
9.54	66.616	42.4388	24.1772	0.311097521	
12.34	65.52	43.48	22.04	0.403648577	
15.71	64.424	44.6308	19.7932	0.511169117	
19.24	63.328	45.7268	17.6012	0.62854048	
23.04	62.232	46.768	15.464	0.75799282	
27.75	61.136	47.864	13.272	0.910851009	
32.78	60.04	48.96	11.08	1.09136588	

Tableau D.6: Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-3 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
	Température (°C)	25.5			
H(0) burette entrée	71.0	cm	H(100) burette entrée	16.2	cm
H(0) burette sortie	70.8	cm	H(100) burette sortie	16.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln (Δh0/Δh)**	
0	71	38	33	0	
2.03	69.904	39.096	30.808	0.068733165	
4.35	68.808	40.192	28.616	0.14254156	
6.6	67.712	41.288	26.424	0.222234873	
9.1	66.616	42.384	24.232	0.308833488	
11.86	65.52	43.48	22.04	0.403648577	
14.89	64.424	44.576	19.848	0.508404315	
18.38	63.328	45.672	17.656	0.625431893	
22.16	62.232	46.768	15.464	0.75799282	
26.61	61.136	47.864	13.272	0.910851009	
31.67	60.04	48.96	11.08	1.09136588	
Essai 1			**Essai 2**		
k_{sat} (cm/s)	4.88E-03		k_{sat} (cm/s)	5.07E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	4.31E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	4.49E-03	

Tableau D.7 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-4

Date	09-10-2015		Échantillon	**HSP-4**	
Indice des vides	0.67		Degré de saturation		1.00
Distance entre manomètre:			Surface (A)	53.12	cm^2
Extérieur	74.93	mm	Diamètre moyen	82.24	mm
Intérieur	62.44	mm			

Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	25.7		Température (°C)	25.7	
Burette tête (cm)	26.0		Burette tête (cm)	26.0	
Burette base (cm)	23.2		Burette base (cm)	23.2	
Cellule Mariotte (cm)	29.4		Cellule Mariotte (cm)	29.4	
Sortie (cm)	19.1		Sortie (cm)	19.1	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
4.29	1	0.233100233	4.44	1	0.225225225
8.74	2	0.228832952	8.91	2	0.224466891
13.15	3	0.228136882	12.89	3	0.232738557
17.28	4	0.231481481	16.83	4	0.237670826
21.63	5	0.231160425	21.04	5	0.237642586
25.89	6	0.23174971	25.22	6	0.237906423
30.22	7	0.231634679	29.34	7	0.23858214
34.22	8	0.233781414	33.53	8	0.238592305
38.63	9	0.23297955	37.8	9	0.238095238
42.95	10	0.232828871	41.98	10	0.238208671
ΔH (cm)	2.8		ΔH (cm)	2.8	
Débit (cm^3/s)	0.23156862		Débit (cm^3/s)	0.23491289	
k_{sat} (cm/s)	1.07E-02		k_{sat} (cm/s)	1.08E-02	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	9.42E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	9.56E-03	

Tableau D.8 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-4 (début)

Date	09-10-2015		Échantillon	**HSP-4**	
Indice des vides	0.67			Degré de saturation	1.00
Longueur Éch.	12.192	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	53.120	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	55.7	cm	a_{in}	1.795	cm^2
Long. Burette base	55.0	cm	a_{out}	1.818	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.5				
H(0) burette entrée	69.9	cm	H(100) burette entrée	14.2	cm
H(0) burette sortie	70.0	cm	H(100) burette sortie	15.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln (Δh0/Δh)**	
0	69.9	40.4	29.5	0	
2.69	68.786	41.555	27.231	0.080034233	
5.34	67.672	42.655	25.017	0.16483467	
8.24	66.558	43.755	22.803	0.257498157	
11.47	65.444	44.8	20.644	0.356965543	
15.03	64.33	45.9	18.43	0.470410492	
18.99	63.216	47	16.216	0.598391854	
23.75	62.102	48.1	14.002	0.745190087	
29.2	60.988	49.145	11.843	0.912653288	
36.12	59.874	50.3	9.574	1.125339172	
44.8	58.76	51.4	7.36	1.388330331	

Tableau D.8 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-4 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
	Température (°C)	25.5			
H(0) burette entrée	69.9	cm	H(100) burette entrée	14.2	cm
H(0) burette sortie	70.0	cm	H(100) burette sortie	15.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln (Δh0/Δh)**	
0	69.9	40.4	29.5	0	
1.9	68.786	41.5	27.286	0.078016513	
4.79	67.672	42.6	25.072	0.162638578	
7.69	66.558	43.7	22.858	0.255089098	
11.06	65.444	44.8	20.644	0.356965543	
14.64	64.33	45.9	18.43	0.470410492	
18.74	63.216	47	16.216	0.598391854	
23.39	62.102	48.1	14.002	0.745190087	
29.1	60.988	49.2	11.788	0.917308198	
35.89	59.874	50.3	9.574	1.125339172	
44.01	58.76	51.4	7.36	1.388330331	

Essai 1		**Essai 2**	
k_{sat} (cm/s)	6.45E-03	k_{sat} (cm/s)	6.47E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	5.71E-03	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	5.72E-03

Tableau D.9 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-5

Date	23-03-2016		Échantillon	**HSP-5**	
Indice des vides	0.71		Degré de saturation		1.00
Distance entre manomètre:			Surface (A)	79.31	cm^2
Extérieur	68.12	mm	Diamètre moyen	100.488	mm
Intérieur	55.49	mm			

Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	25.2		Température (°C)	25.2	
Burette tête (cm)	29.4		Burette tête (cm)	29.6	
Burette base (cm)	24.8		Burette base (cm)	25.0	
Cellule Mariotte (cm)	32.5		Cellule Mariotte (cm)	32.5	
Sortie (cm)	21.0		Sortie (cm)	21.2	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
2.83	1	0.35335689	3.04	1	0.328947368
5.83	2	0.343053173	5.89	2	0.339558574
8.97	3	0.334448161	8.78	3	0.341685649
11.89	4	0.336417157	11.53	4	0.346921075
14.78	5	0.338294993	14.5	5	0.344827586
17.83	6	0.336511497	17.24	6	0.348027842
20.61	7	0.339640951	20.16	7	0.347222222
23.94	8	0.334168755	23.01	8	0.347674924
26.77	9	0.336197236	25.98	9	0.346420323
29.81	10	0.3354579	28.75	10	0.347826087
ΔH (cm)	4.6		ΔH (cm)	4.6	
Débit (cm^3/s)	0.33875467		Débit (cm^3/s)	0.34391117	
k_{sat} (cm/s)	5.74E-03		k_{sat} (cm/s)	5.83E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	5.11E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	5.19E-03	

Tableau D.10 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-5 (début)

Date	24-03-2016		Échantillon	**HSP-5**	
Indice des vides	0.71			Degré de saturation	1.00
Longueur Éch.	10.674	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	79.31	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	54.7	cm	a_{in}	1.828	cm^2
Long. Burette base	54.9	cm	a_{out}	1.821	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.2				
H(0) burette entrée	70.0	cm	H(100) burette entrée	15.3	cm
H(0) burette sortie	69.9	cm	H(100) burette sortie	15.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	70	32.5	37.5	0	
2.77	68.906	33.598	35.308	0.060231366	
4.79	67.812	34.5862	33.2258	0.12101425	
6.77	66.718	35.6842	31.0338	0.189264	
8.94	65.624	36.7822	28.8418	0.262515209	
11.62	64.53	37.8802	26.6498	0.341559287	
13.95	63.436	38.9782	24.4578	0.42739175	
16.71	62.342	40.0762	22.2658	0.521289064	
19.92	61.248	41.1742	20.0738	0.624925451	
23.32	60.154	42.2722	17.8818	0.740557497	
27.52	59.06	43.3153	15.7447	0.867837132	
33.31	57.966	44.578	13.388	1.02998215	

Tableau D.10: Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-5 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
H(0) burette entrée	71.0	cm	H(100) burette entrée	16.2	cm
H(0) burette sortie	70.8	cm	H(100) burette sortie	16.0	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	70	33.6	36.4	0	
0.91	68.906	35.3568	33.5492	0.081555757	
2.66	67.812	36.4548	31.3572	0.149124869	
4.43	66.718	37.5528	29.1652	0.221592557	
6.24	65.624	38.6508	26.9732	0.299724994	
8.28	64.53	39.7488	24.7812	0.384483473	
10.6	63.436	40.8468	22.5892	0.477096859	
12.97	62.342	41.9448	20.3972	0.579171138	
15.69	61.248	43.0977	18.1503	0.695881685	
18.46	60.154	44.1408	16.0132	0.821155393	
21.92	59.06	45.2388	13.8212	0.968365129	
25.93	57.966	45.2388	12.7272	1.050827339	

Essai 1		**Essai 2**	
k_{sat} (cm/s)	3.93E-03	k_{sat} (cm/s)	5.06E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	3.50E-03	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	4.51E-03

Tableau D.11 : Résultats de l'essai à charge constante de l'essai HSP-6

Date	30-03-2016		Échantillon	**HSP-6**	
Indice des vides	0.56		Degré de saturation		0.90
Distance entre manomètre:			Surface (A)	79.22	cm^2
Extérieur	82.69	mm	Diamètre moyen	100.43	mm
Intérieur	70.18	mm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température (°C)	25.8		Température (°C)	25.8	
Burette tête (cm)	39.2		Burette tête (cm)	39.2	
Burette base (cm)	30.0		Burette base (cm)	30.1	
Cellule Mariotte (cm)	32.5		Cellule Mariotte (cm)	32.5	
Sortie (cm)	22.5		Sortie (cm)	22.5	
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
14.21	5	0.351864884	3.24	1	0.308641975
29.36	10	0.340599455	6.19	2	0.323101777
44.32	15	0.338447653	8.72	3	0.344036697
59.91	20	0.333834084	11.88	4	0.336700337
74.98	25	0.333422246	14.95	5	0.334448161
89.65	30	0.33463469	17.89	6	0.335382895
104.43	35	0.335152734	20.73	7	0.337674867
120.01	40	0.333305558	23.62	8	0.33869602
134.74	45	0.333976547	26.78	9	0.336071695
149.94	50	0.33346672	29.72	10	0.336473755
ΔH (cm)	9.2		ΔH (cm)	9.1	
Débit (cm^3/s)	0.33687046		Débit (cm^3/s)	0.33312282	
k_{sat} (cm/s)	3.53E-03		k_{sat} (cm/s)	3.53E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	3.11E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	3.10E-03	

Tableau D.12 : Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-6 (début)

Date	09-10-2015		Échantillon	**HSP-6**	
Indice des vides	0.56			Degré de saturation	0.90
Longueur Éch.	12.476	cm	Vol. burette tête	100	cm^3
Aire Éch.	79.217	cm^2	Vol. burette base	100	cm^3
Long. Burette tête	54.7	cm	a_{in}	1.828	cm^2
Long. Burette base	54.9	cm	a_{out}	1.821	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.8				
H(0) burette entrée	69.8	cm	H(100) burette entrée	15.1	cm
H(0) burette sortie	69.7	cm	H(100) burette sortie	14.8	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	69.8	31.3	38.5	0	
2.31	67.612	33.6058	34.0062	0.12411538	
5.97	65.424	35.2528	30.1712	0.243770414	
10.51	63.236	37.7782	25.4578	0.413636062	
15.88	61.048	39.9742	21.0738	0.602627679	
22.08	58.86	42.1702	16.6898	0.835860487	
30.32	56.672	44.3662	12.3058	1.140587545	
41.46	54.484	46.5622	7.9218	1.581039789	
62.3	52.296	48.7582	3.5378	2.387153176	

Tableau D.12: Résultats de l'essai à charge variable de l'essai HSP-6 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable					
	Température (°C)	25.8			
H(0) burette entrée	69.8	cm	H(100) burette entrée	15.1	cm
H(0) burette sortie	69.7	cm	H(100) burette sortie	14.8	cm
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	0	0	0	0	
1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	
3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	
5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	
8.12	8.12	8.12	8.12	8.12	
10.68	10.68	10.68	10.68	10.68	
13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	
16.18	16.18	16.18	16.18	16.18	
19.21	19.21	19.21	19.21	19.21	
22.68	22.68	22.68	22.68	22.68	
Essai 1			**Essai 2**		
k_{sat} (cm/s)	5.45E-03		k_{sat} (cm/s)	4.51E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	4.79E-03		**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	3.97E-03	

ANNEXE E – RÉSULTATS DES ESSAIS EN COLONNE

E.1 Montage des colonnes :

Figure E.1 : Teneur en eau massique lors du montage des colonnes (A : colonne No.1, B : colonne No. 2)

E2 Essais de drainage :

Figure E.2 : Masse de la colonne No. 2 au cours de l'essai

Figure E.3 : Masse d'eau cumulative à la sortie de la colonne No. 1

Figure E.4 : Masse d'eau cumulative à la sortie de la colonne No. 2

Figure E.5 : Pression enregistrée par les tensiomètres T1, T2, T3, T4 et T6 lors du drainage de la colonne No. 1

Figure E.6: Pression enregistrée par les tensiomètres T1, T2, T3, T4 et T6 lors du drainage de la colonne No. 2

E3 Analyses granulométriques du sable HSP-A après l'essai de drainage en colonne :

Figure E.7 : Courbes granulométriques au démontage de la colonne No. 1

Figure E.8 : Zoom sur les courbes granulométriques après essai de compaction

Tableau E.1 : Analyses granulométriques des échantillons après drainage colonne No. 1

Échantillon	d_5 (mm)	d_{10} (mm)	d_{30} (mm)	d_{60} (mm)	C_u	C_c	d_5 moyen (mm)	d_{10} moyen (mm)
C1-BAS-1	0.054	0.084	0.165	0.279	3.32	1.16	0.056	0.084
C1-BAS-2	0.067	0.084	0.165	0.279	3.32	1.16		
C1-BAS-3	0.047	0.084	0.165	0.279	3.32	1.16		
C1-MILIEU-1	0.034	0.085	0.166	0.280	3.29	1.16	0.044	0.085
C1-MILIEU-2	0.051	0.085	0.166	0.280	3.29	1.16		
C1-MILIEU-3	0.047	0.085	0.166	0.280	3.29	1.16		
C1-HAUT-1	0.043	0.085	0.167	0.281	3.31	1.17	0.043	0.085
C1-HAUT-2	0.033	0.085	0.167	0.281	3.31	1.17		
C1-HAUT-3	0.052	0.085	0.167	0.281	3.31	1.17		

Figure E.9 : Courbes granulométriques au démontage de la colonne No. 2

Figure E.10 : Zoom sur les courbes granulométriques après essai de compaction

Tableau E.2 : Analyses granulométriques des échantillons après drainage colonne No. 2

Échantillon	**d_5 (mm)**	**d_{10} (mm)**	**d_{30} (mm)**	**d_{60} (mm)**	**C_u**	**C_c**	**d_5 moyen (mm)**	**d_{10} moyen (mm)**
C2-BAS-1	0.057	0.087	0.165	0.279	3.21	1.12	0.058	0.087
C2-BAS-2	0.059	0.087	0.165	0.279	3.21	1.12		
C2-BAS-3	0.058	0.087	0.165	0.279	3.21	1.12		
C2-MILIEU-1	0.047	0.087	0.166	0.281	3.23	1.13	0.044	0.087
C2-MILIEU-2	0.037	0.087	0.166	0.281	3.23	1.13		
C2-MILIEU-3	0.048	0.087	0.166	0.281	3.23	1.13		
C2-HAUT-1	0.052	0.088	0.167	0.280	3.18	1.13	0.054	0.088
C2-HAUT-2	0.053	0.088	0.167	0.280	3.18	1.13		
C2-HAUT-3	0.056	0.088	0.167	0.280	3.18	1.13		

E4 Résultats au démontage :

Tableau E.3 : Résultats au démontage pour la colonne 1 (début)

	Élévation (cm)	Masse tare (g)	Masse sol humide +tare (g)	Masse sol sec + tare (g)	No. tare	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	u mesuré (cm)	u calculé (cm)	e	TEV
Couche 22*	102.7	608.1	1626.9	1593.8	D9	3.4%	1627.75		120.29	0.63	0.05
Couche 21	98.54	638.2	2123.9	2059.4	C1	4.5%	1766.50		116.22	0.51	0.08
Couche 20	93.6	325.9	1527.4	1471.1	A	4.9%	1682.25		111.37	0.58	0.08
Couche 19	89.42	715.4	2351.3	2269.7	C3	5.2%	1754.37	90.8	107.27	0.52	0.09
Couche 18	83.98	714.3	2274.4	2196.5	C5	5.3%	1730.24		101.94	0.54	0.09
Couche 17	78.72	716.7	2452.5	2363.1	C6	5.4%	1872.09		96.78	0.42	0.10
Couche 16	73.32	869.8	2113.6	2048.8	CR1	5.5%	1715.48		91.49	0.55	0.09
Couche 15	69.1	868.3	2497	2408.5	CR2	5.7%	1653.36	80.2	87.35	0.61	0.09
Couche 14	63.38	32	1122.5	1061.7	M1	5.9%	1681.54		81.75	0.58	0.10
Couche 13	59.62	32.3	1367	1289.7	M2	6.1%	1762.72		78.06	0.51	0.11
Couche 12*	55.24	32.9	1134.1	1069.9	M3	6.2%	1749.29		73.76	0.52	0.11
Couche 11	51.6	32.8	1466.1	1377.8	M4	6.0%	1720.67		70.20	0.55	0.10
Couche 10	46.34	32.7	1776.5	1661	M5	7.1%	1937.63		65.04	0.37	0.13
Couche 9	41.18	32.8	1659.5	1540.1	M6	7.9%	1746.26	69.5	59.98	0.52	0.14
Couche 8	35.88	32.6	1806.8	1662.4	M7	8.9%	1603.74		54.78	0.66	0.14
Couche 7	29.64	32.4	1689.3	1529.3	M8	10.7%	2042.52		48.67	0.30	0.21

*Densité prise à l'anneau

Tableau E.3 : Résultats au démontage pour la colonne 1 (suite et fin)

	Élévation (cm)	Masse tare (g)	Masse sol humide +tare (g)	Masse sol sec + tare (g)	No. tare	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	u mesuré (cm)	u calculé (cm)	e	TEV
Couche 6	25.14	32.6	1484.7	1302.6	M9	14.3%	1638.26		44.25	0.62	0.23
Couche 5	20.38	32.7	1323.3	1122.3	M10	18.4%	1818.04	49	39.58823529	0.46	0.33
Couche 4	16.7	32.5	1933.5	1616.4	M11	20.0%	1794.38		35.98039216	0.48	0.35
Couche 3	11.28	32.7	1583.6	1315.7	M12	20.9%	1211.99	35	30.66666667	0.48	0.37
Couche 2	4.78	32.7	1234	1034.7	M13						
Couche 1	3.32	32.7	1215.7	1019.3	M14	19.9%	1824.69		22.8627451	0.46	0.36

Tableau E.4 : Résultats au démontage pour la colonne 2 (début)

	Élévation (cm)	Masse tare (g)	Masse sol humide +tare (g)	Masse sol sec + tare (g)	No. tare	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	u mesuré (cm)	u calculé (cm)	e	TEV
Couche 23*	104.7	608.4	1902.4	1847.3	D-9	4.5%	1739.60		92.84	0.53	0.07
Couche 22	99.96	592.1	1908.7	1847	X1	4.9%	1653.52		88.20	0.61	0.08
Couche 2 1	95.3	717.1	2352.9	2270.3	C6	5.3%	1892.27		83.63	0.41	0.08
Couche 20	90.26	869.9	2265.2	2190.9	CR1	5.6%	1682.83	77.15	78.69	0.58	0.10
Couche 19	85.44	714.4	2174.2	2089.9	C5	6.1%	1766.92		73.96	0.51	0.09
Couche 18	80.66	715.6	2212.5	2119.1	C3	6.7%	1737.46		69.27	0.53	0.11
Couche 17	75.7	325.8	2041.1	1926.8	A	7.1%	1712.63		64.41	0.55	0.11
Couche 16	69.96	868.4	2897.9	2751	CR-2	7.8%	1811.85	60.85	58.78	0.47	0.12
Couche 15	63.58	638.2	1555.8	1481.8	C1	8.8%	1947.33		52.53	0.37	0.14
Couche 14	60.92	32.5	1534.9	1402.1	M14	9.7%	1617.24		49.92	0.64	0.17
Couche 13	55.72	32.6	1472	1326.5	M12	11.2%	1719.67		44.82	0.55	0.15
Couche 12*	51.1	32.6	1540	1339.6	M13	15.3%	1815.88		40.29	0.46	0.19
Couche 11	46.34	32.4	1781.1	1489.6	M11	20.0%	1761.33		35.63	0.51	0.27
Couche 10	41.26	32.5	1793.1	1492.2	M10	20.6%	1764.35	40.36	30.65	0.51	0.34
Couche 9	36.18	32.6	1908	1583.1	M9	21.0%	1727.85		25.67	0.54	0.36
Couche 8	30.67	32.5	1503.4	1253	M8	20.5%	1755.07		20.26	0.52	0.35
Couche 7*	26.4	32.6	1777.5	1480.6	M7	20.5%	1721.68		16.08	0.55	0.35

*Densité prise à l'anneau

Tableau E.4 : Résultats au démontage pour la colonne 2 (suite et fin)

	Élévation (cm)	Masse tare (g)	Masse sol humide +tare (g)	Masse sol sec + tare (g)	No. tare	w (%)	ρ_d (kg/m^3)	u mesuré (cm)	u calculé (cm)	e	TEV
Couche 6	21.06	32.4	1904.3	1579.2	M6	21.0%	1792.02	16.10	10.84	0.48	0.35
Couche 5	15.76	32.5	952.6	794.1	M5	20.8%	1670.14		5.65	0.59	0.37
Couche 4	12.96	32.7	1077	898.2	M4	20.7%	1845.27		2.90	0.44	0.34
Couche 3	10.08	32.5	1730.7	1442.7	M3	20.4%	1738.75	1.93	0.08	0.53	0.37
Couche 2	5.1	32.1	869.6	732.3	M2	19.6%	1885.70		-4.80	0.41	0.35
Couche 1	2.82	31.9	1014.5	846.6	M1	20.6%	1773.92		-7.04	0.50	0.36

E5 Résultats des essais de perméabilité en colonne :

Tableau E.5 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 1 partie 1 (début)

Date	21-08-2015		Échantillon	**Colonne 1**	
Distance entre tensiomètre:			Surface (A)	162.24	cm^2
T1-T2	9.5	cm	Diamètre moyen	143.73	mm
T2-T3	19.5	cm	Longueur éch.	102.3	cm
T3-T4	31.0	cm			
T4-T6	19.5	cm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température	26.1	°C	Température	26.1	°C
Diff. Charge T1-T2	0.613	cm	Diff. Charge T1-T2	0.613	cm
Diff. Charge T2-T3	0.748	cm	Diff. Charge T2-T3	0.748	cm
Diff. charge T3-T4	0.357	cm	Diff. charge T3-T4	0.357	cm
Diff. Charge T4-T6	4.765	cm	Diff. Charge T4-T6	4.765	cm
Cellule Mariotte	152.7	cm	Cellule Mariotte	152.7	cm
Sortie	17.7	cm	Sortie	17.7	cm

Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
60	10	0.166666667	0	0	
120	20	0.166666667	6.04	1	0.165562914
180	30	0.166666667	12.22	2	0.161812298
240	40	0.166666667	18.35	3	0.163132137
300	50	0.166666667	24.84	4	0.154083205
360	60	0.166666667	31	5	0.162337662
420	70	0.166666667	36.95	6	0.168067227
480	80	0.166666667	43.35	7	0.15625
540	90	0.166666667	49.47	8	0.163398693
600	100	0.166666667	55.92	9	0.15503876
660	110	0.166666667			
720	120	0.166666667			
780	130	0.166666667			
840	140	0.166666667			
900	150	0.166666667			
960	160	0.166666667			
1020	170	0.166666667			
1080	180	0.166666667			
1140	190	0.166666667			
1200	200	0.166666667			
1320	220	0.166666667			
1440	240	0.166666667			

Tableau E.5: Résultats de l'essai à charge constante colonne 1 partie 1 (suite et fin)

Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
1560	260	0.166666667			
1680	280	0.166666667			
1800	300	0.166666667			
Débit moyen (cm^3/s)	0.1667		Débit (cm^3/s)	0.16091725	
k_{sat} (cm/s)			**k_{sat} (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.59E-02		T1-T2 (cm/s)	1.54E-02	
T2-T3 (cm/s)	2.68E-02		T2-T3 (cm/s)	2.58E-02	
T3-T4 (cm/s)	8.91E-02		T3-T4 (cm/s)	8.60E-02	
T4-T6 (cm/s)	4.20E-03		T4-T6 (cm/s)	4.06E-03	
Éch. Total (cm/s)	7.78E-04		Éch. Total (cm/s)	7.52E-04	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)			**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.39E-02		T1-T2 (cm/s)	1.34E-02	
T2-T3 (cm/s)	2.34E-02		T2-T3 (cm/s)	2.26E-02	
T3-T4 (cm/s)	7.78E-02		T3-T4 (cm/s)	7.51E-02	
T4-T6 (cm/s)	3.67E-03		T4-T6 (cm/s)	3.54E-03	
Éch. Total (cm/s)	6.80E-04		Éch. Total (cm/s)	6.56E-04	

Tableau E.6 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 1 partie 2

Date	21-08-2015		Échantillon	**Colonne 1**	
Distance entre tensiomètre:			Surface (A)	162.24	cm^2
T1-T2	9.5	cm	Diamètre moyen	143.73	mm
T2-T3	19.5	cm	Longueur éch.	102.3	cm
T3-T4	31.0	cm			
T4-T6	19.5	cm			
Essai 3 – Charge constante			**Essai 4 – Charge constante**		
Température	26.1	°C	Température	26.1	°C
Diff. Charge T1-T2	0.613	cm	Diff. Charge T1-T2	0.613	cm
Diff. Charge T2-T3	0.748	cm	Diff. Charge T2-T3	0.748	cm
Diff. charge T3-T4	0.357	cm	Diff. charge T3-T4	0.357	cm
Diff. Charge T4-T6	4.765	cm	Diff. Charge T4-T6	4.765	cm
Cellule Mariotte	152.7	cm	Cellule Mariotte	152.7	cm
Sortie	17.7	cm	Sortie	17.7	cm
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
0	0		0	0	
6.6	1	0.151515152	6.71	1	0.149031297
12.76	2	0.162337662	12.56	2	0.170940171
18.69	3	0.168634064	18.81	3	0.16
24.8	4	0.163666121	25.2	4	0.156494523
30.96	5	0.162337662	31.13	5	0.168634064
37.32	6	0.157232704	37.36	6	0.160513644
43.39	7	0.164744646	44.05	7	0.149476831
50.14	8	0.148148148	50.06	8	0.166389351
56.33	9	0.161550889	56.54	9	0.154320988
62.5	10	0.162074554	62.83	10	0.158982512
Débit moyen (cm^3/s)	0.16022416		Débit (cm^3/s)	0.15947834	
k_{sat} (cm/s)			**k_{sat} (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.53E-02		T1-T2 (cm/s)	1.52E-02	
T2-T3 (cm/s)	2.57E-02		T2-T3 (cm/s)	2.56E-02	
T3-T4 (cm/s)	8.56E-02		T3-T4 (cm/s)	8.52E-02	
T4-T6 (cm/s)	4.04E-03		T4-T6 (cm/s)	4.02E-03	
Éch. Total (cm/s)	7.48E-04		Éch. Total (cm/s)	7.45E-04	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)			**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.34E-02		T1-T2 (cm/s)	1.33E-02	
T2-T3 (cm/s)	2.25E-02		T2-T3 (cm/s)	2.56E-02	
T3-T4 (cm/s)	7.48E-02		T3-T4 (cm/s)	8.52E-02	
T4-T6 (cm/s)	3.53E-03		T4-T6 (cm/s)	4.02E-03	
Éch. Total (cm/s)	6.54E-04		Éch. Total (cm/s)	6.51E-04	

Tableau E.7 : Résultats de l'essai à charge constante colonne 2 (début)

Date	17-09-2015		Échantillon	**Colonne 1**	
Distance entre tensiomètre:			Surface (A)	162.24	cm^2
T1-T2	9.7	cm	Diamètre moyen	143.73	mm
T2-T3	19.3	cm	Longueur éch.	102.88	cm
T3-T4	31.0	cm			
T1-T3	31.6	cm			
Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Température	24.9	°C	Température	24.9	°C
Diff. Charge T1-T2	5.3	cm	Diff. Charge T1-T2	5.3	cm
Diff. Charge T2-T3	5.3	cm	Diff. Charge T2-T3	5.3	cm
Diff. charge T3-T4	11.3	cm	Diff. charge T3-T4	11.3	cm
Diff. Charge T1-T3	10.6	cm	Diff. Charge T1-T3	10.6	cm
Cellule Mariotte	153	cm	Cellule Mariotte	153	cm
Sortie	42	cm	Sortie	42	cm

Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
0			60	67.6	1.96
60	69.3	4.488333333	120	133.7	1.530833333
120	134.6	2.788333333	180	200	1.388888889
180	201.7	2.231666667	240	266.3	1.317916667
240	268.7	1.952916667	300	332.4	1.274666667
300	335.4	1.784666667	360	398.4	1.245555556
360	402.3	1.673055556	420	465.8	1.228095238
420	468.8	1.592380952	480	530.5	1.209375
480	537.6	1.536666667	540	596.6	1.197407407
540	602.2	1.485555556	600	664.7	1.191166667
600	668.6	1.447666667	660	730.7	1.182878788
660	735.3	1.417121212	720	794.4	1.172777778
720	803.8	1.394166667	780	860.2	1.166923077
780	870.6	1.372564103	840	928.2	1.16452381
840	937.4	1.354047619	900	994	1.16
900	1003.7	1.337444444	960	1057.9	1.1540625
960	1070.2	1.323125	1020	1125.8	1.152745098
1020	1136.5	1.310294118	1080	1191.6	1.14962963
1080	1203	1.299074074	1140	1255.3	1.145
1140	1267.2	1.287017544	1200	1323.1	1.14425
1200	1335.6	1.279666667	1260	1388.8	1.141904762
1260	1402.2	1.271587302	1320	1454.5	1.139772727
1320	1472.8	1.267272727	1385	1524.5	1.136823105
1380	1534.8	1.257101449	1440	1583.8	1.134583333

Tableau E.7: Résultats de l'essai à charge constante colonne 2 (suite et fin)

Essai 1 – Charge constante			**Essai 2 – Charge constante**		
Temps (s)	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**	**Temps (s)**	**Volume sortie (mL)**	**Débit (cm^3/s)**
1440	1599	1.249305556	1500	1651.6	1.1344
1500	1667.4	1.244933333	1560	1717.1	1.13275641
1620	1800.1	1.23462963	1620	1782.8	1.131358025
1680	1866.1	1.229821429	1680	1848.4	1.13
1740	1932.4	1.225517241	1740	1914	1.128735632
1800	1998.6	1.221444444	1800	1979.6	1.127555556
Débit moyen (cm^3/s)	1.57094402		Débit (cm^3/s)	1.21581952	
k_{sat} (cm/s)			**k_{sat} (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.78E-02		T1-T2 (cm/s)	1.34E-02	
T2-T3 (cm/s)	3.51E-02		T2-T3 (cm/s)	2.64E-02	
T3-T4 (cm/s)	2.67E-02		T3-T4 (cm/s)	2.08E-02	
T1-T3 (cm/s)	2.88E-02		T1-T3 (cm/s)	2.17E-02	
Éch. Total (cm/s)	8.97E-03		Éch. Total (cm/s)	6.95E-03	
k_{sat} à 20ºC (cm/s)			**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**		
T1-T2 (cm/s)	1.59E-02		T1-T2 (cm/s)	1.20E-02	
T2-T3 (cm/s)	3.15E-02		T2-T3 (cm/s)	2.36E-02	
T3-T4 (cm/s)	2.39E-02		T3-T4 (cm/s)	1.86E-02	
T1-T3 (cm/s)	2.58E-02		T1-T3 (cm/s)	1.95E-02	
Éch. Total (cm/s)	8.05E-03		Éch. Total (cm/s)	6.23E-03	

Tableau E.8: Résultats de l'essai à charge variable colonne 1

Date	01-10-2015		Échantillon	**Colonne 1**	
Longueur Éch.	102.3	cm	Vol. burette tête	8468	cm^3
Aire Éch.	162.24	cm^2	Vol. burette base	8468	cm^3
			a_{in}	41.874	cm^2
			a_{out}	41.901	cm^2

Essai 1 – Charge variable

Température (°C)	25.3			
Temps (s)	**Entrée (mL)**	**Sortie (mL)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**
0	19423	9168.6	42.353111	0
60	19416.7	9162.3	42.2782555	0.001768979
120	19413.3	9158.9	42.2314708	0.002876182
180	19410	9155.6	42.1846861	0.003984612
240	19407.7	9153.3	42.145099	0.004923475
300	19403.5	9149.1	42.0911167	0.006205165
360	19400.2	9145.8	42.0436122	0.007334412
420	19396.6	9142.2	41.995388	0.008482076
480	19393.3	9138.9	41.9478835	0.009613899
540	19390	9135.6	41.9018186	0.010712649
600	19386.8	9132.4	41.8550339	0.011829804
660	19383.4	9129	41.8068096	0.012982641
720	19380.2	9125.8	41.7614644	0.014067866
780	19377.9	9123.5	41.7225972	0.014998997
840	19374.5	9120.1	41.6750927	0.016138225
900	19371.2	9116.8	41.6268685	0.017296042
960	19368.2	9113.8	41.5836826	0.018334033
1020	19365	9110.6	41.5376176	0.019442411
1080	19361.8	9107.4	41.4922725	0.020534673
1140	19358.7	9104.3	41.4462075	0.021645495
1200	19356.2	9101.8	41.4051809	0.022635861
1260	19352.6	9098.2	41.3555172	0.023836038
1320	19350.1	9095.7	41.3166499	0.024776313
1380	19346.9	9092.5	41.2698652	0.0259093
1440	19343.4	9089	41.2230805	0.027043572
1500	19340.2	9085.8	41.1777353	0.028144172
1560	19336.8	9082.4	41.1309506	0.029280983
1620	19333.7	9079.3	41.0841659	0.030419088
1680	19330.6	9076.2	41.0402603	0.031488335
1740	19327.4	9073	40.9963546	0.032558726
1800	19324.4	9070	40.9495699	0.033700569

Tableau E.8: Résultats de l'essai à charge variable colonne 1 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable				
	Température (°C)	25.3		
Temps (s)	**Entrée (mL)**	**Sortie (mL)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**
0	19451.1	9196.7	39.5294743	0
60	19447.1	9192.7	39.4790908	0.001275394
120	19443.9	9189.5	39.4337456	0.002424641
180	19441	9186.6	39.3912795	0.003502119
240	19437.7	9183.3	39.3459343	0.00465393
300	19434.6	9180.2	39.2991496	0.005843698
360	19431.4	9177	39.2516451	0.007053221
420	19428.4	9174	39.2077395	0.008172415
480	19425.3	9170.9	39.1645536	0.009274485
540	19422.5	9168.1	39.1242468	0.010304181
600	19419.5	9165.1	39.0789016	0.011463857
660	19416.8	9162.4	39.0393146	0.012477374
720	19413.7	9159.3	38.9918101	0.013694952
780	19410.7	9156.3	38.9479045	0.014821608
840	19407.8	9153.4	38.9054383	0.015912534
900	19404.7	9150.3	38.8593734	0.017097259
960	19401.6	9147.2	38.8154678	0.018227757
1020	19398.8	9144.4	38.7737214	0.019303844
1080	19395.9	9141.5	38.7312553	0.020399674
1140	19392.8	9138.4	38.6887892	0.021496705
1200	19389.8	9135.4	38.643444	0.022669442
1260	19387.2	9132.8	38.6024174	0.023731676
1320	19384.1	9129.7	38.5585118	0.024869704
1380	19381.1	9126.7	38.5146061	0.026009029
1440	19378.7	9124.3	38.4764586	0.026999988
1500	19375.7	9121.3	38.4303937	0.02819793

Essai 1		Essai 2	
k_{sat} (cm/s)	2.42E-04	k_{sat} (cm/s)	2.48E-04
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	2.15E-04	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	2.21E-04
Essai 3*			
k_{sat} (cm/s)	2.91E-04		
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	2.66E-04		

Tableau E.9 : Résultats de l'essai à charge variable colonne 2 (début)

Date	18-09-2015		Échantillon	**Colonne 2**	
Longueur Éch.	102.88	cm	Vol. burette tête	8468	cm^3
Aire Éch.	162.24	cm^2	Vol. burette base	8468	cm^3
			a_{in}	41.784	cm^2
			a_{out}	41.901	cm^2
Essai 1 – Charge variable					
Température (°C)	25.3				
Temps (s)	**Entrée (mL)**	**Sortie (mL)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**	
0	19821.6	9567.2	37.5933074	0	
60	19804.9	9550.5	37.3644222	0.006107065	
120	19787	9532.6	37.1074663	0.013007843	
180	19770	9515.6	36.8577079	0.019761273	
240	19752.9	9498.5	36.6086694	0.02654096	
300	19735.9	9481.5	36.3639494	0.033248157	
360	19719	9464.6	36.1177899	0.040040502	
420	19702.1	9447.7	35.8737897	0.046819104	
480	19685.7	9431.3	35.6355476	0.053482373	
540	19669	9414.6	35.3937066	0.060292014	
600	19653.4	9399	35.1641017	0.066800315	
660	19636.4	9382	34.9229806	0.073680958	
720	19621.3	9366.9	34.698414	0.08013206	
780	19605.2	9350.8	34.4666498	0.086833856	
840	19588	9333.6	34.2269681	0.093812164	
900	19573.4	9319	34.0052806	0.100310214	
960	19558	9303.6	33.7857524	0.106786852	
1020	19543.2	9288.8	33.5640649	0.113370042	
1080	19528	9273.6	33.346696	0.119867343	
1140	19512.8	9258.4	33.1271678	0.126472315	
1200	19498	9243.6	32.9119581	0.132989979	
1260	19483	9228.6	32.6924299	0.139682489	
1320	19468.7	9214.3	32.4836982	0.146087671	
1380	19454.2	9199.8	32.2742467	0.152556444	
1440	19440.1	9185.7	32.0662347	0.159022442	
1500	19426	9171.6	31.860382	0.165462745	
1560	19411.6	9157.2	31.65237	0.172013012	
1620	19397.3	9142.9	31.4486766	0.178469136	
1680	19382.1	9127.7	31.2370658	0.185220643	
1740	19370	9115.6	31.0484875	0.191275945	
1800	19356.5	9102.1	30.8527115	0.1976014	

Tableau E.9 : Résultats de l'essai à charge variable colonne 2 (suite)

Temps (s)	Entrée (mL)	Sortie (mL)	ΔH (cm)	ln(Δh0/Δh)
1860	19343.8	9089.4	30.6619739	0.203802789
1920	19329	9074.6	30.4575607	0.210491777
1980	19316.2	9061.8	30.2675428	0.216750095
2040	19303	9048.6	30.0768052	0.223071756
2100	19290.2	9035.8	29.8896664	0.229313224
2160	19277	9022.6	29.6974892	0.235763535
2220	19264	9009.6	29.5125097	0.242011808
2280	19251.8	8997.4	29.3304093	0.248201203
2340	19239.1	8984.7	29.1483088	0.254429145
2400	19226	8971.6	28.96117	0.260870072
2460	19214.5	8960.1	28.786987	0.266902596
2520	19202.1	8947.7	28.6070458	0.273172995
2580	19189	8934.6	28.4249453	0.279558923
2640	19177.8	8923.4	28.2543611	0.285578218
2700	19167.8	8913.4	28.0967327	0.291172745

Essai 2 – Charge variable

	Température (°C)	25.3		
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**
0	1068.4	1042.1	26.3	0
60	1067.9	1041.5	26.4	-0.003795071
120	1068.6	1042	26.6	-0.011342277
180	1067.9	1041.7	26.2	0.003809528
240	1067.7	1041.8	25.9	0.01532597
300	1067.9	1042.1	25.8	0.019194447
360	1067.9	1042.2	25.7	0.023077947
420	1067.9	1042.4	25.5	0.030890487
480	1067.3	1042.7	24.6	0.066822496
540	1067.5	1042.6	24.9	0.054701136
600	1067.3	1042.5	24.8	0.058725286
660	1067.3	1042.7	24.6	0.066822496
720	1066.6	1042.8	23.8	0.099883359
780	1066.9	1043	23.9	0.09569048
840	1067.1	1042.9	24.2	0.083216306
900	1066.6	1043.1	23.5	0.112568518
960	1066.5	1043.3	23.2	0.125416661
1020	1066.5	1043.5	23	0.134074723
1080	1066.2	1043.4	22.8	0.142808403
1140	1066.6	1043.5	23.1	0.129736322
1200	1065.9	1043.8	22.1	0.173991331
1260	1065.9	1043.5	22.4	0.16050798

Tableau E.9 : Résultats de l'essai à charge variable colonne 2 (suite et fin)

Essai 2 – Charge variable				
Temps (s)	**Entrée (cm)**	**Sortie (cm)**	**ΔH (cm)**	**ln(Δh0/Δh)**
1320	1065.8	1043.8	22	0.178526486
1380	1065.5	1043.8	21.7	0.192256679
1440	1064	1043.9	20.1	0.268849124
1500	1065.1	1044	21.1	0.220295899
1560	1065.6	1044	21.6	0.196875624
1620	1065.5	1044.4	21.1	0.220295899
1680	1065.1	1044.3	20.8	0.234615952
1740	1063.8	1044.7	19.1	0.319880604
1800	1065.1	1044.7	20.4	0.254034038
1860	1064.9	1044.5	20.4	0.254034038
1920	1063.8	1044.6	19.2	0.31465866
1980	1064.7	1044.8	19.9	0.278849207
2040	1064.2	1044.9	19.3	0.309463843
2100	1064.2	1044.9	19.3	0.309463843
2160	1062.7	1045.1	17.6	0.401670037
2220	1064.2	1045.3	18.9	0.330407017
2280	1062.7	1045.1	17.6	0.401670037
2340	1063.8	1045.3	18.5	0.351798207
2400	1062.7	1045.2	17.5	0.407368058
2460	1063.6	1045.1	18.5	0.351798207
2520	1063.6	1045.3	18.3	0.362667879
2580	1063	1045.3	17.7	0.3960043
2640	1063.6	1045.1	18.5	0.351798207
2700	1062.3	1045.3	17	0.436355595

Essai 1		Essai 2	
k_{sat} (cm/s)	1.44E-03	k_{sat} (cm/s)	2.20E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	1.28E-03	**k_{sat} à 20ºC (cm/s)**	1.95E-03

Essai 3*	
k_{sat} (cm/s)	2.57E-03
k_{sat} à 20ºC (cm/s)	2.29E-03

ANNEXE F – RÉSULTATS ESSAIS DES ESSAIS EN CELLULE TEMPE

Tableau F.1 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-1*

Succion (cm)	Volume sortie (mL)	Masse d'eau (g)	Teneur en eau massique (%)	Teneur en eau massique ajustée après essai (%)	Teneur en eau volumique (-)	Teneur en eau volumique après essai (-)
8.1	0.0	37.6	19.0%	20.8%	0.34	0.37
28.0	0.5	37.1	18.8%	20.6%	0.33	0.36
32.0	0.0	37.1	18.8%	20.6%	0.33	0.36
35.5	1.2	35.9	18.2%	20.0%	0.32	0.35
38.5	2.8	33.1	16.7%	18.6%	0.30	0.33
43.5	0.2	32.9	16.6%	18.5%	0.29	0.33
48.0	0.0	32.9	16.6%	18.5%	0.29	0.33
51.5	0.8	32.1	16.2%	18.1%	0.29	0.32
58.0	0.0	32.1	16.2%	18.1%	0.29	0.32
65.5	1.2	30.9	15.6%	17.5%	0.28	0.31
71.5	0.0	30.9	15.6%	17.5%	0.28	0.31
75.5	19.0	11.9	6.0%	7.9%	0.11	0.14
84.0	4.4	7.5	3.8%	5.6%	0.07	0.10
155.0	4.7	2.8	1.4%	3.3%	0.03	0.06
200.0	0.8	2.0	1.0%	2.9%	0.02	0.05
300.0	0.6	1.4	0.7%	2.6%	0.01	0.05
450.0	0.4	1.0	0.5%	2.3%	0.01	0.04

Tableau F.2 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-2*

Succion (cm)	**Volume sortie (mL)**	**Masse d'eau (g)**	**Teneur en eau massique (%)**	**Teneur en eau massique ajustée après essai (%)**	**Teneur en eau volumique (-)**	**Teneur en eau volumique après essai (-)**
9.5	0.0	41.1	21.1%	10.0%	0.37	0.17
20.3	0.0	41.1	21.1%	10.0%	0.37	0.17
25.3	0.1	41.0	21.1%	10.0%	0.37	0.17
29.6	0.0	41.0	21.1%	10.0%	0.37	0.17
32.6	0.0	41.0	21.1%	10.0%	0.37	0.17
36.3	0.0	41.0	21.1%	10.0%	0.37	0.17
37.8	1.0	40.0	20.6%	9.5%	0.36	0.16
39.5	0.0	40.0	20.6%	9.5%	0.36	0.16
41.1	0.0	40.0	20.6%	9.5%	0.36	0.16
43.6	0.4	39.6	20.3%	9.3%	0.35	0.16
48.6	5.8	33.8	17.4%	6.3%	0.30	0.11
51.6	0.0	33.8	17.4%	6.3%	0.30	0.11
56.6	0.6	33.2	17.1%	6.0%	0.30	0.10
62.1	1.4	31.8	16.3%	5.3%	0.28	0.09
65.6	0.2	31.6	16.2%	5.2%	0.28	0.09
70.5	0.6	31.0	15.9%	4.8%	0.28	0.08
80.5	1.2	29.8	15.3%	4.2%	0.27	0.07
150.0	2.4	27.4	14.1%	3.0%	0.24	0.05
200.0	0.9	26.5	13.6%	2.5%	0.24	0.04
300.0	0.7	25.8	13.3%	2.2%	0.23	0.04
450.0	0.4	25.4	13.1%	2.0%	0.23	0.03

Figure F.1 : Courbe de rétention d'eau obtenue en cellule de pression (Échantillon HSP-2) et CRE estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003)

Tableau F.3 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-3*

Succion (cm)	**Volume sortie (mL)**	**Masse d'eau (g)**	**Teneur en eau massique (%)**	**Teneur en eau massique ajustée après essai (%)**	**Teneur en eau volumique (-)**	**Teneur en eau volumique après essai (-)**
3.5	34.3	5.0	34.1	17.1%	17.3%	0.31
5.5	54.0	16.3	17.8	8.9%	9.1%	0.16
8.0	78.5	8.5	9.3	4.7%	4.9%	0.08
10.0	98.1	1.9	7.4	3.7%	3.9%	0.07
12.0	117.7	0.9	6.5	3.3%	3.5%	0.06
14.6	143.2	0.8	5.7	2.9%	3.1%	0.05
18.0	176.6	0.5	5.2	2.6%	2.8%	0.05
25.2	247.2	0.9	4.3	2.2%	2.4%	0.04
30.2	296.3	0.1	4.2	2.1%	2.3%	0.04
45.0	441.5	0.6	3.6	1.8%	2.0%	0.03
59.9	587.6	0.1	3.5	1.8%	2.0%	0.03
80.1	785.8	0.6	2.9	1.5%	1.7%	0.03

Tableau F.4 : Résultats cellule Tempe échantillon *HSP-4*

Succion (cm)	**Volume sortie (mL)**	**Masse d'eau (g)**	**Teneur en eau massique (%)**	**Teneur en eau massique ajustée après essai (%)**	**Teneur en eau volumique (-)**	**Teneur en eau volumique après essai (-)**
3.2	31	3.9	37.4	19.2%	19.5%	0.33
5.6	55	19.7	17.7	9.1%	9.4%	0.16
8.1	79	7.1	10.6	5.4%	5.7%	0.09
10.5	103	2.4	8.2	4.2%	4.5%	0.07
13.2	129	1.4	6.8	3.5%	3.8%	0.06
15.3	150	0.1	6.7	3.4%	3.7%	0.06
20.0	196	1.5	5.2	2.6%	2.9%	0.05
30.2	296	1.0	4.2	2.1%	2.4%	0.04
45.0	441	0.9	3.3	1.7%	2.0%	0.03
59.9	588	0.2	3.1	1.6%	1.9%	0.03
80	785	0.6	2.5	1.3%	1.6%	0.02

ANNEXE G – RÉSULTATS DE DENSITÉ IN SITU

G.1 Résultats avec le nucléodensimètre :

Tableau G.1 : Résultats du nucléodensimètre avant les essais d'infiltration (Campagne du 24 mai – 11 juin 2016)

Lys.	**Méthode**	**Masse volumique sec ρ_d (kg/m^3)**			**Teneur en eau massique W(%)**			**Indice des vides e(-)**		**Porosité n(-)**		**Teneur en eau volumique Θ (-)**	
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 1	Essai 2	Essai 3	min	max	min	max	min	max
1	SA (r=15cm)	1948	1936	-	7.3	7.8	-	0.38	0.38	0.27	0.28	0.14	0.15
	SA (r=30cm)	1948	1968	-	3.4	3.1	-	0.36	0.38	0.27	0.27	0.06	0.07
	PG	1908	1926	-	4.1	3.9	-	0.39	0.40	0.28	0.29	0.08	0.08
2	SA (r=15cm)	1960	1963	-	3.8	3.7	-	0.37	0.37	0.27	0.27	0.07	0.07
	SA (r=30cm)	1937	1945	-	4.8	4.7	-	0.38	0.38	0.27	0.28	0.09	0.09
	PG	1975	1973	-	4.6	4.6	-	0.36	0.36	0.26	0.26	0.09	0.09
3	SA (r=15cm)	1932	1937	-	3.7	4	-	0.38	0.39	0.28	0.28	0.07	0.08
	PG	1870	1867	-	5.5	5.5	-	0.43	0.44	0.30	0.30	0.10	0.10
	DA	1832	1841	-	5.1	4.7	-	0.46	0.46	0.31	0.32	0.09	0.09
4	SA (r=15cm)	1958	1961	-	3.9	3.9	-	0.37	0.37	0.27	0.27	0.08	0.08
	PG	1919	1926	-	4.3	4.2	-	0.39	0.40	0.28	0.28	0.08	0.08
	DA	1974	1926	1999	5	5.1	4.3	0.34	0.39	0.25	0.28	0.09	0.10
5	SA (r=30cm)	1907	1908	-	4.8	4.8	-	0.40	0.41	0.29	0.29	0.09	0.09
	PG	1925	1930	-	6.7	6.4	-	0.39	0.39	0.28	0.28	0.12	0.13
	DA	1849	1825	1836	5.5	6.1	5.8	0.45	0.47	0.31	0.32	0.01	0.11
6	SA (r=15cm)	1803	1821	-	6.7	5.9	-	0.47	0.49	0.32	0.33	0.11	0.12
	SA (r=30cm)	1808	1800	-	8.6	9.1	-	0.48	0.49	0.33	0.33	0.16	0.16
	PG	1864	1857	-	3.3	3.3	-	0.44	0.44	0.30	0.31	0.06	0.06

SA= simple anneau; PG= perméamètre de Guelph; DA=double anneau

Tableau G.2 : Résultats du nucléodensimètre après les essais d'infiltration (Campagne du 24 mai – 11 juin 2016)

Lys.	**Méthode**	**Masse volumique sec ρ_d (kg/m^3)**		**Teneur en eau massique W(%)**		**Indice des vides e(-)**		**Porosité n(-)**		**Teneur en eau volumique Θ(-)**	
		Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	min	max	min	max	min	max
1	SA (r=15cm)	1900	1882	7.6	8	0.41	0.42	0.29	0.30	0.14	0.15
	PG	1948	1955	5.1	4.8	0.37	0.38	0.27	0.27	0.09	0.10
2	SA (r=15cm)	1911	1913	4.8	4.7	0.40	0.40	0.29	0.29	0.09	0.09
	SA (r=30cm)	1931	1930	4.8	5.2	0.39	0.39	0.28	0.28	0.09	0.10
	PG	1967	1967	4.2	4.4	0.36	0.36	0.27	0.27	0.08	0.09
3	SA (r=15cm)	1922	1925	4.7	4.4	0.39	0.39	0.28	0.28	0.08	0.09
	PG	1866	1871	4.6	4.6	0.43	0.44	0.30	0.30	0.09	0.09
	DA	1878	1880	6.6	7	0.43	0.43	0.30	0.30	0.12	0.13
4	SA (r=15cm)	1892	1884	4.2	4.6	0.42	0.42	0.29	0.30	0.08	0.09
	PG	1896	1891	3.6	3.3	0.41	0.42	0.29	0.29	0.06	0.07
	DA	1884	1900	6.4	6.1	0.41	0.42	0.29	0.30	0.12	0.12
5	SA (r=30cm)	1815	1804	8.4	8.9	0.48	0.49	0.32	0.33	0.15	0.16
	PG	1910	1905	7	6.8	0.40	0.41	0.29	0.29	0.13	0.13
	DA	1886	1896	4.4	4.3	0.41	0.42	0.29	0.30	0.08	0.08
6	SA (r=15cm)	1792	1807	6.8	6.3	0.48	0.50	0.33	0.33	0.11	0.12
	SA (r=30cm)	1780	1792	11.2	10.7	0.50	0.51	0.33	0.34	0.19	0.20
	PG	1855	1851	4.1	4.2	0.44	0.45	0.31	0.31	0.08	0.08

SA= simple anneau; PG= perméamètre de Guelph; DA=double anneau

Tableau G.3 : Résultats du nucléodensimètre avant les essais d'infiltration (Campagne du 11 septembre - 2 octobre 2016)

Lys.	**Prof. (cm)**	**Méthode**	**Masse volumique sec ρ_d (kg/m^3)**			**Teneur en eau massique W(%)**			**Indice des vides e(-)**		**Porosité n(-)**		**Teneur en eau volumique Θ (-)**	
			Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 1	Essai 2	Essai 3	min	max	min	max	min	max
3	Z=0	DA	1883	1846	-	3.7	4.1	-	0.42	0.45	0.30	0.31	0.07	0.08
		PG	1981	1867	-	3.8	3.6	-	0.35	0.44	0.26	0.30	0.07	0.08
3	Z=30	SA (r=15cm)	1891	1874	-	8.8	7.9	-	0.42	0.43	0.29	0.30	0.07	0.15
		DA	1817	1750	1792	5.6	6.8	6.4	0.47	0.53	0.32	0.35	0.10	0.12
		PG	1815	1807	-	7.2	6.4	-	0.48	0.48	0.32	0.33	0.12	0.13
4	Z=0	DA	1893	1960	-	4.0	3.9	-	0.37	0.42	0.27	0.29	0.08	0.08
		PG	1867	1914	-	4.4	2.4	-	0.40	0.44	0.29	0.30	0.05	0.08
4	Z=30	SA (r=30cm)	1810	1852	-	8.5	8.1	-	0.45	0.48	0.31	0.32	0.15	0.15
		PG	1809	1797	1861	6.2	7.2	5.8	0.44	0.49	0.31	0.33	0.11	0.13
		DA	1753	1772	-	5.9	6.7	-	0.51	0.53	0.34	0.35	0.10	0.12
		DA -2	1864	1841	-	5.9	5.9	-	0.44	0.46	0.30	0.31	0.11	0.11

SA= simple anneau; PG= perméamètre de Guelph; DA=double anneau

Tableau G.4 : Résultats du nucléodensimètre après les essais d'infiltration (Campagne du 11 septembre - 2 octobre 2016)

Lys.	**Prof. (cm)**	**Méthode**	**Masse volumique sec ρ_d (kg/m^3)**			**Teneur en eau massique W(%)**			**Indice des vides e(-)**		**Porosité n(-)**		**Teneur en eau volumique Ɵ(-)**	
			Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 1	Essai 2	Essai 3	min	max	min	max	min	max
3	Z=0	DA	1946	1889	1893	8.7	6.4	7.7	0.38	0.42	0.27	0.30	0.12	0.17
		PG	1973	1984	-	3.7	3.3	-	0.35	0.36	0.26	0.26	0.07	0.07
3	Z=30	SA (r=15cm)	1865	1849	-	9.0	9.1	-	0.44	0.45	0.30	0.31	0.17	0.17
		DA	1823	1879	-	7.8	7.2	-	0.43	0.47	0.30	0.32	0.14	0.14
4	Z=0	DA	1952	1918	-	7.2	7.4	-	0.37	0.40	0.27	0.28	0.14	0.14
		PG	1957	1899	-	4.0	3.8	-	0.37	0.41	0.27	0.29	0.07	0.08
4	Z=30	SA (r=30cm)	1865	1733	-	8.5	9.0	-	0.44	0.55	0.30	0.35	0.16	0.16
		PG	1827	1861	-	5.6	5.8	-	0.44	0.47	0.31	0.32	0.10	0.11
		DA	1792	1781	1820	6.9	9.6	6.7	0.47	0.50	0.32	0.34	0.12	0.17
		DA -2	1860	1791	-	7.6	7.2	-	0.44	0.50	0.31	0.33	0.13	0.14

SA= simple anneau; PG= perméamètre de Guelph; DA=double anneau

G.2 Résultats de densité avec l'anneau avant les essais d'infiltration:

Tableau G.5 : Résultats de densité à l'anneau avant les essais d'infiltration

Lys.	Échantillons	#Tare	Masse tare (g)	Masse h+tare (g)	Masse s+tare (g)	Teneur en eau massique W(%)	Poids vol. sec (kg/m^3)	Indice des vides e(-)	Porosité n(-)	Teneur en eau volumique θ (-)
1	Lys. 1 - SA15	V1	228.1	445.5	427.7	8.9%	1779	0.51	0.34	0.16
2	Lys. 2 - SA15	V4	150.7	357.1	346.8	5.3%	1748	0.533	0.35	0.09
	Lys. 2 - SA30	120	131.3	340	328.6	5.8%	1758	0.524	0.34	0.10
3	Lys. 3 - SA15	103	122.3	325	315.7	4.8%	1724	0.55	0.36	0.08
	Lys. 3-DA-2	126	105.4	314.1	302.8	5.7%	1759	0.52	0.34	0.10
	Lys. 3-DA-Z30	19	153	361.6	346.9	7.6%	1728	0.55	0.36	0.13
	Lys. 3-SA15-Z30	62	321.2	540.7	517.9	11.6%	1753	0.53	0.35	0.20
4	Lys. 4 - SA15	19	152.9	358.8	349	5.0%	1748	0.53	0.35	0.09
	Lys. 4 - DA	116-A	127.5	325.2	314.6	5.7%	1668	0.61	0.38	0.09
	Lys. 4-DA-Z30	109	134.1	338.1	325.3	6.7%	1704	0.57	0.36	0.11
	Lys. 4-DA-2	103	122.4	318.3	307.2	6.0%	1647	0.63	0.39	0.10
	Lys. 4 DA2-Z30	P5	150.5	359.4	345.5	7.1%	1738	0.54	0.35	0.12
	Lys. 4-SA30-Z30	64	318.2	533	514.1	9.6%	1746	0.53	0.35	0.17
5	Lys. 5 - SA30	63	315.4	523.1	512.3	5.5%	1755	0.53	0.35	0.10
	Lys. 5 - DA	115	125.2	331.8	323.3	4.3%	1766	0.52	0.34	0.08
6	Lys. 6 -SA15	66	328.8	529.7	519.8	5.2%	1702	0.57	0.36	0.09

ANNEXE H – RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFILTRATION

Tableau H.1 : Résultats des essais d'infiltration à une profondeur Z=0 cm

Profondeur Z=0cm

Simple anneau (r=15 cm)

No.	θ_i	e (-)	barre erreur e (-)	k_{sat} num cm/s	k_{fs} médian cm/s	barre erreur k_{fs} médian cm/s
1	0.14	0.4	0.02	4.0E-04	9.6E-04	3.3E-04
2	0.07	0.38	0.02	5.5E-04	1.1E-03	
3	0.07	0.39	0.01	4.0E-04	9.3E-04	4.7E-04
4	0.08	0.39	0.02	4.5E-04	8.5E-04	1.1E-04
5	0.11	0.48	0.02	7.0E-04	1.8E-03	7.8E-04

Simple anneau r=30cm

No.	θ_i	e (-)	barre erreur e (-)	k_{sat} num cm/s	k_{fs} médian cm/s	barre erreur k_{fs} médian cm/s
1	0.06	0.37	0.01	4.5E-04	1.2E-03	2.5E-04
2	0.09	0.38	0.01	3.0E-04	6.7E-04	3.4E-04
3	0.09	0.44	0.05	2.5E-04	5.8E-04	8.6E-05
4	0.16	0.485	0.02	5.5E-04	1.0E-03	1.2E-04

Perméamètre de Guelph

No.	θ_i	e (-)	barre erreur e (-)	k_{sat} num cm/s	k_{fs} médian cm/s	barre erreur k_{fs} médian cm/s
1	0.08	0.39	0.02	2.0E-04	2.1E-04	4.7E-05
2	0.09	0.36		3.5E-04	6.5E-04	8.3E-05
3	0.1	0.435	0.01	3.0E-04	5.4E-04	7.4E-05
4	0.1	0.435	0.01	2.0E-04	5.1E-04	4.8E-05
5	0.08	0.395	0.02	2.0E-04	6.2E-04	8.5E-05
6	0.12	0.44	0.01	2.0E-04	6.5E-04	1.3E-04
7	0.06	0.44	0.01	1.2E-03	2.2E-03	2.0E-04
8	0.07	0.39	0.04	1.5E-04	2.5E-04	2.5E-05
9	0.08	0.42	0.02	3.0E-04	7.9E-04	1.1E-04
10	0.08	0.395	0.02	1.2E-04	5.9E-04	1.5E-04
11	0.12	0.44	0.01	2.8E-04	6.1E-04	3.8E-05

Double anneau (externe)

No.	θ_i	e (-)	barre erreur e (-)	k_{sat} num cm/s	k_{fs} médian cm/s	barre erreur k_{fs} médian cm/s
1	0.09	0.44	0.02	5.0E-04	1.4E-03	6.2E-04
2	0.1	0.38	0.04	3.5E-04	7.1E-04	3.7E-05
3	0.07	0.44	0.02		7.0E-04	2.5E-04
4	0.08	0.39	0.03		1.1E-03	6.3E-04

Double anneau (interne)

No.	θ_i	e (-)	barre erreur e (-)	k_{sat} num cm/s	k_{fs} médian cm/s	barre erreur k_{fs} médian cm/s
1	0.07	0.44	0.02	1.0E-04	3.4E-04	1.7E-04
2	0.08	0.39	0.03	2.0E-04	6.1E-04	2.6E-04
3	0.1	0.38	0.04	3.5E-04	2.9E-04	1.3E-04

Tableau H.2 : Résultats des essais d'infiltration à une profondeur Z=30 cm

Profondeur Z=30 cm

Simple anneau (r=15 cm) - Z30

No.	θ_i	e	barre erreur e	k_{sat} num	k_{fs} médian	barre erreur k_{fs} médian
		(-)	(-)	cm/s	cm/s	cm/s
1	0.16	0.42	0.01	5.5E-04	1.1E-03	1.8E-04

Simple anneau (r=30 cm) - Z30

No.	θ_i	e	barre erreur e	k_{sat} num	k_{fs} médian	barre erreur k_{fs} médian
		(-)	(-)	cm/s	cm/s	cm/s
1	0.15	0.46	0.02	4.5E-04	7.0E-04	2.0E-04

Perméamètre de Guelph - Z30

No.	θ_i	e	barre erreur e	k_{sat} num	k_{fs} médian	barre erreur k_{fs} médian
		(-)	(-)	cm/s	cm/s	cm/s
1	0.09	0.48	0	7.0E-04	2.0E-03	1.5E-04
2	0.12	0.47	0.02	4.5E-04	1.4E-03	1.4E-04

Double anneau (interne) - Z30

No.	θ_i	e	barre erreur e	k_{sat} num	k_{fs} médian	barre erreur k_{fs} médian
		(-)	(-)	cm/s	cm/s	cm/s
1	0.11	0.49	0.03	3.5E-04	4.38E-04	8.8E-05
2	0.11	0.52	0.01	3.5E-04	5.12E-04	3.4E-04
3	0.11	0.45	0.01	3.5E-04	7.97E-04	2.2E-04

Double anneau (externe)-Z30

No.	θ_i	e	barre erreur e	k_{sat} num	k_{fs} médian	barre erreur k_{fs} médian
		(-)	(-)	cm/s	cm/s	cm/s
1	0.11	0.49	0.03	-	7.62E-04	1.0E-04
2	0.11	0.52	0.01	-	1.12E-03	4.2E-04
3	0.11	0.45	0.01	-	1.22E-03	1.3E-04

ANNEXE I – RÉSULTATS DES ANALYSES NUMÉRIQUES

I1. Profils de degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation

Figure I.1 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 1L

Figure I.2: Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 3L

Figure I.3 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 30 cm, précipitation de 5L

Figure I.4 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 1L

Figure I.5 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 3L

Figure I.6 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 5L

Figure I.7 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 40 cm, précipitation de 7L

Figure I.8 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 1L

Figure I.9 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 3L

Figure I.10 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 5L

Figure I.11 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 50 cm, précipitation de 7L

Figure I.12 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L

Figure I.13 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L

Figure I.14 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,38; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L

Figure I.15 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L

Figure I.16 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L

Figure I.17 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L

Figure I.18 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,42; épaisseur de 60 cm, précipitation de 7L

Figure I.19 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L

Figure I.20 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L

Figure I.21 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L

Figure I.22 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,45; épaisseur de 60 cm, précipitation de 7L

Figure I.23 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 1L

Figure I.24 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 3L

Figure I.25 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 30 cm, précipitation de 5L

Figure I.26 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 1L

Figure I.27 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 3L

Figure I.28 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 5L

Figure I.29 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 40 cm, précipitation de 7L

Figure I.30 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 1L

Figure I.31 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 3L

Figure I.32 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 5L

Figure I.33 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 50 cm, précipitation de 7L

Figure I.34 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 1L

Figure I.35 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 3L

Figure I.36 : Profil du degré de saturation et de succion en fonction de l'élévation pour e=0,49; épaisseur de 60 cm, précipitation de 5L

I.2. CRE en mouillage approximée avec la méthode de Maqsoud et al. (2012)

Figure I.37 : Courbe de rétention d'eau en mouillage (CRE wet) estimée avec la méthode de Maqsoud et al. (2012) comparée à la CRE en drainage pour un e=0,44

Figure I.38 : Courbe de rétention d'eau en mouillage (CRE wet) estimée avec la méthode de Maqsoud et al. (2012) comparée à la CRE en drainage pour un e=0,42

I3. Données détaillées du taux d'infiltration en fonction de la distance à l'interface sable-stérile et l'indice des vides

Tableau I.1 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 45 cm de l'interface (début)

	45 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
0	0	0	0	0
60	1.65E-06	2.23E-06	2.92E-06	2.82E-06
120	1.31E-06	1.36E-06	1.96E-06	2.20E-06
180	7.03E-07	1.21E-06	1.62E-06	1.65E-06
240	7.59E-07	1.11E-06	1.39E-06	1.54E-06
300	7.68E-07	9.21E-07	1.31E-06	1.43E-06
360	7.15E-07	8.52E-07	1.16E-06	1.24E-06
420	5.88E-07	8.30E-07	1.08E-06	1.20E-06
480	5.14E-07	7.94E-07	1.05E-06	1.15E-06
540	5.20E-07	7.29E-07	9.83E-07	1.06E-06
600	5.27E-07	6.76E-07	9.20E-07	1.00E-06
660	5.21E-07	6.56E-07	8.91E-07	9.89E-07
720	4.99E-07	6.45E-07	8.70E-07	9.63E-07
780	4.61E-07	6.29E-07	8.39E-07	9.13E-07
840	4.23E-07	6.04E-07	8.02E-07	8.74E-07
900	4.09E-07	5.73E-07	7.77E-07	8.59E-07
960	4.08E-07	5.52E-07	7.63E-07	8.49E-07
1020	4.09E-07	5.41E-07	7.50E-07	8.31E-07
1080	4.06E-07	5.34E-07	7.34E-07	8.06E-07
1140	3.99E-07	5.27E-07	7.15E-07	7.87E-07
1200	3.86E-07	5.16E-07	7.00E-07	7.77E-07
1260	3.69E-07	5.02E-07	6.91E-07	7.71E-07
1320	3.54E-07	4.86E-07	6.83E-07	7.63E-07
1380	3.44E-07	4.74E-07	6.75E-07	7.52E-07
1440	3.40E-07	4.66E-07	6.66E-07	7.40E-07
1500	3.39E-07	4.61E-07	6.56E-07	7.30E-07
1560	3.38E-07	4.57E-07	6.48E-07	7.24E-07
1620	3.36E-07	4.52E-07	6.41E-07	7.19E-07
1680	3.32E-07	4.46E-07	6.36E-07	7.14E-07
1740	3.27E-07	4.39E-07	6.31E-07	7.06E-07
1800	3.19E-07	4.32E-07	6.25E-07	6.99E-07
1860	3.10E-07	4.25E-07	6.19E-07	6.92E-07
1920	3.03E-07	4.20E-07	6.13E-07	6.86E-07

Tableau I.1 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 45 cm de l'interface (suite)

	45 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
1980	2.97E-07	4.16E-07	6.08E-07	6.81E-07
2040	2.94E-07	4.13E-07	6.04E-07	6.77E-07
2100	2.92E-07	4.11E-07	6.00E-07	6.72E-07
2160	2.91E-07	4.08E-07	5.96E-07	6.66E-07
2220	2.90E-07	4.05E-07	5.92E-07	6.61E-07
2280	2.89E-07	4.01E-07	5.87E-07	6.56E-07
2340	2.86E-07	3.97E-07	5.83E-07	6.52E-07
2400	2.84E-07	3.94E-07	5.79E-07	6.48E-07
2460	2.80E-07	3.90E-07	5.76E-07	6.44E-07
2520	2.76E-07	3.87E-07	5.72E-07	6.41E-07
2580	2.72E-07	3.85E-07	5.69E-07	6.37E-07
2640	2.69E-07	3.83E-07	5.66E-07	6.33E-07
2700	2.66E-07	3.81E-07	5.63E-07	6.30E-07
2760	2.65E-07	3.79E-07	5.60E-07	6.27E-07
2820	2.63E-07	3.77E-07	5.57E-07	6.24E-07
2880	2.62E-07	3.75E-07	5.55E-07	6.21E-07
2940	2.61E-07	3.73E-07	5.52E-07	6.19E-07
3000	2.61E-07	3.70E-07	5.50E-07	6.16E-07
3060	2.60E-07	3.68E-07	5.47E-07	6.14E-07
3120	2.58E-07	3.66E-07	5.45E-07	6.12E-07
3180	2.57E-07	3.64E-07	5.43E-07	6.09E-07
3240	2.55E-07	3.62E-07	5.41E-07	6.07E-07
3300	2.53E-07	3.61E-07	5.39E-07	6.05E-07
3360	2.51E-07	3.59E-07	5.37E-07	6.03E-07
3420	2.50E-07	3.58E-07	5.35E-07	6.02E-07
3480	2.48E-07	3.56E-07	5.33E-07	6.00E-07
3540	2.47E-07	3.55E-07	5.32E-07	5.98E-07
3600	2.46E-07	3.53E-07	5.30E-07	5.97E-07
4050	2.40E-07	3.42E-07	5.20E-07	5.87E-07
4500	2.32E-07	3.33E-07	5.12E-07	5.79E-07
4950	2.27E-07	3.26E-07	5.05E-07	5.73E-07
5400	2.21E-07	3.21E-07	5.00E-07	5.68E-07
5850	2.17E-07	3.16E-07	4.96E-07	5.64E-07
6300	2.13E-07	3.12E-07	4.92E-07	5.60E-07
6750	2.09E-07	3.09E-07	4.89E-07	5.57E-07
7200	2.06E-07	3.06E-07	4.86E-07	5.54E-07

Tableau I.1 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 45 cm de l'interface (suite et fin)

	45 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
7650	2.04E-07	3.03E-07	4.83E-07	5.51E-07
8100	2.02E-07	3.01E-07	4.81E-07	5.48E-07
8550	2.00E-07	2.99E-07	4.78E-07	5.45E-07
9000	1.98E-07	2.98E-07	4.76E-07	5.43E-07

Tableau I.2 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 35 cm de l'interface (début)

	35 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
0	0	0	0	0
60	1.61E-06	2.23E-06	2.91E-06	2.81E-06
120	1.22E-06	1.36E-06	1.96E-06	2.20E-06
180	6.94E-07	1.21E-06	1.61E-06	1.65E-06
240	7.64E-07	1.11E-06	1.39E-06	1.54E-06
300	7.63E-07	9.19E-07	1.31E-06	1.42E-06
360	7.00E-07	8.53E-07	1.15E-06	1.24E-06
420	5.70E-07	8.31E-07	1.08E-06	1.20E-06
480	5.12E-07	7.94E-07	1.05E-06	1.15E-06
540	5.22E-07	7.27E-07	9.82E-07	1.06E-06
600	5.27E-07	6.75E-07	9.20E-07	1.00E-06
660	5.18E-07	6.56E-07	8.92E-07	9.90E-07
720	4.93E-07	6.45E-07	8.71E-07	9.63E-07
780	4.53E-07	6.30E-07	8.38E-07	9.11E-07
840	4.19E-07	6.03E-07	8.01E-07	8.74E-07
900	4.08E-07	5.73E-07	7.77E-07	8.60E-07
960	4.08E-07	5.52E-07	7.63E-07	8.49E-07
1020	4.08E-07	5.41E-07	7.50E-07	8.31E-07
1080	4.05E-07	5.35E-07	7.33E-07	8.06E-07
1140	3.97E-07	5.27E-07	7.14E-07	7.87E-07
1200	3.83E-07	5.16E-07	7.00E-07	7.78E-07
1260	3.65E-07	5.01E-07	6.91E-07	7.71E-07
1320	3.51E-07	4.86E-07	6.83E-07	7.63E-07
1380	3.43E-07	4.74E-07	6.75E-07	7.51E-07

Tableau I.2 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 35 cm de l'interface (suite)

	35 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
1440	3.40E-07	4.66E-07	6.65E-07	7.39E-07
1500	3.39E-07	4.61E-07	6.56E-07	7.30E-07
1560	3.37E-07	4.57E-07	6.48E-07	7.25E-07
1620	3.35E-07	4.52E-07	6.42E-07	7.20E-07
1680	3.31E-07	4.46E-07	6.36E-07	7.14E-07
1740	3.25E-07	4.39E-07	6.31E-07	7.06E-07
1800	3.17E-07	4.31E-07	6.25E-07	6.98E-07
1860	3.08E-07	4.25E-07	6.19E-07	6.92E-07
1920	3.01E-07	4.20E-07	6.13E-07	6.86E-07
1980	2.96E-07	4.16E-07	6.08E-07	6.81E-07
2040	2.93E-07	4.14E-07	6.04E-07	6.77E-07
2100	2.92E-07	4.11E-07	6.00E-07	6.72E-07
2160	2.91E-07	4.08E-07	5.96E-07	6.66E-07
2220	2.89E-07	4.05E-07	5.91E-07	6.61E-07
2280	2.88E-07	4.01E-07	5.87E-07	6.56E-07
2340	2.86E-07	3.97E-07	5.83E-07	6.52E-07
2400	2.83E-07	3.93E-07	5.79E-07	6.48E-07
2460	2.79E-07	3.90E-07	5.76E-07	6.44E-07
2520	2.75E-07	3.87E-07	5.72E-07	6.41E-07
2580	2.71E-07	3.85E-07	5.69E-07	6.37E-07
2640	2.68E-07	3.83E-07	5.66E-07	6.33E-07
2700	2.66E-07	3.81E-07	5.63E-07	6.30E-07
2760	2.64E-07	3.79E-07	5.60E-07	6.27E-07
2820	2.63E-07	3.77E-07	5.57E-07	6.24E-07
2880	2.62E-07	3.75E-07	5.54E-07	6.21E-07
2940	2.61E-07	3.73E-07	5.52E-07	6.19E-07
3000	2.60E-07	3.70E-07	5.50E-07	6.16E-07
3060	2.59E-07	3.68E-07	5.47E-07	6.14E-07
3120	2.58E-07	3.66E-07	5.45E-07	6.11E-07
3180	2.56E-07	3.64E-07	5.43E-07	6.09E-07
3240	2.54E-07	3.62E-07	5.41E-07	6.07E-07
3300	2.52E-07	3.61E-07	5.39E-07	6.05E-07
3360	2.51E-07	3.59E-07	5.37E-07	6.03E-07
3420	2.49E-07	3.58E-07	5.35E-07	6.02E-07
3480	2.48E-07	3.56E-07	5.33E-07	6.00E-07
3540	2.46E-07	3.55E-07	5.32E-07	5.98E-07

Tableau I.2 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 35 cm de l'interface (suite et fin)

	35 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
3600	2.45E-07	3.53E-07	5.30E-07	5.97E-07
4050	2.39E-07	3.42E-07	5.20E-07	5.87E-07
4500	2.32E-07	3.33E-07	5.12E-07	5.79E-07
4950	2.26E-07	3.26E-07	5.05E-07	5.73E-07
5400	2.21E-07	3.21E-07	5.00E-07	5.68E-07
5850	2.16E-07	3.16E-07	4.96E-07	5.64E-07
6300	2.12E-07	3.12E-07	4.92E-07	5.60E-07
6750	2.09E-07	3.09E-07	4.89E-07	5.57E-07
7200	2.06E-07	3.06E-07	4.86E-07	5.53E-07
7650	2.03E-07	3.03E-07	4.83E-07	5.50E-07
8100	2.01E-07	3.01E-07	4.80E-07	5.44E-07
8550	1.99E-07	2.99E-07	4.75E-07	5.37E-07
9000	1.98E-07	2.98E-07	4.69E-07	5.29E-07

Tableau I.3 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 30 cm de l'interface (début)

	30 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
0	0	0	0	0
60	1.60E-06	2.22E-06	2.94E-06	2.84E-06
120	1.23E-06	1.36E-06	1.95E-06	2.19E-06
180	6.90E-07	1.21E-06	1.63E-06	1.67E-06
240	7.53E-07	1.11E-06	1.39E-06	1.53E-06
300	7.58E-07	9.26E-07	1.31E-06	1.43E-06
360	7.04E-07	8.49E-07	1.16E-06	1.24E-06
420	5.82E-07	8.27E-07	1.08E-06	1.19E-06
480	5.11E-07	7.94E-07	1.04E-06	1.15E-06
540	5.15E-07	7.33E-07	9.87E-07	1.06E-06
600	5.22E-07	6.77E-07	9.22E-07	1.00E-06
660	5.16E-07	6.54E-07	8.89E-07	9.86E-07
720	4.95E-07	6.42E-07	8.69E-07	9.64E-07
780	4.58E-07	6.28E-07	8.42E-07	9.18E-07

Tableau I.3 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 30 cm de l'interface (suite)

	30 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
840	4.23E-07	6.05E-07	8.05E-07	8.73E-07
900	4.06E-07	5.76E-07	7.76E-07	8.54E-07
960	4.04E-07	5.53E-07	7.60E-07	8.45E-07
1020	4.05E-07	5.40E-07	7.48E-07	8.32E-07
1080	4.03E-07	5.33E-07	7.35E-07	8.10E-07
1140	3.96E-07	5.26E-07	7.17E-07	7.88E-07
1200	3.84E-07	5.17E-07	7.01E-07	7.74E-07
1260	3.69E-07	5.04E-07	6.89E-07	7.67E-07
1320	3.53E-07	4.88E-07	6.81E-07	7.61E-07
1380	3.43E-07	4.74E-07	6.74E-07	7.53E-07
1440	3.38E-07	4.65E-07	6.67E-07	7.42E-07
1500	3.36E-07	4.59E-07	6.58E-07	7.31E-07
1560	3.35E-07	4.55E-07	6.49E-07	7.23E-07
1620	3.34E-07	4.51E-07	6.41E-07	7.17E-07
1680	3.31E-07	4.46E-07	6.35E-07	7.12E-07
1740	3.26E-07	4.40E-07	6.30E-07	7.07E-07
1800	3.19E-07	4.33E-07	6.25E-07	7.00E-07
1860	3.10E-07	4.26E-07	6.20E-07	6.93E-07
1920	3.02E-07	4.20E-07	6.14E-07	6.86E-07
1980	2.96E-07	4.15E-07	6.09E-07	6.80E-07
2040	2.92E-07	4.12E-07	6.04E-07	6.75E-07
2100	2.89E-07	4.09E-07	5.99E-07	6.71E-07
2160	2.88E-07	4.07E-07	5.95E-07	6.67E-07
2220	2.87E-07	4.04E-07	5.91E-07	6.62E-07
2280	2.86E-07	4.01E-07	5.87E-07	6.57E-07
2340	2.85E-07	3.98E-07	5.84E-07	6.52E-07
2400	2.83E-07	3.95E-07	5.80E-07	6.47E-07
2460	2.80E-07	3.91E-07	5.76E-07	6.44E-07
2520	2.77E-07	3.88E-07	5.72E-07	6.40E-07
2580	2.73E-07	3.85E-07	5.69E-07	6.37E-07
2640	2.69E-07	3.82E-07	5.66E-07	6.34E-07
2700	2.66E-07	3.80E-07	5.63E-07	6.30E-07
2760	2.63E-07	3.79E-07	5.60E-07	6.27E-07
2820	2.61E-07	3.77E-07	5.58E-07	6.24E-07
2880	2.60E-07	3.75E-07	5.55E-07	6.21E-07
2940	2.59E-07	3.73E-07	5.52E-07	6.18E-07

Tableau I.3 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 30 cm de l'interface (suite et fin)

	30 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
3000	2.58E-07	3.71E-07	5.50E-07	6.16E-07
3060	2.58E-07	3.69E-07	5.47E-07	6.14E-07
3120	2.57E-07	3.67E-07	5.45E-07	6.12E-07
3180	2.56E-07	3.64E-07	5.43E-07	6.09E-07
3240	2.55E-07	3.62E-07	5.41E-07	6.07E-07
3300	2.53E-07	3.60E-07	5.39E-07	6.05E-07
3360	2.52E-07	3.59E-07	5.37E-07	6.03E-07
3420	2.50E-07	3.57E-07	5.35E-07	6.01E-07
3480	2.48E-07	3.56E-07	5.34E-07	6.00E-07
3540	2.47E-07	3.54E-07	5.32E-07	5.98E-07
3600	2.45E-07	3.53E-07	5.30E-07	5.97E-07
4050	2.39E-07	3.42E-07	5.20E-07	5.87E-07
4500	2.32E-07	3.33E-07	5.12E-07	5.79E-07
4950	2.26E-07	3.26E-07	5.06E-07	5.73E-07
5400	2.21E-07	3.21E-07	5.00E-07	5.68E-07
5850	2.16E-07	3.16E-07	4.95E-07	5.59E-07
6300	2.12E-07	3.12E-07	4.85E-07	5.43E-07
6750	2.08E-07	3.09E-07	4.70E-07	5.25E-07
7200	2.06E-07	3.06E-07	4.55E-07	5.10E-07
7650	2.03E-07	3.03E-07	4.44E-07	4.99E-07
8100	2.01E-07	3.01E-07	4.35E-07	4.91E-07
8550	1.99E-07	2.99E-07	4.27E-07	4.84E-07
9000	1.98E-07	2.98E-07	4.20E-07	4.79E-07

Tableau I.4 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 22 cm de l'interface (début)

	22 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
0	0	0	0	0
60	1.60E-06	2.22E-06	2.94E-06	2.84E-06
120	1.23E-06	1.36E-06	1.95E-06	2.19E-06
180	6.90E-07	1.21E-06	1.63E-06	1.67E-06
240	7.53E-07	1.11E-06	1.39E-06	1.53E-06
300	7.58E-07	9.26E-07	1.31E-06	1.43E-06
360	7.04E-07	8.49E-07	1.16E-06	1.24E-06
420	5.82E-07	8.27E-07	1.08E-06	1.19E-06
480	5.11E-07	7.94E-07	1.04E-06	1.15E-06
540	5.15E-07	7.33E-07	9.87E-07	1.06E-06
600	5.22E-07	6.77E-07	9.22E-07	1.00E-06
660	5.16E-07	6.54E-07	8.89E-07	9.86E-07
720	4.95E-07	6.42E-07	8.70E-07	9.64E-07
780	4.58E-07	6.28E-07	8.42E-07	9.18E-07
840	4.23E-07	6.05E-07	8.05E-07	8.73E-07
900	4.06E-07	5.76E-07	7.75E-07	8.53E-07
960	4.04E-07	5.53E-07	7.59E-07	8.44E-07
1020	4.05E-07	5.40E-07	7.48E-07	8.32E-07
1080	4.03E-07	5.33E-07	7.35E-07	8.11E-07
1140	3.96E-07	5.26E-07	7.18E-07	7.88E-07
1200	3.84E-07	5.17E-07	7.01E-07	7.74E-07
1260	3.69E-07	5.04E-07	6.89E-07	7.66E-07
1320	3.53E-07	4.88E-07	6.80E-07	7.61E-07
1380	3.43E-07	4.74E-07	6.74E-07	7.53E-07
1440	3.38E-07	4.65E-07	6.67E-07	7.43E-07
1500	3.36E-07	4.58E-07	6.58E-07	7.31E-07
1560	3.35E-07	4.54E-07	6.49E-07	7.22E-07
1620	3.34E-07	4.50E-07	6.41E-07	7.16E-07
1680	3.31E-07	4.46E-07	6.35E-07	7.12E-07
1740	3.26E-07	4.40E-07	6.30E-07	7.07E-07
1800	3.19E-07	4.34E-07	6.25E-07	7.00E-07
1860	3.11E-07	4.27E-07	6.20E-07	6.93E-07
1920	3.02E-07	4.20E-07	6.15E-07	6.86E-07
1980	2.96E-07	4.15E-07	6.09E-07	6.80E-07
2040	2.91E-07	4.11E-07	6.04E-07	6.75E-07

Tableau I.4 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 22 cm de l'interface (suite)

	22 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
2100	2.89E-07	4.09E-07	5.99E-07	6.71E-07
2160	2.87E-07	4.06E-07	5.95E-07	6.66E-07
2220	2.86E-07	4.04E-07	5.91E-07	6.62E-07
2280	2.86E-07	4.01E-07	5.87E-07	6.57E-07
2340	2.84E-07	3.98E-07	5.84E-07	6.52E-07
2400	2.82E-07	3.95E-07	5.80E-07	6.48E-07
2460	2.80E-07	3.91E-07	5.76E-07	6.44E-07
2520	2.77E-07	3.88E-07	5.72E-07	6.40E-07
2580	2.73E-07	3.85E-07	5.69E-07	6.37E-07
2640	2.69E-07	3.82E-07	5.66E-07	6.34E-07
2700	2.66E-07	3.80E-07	5.63E-07	6.30E-07
2760	2.63E-07	3.78E-07	5.60E-07	6.27E-07
2820	2.61E-07	3.77E-07	5.58E-07	6.24E-07
2880	2.60E-07	3.75E-07	5.55E-07	6.21E-07
2940	2.59E-07	3.73E-07	5.52E-07	6.18E-07
3000	2.58E-07	3.71E-07	5.50E-07	6.15E-07
3060	2.57E-07	3.69E-07	5.47E-07	6.11E-07
3120	2.57E-07	3.67E-07	5.44E-07	6.06E-07
3180	2.56E-07	3.64E-07	5.41E-07	5.99E-07
3240	2.55E-07	3.62E-07	5.37E-07	5.89E-07
3300	2.53E-07	3.60E-07	5.31E-07	5.76E-07
3360	2.52E-07	3.59E-07	5.23E-07	5.61E-07
3420	2.50E-07	3.57E-07	5.13E-07	5.44E-07
3480	2.48E-07	3.56E-07	5.00E-07	5.29E-07
3540	2.47E-07	3.54E-07	4.87E-07	5.15E-07
3600	2.45E-07	3.53E-07	4.74E-07	5.04E-07
4050	2.39E-07	3.42E-07	4.17E-07	4.67E-07
4500	2.32E-07	3.34E-07	4.03E-07	4.52E-07
4950	2.26E-07	3.26E-07	3.87E-07	4.40E-07
5400	2.21E-07	3.12E-07	3.82E-07	4.43E-07
5850	2.16E-07	2.78E-07	3.81E-07	4.39E-07
6300	2.12E-07	2.54E-07	3.78E-07	4.37E-07
6750	2.09E-07	2.45E-07	3.74E-07	4.34E-07
7200	2.05E-07	2.40E-07	3.70E-07	4.31E-07
7650	1.99E-07	2.33E-07	3.67E-07	4.30E-07

Tableau I.4 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 22 cm de l'interface (suite et fin)

	22 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
8100	1.88E-07	2.29E-07	3.64E-07	4.30E-07
8550	1.73E-07	2.28E-07	3.63E-07	4.29E-07
9000	1.63E-07	2.27E-07	3.61E-07	4.28E-07

Tableau I.5 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 15 cm de l'interface (début)

	15 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
0	0	0	0	0
60	1.63E-06	2.25E-06	2.88E-06	2.78E-06
120	1.20E-06	1.36E-06	1.97E-06	2.21E-06
180	7.03E-07	1.22E-06	1.60E-06	1.64E-06
240	7.76E-07	1.11E-06	1.40E-06	1.55E-06
300	7.68E-07	9.13E-07	1.31E-06	1.42E-06
360	6.93E-07	8.59E-07	1.15E-06	1.24E-06
420	5.57E-07	8.36E-07	1.09E-06	1.21E-06
480	5.18E-07	7.92E-07	1.05E-06	1.15E-06
540	5.30E-07	7.21E-07	9.75E-07	1.05E-06
600	5.32E-07	6.76E-07	9.20E-07	1.01E-06
660	5.19E-07	6.60E-07	8.95E-07	9.95E-07
720	4.88E-07	6.49E-07	8.71E-07	9.57E-07
780	4.45E-07	6.30E-07	8.33E-07	9.05E-07
840	4.17E-07	5.99E-07	7.99E-07	8.79E-07
900	4.12E-07	5.69E-07	7.80E-07	8.67E-07
960	4.13E-07	5.53E-07	7.67E-07	8.51E-07
1020	4.12E-07	5.44E-07	7.50E-07	8.25E-07
1080	4.07E-07	5.37E-07	7.30E-07	8.03E-07
1140	3.96E-07	5.28E-07	7.13E-07	7.91E-07
1200	3.79E-07	5.14E-07	7.02E-07	7.83E-07
1260	3.61E-07	4.98E-07	6.94E-07	7.74E-07
1320	3.49E-07	4.84E-07	6.85E-07	7.62E-07
1380	3.44E-07	4.75E-07	6.74E-07	7.50E-07
1440	3.42E-07	4.69E-07	6.64E-07	7.40E-07

Tableau I.5 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 15 cm de l'interface (suite)

	15 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
1500	3.42E-07	4.64E-07	6.54E-07	7.28E-07
1560	3.40E-07	4.59E-07	6.41E-07	7.02E-07
1620	3.36E-07	4.53E-07	6.13E-07	6.26E-07
1680	3.30E-07	4.45E-07	5.31E-07	4.92E-07
1740	3.22E-07	4.36E-07	4.30E-07	4.32E-07
1800	3.14E-07	4.30E-07	3.83E-07	4.00E-07
1860	3.06E-07	4.25E-07	3.72E-07	3.82E-07
1920	3.01E-07	4.21E-07	3.72E-07	4.11E-07
1980	2.98E-07	4.19E-07	3.71E-07	4.16E-07
2040	2.96E-07	4.16E-07	3.70E-07	4.16E-07
2100	2.95E-07	4.12E-07	3.69E-07	4.09E-07
2160	2.93E-07	4.08E-07	3.64E-07	3.98E-07
2220	2.91E-07	4.04E-07	3.59E-07	3.93E-07
2280	2.89E-07	4.00E-07	3.51E-07	3.87E-07
2340	2.85E-07	3.96E-07	3.45E-07	3.74E-07
2400	2.81E-07	3.93E-07	3.36E-07	3.73E-07
2460	2.77E-07	3.89E-07	3.32E-07	3.63E-07
2520	2.73E-07	3.83E-07	3.28E-07	3.64E-07
2580	2.70E-07	3.74E-07	3.27E-07	3.58E-07
2640	2.68E-07	3.55E-07	3.28E-07	3.53E-07
2700	2.67E-07	3.15E-07	3.28E-07	3.57E-07
2760	2.66E-07	2.72E-07	3.27E-07	3.55E-07
2820	2.65E-07	2.47E-07	3.28E-07	3.56E-07
2880	2.64E-07	2.31E-07	3.28E-07	3.62E-07
2940	2.63E-07	2.20E-07	3.28E-07	3.68E-07
3000	2.61E-07	2.18E-07	3.26E-07	3.73E-07
3060	2.59E-07	2.19E-07	3.28E-07	3.77E-07
3120	2.57E-07	2.19E-07	3.31E-07	3.81E-07
3180	2.56E-07	2.19E-07	3.33E-07	3.83E-07
3240	2.54E-07	2.19E-07	3.33E-07	3.82E-07
3300	2.52E-07	2.18E-07	3.33E-07	3.83E-07
3360	2.51E-07	2.18E-07	3.33E-07	3.81E-07
3420	2.50E-07	2.16E-07	3.32E-07	3.79E-07
3480	2.48E-07	2.14E-07	3.31E-07	3.77E-07
3540	2.46E-07	2.13E-07	3.33E-07	3.76E-07
3600	2.44E-07	2.09E-07	3.36E-07	3.74E-07

Tableau I.5 : Données brutes du débit d'eau infiltré pour un essai réalisé à 15 cm de l'interface (suite et fin)

	15 cm de l'interface			
	e=0.38	e=0.42	e=0.45	e=0.49
Time (sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)	Water Flux (m³/sec)
4050	1.63E-07	1.91E-07	3.38E-07	3.89E-07
4500	1.28E-07	1.92E-07	3.38E-07	3.80E-07
4950	1.12E-07	1.92E-07	3.36E-07	3.97E-07
5400	1.04E-07	1.96E-07	3.34E-07	4.00E-07
5850	1.19E-07	1.98E-07	3.33E-07	4.00E-07
6300	1.24E-07	1.99E-07	3.31E-07	4.01E-07
6750	1.24E-07	2.00E-07	3.30E-07	4.01E-07
7200	1.22E-07	2.00E-07	3.30E-07	4.00E-07
7650	1.20E-07	1.99E-07	3.29E-07	4.00E-07
8100	1.21E-07	1.99E-07	3.28E-07	3.99E-07
8550	1.21E-07	1.98E-07	3.27E-07	3.98E-07
9000	1.21E-07	1.97E-07	3.27E-07	3.97E-07