POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Analyses des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles
Auteur: Author:	Omar Fala
Date:	2008
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Fala, O. (2008). Analyses des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8140/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/8140/
Directeurs de recherche: Advisors:	Michel Aubertin, Bruno Bussière, & Robert P. Chapuis
Programme: Program:	Non spécifié

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

ANALYSES DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT NON SATURÉ DANS LES HALDES À STÉRILES

OMAR FALA
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph. D.)
GÉNIE MINÉRAL

JANVIER 2008

© Omar Fala, 2008

Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-46124-2
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-46124-2

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

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

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

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

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

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

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

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

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

ANALYSES DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT NON SATURÉ DANS LES HALDES À STÉRILES

présentée par : FALA Omar
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. ZAGURY Gérald, Ph.D., Président
M. AUBERTIN Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. BUSSIÈRE Bruno, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. CHAPUIS Robert P., D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche
M. SIMON Richard, Ph.D., membre
M. NASTEV Miroslav, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse n'a été possible que grâce aux compétences et au soutien de plusieurs personnes. Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Michel Aubertin. Sa confiance en moi, son aide et ses conseils m'étaient très utiles tout au long de ces années.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à Bruno Bussière et Robert Chapuis mes deux codirecteurs pour leurs commentaires instructifs et leurs suggestions pertinentes concernant divers aspects de mon projet.

Mes remerciements vont également à Étienne Bélanger et Antonio Gatien, à Nil Gaudet, Alain Perreault et Hugues Bordeleau (de l'URSTM) et à Martin Archambault (de la Mine Laronde) pour leur soutien aux travaux en laboratoire et sur le terrain, ainsi qu'à Lyne Lavoie et Lucette De Gagné pour leur support.

Enfin, un gros merci aux amis étudiantes et étudiants, non seulement pour l'aide dont j'ai bénéficié de la part de nombreux parmi eux (pour effectuer mes essais sur terrains par exemple), mais aussi pour l'atmosphère agréable qu'ils entretiennent au sein de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers.

RÉSUMÉ

La prévention contre la pollution des eaux constitue un défi environnemental majeur pour l'industrie minière. C'est le cas notamment du drainage minier acide (DMA) et du drainage neutre contaminé (DNC) qui résultent de la présence simultanée au même endroit de trois composantes : des rejets miniers sulfureux réactifs, l'eau et l'oxygène. Les haldes à stériles constituent un milieu favorable à la production d'eau contaminée. Au sein de ces haldes, les processus physiques, géochimiques et biologiques menant à la production de DMA ou de DNC sont nombreux et complexes. Dans ce projet, on s'est intéressé à l'analyse des écoulements non saturés de l'eau dans les haldes. Le but visé est d'étudier les conditions naturelles et celles qui permettraient de contrôler le mouvement de l'eau afin de proposer des directives permettant une construction de haldes à stériles potentiellement moins nocive pour l'environnement.

Dans un premier temps, on fait un bref rappel de la théorie qui sous-tend la problématique étudiée ici. Puis les propriétés des équations d'écoulement de l'eau en conditions non saturées, sans dimensions, sont utilisées pour l'interprétation d'essais d'infiltration. L'approche proposée s'appuie sur des calculs numériques (effectués à l'aide du code d'éléments finis HYDRUS2D) pour déterminer les paramètres du modèle analytique des fonctions hydriques de van Genuchten (1980) à partir d'un essai d'infiltration. Une validation partielle de la méthode est effectuée pour un essai de laboratoire. Des essais d'infiltration *in situ* ont aussi permis de caractériser, avec cette technique, la partie superficielle d'une halde à stériles construite sur un site minier en Abitibi (Québec).

Des simulations numériques des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à grande échelle ont ensuite été réalisées pour des conditions variables, pour une période de une à plusieurs années. Dans ces simulations, on a considéré une distribution lognormale des propriétés des matériaux. Plusieurs niveaux de variabilité spatiale, avec

des conditions atmosphériques typiques du Québec, ont été utilisés lors des calculs effectués avec le logiciel HYDRUS2D.

Les simulations des écoulements de l'eau dans les haldes à stériles avec des propriétés hydriques possédant une forte corrélation spatiale selon une direction donnée (horizontale, verticale ou mixte) ont montré que la distribution de l'humidité suit la direction prépondérante de cette corrélation. Par exemple, les teneurs en eau sont fortement corrélées horizontalement lorsque la corrélation horizontale domine les propriétés hydriques. Ceci indique qu'une variabilité spatiale des propriétés hydriques peut induire des écoulements préférentiels. Une discussion de l'impact de ces écoulements préférentiels sur la contamination de l'eau est aussi présentée dans la thèse.

Les simulations indiquent par ailleurs que la présence de couches horizontales de matériaux fins (résultant par exemple de la ségrégation granulométrique qui se produit lors de la mise en place) peut, dans certains cas, favoriser la création de zones de suintement qui sont susceptibles d'amplifier les problèmes de contamination (dans le matériau grossier sous-jacent). On montre aussi qu'une faible inclinaison de ces couches vers l'extérieur peut aider à palier à ce problème. Les couches inclinées favorisent alors un écoulement de l'eau vers la périphérie de la halde. L'eau est ainsi acheminée loin du centre de l'empilement, grâce aux effets de barrière capillaire en 2D. Les simulations numériques suggèrent que cet effet potentiellement bénéfique continue d'exister (ou peut même s'améliorer) lorsque on introduit une variabilité spatiale modérée des caractéristiques hydriques des stériles.

Dans la dernière partie de la thèse, les paramètres pertinents pour le contrôle du mouvement de l'eau sont utilisés pour élaborer une approche descriptive (semi-quantitative) permettant d'optimiser la construction des haldes à stériles. Cette approche vise le contrôle du mouvement de l'eau dès le début de la construction des haldes et ce

jusqu'à la fin des opérations, ce qui facilitera par la suite la restauration en phase de fermeture.

ABSTRACT

Prevention of water pollution is a major environmental challenge for the mining industry. This is particularly the case for acid rock drainage (ARD) and contaminated neutral drainage (CND), which result from the presence of three components: reactive minerals, water and oxygen. Waste rock dumps (or piles) are a favourable medium for the production of contaminated water, which involves numerous interdependent and complex physical, geochemical and biological processes.

This project focuses on the analysis of unsaturated flow within mine waste dumps. The objective is to study natural flow conditions and to suggest directives to help control water migration, leading to construction of less harmful waste rock piles for the environment.

First, the basic theory of the problem is reviewed. Properties of the dimensionless unsaturated flow equations are then applied for the interpretation of infiltration tests. The proposed approach is based on numerical calculations (with the finite element code HYDRUS2D) which are used to determine the van Genuchten (1980) analytical model parameters based on infiltration data. A laboratory test is used to demonstrate the use and to partly validate this approach. *In situ* tests were also carried out to characterize the upper surface of a waste rock pile located at the Abitibi mine site (Québec).

Numerical simulations of unsaturated flow in waste rock piles were performed for varying conditions over a period of one to several years, and using lognormal distributions of material hydrogeological properties. Several levels of spatial variability were considered (in HYDRUS2D) using typical atmospheric conditions of central Quebec. Results show that moisture distribution is typically similar to the spatial distribution of the hydrogeological properties. For example, the water content shows

strong horizontal correlation when the material property correlations are dominantly horizontal. This indicates that a spatial variability of the hydrogeological properties can generate preferential flow. A discussion of the impact of such preferential flow on the contamination of water is also presented in the thesis.

Numerical calculations also indicate that the presence of horizontal layers of a fine grained material (resulting, for example, from grain size segregation) can, in certain cases, create seepage zones which are likely to amplify water contamination (in the underlying coarse material). It is shown, however, that a gentle slope of these layers toward the outside can help to overcome this problem. Such inclined layers can prevent internal drainage within piles. Water is then routed to the perimeter, owing to 2D capillary barrier effects. Numerical simulations suggest that this potentially beneficial effect may continue (or can even improve) when one introduces moderate spatial variability into the hydrogeological characteristics.

In the last part of this thesis, the relevant parameters for the control of water movement are used to elaborate a descriptive (semi-quantitative) approach to optimize the construction of waste rock piles. This approach aims at controlling water movement from the early stage until the end of mine operations, thus facilitating reclamation during the closing phase of the mine.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **iv**
RÉSUMÉ ..... **v**
ABSTRACT ..... **viii**
TABLE DES MATIÈRES ..... **x**
LISTE DES TABLEAUX ..... **xvi**
LISTE DES FIGURES ..... **xix**
LISTE DES SYMBOLES ..... **xxxvi**
LISTE DES ANNEXES ..... **xlvi**
CHAPITRE 1: INTRODUCTION **1**
1.1 Généralités 1
1.2 Les eaux du drainage minier 1
1.2.1 Le drainage minier acide 2
1.2.1.1 Processus biogéochimiques 2
1.2.1.2 Processus physiques 6
1.2.2 Le drainage minier neutre contaminé 9
1.3 Problématique, objectifs et contenu de la thèse 10
CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE **17**
2.1. Halde à stériles : propriétés et structure 17
2.1.1 Matériaux granulaires secs 17
2.1.1.1 État statique 17
2.1.1.2 Matériaux granulaires en mouvement 23
2.1.1.3 Haldes à stériles 33
2.1.2 L'eau dans les matériaux granulaires 42
2.1.2.1 Tension superficielle 42
2.1.2.2 Angle de contact 43
2.1.2.3 Propriétés hydriques non saturées 50

2.1.2.4 Cas des stériles 62
2.1.3 Écoulements préférentiels 64
2.2 Infiltration dans les matériaux granulaires : phénoménologie et prédiction 67
2.2.1 Quelques notions et définitions reliées à l'infiltration 67
2.2.2 Modèles d'infiltration 69
2.2.3 Équations générales d'écoulement 71
2.2.4 Équations de la capacité d'infiltration 72
2.2.4.1 Solution de Green et Ampt 72
2.2.4.2 Solution de Philip 79
2.2.4.3 Autres solutions 86
CHAPITRE 3: ESSAIS D'INFILTRATION : PROPOSITION D'UNE MÉTHODE D'INTERPRÉTATION PAR APPROCHE MIXTE (ANALYTIQUE ET NUMÉRIQUE) 88
3.1 Généralités 88
3.1.1 Méthode et objectifs 89
3.1.2 Hypothèses de calcul à la base de la méthode proposée 90
3.2 Équations d'écoulement sans dimension 90
3.3 Infiltration dans un sol aux caractéristiques hydriques uniformes 95
3.3.1 Paramètres numériques 99
3.3.2 Procédures d'interprétation d'un essai. 101
3.3.2.1 Exemple de détermination des paramètres du modèle analytique de van Genuchten - Matériau MM1 102
3.4 Infiltration dans un matériau non uniforme 114
3.4.1 Exemple 2- Matériau MM1+MM2 116
3.5 Essai en laboratoire 132
3.5.1 Propriétés du matériau et mode opératoire 133
3.5.2 Résultats 137
3.6 Site de la Mine Laronde 150
3.6.1 Historique et situation 150

3.6.2 Topographie, géologie, sols et climat 151
3.6.3 La halde no 1 152
3.6.3.1 Minéralogie 155
3.6.3.2 Géochimie 155
3.6.3.3 Propriétés géotechniques de base 156
3.6.3.4 Hydrogéologie 157
3.6.3.5 Structure de la halde no1 161
3.7 Essais *in situ* 162
3.7.1 Résultats 163
CHAPITRE 4: COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES HALDES À STÉRILES STATISTIQUEMENT HOMOGÈMES 177
4.1 Variabilité spatiale des propriétés des sols 177
4.1.1 Hétérogénéité 177
4.1.2 Volume élémentaire représentatif 178
4.1.3 Variabilité spatiale 179
4.2 Définition des conditions de modélisation 186
4.2.1 Caractéristiques des matériaux 186
4.2.2 Conditions frontières et initiales 190
4.2.3 Scénarios à l'étude 192
4.3 Simulation de haldes statistiquement homogènes (un seul matériau, Série 1) ... 194
4.3.1 Cas de base (caractéristiques constantes) 195
4.3.2 Distribution avec une forte corrélation horizontale 198
4.3.2.1 Distribution avec $\sigma_\theta = 0{,}1, \sigma_k = \sigma_\psi = 1$ 198
4.3.2.2 Distribution avec $\sigma_\theta = 0{,}1, \sigma_k = \sigma_\psi = 5$ 201
4.3.2.3 Distribution avec $\sigma_\theta = 0{,}1, \sigma_k = \sigma_\psi = 10$ 203
4.3.3 Distribution avec une forte corrélation verticale 205
4.3.3.1 Distribution avec $\sigma_\theta = 0{,}1, \sigma_k = \sigma_\psi = 1$ 205
4.3.3.2 Distribution avec $\sigma_\theta = 0{,}1, \sigma_k = \sigma_\psi = 5$ 208

4.3.3.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 210

4.3.4 Distribution avec forte corrélation mixte 212

4.3.4.1 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=1 212

4.3.4.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=5 215

4.3.4.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 217

4.3.5 Sommaire des résultats de simulation de la série 1 219

CHAPITRE 5: COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES HALDES À STÉRILES STATISTIQUEMENT HÉTÉROGÈNES 222

5.1 Cas d'une interface SBL/GRV horizontale (Série 2) 222

5.1.1 Cas de base (caractéristiques constantes) 223

5.1.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 225

5.1.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 225

5.1.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 227

5.1.2.3 Distribution avec une forte corrélation mixte 229

5.1.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 230

5.1.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 230

5.1.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 232

5.1.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte 233

5.2 Cas d'une interface SBL/GRV inclinée (séries 3 et 4) 235

5.2.1 Cas de base (caractéristiques constantes et pente de 5%) 236

5.2.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 et une pente de 5% 240

5.2.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 240

5.2.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 242

5.2.2.3 Distribution avec une corrélation mixte 244

5.2.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 5% 245

5.2.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 245

5.2.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 247

5.2.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte 248
5.2.4 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 10 % 250
5.3 Cas d'une interface SLT/GRV inclinée (Séries 5 et 6) 254
5.3.1 Cas de base (caractéristiques constantes et pente de 5%) 255
5.3.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 et une pente de 5% 258
5.3.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 258
5.3.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 259
5.3.2.3 Distribution avec une forte corrélation mixte 261
5.3.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 5% 263
5.3.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale 263
5.3.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale 264
5.3.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte 266
5.3.4 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 10 % 267
5.4 Sommaire des résultats des simulations numériques 271
CHAPITRE 6: ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION 273
6.1 Analyse des résultats 273
6.1.1 Essais d'infiltration 273
6.1.2 Modélisation des écoulements dans les haldes 281
6.2 Optimisation de la méthode de construction des haldes 290
6.2.1 Mise en situation 291
6.2.2 Lien entre les divers paramètres 293
6.2.3 Emplacement 295
6.2.4 Géométrie externe 295
6.2.5 Bancs de la halde 296
6.2.5.1 Épaisseur et nombre 296
6.2.5.2 Couche du matériau fin 302
6.2.5.3 Largeur des paliers 303
6.2.6 Déroulement des travaux 304

6.2.6.1 Démarrage 305
6.2.6.2 Mise en place du système bicouche 306
6.2.6.3 Croissance de la halde 307
6.2.6.4 Rampes d'accès 309
6.2.7 Dernières remarques 310
6.2.8 Fermeture et restauration de la halde 311
CHAPITRE 7: CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 314
BIBLIOGRAPHIE 320
ANNEXES (sur CD-ROM) 345

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Type de drainage minier (tirée de Aubertin et al., 2002) 3
Tableau 2.1 : Arrangement de sphères de rayon R et la porosité correspondante (adapté d'après Hillel, 1998)..... 21
Tableau 2.2 : Certaines des principales fonctions disponibles pour représenter la courbe de rétention d'eau. 53
Tableau 2.3 : Certaines fonctions de conductivité hydraulique. 56
Tableau 2.4 : Valeurs de l'angle de contact de divers minéraux (adapté d'après Yotsumoto, 2006)..... 62
Tableau 2.5 : Classification des minéraux selon les propriétés de leur surface (adaptée d'après Yotsumoto, 2006). 63
Tableau 2.6 : Valeurs typiques des paramètres du modèle de Green et Ampt (tiré de Espinoza, 1999) 78
Tableau 3.1: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour les matériaux M1 à M4. 96
Tableau 3.2: Facteurs d'échelle, $\psi_a^{'}$ et temps de mesure utilisés avec les modèles ($k_s^{'}$ est égale à 1,157x10^{-5} m/s, $\theta_s^{'}$ est égale à 0,4 et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est égal à 0,0315, 0,1842, 0,4590 ou 0,6863, pour M1 à M4 respectivement). Le temps de référence est de 8,64 s (ou 10^{-4} j). 99
Tableau 3.3: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) de MM1.... 103
Tableau 3.4: Caractéristiques hydrique de MM1 déterminées à partir de la courbe du taux d'infiltration (paramètres de van Genuchten 1980). 114
Tableau 3.5 : Temps de référence retenus et les valeurs de $t_{ra}^{'}$ correspondantes, dans le cas d'un matériau non uniforme. 116
Tableau 3.6: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour le matériau MM2..... 116

Tableau 3.7 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP1) pour les matériaux MM3, MM4, MM5 et MM6. 122
Tableau 3.8 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP2) pour les matériaux MM7,MM8 et MM9. 124
Tableau 3.9 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP3) pour les matériaux MM10, MM11 et MM12. 124
Tableau 3.10 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten pour les matériaux MM13, MM14 et MM15. 126
Tableau 3.11 : Caractéristiques géotechniques du sable Kam Kotia. Cas des échantillons de la figure 3.31 (D_{10} : diamètre des grains représentant 10% des passants. C_U : coefficient d'uniformité; C_c : coefficient de courbure; D_r : densité des grains; k_s : conductivité hydraulique à la saturation). 133
Tableau 3.12 : Paramètres de la courbe de rétention d'eau du sable Kam Kotia, en mouillage et en drainage (voir les courbes à la figure 3.32). Les symboles avec une apostrophe (') indiquent les paramètres en mouillage. 135
Tableau 3.13 : Paramètres du modèle de van Guenuchten (1980) en mouillage utilisés lors de l'analyse avec les matériaux MM16 à MM28. 140
Tableeau 3.14 : Teneurs en eau résiduelles du sable Kam Kotia évaluées à l'aide du modèle MK ($\theta_{r,MK}$) et celui de Fredlund et Xing ($\theta_{r,FX}$). 148
Tableau 3.15 : Diamètre maximum (Dmax) estimé dans les sondages 1 à 8. 157
Tableau 3.16: Paramètres de rétention d'eau des stériles ($\leq$ 5 mm) selon le modèle de van Genuchten (1980) (adapté d'après Gamache-Rochette, 2004)..... 160
Tableau 3.17: Paramètres du modèle analytique de van Guenuchten (1980) pour le matériau M5. 168
Tableau 3.18: Facteurs d'échelle et AEV des 12 modèles (cas de l'essai CH1). 170
Tableau 3.19: Temps de référence et t_{ra} correspondants (cas de l'essai CH1). 170
Tableau 3.20: Caractéristiques hydriques de la halde no 1, à divers endroits et profondeurs (Zi) pour les points choisis sur la courbe *f(t)*. 173

Tableau 3.21 : Moyenne et écart type des propriétés hydriques des stériles à la surface de la halde no1. 176

Tableau 4.1 : Longueurs de corrélation pour $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ (R^2 est le coefficient de corrélation qui mesure ici le degré d'ajustement entre les données et le modèle empirique). 183

Tableau 4.2 : Paramètres de la CRE du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour les trois matériaux utilisés (en drainage). 188

Tableau 4.3 : Pressions d'entrée d'air (ψ_a=AEV) et d'entrée d'eau (ψ_w=ψ_r= pression correspondant à la teneur en eau résiduelle en drainage). 188

Tableeau 4.4 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S1 à S20. 195

Tableau 5.1 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations de la série 2 (S21 à S27). 223

Tableau 5.2 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S28 à S38 (séries 3 et 4). 237

Tableau 5.3 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S39 à S49 (séries 5 et 6). 255

Tableau 6.1 : Principaux facteurs d'influence dans le dimensionnement d'une halde. 294

Tableau 6.2 : Valeurs des épaisseurs des bancs en fonction du leur nombre pour l'exemple de la figure 6.12. 301

Tableau 6.3 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, une pente de la couche de matériau fin de 5 % et des bancs d'épaisseur de 8 m. 302

Tableau 6.4 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, pente 1V/1,35H, β_h de 14,5° et des bancs d'épaisseur de 8 m. 303

Tableau 6.5 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, pente 1V/1,35H, une pente de la couche de matériau fin de 5% et des bancs d'épaisseur 8 m. 304

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Étapes de la formation du DMA (d'après Kleinman et al., 1981)..... 5

Figure 1.2 : Mécanismes physiques opérant durant la production de DMA dans les roches stériles (adaptée d'après Lefebvre, 1994)..... 7

Figure 2.1: Modèle d'arrangement de sphères : a) cubique simple, b) cubique tétraédral, c) tétragonal sphéroïdal, d) pyramidal et e) tétraédral (tirée de Hillel, 1998). 21

Figure 2.2 : Arrangement idéal dans une distribution polymodale de particules (tirée de Hillel, 1998)..... 22

Figure 2.3 : Porosité en fonction de la proportion des particules fines dans 4 mélanges bimodaux de sphères. D_{p1} et D_{p2} [μm] : diamètre des fractions 1 et 2 respectivement (tirée de Suzuki, 2006)..... 22

Figure 2.4 : Diagramme des phases dans le cas d'un système de billes d'acier sur silice (ϕ = r/R; r=0,2 à 0,3 mm; R=1 à 8 mm; la longueur de la pente est de 1m) (adaptée d'après Aguirre et al., 1997)..... 28

Figure 2.5 : Diagramme des phases donnant la hauteur de la masse de sphères en mouvement (H) par rapport à l'angle d'inclinaison de la surface φ ; a) cas 2D et b) cas 3D (tirée de Silbert et al., 2003)..... 29

Figure 2.6 : Empilements de particules (sable et billes de verre) formant une stratification. Le rapport des dimensions sable/billes de verre est égal à 3,6, le débit w est de 1,2 g/s et la séparation des plans est de 3 mm (tirée de Grasselli et al., 1998). 31

Figure 2.7 : Diagramme des phases montrant les caractéristiques des empilements en fonction des dimensions des grains (le débit w est ici de 2,5 g/s et la séparation des plans est de 3 mm) (tirée de Grasselli et al., 1998). 32

Figure 2.8 : Structure interne de la halde de la mine Golden Sunlight, USA (tirée de Azam et al., 2006)..... 33

Figure 2.9 : Distributions granulométriques sous forme de 3 zones de ségrégation le long de la pente : 0-20 cm, 20-120 cm et >120 cm, dans le cas du déversement à la benne pour une longue pente (2 m). Chaque courbe représente la moyenne de 5 tests (tirée de Nichols, 1987). 35

Figure 2.10 : Distributions granulométriques des 3 zones de ségrégation : 0-10 cm, 10-60 cm et > 60 cm, dans le cas du déversement à la benne pour une courte pente (1 m). Chaque courbe représente la moyenne de 2 tests (tirée de Nichols, 1987). 36

Figure 2.11 : Distributions granulométriques dans le cas du déversement à la benne pour une courte pente (1 m) et un gravier fin. Chaque courbe représente la moyenne pondérée de 2 tests (tirée de Nichols, 1987). 37

Figure 2.12 : Distributions granulométriques dans le cas du déversement avec épandage au butoir pour une courte pente et un gravier grossier. Chaque courbe représente la moyenne de 2 tests (tirée de Nichols, 1987). 38

Figure 2.13 : Quantités relatives de matériau déposé le long des pentes dans le cas des déversements à la benne et avec épandage au butoir (tirée de Nichols, 1987). 39

Figure 2.14 : Similarité de la distribution granulométrique dans une halde de 60 m de hauteur construite par déversement à la benne (à Byron Creek Collieries) à gauche vs celle observée lors du test de déversement par la même méthode dans le cas d'une courte pente et d'un gravier grossier, à droite (tirée de Nichols, 1987). 41

Figure 2.15 : Similarité de la distribution granulométrique dans une halde de 5 m de hauteur construite par déversement avec épandage au butoir (à Byron Creek Collieries), à gauche vs celle observée lors du test de déversement par la même méthode dans le cas d'une courte pente et d'un gravier grossier, à droite (tirée de Nichols, 1987). 41

Figure 2.16 : Équilibre des forces de tension superficielles (adaptée d'après Hillel, 1998). 43

Figure 2.17 : Détermination de l'angle avançant et de l'angle au retrait (adaptée d'après Carre, 1989) 44
Figure 2.18 : Eau retenue par capillarité entre deux particules sphériques (tirée de Iwata et al., 1988) 47
Figure 2.19 : Interface ayant des rayons de courbure de signe opposé (adaptée d'après Briant et Tenebre 1989). 48
Figure 2.20 : Remontée capillaire (adaptée d'après Hillel, 1998). 49
Figure 2.21 : Représentation schématique de la courbe de rétention d'eau d'un sol. θ_r [-] : teneur en eau résiduelle; ψ_0 : pression correspondant à une teneur en eau nulle (= 10^6 kPa); ψ_r : pression correspondant à la teneur en eau résiduelle; ψ_a : pression d'entrée d'air (AEV); θ_s [-] : teneur en eau à saturation (adaptée d'après Fredlund et Xing, 1994 et Aubertin et al., 1995, 2003). 51
Figure 2.22 : Courbes de rétention d'eau avec effet d'hystérésis en phase de mouillage et de drainage (tirée de Iwata et al., 1988). 58
Figure 2.23 : Courbes de rétention d'eau principales (en drainage) du sable à différents degrés de mouillabilité (tirée de Nieber et al., 2000) 59
Figure 2.24 : Courbes de rétention d'eau principale (en mouillage) du sable à différents degrés de mouillabilité (tirée de Nieber et al., 2000) 61
Figure 2.25 : Conductivité hydraulique en fonction du degré de saturation pour un sable hydrophile et un autre extrêmement hydrophobe (tirée de Nieber et al., 2000) 61
Figure 2.26 : Scénarios typiques lors de l'infiltration (adaptée d'après Espinoza, 1999) 69
Figure 2.-27 : Profil de teneur en eau à différents temps lors d'une séquence d'infiltration de durée t_7-t_0 (tirée de Espinoza, 1999) 70
Figure 2.28 : Modèle de Green et Ampt (adaptée d'après Espinoza, 1999). 73

Figure 2.29 : Représentation schématique de la courbe de rétention d'eau (air entry value = AEV = ψ_a ; fully wet pressure = ψ_{im} ; water entry value = WEV = ψ_w) en mouillage et en drainage (adaptée d'après Espinoza, 1999). 77

Figure 3.1: Courbes de rétention d'eau des matériaux M1 à M4, selon le modèle analytique de van Genuchten (1980) et les paramètres donnés au tableau 3.1. 97

Figure 3.2: Conductivité hydraulique des matériaux M1 à M4, selon le modèle analytique de Mualem (1976) et van Genuchten (1980) (voir van Genuchten et al., 1991). 98

Figure 3.3 : Configuration géométrique du modèle d'infiltration d'eau dans un matériau uniforme (conditions axisymétriques). 100

Figure 3.4: Relation entre k'_{ra} et ψ'_{ra} pour diverses valeurs de ψ'_a/ψ'_w , pour t'_{ra} égal à 0,0103 (échelle ln-ln). 103

Figure 3.5: Ci (coefficients utilisés pour les courbes de la figure 3.4) en fonction de ψ'_a/ψ'_w pour t_{ra} égal à 0,0103. 104

Figure 3.6: Taux d'infiltration dans MM1 simulés à l'aide d'HYDRUS2D. 104

Figure 3.7: Procédure pour la détermination des propriétés hydriques (modèle analytique de Mualem-van Genuchten) d'un sol homogène soumis à un essai d'infiltration. 106

Figure 3.8: Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour α'_ψ = 0,25 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w . En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports ψ'_a/ψ'_w et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes. 109

Figure 3.9 Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour α'_ψ = 0,33 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w . En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4

rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes. 109

Figure 3.10 : Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour $\alpha_\psi^{'}$ = 0,20 m^{-1} et pour différentes valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes. 110

Figure 3.11: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour $\alpha_\psi^{'}$ = 0,25 m^{-1} et pour différentes valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ 110

Figure 3.12: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour $\alpha_\psi^{'}$ = 0,33 m^{-1} et pour différentes valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ 111

Figure 3.13: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour $\alpha_\psi^{'}$ = 0,20 m^{-1} et pour différentes valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ 111

Figure 3.14: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps petits. (0,5039/0,2 veut dire que $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,5039 et $\alpha_\psi^{'}$ = 0,2 m^{-1}). En abscisse : taux d'infiltration de MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=4320 s pour l'ensemble des courbes. 112

Figure 3.15: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés. (0,5039/0,2 veut dire que $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,5039 et $\alpha_\psi^{'}$ = 0,2 m^{-1}). Cas de la figure 3.14..... 113

Figure 3.16 : Configuration géométrique du modèle numérique avec les matériaux MM1 et MM2 (essai d'infiltration axisymétrique simulé avec HYDRUS2D)..... 117

Figure 3.17 : Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D, pour une pression d'eau nulle en surface, dans le matériau MM1+MM2, selon la configuration géométrique montrée à la figure 3.16. 118

Figure 3.18 : Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D pour les matériaux MM1 (exemple 1) et MM1+MM2 (cas de la figure 3.16). 118

Figure 3.19 : Valeurs de k'_{ra} en fonction de ψ'_{ra} pour $\psi'_a/\psi'_w = 0{,}5500$ et pour t'_{ra} variant de $1{,}03\text{x}10^{-5}$ à $5{,}15\text{x}10^{-2}$ 119

Figure 3.20: Procédure proposée pour la caractérisation du matériau MM1+MM2, lorsque les caractéristiques de MM1 sont déjà connues. 121

Figure 3.21 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM3, MM4, MM5 et MM6 (tableau 3.7), et MM1+MM2 (matériau à caractériser). b) mise en relief d'une partie de la figure en (a). 123

Figure 3.22 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM7, MM8 et MM9 (tableau 3.8) et MM1+MM2 (matériau à caractériser). 124

Figure 3.23 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM10, MM11 et MM12 (tableau 3.9) et MM1+MM2 (matériau à caractériser). 125

Figure 3.24 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM13 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser). 126

Figure 3.25 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM14 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser). 127

Figure 3.26 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM15 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser). 127

Figure 3.27 : Variation du AEV de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10). 129

Figure 3.28 : Variation de la conductivité hydraulique à saturation de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10). 129

Figure 3.29 : Variation de la teneur en eau à saturation de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10). 130

Figure 3.30 : Contours de pression (en cm) dans MM1+MM2 (valeurs multipliées par 10^{-3}). 132

Figure 3.31: Courbes granulométriques du sable Kam Kotia. La courbe notée Éch1 est celle qui provient du sable testé par l'auteur. 134
Figure 3.32: Courbe de rétention d'eau en drainage et en mouillage du sable Kam Kotia (voir les paramètres au tableau 3.12. VG : ajustement des données au modèle de van Genuchten, les mesures ont été effectuées dans le cadre d'autres projets ou à d'autres stades de celui ci) 134
Figure 3.33: Dispositif expérimental utilisé pour l'essai d'infiltration réalisé en laboratoire (a) et sa schématisation (b). 137
Figure 3.34: Taux d'infiltration mesurés à la surface du sable Kam Kotia. a) échelle arithmétique et b) échelle logarithmique. 138
Figure 3.35: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P1, pour les matériaux MM16, MM17, MM18 et MM19 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,0315, 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement). 141
Figure 3.36: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P2, pour les matériaux MM20, MM21 et MM22 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement). 141
Figure 3.37: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P3, pour les matériaux MM23, MM24, et MM25 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement). 142
Figure 3.38: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P4, pour les matériaux MM26, MM27, et MM28 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement). b) et c) sont des vues rapprochées de a) 143
Figure 3.39: Procédure à suivre pour l'estimation de la teneur en eau résiduelle ($\theta_{MK/FX}$ est la teneur en eau calculée à l'aide du modèle MK ou FX). 147
Figure 3.40: Ajustement des modèles MK (MK) et Fredlund et Xing (FX) sur la CRE du matériau MM18 (modèle de van Genuchten, vG). 149
Figure 3.41 : Effet de la teneur en eau résiduelle sur les taux d'infiltration. 149
Figure 3.42 : Photo de la halde no 1 de la mine Laronde 153

Figure 3.43 : Reconnaissances menées sur la halde no 1. a) vue globale b) détails concernant le volet hydrogéologique (adaptée d'après Anterrieu, 2006). 154

Figure 3.44 : Proportions de la carotte constituées de particules fines (sable et silt surtout) en fonction de la profondeur (mesures basées sur les données de Dubreuil-Boiclair, 2005). 158

Figure 3.45 : Intervalle de variation de la longueur des morceaux de carottes en fonction de la profondeur (basé sur les données de Dubreuil-Boiclair, 2005)..... 159

Figure 3.46 : Conductivité hydraulique à saturation des stériles en fonction de la porosité (adaptée d'après Gamache-Rochette, 2004)..... 160

Figure 3.47 : Modèle électrique de la structure interne de la halde, d'ouest (gauche) en est. L'aire géophysique est représentée en jaune, et les couches résistives déterminées par les mesures en forages sont présentées en rouge (tirée de Anterrieu, 2006). 161

Figure 3.48 : Contenant utilisé pour effectuer les essais à petite échelle..... 163

Figure 3.49: Emplacement des divers essais d'infiltration à la surface de la halde (le numéro i est équivalent à Chi dans la figure 3.50). Cet emplacement des essais correspond à celui montrée à la figure 3.43b (adaptée d'après Tripodi, 2003). ... 164

Figure 3.50: Données des essais d'infiltration effectués à la surface de la halde no1 aux endroits montrés à la figure 2.49 (le trait plein correspond à la moyenne mobile de 2 à 4 périodes); les échelles varient d'une figure à l'autre..... 165

Figure 3.50 (suite et fin): Données des essais d'infiltration effectués à la surface de la halde no1 aux endroits montrés à la figure 3.49 (le trait plein correspond à la moyenne mobile de 2 à 4 périodes); les échelles varient d'une figure à l'autre. 166

Figure 3.51: Teneur en eau volumique et fonction de la conductivité hydraulique du matériau M5, selon le modèle analytique de van Genuchten (1980)..... 168

Figure 3.52: Courbes k_{ra} vs ψ_{ra} pour ψ'_a/ψ'_w =0,0241 à diverses valeurs de t_{ra} (cas de l'essai CH1). 171

Figure 3.53 : Taux d'infiltration mesurés (CH1) et calculés. Légende : CH1_i correspond au point Pi. Le trait plein correspond à une moyenne mobile des taux d'infiltration mesurés. 171
Figure 3.54 : Fuseau des teneurs en eau volumique (selon les données présentées au tableau 3.20) de l'ensemble des mesures effectuées sur la halde no 1..... 172
Figure 3.55 : Fuseau des fonctions de conductivité hydraulique (selon les données présentées au tableau 3.20) de l'ensemble des mesures effectuées sur la halde no 1. 174
Figure 3.56 : Valeurs des teneurs en eau à saturation mesurées à la surface de la halde no 1 174
Figure 3.57 : Valeurs des pressions d'entrée d'air (AEV) mesurées à la surface de la halde no 1 175
Figure 3.58 : Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation mesurées à la surface de la halde no 1 175
Figure 4.1 : Autocorrélation spatiale en prenant le point CH17 (figure 3.49) comme origine. a) de $\theta_s^{'}$. b) de $\psi_a^{'}$ et c) de $k_s^{'}$..... 184
Figure 4.2 : Facteurs d'échelle. a) relatifs à la pression (α_ψ), b) relatifs à la teneur en eau et à la conductivité hydraulique (α_θ et α_k respectivement). 186
Figure 4.3 : Courbes de rétention d'eau et fonctions de conductivité hydraulique en drainage des trois matériaux..... 188
Figure 4.4 : Conditions climatiques utilisées. Légende : Pr = précipitations. Ev.= évaporation (Environnement Canada, 2007)..... 192
Figure 4.5 : Configuration géométrique des haldes de la série 1, cas des simulations S1 à S22. 194
Figure 4.6 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S1 et S2. . 196
Figure 4.7 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S1 (avec GRV)..... 196

Figure 4.8 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S2 (avec SBL). 197
Figure 4.9 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S3 et S4. 199
Figure 4.10 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S3 (GRV). 199
Figure 4.11 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S4 (SBL). 200
Figure 4.12 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S5 et S6. 201
Figure 4.13 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S5 (GRV). 202
Figure 4.14 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S6 (SBL). 202
Figure 4.15 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S7 et S8..... 203
Figure 4.16 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S7 (GRV). 204
Figure 4.17 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S8 (SBL). 204
Figure 4.18 : Facteurs d'échelle de la conductivité (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S9 et S10..... 206
Figure 4.19 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S9 (GRV). 206
Figure 4.20 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S10 (SBL). 207
Figure 4.21 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S11 et S12..... 208

Figure 4.22 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S11 (GRV). 209
Figure 4.23 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S12 (SBL). 209
Figure 4.24 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S13 et S14..... 211
Figure 4.25 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S13 (GRV). 211
Figure 4.26 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S14 (SBL). 212
Figure 4.27 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S15 et S16..... 213
Figure 4.28 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S15 (GRV). 213
Figure 4.29 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S16 (SBL). 214
Figure 4.30 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S17 et S18..... 215
Figure 4.31 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S17 (GRV). 216
Figure 4.32 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S18 (SBL). 216
Figure 4.33 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S19 et S20..... 218
Figure 4.34 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S19 (RGV). 218
Figure 4.35 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S20 (SBL). 219

Figure 5.1 : Configuration géométrique des haldes simulées lors de la série 2 (simulations S21 à S27). 222
Figure 5.2 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S21..... 224
Figure 5.3 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S21. 224
Figure 5.4 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S22..... 225
Figure 5.5 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S22. 226
Figure 5.6 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S23..... 228
Figure 5.7 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S23. 228
Figure 5.8 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S24..... 229
Figure 5.9 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S24. 230
Figure 5.10 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S25..... 231
Figure 5.11 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S25. 231
Figure 5.12 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S26..... 232
Figure 5.13 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S26. 233
Figure 5.14 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S27..... 234

Figure 5.15 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S27. 234
Figure 5.16: Configuration géométrique des haldes (axisymétrique ou 2D) dans les séries 3 à 6 (simulations S28 à S49). 236
Figure 5.17 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S28 et S29. 238
Figure 5.18 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S28 (axisymétrique). 238
Figure 5.19 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S29 (2D). 239
Figure 5.20 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S30. 241
Figure 5.21 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S30. 241
Figure 5.22 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S31. 242
Figure 5.23 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S31. 243
Figure 5.24 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S32. 244
Figure 5.25 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S32. 245
Figure 5.26 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S33. 246
Figure 5.27 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S33. 246
Figure 5.28 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S34. 247

Figure 5.29 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S34. 248
Figure 5.30 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S35. 249
Figure 5.31 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S35. 249
Figure 5.32 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S36. 250
Figure 5.33 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S36. 251
Figure 5.34 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S37. 251
Figure 5.35 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S37. 252
Figure 5.36 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S38. 252
Figure 5.37 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S38. 253
Figure 5.38 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S39 et S40. 256
Figure 5.39 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S39 (axisymétrique). 256
Figure 5.40 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S40 (2D). 257
Figure 5.41 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S41. 258
Figure 5.42 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S41. 259

Figure 5.43 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S42. 260
Figure 5.44 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S42. 260
Figure 5.45 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S43. 261
Figure 5.46 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S43. 262
Figure 5.47 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S44. 263
Figure 5.48 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S44. 264
Figure 5.49 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S45. 265
Figure 5.50 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S45. 265
Figure 5.51 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S46. 266
Figure 5.52 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S46. 267
Figure 5.53 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S47. 268
Figure 5.54 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S47. 268
Figure 5.55 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S48. 269
Figure 5.56 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S48. 269

Figure 5.57 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S49. 270
Figure 5.58 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S49. 270
Figure 6.1 : Essai d'infiltration (à grande échelle) à travers une surface conique avec mesure de la hauteur d'eau en fonction du temps (les données de cet essai sont présentées à l'annexe 2) 275
Figure 6.2: L'effet de l'échelle sur la mesure de la porosité (adaptée d'après Chin, 2006). 279
Figure 6.3 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique pour un écart type de 5 et une longueur de corrélation de 0,7 selon l'axe des z. La longueur de corrélation est de 34,6 m selon l'axe des y (a) et de 419,4 m selon l'axe des x (b). 283
Figure 6.4 : Contours de teneur en eau après 1 an. Cas de la simulation S50. 284
Figure 6.5 : Grille d'éléments carrés (8 cm x 8 cm) montrant un creux dans la couche du sable SBL à l'interface SBL-GRV. 285
Figure 6.6 : Contours de teneur en eau après 1 an. Cas de la simulation S51. 286
Figure 6.7 : Variation de la teneur en eau au milieu de la coupe AB. Cas de la simulation S50 288
Figure 6.8 : Variation de la teneur en eau au milieu de la coupe AB. Cas de la simulation S51 288
Figure 6.9: Modèle de halde circulaire ou allongée en terrain plat, mettant en relief les stériles fins et grossiers. 291
Figure 6.10 : Contours de teneur en eau à la fin du mois de mars, juin, septembre et décembre (de gauche vers la droite et du haut vers le bas). Cas de la simulation S54 299
Figure 6.11 : Contours de teneur en eau à la fin du mois de mars, juin, septembre et décembre (de gauche vers la droite et du haut vers le bas). Cas de la simulation S55 299

Figure 6.12 : Rapport $\rho\,(S_H/V_H)$ en fonction de l'épaisseur et du nombre de bancs pour l'exemple de la halde décrit dans le texte (voir aussi tableau 6.2). 302

Figure 6.13 : Construction de la partie centrale d'un banc, constituée de stériles avec toutes les classes granulométriques et d'un système bicouche en surface. .. 306

Figure 6.14 : Valeurs de $\rho\,(S_H/V_H)$ en fonction du nombre de bancs pour l'exemple discuté dans le texte. 308

Figure 6.15 : Schéma illustrant les étapes (de 1 à 13) de la croissance (horizontale et verticale) d'une halde circulaire constituée de 7 bancs (N.B. le schéma ne tient pas compte de l'inclinaison de la couche de surface et ne distingue pas le noyau central des bancs) 310

Figure 6.16 : Représentation schématique d'un banc d'une halde et de la zone à décaper d'une rampe d'accès, après sa mise hors service (le schéma ne tient pas compte de l'inclinaison des couches de matériau fin). 311

LISTE DES SYMBOLES

a_b	Paramètres du modèle Brutsaert (1966) [L^{n_b}].
a_c	Constante reliée à la succion d'adhésion dans le modèle MK [-].
a_f	Valeur approximative de ψ_a dans le modèle de Fredlund et Xing (1994).
a_g , $a_g^{'}$	Paramètres du modèle de Gardner (1958) avec a_g [L^{-n_g}], $a_g^{'}$ [L^{-1}].
A	Paramètre calculé par une intégration numérique dans le modèle de Philip (1957a) [LT^{-1}].
$A_n(\theta)$	Coefficients apparaissant dans le modèle de Philip (1957a) [$LT^{-n/2}$].
A_{*n}	Paramètres apparaissant dans le modèle de Philip (1069b). Ce sont des intégrales de ϕ_n (des fonctions de teneur en eau) [$L^nT^{-n/2}$].
C_c	Coefficient de courbure [-].
Ci	Coefficients qui donnent la relation $k_{ra}^{'} = f_1(\psi_{ra}^{'})$ en fonction de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$.
Cor-i	Longueur de corrélation selon l'axe des x ou z (i=x ou z) [L].
C_U	Coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60} / D_{10}$) [-].
d	Espace entre de plans parallèles et verticaux [L].
$D(\theta)$	Coefficient de diffusion (ou diffusivité) de l'eau [L^2T^{-1}].
D_{10}	Diamètre correspondant à 10 % de passant dans la courbe granulométrique [L].
D_{c1} , D_{c2}	Diamètres de coupure granulométrique [L].
Dmax	Diamètre maximum de particules [L].
D_{p1} , D_{p2}	Diamètre des fractions 1 et 2 respectivement [L].
D_r	Densité des grains [-].
e	Indice des vides [-].
E_g	Épaisseur de la couche de matériau grossier [L]
E_f	Épaisseur de la couche de matériau fin [L].

f	Capacité d'infiltration d'un matériau [LT^{-1}].
f_1, f_2, f_3, f_4	Fonctions tel que $k'_{ra} = f_1(\psi'_{ra})$, $k'_{ra} = f_2(t'_{ra})$, $k'_{ra} = f_3(\psi'_a/\psi'_w)$ et $q = f_4(t)$.
F	Capacité d'infiltration cumulée d'un matériau [L].
F*	Infiltration cumulative sans dimension.
F_p	Infiltration cumulée au temps t_p [L].
G_m	Distribution uniforme dans l'intervalle (0,1).
h_0	Charge à la surface d'infiltration dans le modèle de Green et Ampt (1911) [L].
h_{co}	Remontée capillaire équivalente dans le modèle MK [L].
$h(t)$	Hauteur de la tête d'eau en fonction du temps [L].
H	Hauteur ou épaisseur d'une couche.
i_p	Intensité des précipitations [LT^{-1}].
I_p	Précipitations cumulées [L].
j	Numéro de l'intervalle sur la CRE dans le modèle de Fredlund et Xing (1994).
k_1	Différence entre conductivité hydraulique à saturation et la conductivité hydraulique initiale ($k_1 = k_s - k_i$) [LT^{-1}].
$k*$	Variable sans dimension avec $k* = \alpha_k k$, α_k [TL^{-1}] est un facteur d'échelle.
k_i	Conductivité hydraulique du sol à sa teneur en eau initiale [LT^{-1}].
$k(\psi)$	Conductivité hydraulique [LT^{-1}].
k_h	Perméabilité horizontale [L^2].
k_r	Fonction de conductivité hydraulique relative [-].
k_{ra}	Paramètres sans dimension relié à la conductivité hydraulique.

k'_{ra}	Paramètre sans dimension relié à la conductivité hydraulique, dans un essai d'infiltration.
k_s	Conductivité hydraulique à saturation [LT^{-1}].
k'_s	Conductivité hydraulique à saturation déterminée à partir d'un essai d'infiltration [LT^{-1}].
k_v	Perméabilité verticale [L^2].
L, L_0 , L_1	Rayon d'un volume sphérique de matériau [L].
m	Paramètre d'ajustement dans le modèle MK [-].
m_f	Paramètre du modèle Fredlund et Xing (1994) [-].
m_v	Paramètres du modèle de Mualem (1976) [-]. On utilise souvent $m_v = 1 - 1/n_v$.
M	Nombre des sous intervalles sur la CRE dans le modèle de Fredlund et Xing (1994).
n	Porosité [-].
n_b	Paramètres du modèle Brutsaert (1966) [-].
n_f	Paramètre du modèle Fredlund et Xing (1994) [-].
n_g	Paramètre du modèle de Gardner (1958) [-].
n_j	Nombre de mesures dans une série donnée.
n_v	Paramètre du modèle analytique de van Genuchten (1980) [-].
n'_v	Paramètre du modèle analytique de van Genuchten (1980) déterminée à partir d'un essai d'infiltration [-].
N'	Paramètre apparaissant dans la relation de champs de résidus ε_{ij} (>50) [-].
p1 , p2	Profondeur du front de mouillage dans les simulations numérique à des temps 1 et 2 [L].
P1 à P4	Points de mesure relevés sur la courbe des taux d'infiltration.

P_{r1}	Pression d'eau tout près de l'interface eau-air [$MT^{-2}L^{-1}$].
P_{r0}	Pression de l'air tout près de l'interface eau-air [$MT^{-2}L^{-1}$].
$q_j^*(t_i)$	Mesures spécifiques au temps t_i pour la jème série.
q_x^*	Variable sans dimension avec $q_x^* = \alpha_{q_x} q_x$, α_{q_x} [TL^{-1}] est un facteur d'échelle.
q_y^*	Variable sans dimension avec $q_y^* = \alpha_{q_y} q_y$, α_{q_y} [TL^{-1}] est un facteur d'échelle.
q_z^*	Variable sans dimension avec $q_z^* = \alpha_{q_z} q_z$, α_{q_z} [TL^{-1}] est un facteur d'échelle.
$q_j(t_i, \chi)$	Prédictions du modèle pour le vecteur χ .
q_z	Taux d'infiltration au temps t [LT^{-1}].
r	Rayon de la surface d'infiltration [L].
r_1	Rayon d'un tube capillaire [L].
r_α	Rapport entre l'aire de l'interface solide-liquide réelle et l'aire géométrique apparente de cette interface.
R	Rayon d'un cercle ou d'une sphère [L].
R_1 , R_2	Principaux rayons de courbure (positifs quand la surface est convexe, négatifs quand la surface est concave) [L].
s_1 , s_2	Fractions de surface occupées par des éléments S_1 et S_2; α_1 et α_2 sont les angles de contact sur S_1 seul et S_2 seul.
S	Sorptivité d'un matériau [$LT^{-1/2}$].
S_c, S_a	Parts de la succion capillaire et d'adhésion dans le degré de saturation du modèle MK [-].
S_e	Saturation effectif $S_e = \dfrac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ [-].

S_H	Surface de l'empreinte au sol d'une halde à stériles (S_{H0} et $S_{H\max}$ surfaces initiale et maximale) [L^2].
Si	Simulation numéro i.
S_{in}	Surface d'infiltration [L^2].
S_r	Degré de saturation [-].
S_Ω	Surface d'infiltration de l'eau dans le domaine Ω [L^2].
t	Temps de mesure de q_z [T].
t^*	Variable sans dimension avec $t^* = \alpha_t t$, α_t [T^{-1}] est un facteur d'échelle.
t_c	Temps où les forces gravitaires deviennent égales aux forces de rétention capillaire dans un essai d'infiltration [T].
t_i	ième lecture de temps [T].
t_p	Temps où la pression d'eau initialement négative devient nulle qui marque le début de la stagnation d'eau dans un essai d'infiltration [T].
t_{ra}	Paramètre sans dimension relié au temps.
t'_{ra}	Paramètre sans dimension relié au temps dans un essai d'infiltration.
u_w, u_a	Pression de l'eau et de l'air [$MT^{-2}L^{-1}$].
v	Vitesse de formation des couches de particules [LT^{-1}].
v_i	Poids associé respectivement à une série de mesure ou à un point en particulier.
V_c	Volume d'eau dans le contenant à t_i [L^3].
V_{cum}	Volume d'eau infiltré cumulé à t_i [L^3].
$V_{cum,r}$	Diminution du volume d'eau cumulée dans le réservoir à t_i [L^3].
V_H	Volume de stériles (pour une surface au sol de S_H) [L^3].
w	Débit de déversement de particules entre deux plans verticaux et parallèles [MT^{-1}].

w_{ij}	Poids associé respectivement à une série de mesure ou à un point en particulier.
w_m	Variable aléatoire définie à partir de G_m et α_A.
WDTP	Mesure de la mouillabilité d'un matériau ("Water Drop Penetration time") [T].
$x_1, x_2, \ldots x_n$	Mesures d'une propriété aux endroits 1,2,3,… n.
x^*	Variable sans dimension avec $x^* = \alpha_x x$, α_x [L^{-1}] est un facteur d'échelle.
y^*	Variable sans dimension avec $y^* = \alpha_y y$, α_y [L^{-1}] est un facteur d'échelle.
y_i	Point milieu du $i^{ième}$ intervalle de succion sur la CRE dans le modèle de Fredlund et Xing (1994) [L].
z^*	Variable sans dimension avec $z^* = \alpha_z z$, α_z [L^{-1}] est un facteur d'échelle.
Z_f	Profondeur du front de mouillage dans le modèle de Green et Ampt (1911) [L].
α	Angle de contact de l'eau sur un solide.
α_0	Angle de contact théorique sur une surface parfaitement lisse.
α_a, α_r	Angles de contact d'avancée (ou avançant) et au retrait.
α_A	Paramètre d'autocorrélation spatiale de la propriété mesurée A [L^{-1}].
$1/\alpha_A$	Longueur de corrélation [L].
$\alpha^{A,R}$	Angle de contact avançant ou au retrait.
α_i	Paramètres d'autocorrélation selon les directions x, y et z (i=1, 2 ou 3) [L^{-1}]. $1/\alpha_i$, longueur de corrélation selon la direction x, y ou z.
α_k, α_ψ, α_θ	Facteurs d'échelle relatifs à la conductivité hydraulique, à la teneur en eau et à la pression, utilisés dans les analyses stochastiques [-].
α_k', α_θ', α_ψ'	Facteurs d'échelle reliés à la conductivité hydraulique, à la teneur en eau et à la pression, dans un essai d'infiltration α_k' [TL^{-1}], α_θ' [-], α_ψ' [L^{-1}].

α_{re} Angle de contact réel.

α_v Paramètre du modèle analytique de van Genuchten (1980) [L^{-1}].

$\alpha_v^{'}$ Paramètre du modèle analytique de van Genuchten déterminé à partir d'un essai d'infiltration (1980) [L^{-1}].

β Paramètre de Parlange et al., (1982) égal à $\frac{1}{\theta_s - \theta_i}\int_{\theta_i}^{\theta_s}\frac{k_s - k(\theta)}{(k_s - k_i)}d\theta$ [-].

β_d Angle de contact dans le modèle MK.

β_f Angle de la pente de la couche de matériau fin.

β_h Angle de la pente globale de la halde.

β_p Angle de la pente périphérique avant ou après reprofilage.

γ_m Distribution uniforme dans l'intervalle [0, 2 π][-].

γ_w Poids volumique de l'eau [$MT^{-2}L^{-2}$].

ΔL Largeur des paliers dans une halde [L].

ε_{ij} Champs de résidus générer à partir du processus stochastique N(0,1, α_A).

η Paramètre égal à $(2+3\lambda_{BC})/\lambda_{BC}$.

θ Teneur en eau volumique [-].

$\theta*$ Variable sans dimension avec $\theta* = \alpha_\theta\theta$, α_θ [-] est un facteur d'échelle.

θ' Dérivée de la fonction $\theta(\psi)$ dans le modèle de Fredlund et Xing (1994).

θ_i Teneur en eau initiale d'un matériau [-].

θ_r Teneur en eau volumique résiduelle [-].

$\theta_r^{'}$ Teneur en eau volumique résiduelle déterminée à partir d'un essai d'infiltration [-].

$\theta_{r,FX}$ Teneur en eau résiduelle estimée à l'aide du modèle de Fredlund et Xing (1994) [-].

$\theta_{r,MK}$	Teneur en eau résiduelle estimée à l'aide du modèle MK [-].
θ_s	Teneur en eau volumique à saturation [-].
$\theta_s^{'}$	Teneur en eau volumique à saturation déterminée à partir d'un essai d'infiltration [-].
λ	Moyenne des distances qui séparent le centre de deux couches successives de particules entre deux plans verticaux et parallèles [L].
λ_{BC}	Indice des pores [-].
μ_A	Moyenne d'une population normalement distribuée (N(μ_A, σ_A)).
μ_E	Moyenne des mesures x_i du paramètre E.
π_1 à π_7	Paramètres sans dimension des équations d'écoulement.
ρ	Rapport de la surface à la base S_H sur le volume de stériles V_H, [L^{-1}].
ρ_e	Densité de l'empilement des couches de particules [ML^3].
ρ_A	Coefficient d'autocorrélation de la propriété mesurée A à la distance *l*.
ρ_E	Autocorrélation de x_1 avec x_{1+J} , x_2 avec x_{2+J},..., et de x_{n-J} avec x_n. J sert à séparer les intervalles de distance entre les mesures ("lag position *J*").
σ_A	Écart type d'une population normalement distribuée (N(μ_A, σ_A)).
σ_k, σ_ψ, σ_θ	Écart-type relatif à k, ψ et θ pour une distribution lognormale avec σ_k [LT^{-1}], σ_ψ [L] et σ_θ [-].
σ_s	Tension superficielle de l'eau [MT^{-2}].
σ_{sl}, σ_{gs}, σ_{lg}	Tension superficielle entre le solide et le liquide, le gaz et le solide et entre liquide et le gaz [MT^{-2}].
σ_E	Écart type des mesures x_i du paramètre E.
φ	Angle d'inclinaison d'une pente [degré].

φ_m	Angle à partir duquel un système statique de sphère se met en mouvement.
$\varphi_{\max}$	Angle maximum permettant un régime permanent stable du mouvement des sphères.
φ_r	Angle de repos correspondant à l'angle où des sphères en mouvement s'arrêtent.
ϕ	Rugosité d'une surface.
ϕ'	Angle de frottement interne d'un matériau.
ϕ_1, ϕ_2	Fonctions de teneur en eau dans le modèle de Philip (1057a) avec ϕ_1 [$LT^{-1/2}$] et ϕ_2 [LT^{-1}].
ϕ_m	Distribution uniforme dans l'intervalle [0, 2π][-].
χ	Vecteur des paramètres optimisés (e.g. θ_r, θ_s, ks, etc).
ψ	Pression négative de l'eau (généralement appelée succion) [L].
ψ^*	Variable sans dimension avec $\psi^* = \alpha_\psi \psi$, α_ψ [L^{-1}] est un facteur d'échelle.
ψ_0	Pression correspondant à une teneur en eau nulle (= 10^5 m) [L]
ψ_a	Pression d'entrée d'air en drainage (AEV) [L].
ψ_a'	Pression d'entrée d'air déterminée à partir d'un essai d'infiltration [L].
ψ_a/ψ_w	Rapport pression d'entrée d'air sur pression d'entrée d'eau (ψ_w=WEV ou "water entry value").
ψ_f	Succion constante dans le modèle de Green et Ampt (1911) au dessus de laquelle le déficit d'humidité ($\Delta\theta_i$ [-]) est uniforme [L].
ψ_i	Succion correspondant à la teneur en eau initiale [L].
ψ_{im}	Pression à imbibition complète lors d'un mouillage [L].

ψ_n	Paramètre de normalisation dans le modèle MK (ψ_n=1 cm quand h_{co} et ψ sont exprimés en cm) [L].
ψ_r	Pression correspondant à la teneur en eau résiduelle [L].
ψ_{ra}	Paramètre sans dimension relié à la pression.
ψ'_{ra}	Paramètre sans dimension relié à la pression dans un essai d'infiltration.
ψ'_w	Pression correspondant à la teneur en eau résiduelle déterminée à partir d'un essai d'infiltration [L].
Ω	Domaine d'infiltration d'eau [L^3].
$<>$	Crochets de MacCauley ($<x>=(x+\lvert x\rvert)/2$).

LISTE DES ANNEXES
(Sur CD-ROM)

Annexe 1 : Teneur en eau et densité après le démantèlement de la colonne du sable Kam Kotia

Annexe 2 : Données brutes des essais d'infiltration

Annexe 3 : Résultats de l'interprétation des essais d'infiltration à petite échelle

Annexe 4 : Données météorologiques de la station Latulipe

Annexe 5: Article: 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. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 26-30 March 2006, St. Louis, Missouri, R.I. Barnhisel (ed.). The American Society of Mining and Reclamation, pp. 582-597.

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

1.1 Généralités

Les rejets d'origine géologique produits par une mine comprennent (Aubertin et al., 1999) : le mort-terrain, résultant des excavations effectuées en surface, les roches stériles issues des différentes opérations minières et les rejets du concentrateur. Il faut également inclure les eaux qui s'infiltrent à travers le concentré et le minerai placé en surface, les eaux pompées du fond de la mine vers la surface et les produits du traitement des eaux (sédiments, boues de précipités, etc.).

Le mort-terrain, composé de sols naturels, est usuellement entreposé en surface sous forme de remblais. Les sols organiques sont entreposés séparément de façon à pouvoir être réutilisés lors de la phase de restauration et de végétation du site. Pour leur part, les rejets de concentrateurs et les eaux de mines et de procédés sont entreposés dans des bassins confinés par des digues.

Les roches stériles sont utilisées pour le remblayage des ouvertures souterraines ou stockées en surface sous forme d'empilements appelés haldes à stériles. Dans ce dernier cas, les matériaux grossiers peuvent former des structures de grandes dimensions (100 m et plus de hauteur) exposées aux conditions climatiques externes. C'est de ce genre de rejets miniers dont il sera question dans ce projet.

1.2 Les eaux du drainage minier

On peut définir le drainage minier comme étant le résultat de la circulation des eaux tant de surface que souterraines à travers les composantes d'un site minier (rejets du concentrateur, haldes à stériles, galeries de mine, etc.). On peut diviser le drainage

minier en quatre classes principales (Morin et Hutt, 1997, Aubertin et al., 2002), soit: le drainage minier acide (DMA, pH < 6), le drainage minier alcalin (pH > 9), le drainage minier neutre (6 < pH < 9), ainsi que le drainage minier au pH peu problématique, qui découle de l'exploitation de minéraux industriels non métalliques comme le sel gemme, la potasse, la kaolinite, etc. Le tableau 1.1 illustre les caractéristiques de ces quatre classes de drainage minier.

Le processus d'exploitation minière, qui vise l'extraction de substances minérales ayant une valeur commerciale, donne lieu à l'exposition de rejets miniers aux conditions climatiques locales. Les matériaux ainsi exposés peuvent contribuer à la formation du DMA. Le drainage minier acide est, de loin, le problème environnemental qui soulève le plus de préoccupations au Québec (Aubertin et al., 2002). Il comporte une mobilisation (solubilisation) de métaux lourds et d'autres substances toxiques pour l'environnement. Le drainage minier neutre (ou drainage minier neutre contaminé, DNC) peut aussi constituer une problématique préoccupante pour certains sites.

1.2.1 Le drainage minier acide

1.2.1.1 Processus biogéochimiques

Une fois construite (ou en cours de construction), une halde devient un système dont les frontières sont ouvertes aux mouvements des eaux, des particules solides et des gaz. Lorsque les stériles sont sulfureux, il peut y avoir génération de drainage minier acide (DMA). Ce dernier est le résultat d'une suite complexe de processus physiques, hydrogéologiques, chimiques et biologiques (Ritchie, 1994).

Le processus chimique à la base du DMA dans les rejets dits réactifs est l'oxydation des sulfures lorsque ceux-ci sont en contact avec l'oxygène et l'eau. On présente

généralement les équations chimiques de production du DMA avec la pyrite puisque cette dernière est le minéral sulfuré (ou sulfureux) le plus abondant.

Tableau 1.1: Type de drainage minier (tirée de Aubertin et al., 2002)

ALCALIN	NEUTRE
- pH du drainage >9 - alcalinité élevée - exploitations amiante kimberlite (diamant) bauxite cendres volantes scories de hauts fourneaux et autres	- 6<pH du drainage<9 - le drainage peut devenir alcalin ou acide dans le temps
ACIDE	**AUTRES**
- pH du drainage <6 - acidité élevée - %de métaux et sulfates élevé - exploitations métaux de base métaux précieux uranium charbon	- pH du drainage variable - exploitations potasse sel borates bentonite kaolinite sable et autres

L'oxydation de la pyrite peut être directe ou indirecte (Aubertin et al., 2002). L'oxydation directe se produit lors d'une réaction chimique (équation 1.1) entre la pyrite à l'état solide avec l'oxygène de l'air et l'eau :

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \qquad (1.1)$$

Lorsqu'il y a dissociation de la pyrite (équation 1.1), le fer ferreux (Fe^{2+}) produit peut s'oxyder :

$$2Fe^{2+} + 1/2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \quad (1.2)$$

Le fer ferrique peut précipiter sous forme d'hydroxyde, comme la ferrihydrite, si le pH est suffisamment élevé :

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad (1.3)$$

L'oxydation indirecte de la pyrite se produit par une réaction qui met en jeu un oxydant comme le fer ferrique (Fe^{3+}) lorsque le milieu est plus acide (pH $\leq$ 3 environ). Le Fe^{3+} peut alors oxyder la pyrite :

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \quad (1.4)$$

En comparant la stœchiométrie de la réaction d'oxydation directe de la pyrite (équation 1.1) avec celle de la réaction d'oxydation indirecte (équation 1.4), on se rend compte que l'oxydation directe conduit à la formation de 2 moles de H^+ (ou 1 mole d'acide sulfurique) pour 1 mole de FeS_2, tandis que la réaction d'oxydation indirecte produit beaucoup plus d'acidité, soit 16 moles de H^+ (ou 8 moles d'acide sulfurique) pour 1 mole de FeS_2. La réaction d'oxydation directe de la pyrite se produit surtout à des valeurs de pH proches de la neutralité (5 < pH < 7). L'oxydation indirecte de la pyrite survient typiquement à des valeurs de pH beaucoup plus faibles (pH < 3)

À partir des équations qui précèdent, on peut présenter les étapes de l'acidification des effluents, schématisée à la figure 1.1, de la façon suivante (Kleinmann et al., 1981, Aubertin et al., 2002).

I. La pyrite ainsi que d'autres minéraux sulfureux (chalcopyrite, pyrrhotite, sphalérite, covellite, arsénopyrite, galène, etc.) sont mis en contact avec une eau dont le pH est proche du point de neutralité (pH $\cong$ 7). Ils subissent d'abord une oxydation chimique lente (l'oxydation directe) suivant l'équation 1.1. Ce processus peut être catalysé par

diverses bactéries, telle la bactérie *Acidithiobacillus ferrooxidans,* lorsqu'elles sont directement en contact avec les sulfures (e.g., Singer et Stumm, 1970; Kleinmann et al., 1981),. Notons toutefois que l'action de telles bactéries est plus marquée lorsque le pH est relativement bas, soit pH ≤ 3,5 environ. Le milieu s'acidifie graduellement autour des sulfures et la deuxième étape du processus s'amorce.

Figure 1.1 : Étapes de la formation du DMA (d'après Kleinman et al., 1981).

II. La deuxième étape consiste en la transformation du fer ferreux en fer ferrique selon l'équation 1.2. Il y a alors précipitation d'un hydroxyde de fer ($Fe(OH)_3$), ce qui contribuera à acidifier davantage le milieu (équation 1.3), engendrant ainsi un pH de plus en plus bas. En deçà de 3,5 environ, le fer ferrique reste en solution et devient un agent oxydant pouvant oxyder la pyrite selon la réaction 1.4 (oxydation indirecte).

III. À la dernière étape, on observe habituellement l'effet catalytique marqué des bactéries acidophiles qui contribueraient notamment à accélérer le processus

d'oxydation du fer ferreux en fer ferrique, ce qui se traduit par une augmentation de plusieurs ordres de grandeur du taux d'acidification générale (e.g. SRK, 1991). La présence de ces bactéries permet l'établissement d'un processus cyclique mettant en jeu les réactions 1.2 et 1.4 (sans passer par la réaction 1.3). Les métaux lourds présents dans plusieurs sulfures (par exemple, Zn, Mn, Cd, Hg, Fe, Ni, Co, As) seraient ainsi libérés et de grandes quantités d'acide seraient générées.

1.2.1.2 Processus physiques

Les processus physiques impliqués dans la production de DMA sont : l'écoulement multiphasique, le transfert de chaleur et la diffusion des composantes gazeuses (Lefebvre, 1994). La figure 1.2 montre un modèle conceptuel des mécanismes physiques qui opèrent dans les haldes à stériles. Elle illustre le fait que la production du DMA dans les haldes dépend des processus physiques suivants (Lefebvre, 1994) : l'apport d'oxygène par diffusion et convection, la production et le transfert de chaleur (la réaction d'oxydation de la pyrite à pression constante est fortement exothermique; l'enthalpie de celle-ci est de l'ordre de –1409,2 kJ/mol; Lefebvre, 1994) et l'écoulement de gaz et de liquide.

L'interaction de ces processus, telle que décrite par Lefebvre (1994), suit le cycle suivant. D'abord, l'oxydation directe de la pyrite produit de la chaleur qui est dissipée vers la surface et la base de la halde par conduction. Les gradients de la température ainsi créés entraînent des gradients de pression des gaz qui déclenchent leur convection si la perméabilité au gaz des stériles est suffisante. Puisque la colonne de gaz dans la halde est plus chaude que celle à l'extérieur, elle a tendance à se déplacer vers le haut et à s'échapper vers la surface de la halde. En même temps, l'air extérieur pénètre dans la halde, en grande partie, par sa bordure. Ainsi, la convection d'air apporte dans la halde de l'oxygène qui est utilisé dans la réaction d'oxydation de la pyrite pour continuer à produire de la chaleur et poursuivre ce cycle. L'infiltration d'eau est également reliée,

indirectement, au transfert de chaleur. Premièrement, l'infiltration d'eau permet le transfert de chaleur par advection. Deuxièmement, les mouvements de gaz dans la halde provoquent l'évaporation et la condensation de la vapeur d'eau et la redistribution de l'humidité au sein de la halde. Ce cycle est en partie régulé par la variation de l'activité bactérienne en réponse aux conditions engendrées.

Figure 1.2 : Mécanismes physiques opérant durant la production de DMA dans les roches stériles (adaptée d'après Lefebvre, 1994)

À long terme, les conditions frontières du système sont relativement constantes, mais elles subissent des variations cycliques (diurnes et saisonnières). Pour la température, les changements diurnes n'affectent que très peu les conditions dans la halde puisque la pénétration des variations de températures de courte durée est faible. De plus, il a été observé que les fluctuations de températures saisonnières à la surface n'affectent pas la température des eaux souterraines à plus de 10 m de profondeur; cela a été considéré valable pour les haldes à stériles aussi (Lefebvre, 1994). En général, les changements de

pression atmosphérique ne permettent pas non plus le mouvement de gaz de la halde sur une grande épaisseur.

À la base des haldes à stériles, les pertes de fluides sont plus ou moins importantes selon la conductivité hydraulique (saturée et non saturée) des matériaux sous-jacents. Dans le cas de l'oxygène, la base peut être pratiquement considérée comme une limite imperméable, surtout si la halde est saturée à cet endroit (Lefebvre, 1994).

Lefebvre (1994) a étudié numériquement la halde sud de la mine Doyon (située en Abitibi). Le modèle utilisé a une zone non saturée d'une épaisseur de 30 m et une zone saturée (à la base) d'épaisseur variable allant de 0 à 1,5 m. Les dimensions latérales du domaine sont de 87 m à la base et 57 m à la surface. Les résultats de ces modélisations montrent qu'après 9 ans de production de DMA :

- La contribution de la diffusion au transport de l'oxygène (et donc de la production du DMA) est très faible dans un système où la convection est importante. Cependant, au tout début, c'est la diffusion qui se charge du transport de l'oxygène car à ce stade, il n'existe pas de gradients de température à l'intérieur de la halde.

- Pour que la convection soit significative, il faut que les stériles possèdent une perméabilité isotrope minimale de l'ordre de 10^{-10} m^2. Une perméabilité anisotrope et relativement élevée ($k_h=5x10^{-9}$ m^2 et $k_v=5x10^{-10}$ m^2, par exemple) provoque une augmentation de la température dans l'ensemble de la halde à cause de la pénétration horizontale plus grande de l'air (en raison de l'anisotropie). Il en résulte un taux d'oxydation élevé dans l'ensemble de la halde.

- Les haldes de faibles dimensions peuvent aussi être le siège de la convection d'air et du fort taux de production du DMA.

- La production du DMA dans une halde dépend plus des propriétés contrôlant la convection (la perméabilité à l'air et le degré d'anisotropie) que de la cinétique chimique du système.

Ces résultats montrent l'importance de bien caractériser les conditions d'écoulement de l'eau dans les haldes car la production de DMA est fortement liée à la distribution de l'humidité et au mouvement du lixiviat.

1.2.2 Le drainage minier neutre contaminé

Comme mentionné précédemment, la baisse du pH causée par l'oxydation des minéraux sulfureux crée des conditions géochimiques favorables à la mise en solution des différents métaux composant le rejet minier. Cependant, certains de ces métaux sont solubles même à des pH près de la neutralité (e.g., Bussière et al., 2005). À titre d'exemple, pour faire précipiter la quasi-totalité du zinc contenu dans un effluent, le pH doit être rehaussé autour de 9,5, alors que pour le nickel, on parle habituellement d'un pH supérieur à 8,5 (e.g. Ritcey, 1989). Dans la nature, il est rare d'avoir des pH aussi élevés. On peut donc retrouver des concentrations non négligeables de ces éléments solubles dans des effluents miniers dont le pH est près de la neutralité.

Le drainage neutre contaminé (DNC) est défini comme étant un drainage minier dont la qualité chimique est affectée par le passage à travers le rejet minier, mais qui n'est pas acide (Stantec, 2004, Bussière et al., 2005). Le DNC peut apparaître dans différentes conditions (Stantec, 2004; Bussière et al., 2005); mentionnons par exemple :

i- Les minéraux sulfureux s'oxydent et produisent un peu d'acide, ce qui entraîne la mise en solution de certains métaux solubles. Cependant, une portion des rejets contient suffisamment de minéraux acidivores pour maintenir le pH des exfiltrations près de la neutralité. Dans ce cas, les réactions géochimiques (par exemple :

précipitations) présentes dans le rejet minier n'affectent pas de façon significative la teneur de certains métaux plus solubles, qui demeurent à des concentrations suffisamment élevées pour avoir un impact sur l'environnement.

ii- Il y a lixiviation des métaux contenus dans les rejets sans génération d'acide (par exemple la sphalérite peut réagir avec l'oxygène sans générer d'acide, tout en libérant du zinc, très soluble).

iii- Il peut y avoir production de drainage neutre lorsque des méthodes de contrôle du DMA sont appliquées sur des rejets générateurs d'acide. Par exemple, certains rejets miniers placés sous un recouvrement en eau qui limite l'accès à l'oxygène et, par conséquent, réduit l'oxydation des minéraux sulfureux et la génération d'acide. Cependant, la quantité d'oxygène disponible dans l'eau peut être suffisante pour qu'il y ait une oxydation localisée et/ou un (faible) relargage de métaux, sans pour autant avoir un problème d'acidité à l'effluent.

Les principaux éléments que l'on peut retrouver dans les effluents neutres contaminés sont, par ordre alphabétique (Stantec, 2004; Bussière et al., 2005) : antimoine, arsenic, cadmium, chrome, cobalt, manganèse, mercure, molybdène, nickel, sélénium, sulfates et zinc. Au Québec, on reconnaît habituellement que les plus problématiques sont l'arsenic, le nickel et le zinc (Bussière et al., 2005).

L'eau joue encore ici un rôle important dans la production du DNC. Le contrôle de son mouvement peut aussi permettre de prévenir la contamination du lixiviat.

1.3 Problématique, objectifs et contenu de la thèse

Les travaux de cette thèse portent surtout sur une étude des moyens visant à prévenir la contamination des effluents par le DMA (ou le DNC) tout au long de la construction de

la halde. La granulométrie des stériles constituants les haldes est généralement très étalée, ce qui permet d'avoir sur place des matériaux fins et grossiers, nécessaires à la création des effets de barrière capillaire qui peuvent se révéler utiles pour contrôler le mouvement de l'eau. Au lieu d'une déposition aléatoire des stériles, les résultats de ce projet donneront certains principes pour minimiser la production d'eaux contaminées. Ceci entraînera, lors de la mise en œuvre, certains changements dans les pratiques courantes de construction des haldes à stérile.

Diverses études montrent le grand nombre de paramètres et de processus reliés à la production de DMA et de DNC (voir par exemple Ritchie, 1994; Lefebvre, 1994; Lamontagne, 2001). Trois éléments de base doivent usuellement être présents pour générer le DMA ou le DNC : des matériaux réactifs, de l'eau et de l'oxygène. Dans ce projet, on s'intéresse plus spécifiquement aux mouvements de l'eau dans les haldes à stériles. Les autres processus qu'on vient de voir ne seront pas pris en compte directement puisqu'initialement, ce sont les processus liés à la présence d'eau qui déclenchent la contamination.

Les travaux de Lefebvre (1994) montrent aussi le rôle que jouent les parois latérales de la halde sur la migration de l'oxygène vers l'intérieur de la halde. L'air (plus riche en oxygène) qui rentre par les parois remplace l'air chaud qui s'échappe par la surface de la halde créant ainsi un mouvement circulaire de l'air. Plus la hauteur de la halde est grande plus l'amplitude de ce mouvement est grande et plus grand est le volume de stériles alimentés en oxygène. Lamontagne (2001) a montré que l'insertion de couches de matériau fin de faibles épaisseurs à des niveaux réguliers dans une halde peut limiter la migration d'oxygène vers l'intérieur de la halde et réduire ainsi la production du DMA. Les couches de matériaux fins qui reposent horizontalement sur des couches de stériles plus grossiers réduisent l'amplitude des mouvements des flux d'oxygène et confinent ainsi la circulation des gaz près des parois. Au niveau des écoulements de l'eau ces couches de matériaux fins transportent, à l'aide des effets de barrière capillaire

1D, de l'eau à l'intérieur de la halde. Ceci réduit leur efficacité à contrôler le DMA (voir Fala, 2002; Fala et al., 2003; Molson et al., 2005). Fala (2002) a proposé une configuration géométrique avec des couches légèrement inclinées (5 à 10%) vers l'extérieur de la halde. Cette configuration permet d'acheminer, grâce aux effets de barrière capillaire 2D, l'eau qui s'infiltre dans la halde vers la périphérie, laissant le centre de la halde pratiquement sec. Les simulations numériques ont montré que cette configuration permet une augmentation de la teneur en eau vers la périphérie. Ceci assure un meilleur contrôle du mouvement de l'eau et donc un meilleur contrôle du DMA (ou du DNC). Les simulations numériques effectuées avec deux matériaux homogènes (un fin et un grossier) étaient encourageantes (Fala, 2002; Fala et al., 2003; Molson et al., 2005), mais il subsiste encore des questions auxquelles il fallait répondre. Ces questions sont reliées notamment aux écoulements préférentiels et aux propriétés hydriques plus réalistes des stériles. À cet égard, on souhaite évaluer l'ampleur des écoulements préférentiels dans les haldes et leur effet sur le comportement hydrique des couches de matériau fin inclinées. On a tenu compte dans les simulations de l'hétérogénéité des propriétés des stériles (une halde ne peut pas être représentée hydrogéologiquement par seulement un ou deux matériau(x)). Des questions reliées à la mise en œuvre des couches inclinées ont été aussi soulevées; cette mise en œuvre doit assurer un minimum de régularité de l'interface avec une inclinaison uniforme. La méthode proposée ici se base sur les moyens de mise en œuvre traditionnels peu coûteux, comme le déversement à la benne.

Cette thèse a deux objectifs principaux :

- Évaluer les conditions et l'effet des écoulements préférentiels sur le comportement hydrogéologique des haldes. Ces derniers sont induits par l'introduction d'une variabilité avec une forte corrélation spatiale des propriétés hydriques des stériles.

- Élaborer des stratégies permettant de mieux contrôler le mouvement de l'eau à l'intérieur d'une halde (en tenant compte de ces écoulements préférentiels). On vise une gestion intégrée des stériles, pour prévenir le DMA (ou le DNC) depuis le début de la construction de la halde jusqu'à la fin de son exploitation.

Pour parvenir à cela, une étude du comportement hydrogéologique des haldes (simulation de plusieurs années d'écoulement), a été menée en conditions non saturées et en introduisant une variabilité spatiale croissante des propriétés hydriques des stériles. Des configurations géométriques habituellement rencontrées sur le terrain (un ou plusieurs niveaux, circulaires ou allongées) ont été utilisées. Ces analyses permettent de dégager les paramètres hydrogéologiques qui conditionnent les mouvements de l'eau (et donc ceux responsables du déclenchement et de la migration du DMA ou du DNC) et la mise au point, par la suite, des mesures susceptibles de mieux les contrôler.

Un volet important relié à ces travaux touche la caractérisation des matériaux d'une halde existante. Cette caractérisation consiste à effectuer des essais d'infiltration en surface de la halde dans le but d'évaluer les propriétés hydriques et la distribution spatiale de ces propriétés *in situ* (près de la surface) sur un cas réel.

Ce document est organisé de la façon suivante :

Après cette introduction, le chapitre 2 traite tout d'abord les propriétés des particules granulaires quand elles sont immobiles (constituant ainsi un milieu poreux). La deuxième partie de ce chapitre donne un aperçu sur le comportement des particules en mouvement et de la ségrégation granulométrique. C'est ce phénomène qui permet la séparation des particules fines des grossières lors d'un déversement des stériles au sommet de la pente d'une halde. On parlera en suite de l'interaction eau/particules granulaires (certaines données concernant les particules de stériles y seront présentées), et les lois physiques qui régissent le mouvement de l'eau dans les milieux poreux non

saturés. Vers la fin de ce chapitre on présente une revue des solutions et des équations (analytiques et empiriques) utilisées pour estimer le taux d'infiltration de l'eau dans les sols.

Le chapitre 3 présente une approche ralliant méthodes numériques et les propriétés des équations d'écoulement sans dimensions pour l'interprétation des essais d'infiltration (approche analytico-numérique). La démonstration de l'approche est basée d'abord sur des données synthétiques. Une application à un essai en laboratoire et à quelques essais de terrain (sur la halde no 1 de la mine Laronde) est montrée dans la deuxième partie de ce chapitre. L'importance de ces résultats réside dans le fait que ces essais donnent une estimation des propriétés hydriques (saturées et non saturées) *in situ* de la partie superficielle de la halde.

Dans les chapitres 4 et 5, on analyse l'écoulement de l'eau à long terme dans les haldes à stériles présentant une variabilité spatiale de leurs propriétés hydriques. Différents degrés de variabilité et d'orientation de la forte corrélation spatiale ont été étudiés. Le chapitre 4 porte sur les haldes avec un seul matériau (distribution stochastique ayant une seule moyenne et un seul écart type). Le chapitre 5 présente des simulations de haldes formées de deux matériaux (un grossier et un fin). Le but ici est d'évaluer l'effet d'une variabilité spatiale à différents degrés sur l'écoulement et sur l'effet de barrière capillaire 2D.

Une discussion des résultats et une analyse de l'effet des écoulements préférentiels sont présentées au chapitre 6. On y trouve aussi des recommandations pour le dimensionnement et la planification des travaux de construction d'une halde. Ces moyens visent une rationalisation du déroulement des travaux de construction afin de faciliter sa restauration à la fermeture de la mine.

Enfin une conclusion et quelques recommandations terminent ce document.

Les principales retombées scientifiques de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

- Une nouvelle approche analytico-numérique a été proposée pour l'interprétation des essais d'infiltration. Cette méthode permet d'estimer quatre paramètres (sur cinq) du modèle de van Genuchten (1980), pour une infiltration du type 1, 2 ou 3D.

- L'approche d'analyse qui s'applique à un matériau homogène ou hétérogène a mis en lumière le rôle de divers paramètres hydriques tels que la pression d'entrée d'eau, le rapport de la pression d'entrée d'eau sur la pression d'entrée d'air et la conductivité hydraulique à saturation sur la variation du taux d'infiltration en fonction du temps.

- On a aussi montré que l'introduction d'une variabilité des propriétés hydriques avec une forte corrélation spatiale (horizontale, verticale ou mixte) peut influencer l'écoulement de l'eau. Ainsi, le mouvement de l'humidité dans la halde est fortement relié à la direction de la corrélation des propriétés hydriques des stériles. Ceci constitue une progression dans notre compréhension des écoulements préférentiels dans les haldes à stériles.

- Les résultats de nos travaux ont montré que l'angle d'inclinaison et l'épaisseur des couches de matériau fin sont les principaux paramètres qui influencent le comportement de systèmes stratifiés (matériau fin sur matériau grossier avec une interface inclinée), destinés à contrôler le mouvement de l'eau dans les haldes (homogènes ou possédant une variabilité faible à modérée des propriétés hydriques des matériaux).

- Enfin, ce projet propose certains outils permettant de mieux concevoir et organiser les travaux d'entreposage des stériles, ce qui faciliterait la restauration des haldes à la fin des opérations.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Halde à stériles : propriétés et structure

2.1.1 Matériaux granulaires secs

2.1.1.1 État statique

Les divers types de matériaux granulaires, MG (comme les roches stériles) à l'état statique ont généralement des propriétés équivalentes à celles d'un sol pulvérulent (sans cohésion). Les principales propriétés résultantes de cet état sont présentées dans le paragraphe suivant. On abordera ensuite les MG en mouvement. Ce mouvement induit lors de la déposition des MG a une grande influence sur la structure des empilements (ou haldes dans le cas des stériles).

Structure de base

Dans un MG, les particules sont différentes dans leurs dimensions, leurs formes et leurs orientations. Elles peuvent être liées de façon variée et irrégulière qu'il est très difficile, voire impossible, de caractériser selon une géométrie exacte. D'autres complications viennent s'ajouter à cela. Il y a par exemple l'instabilité inhérente à la structure du MG (et donc la non constance dans le temps), et son hétérogénéité dans l'espace. La structure d'un MG est aussi affectée par les variations climatiques (diurnes et saisonnières), l'activité biologique et par les pratiques d'aménagement et d'utilisation des sols (Hillel, 1998).

Pour ces raisons il n'existe pas une façon unique de caractériser et quantifier la structure d'un MG. D'ailleurs, le terme structure est un concept plutôt qualitatif que quantitatif (en géotechnique et hydrogéologie). La plupart des méthodes qui existent pour caractériser la structure d'un sol et autres MG sont indirectes. Elles sont généralement conçues non pas pour mesurer directement la structure mais pour évaluer les effets de cette structure sur des paramètres mesurables. Parmi ces méthodes, il y en a qui sont spécifiques à des domaines en particulier (i.e. agronomies, génie civil, génie minier) et d'autres qui sont universelles.

En général, on distingue trois grandes catégories de structure à l'échelle mésoscopique (Hillel, 1998) : pulvérulente ("single grained"), cohérente ("massive") et agglomérée ("aggregated"). Lorsque les particules sont complètement libres les unes par rapport au autres, la structure est complètement dispersée, comme c'est le cas d'un dépôt non consolidé de grains fins dans un désert; la structure est alors dite pulvérulente (non structurée selon une ancienne nomenclature). Lorsque les particules sont assemblées formant un milieu massif (ou quasi continu), comme dans le cas d'argiles, la structure est dite cohérente. Entre ces deux extrêmes, on parle de structures intermédiaires ou agglomérées, dans lesquelles des particules grossières sont associées à des amas de particules plus fines. D'autres éléments de la structure des sols peuvent aussi être définis à l'échelle microscopique (Mitchell, 1993), surtout dans le cas des matériaux fins.

Caractérisation de la structure d'un MG

L'espace dans un MG non occupé par les particules solides est généralement continu. Il peut être considéré comme un seul volume des pores. Ce volume est cependant extrêmement difficile à caractériser vu son extrême variabilité topologique. L'approche usuelle est alors de considérer cet espace comme un ensemble plus ou moins discret de pores interconnectés.

Selon l'échelle, il existe trois catégories de pores (Hillel, 1998) : micropores, pores capillaires et macropores. Les micropores ont généralement un diamètre inférieur à environ 1 μm. On les retrouve surtout dans les sols argileux. L'eau dans ce type de pore est soumise à des forces adhésives et sa nature est différente de celle qui se trouve dans des pores plus grands (Mitchell, 1993). La différence réside surtout dans sa composition ionique et dans sa viscosité. Des phénomènes tels que l'adsorption cationique, l'hydratation et l'exclusion anionique peuvent avoir lieu, et affecter le comportement du fluide. L'eau dans ces pores n'obéit plus aux lois classiques de la capillarité et de Darcy. Cette eau adsorbée est souvent discontinue et elle ne participe pas directement aux mouvements usuels de l'eau.

Les pores capillaires sont les pores dont la largeur se situe entre quelques micromètres et quelques millimètres. Les fluides qui les traversent obéissent généralement aux lois de la capillarité et à celle de Darcy. À l'état non saturé, ces pores montrent un ménisque air-eau typique. L'écoulement de l'eau dans ces pores est généralement laminaire.

Les macropores peuvent avoir plusieurs millimètres voir plusieurs centimètres de largeur. Ils sont aisément visibles à l'œil nu. Ils sont formés par des espaces entre de gros grains, ou ils apparaissent comme des fentes (dans des sols argileux secs par exemple). Ils peuvent aussi résulter d'activités biologiques (animales ou végétales). Quand ils sont secs, ces pores constituent souvent des barrières contre l'écoulement en permettant seulement à un film d'eau de couler le long de leurs parois (comme un ruissellement interne). Quand ils sont remplis d'eau, ils permettent un drainage rapide du sol qui cause parfois un écoulement turbulent n'obéissant pas à la loi de Darcy.

Dans un MG comme les stériles de mines en roches dures, on rencontre généralement les deux derniers types de pores (les minéraux argileux, au sens minéralogique du terme, y sont usuellement presque absents).

Arrangement des particules

Dans le cas des matériaux possédant des pores capillaires, l'arrangement interne des grains dépend de la distribution de leurs dimensions et de leur forme ainsi que du mode de déposition. Il existe deux cas extrêmes d'arrangement pour un ensemble de grains sphériques: i) un état ouvert avec un minimum de densité (maximum de porosité) pour des grains de diamètre uniforme, ou ii) un état où les vides entre les gros grains sont remplis par de petits grains dans une succession idéale pour donner un maximum de densité ou un minimum de porosité (Hillel, 1998).

Considérons un ensemble de sphères de même diamètre. Pour ces dernières, la densité minimale (et donc la porosité maximale) est donnée par un arrangement cubique des grains. Dans ce mode d'agencement, chaque grain est en contact avec les 6 grains voisins de chaque coté des trois axes orthogonaux (voir figure 2.1a). La porosité n est donc de 47,6 % (tableau 2.1), indépendamment du diamètre des grains (indice des vides e de 0,91). La densité maximale est donnée par deux modes d'arrangement : pyramidal et tétraédral (voir figure 2.1d et e). Dans les deux agencements chaque sphère est en contact avec 12 autres sphères voisines. La porosité est alors de 25,9 % (indice des vides e de 0,35). D'autres arrangements intermédiaires sont aussi montrés à la figure 2.1 et décrits au tableau 2.1.

Des systèmes contenant des sphères de diamètres différents ont été analysés par Wise (1952) et Deresiewicz (1958). Dans de tels arrangements, une sphère peut avoir jusqu'à 30 sphères voisines (voir figure 2.2), et la porosité n peut descendre jusqu'à 20% (e =0,25).

Figure 2.1: Modèle d'arrangement de sphères : a) cubique simple, b) cubique tétraédral, c) tétragonal sphéroïdal, d) pyramidal et e) tétraédral (tirée de Hillel, 1998).

La proportion relative des diverses fractions granulométriques affecte la porosité. Par exemple, la figure 2.3 montre la variation de la porosité en fonction de la proportion de particules fines pour 4 distributions bimodales de billes de verre. Il est à noter que la porosité présente un minimum pour un pourcentage de particules fines qui varie selon la taille.

Tableau 2.1 : Arrangement de sphères de rayon R et la porosité correspondante (adapté d'après Hillel, 1998).

Configuration	**Nombre de contacts**	**Épaisseur des niveaux**	**Volume unitaire**	**Porosité %**	**Indice des vides**
Cubique simple	6	2R	$8R^3$	47,64	0,91
Cubique tétraédral	8	2R	$4x3^{1/2} R^3$	39,54	0,65
Tétragonal sphéroïdal	10	$3^{1/2} R$	$6R^3$	30,19	0,43
Pyramidal	12	$2^{1/2} R$	$4x2^{1/2} R^3$	25,95	0,35
Tétraédral	12	$2x2^{1/2}R/3$	$4x2^{1/2} R^3$	25,95	0,35

Figure 2.2 : Arrangement idéal dans une distribution polymodale de particules (tirée de Hillel, 1998).

Figure 2.3 : Porosité en fonction de la proportion des particules fines dans 4 mélanges bimodaux de sphères. D_{p1} et D_{p2} [μm] : diamètre des fractions 1 et 2 respectivement (tirée de Suzuki, 2006).

Dans la nature, on peut considérer que les sols granulaires ressemblent à une collection polymodale de grains qui ont été souvent arrondis par l'érosion. La porosité peut alors varier entre les deux extrêmes; i.e. entre 20 et 50 % (Hillel, 1998). Dans le cas des stériles, l'angularité des particules est plus grande et la taille des cailloux et blocs peut être plus grande. La porosité minimale des stériles peut dans certains cas être inférieure à 20% (du moins à une échelle locale).

Texture

Le terme texture utilisé en agronomie et en physique des sols est relié à l'intervalle de dimensions auquel appartiennent les particules. La texture donne donc des renseignements sur les dimensions moyennes, maximale et minimale, et sur l'uniformité et la distribution granulométrique globale des particules. Ce terme a une connotation quantitative et qualitative. Qualitativement, il fournit une première impression sur le matériau : est-il fin et 'doux' (au touché) ou grossier et rugueux? Ce terme dénote aussi avec une certaine précision les proportions quantitatives des diverses fractions granulométriques qui composent le matériau (Hillel, 1998).

2.1.1.2 Matériaux granulaires en mouvement

Les MG en mouvement peuvent interagir entre eux de façon dynamique. Dans certains cas, ils se comportent comme des particules individuelles, alors que dans d'autres cas leur interaction contrôle leur comportement. Le résultat peut mener à une ségrégation granulométrique. Comprendre ce phénomène est important ici puisque la ségrégation conditionne, en grande partie, la structure des haldes à stérile.

Ségrégation

La ségrégation granulométrique est un phénomène très commun et d'une grande importance pour plusieurs industries (mines, agronomie, agroalimentaires, pharmaceutiques, céramiques, etc.). Elle survient à chaque fois qu'on verse, vibre ou met en rotation des granulats de caractéristiques différentes dans un fluide (comme l'air ou l'eau). Ces caractéristiques peuvent être par exemple (Dolgunin et al. 2006): la taille, la forme, la densité, l'état de la surface (comme la rugosité) et les propriétés mécaniques des particules (comme le module d'élasticité). Parmi toutes ces propriétés, le facteur dimension est de loin le plus important (Richard et al., 1999).

La ségrégation est un phénomène bien connu, utilisé par les humains depuis des siècles (par exemple séparation des grains de céréales, extraction de l'or, etc). Toutefois, les bases physiques de ce phénomène ne sont pas encore toutes élucidées. Ceci est dû au fait que malgré son apparente simplicité, les mécanismes physiques à sa base sont nombreux et complexes (Dolgunin et al. 2006). C'est pour cette raison que les outils mathématiques les plus utilisés pour décrire la ségrégation granulométrique sont de nature probabiliste. Les modèles issus de ces théories, bien utiles dans certains cas spécifiques, ne permettent toutefois pas de saisir l'essence du phénomène et leurs pouvoirs prédictifs sont limités. Certains modèles déterministes peuvent, par contre, fournir des prédictions adéquates mais ils ne s'appliquent généralement qu'à des cas particuliers (Dolgunin et al. 2006) souvent assez simples. Compte tenu de l'importance de ce phénomène sur le comportement hydrogéologique des haldes à stériles, une brève description du phénomène est présenté dans ce qui suit.

Mécanismes fondamentaux de la ségrégation

La ségrégation est l'opposée du mixage, mais les deux phénomènes font appel aux mêmes mécanismes. Il est donc possible de considérer, dans un premier temps, les

processus physiques reliés au mixage (ou mélange) comme étant source de ségrégation. Pour servir de bases pour des cas plus généraux, certains mécanismes simples sont considérés ici pour le cas des particules sphériques qui agissent individuellement ou qui interagissent entre elles (Shinohara, 2006) :

Effet de trajectoire

Lorsque des particules sont projetées dans un fluide, à une certaine vitesse initiale horizontale, elles se séparent selon leur taille et leur densité. Les plus grandes ou les plus denses se déplacent plus loin, horizontalement.

Effet de rotation

Lorsque des particules se déplacent sur un plan incliné, elles peuvent rouler ou/et glisser. Les plus grandes ou celles qui rencontrent moins de frottement parcourent plus de distance. Cependant, quand le glissement est seul responsable du mouvement, la distance parcourue est indépendante de la densité.

Effet de dénivellation

Il est plus facile pour les grandes particules de rouler sur des obstacles d'une certaine hauteur. Elles atteignent ainsi la base du plan incliné plus rapidement et en plus grand nombre que les plus petites.

Effet d'insertion

Une particule d'une certaine taille et d'une certaine densité placée au dessus de deux autres particules (sur un même plan) de différentes tailles et densités, peut déplacer ces

dernières dans le sens opposé au frottement horizontal qui s'exerce sur elles et ainsi s'insérer entre les deux.

Percolation

À chaque fois que la porosité ou la fluidité augmente suite à la déformation d'une couche de MG, les plus petites particules peuvent percoler à travers les interstices formés par les plus grandes. Cette forme de ségrégation peut survenir même quand le rapport des tailles est aussi faible que 1,53 (Shinohara, 2006).

En pratique, on rencontre souvent la combinaison de deux ou de plusieurs mécanismes à la fois.

Comportement le long d'un plan incliné

Les mécanismes de ségrégation qui se produisent lors du déplacement de particules le long d'un plan incliné constituent un champ d'expertise particulier (e.g. Riguidel et al., 1994; Aguirre et al., 1997; Makse et al., 1997; Grasselli et al., 1998; Samson et al., 1998; Boutreux et al., 1999; Pudasaini et al., 2002; Dolgunin et al., 2006). Ces mécanismes sont reliés à certains risques naturels comme les éboulements de roches le long des flancs de montagne ou les avalanches. La ségrégation qui se produit le long des pentes pendant la construction des haldes à stériles est régie par ces mêmes mécanismes.

Quand on laisse s'écouler un mélange polymodal de grains sur une surface inclinée, les particules plus fines vont arrêter de se déplacer sur la surface rapidement, alors que les particules plus grossières vont continuer à rouler plus loin. C'est ce qu'on appelle la ségrégation superficielle (Richard et al. 1999). Pour étudier expérimentalement ce cas, Aguirre et al. (1997) ont considéré le déplacement de sphères, de rayon R (variant de 1 à 8 mm), sur une surface sur laquelle on a collé des sphères de rayon r (variant de 0,2 à

0,3 mm) de diverses natures. Ils ont montré qu'il existe trois régimes quand on met en mouvement une sphère (avec une vitesse initiale nulle) à partir du haut de la pente selon l'angle d'inclinaison φ et la rugosité ϕ (= r/R) (à l'échelle de ces expériences avec une pente de 1 m de longueur) :

- pour de petites valeurs de φ ou ϕ, la sphère décélère et s'arrête soudainement (régime A)
- pour des valeurs de φ ou ϕ intermédiaires, la sphère atteint rapidement une vitesse limite qu'elle conserve jusqu'en bas (régime B)
- pour de grandes valeurs de φ et ϕ, la sphère se déplace sur le plan incliné en sautant (mouvement instable) sans atteindre une vitesse limite (régime C).

L'apparition de ces régimes ne dépendrait que de l'angle d'inclinaison de la surface φ et de la rugosité ϕ et est indépendante de la nature du matériau.

Il est à noter que dans ces expériences, on a utilisé une seule sphère à la fois. Aucune interaction entre les particules n'a donc été permise. La figure 2.4 montre un exemple des trois régimes pour des sphères en silice et acier.

Samson et al., (1998) ont constaté expérimentalement que durant le régime B, les billes peuvent se comporter de deux façons différentes :

- pour un R donné et un angle d'inclinaison φ suffisamment grand, le vecteur vitesse possède une composante horizontale (dans le plan incliné).
- Pour une faible inclinaison φ (proche de la transition du régime A vers B), la composante horizontale de la vitesse disparaît.

Figure 2.4 : Diagramme des phases dans le cas d'un système de billes d'acier sur silice (ϕ = r/R; r=0,2 à 0,3 mm; R=1 à 8 mm; la longueur de la pente est de 1m) (adaptée d'après Aguirre et al., 1997)

Silbert et al. (2003) ont simulé numériquement (en 3D) le mouvement de sphères le long d'une surface inclinée d'un angle φ, pour un ensemble de sphères. Ces dernières sont toutes de même diamètre ou possèdent une faible dispersion granulométrique. L'alimentation se fait le long de la crête par un certain nombre de sphères, formant une couche d'une hauteur H, directement en contact avec la surface inclinée. Pour une valeur de H donnée, trois angles caractérisent le diagramme de phase obtenu (voir figure 2.5):

- φ_r : l'angle de repos correspondant à l'angle où des sphères en mouvement s'arrêtent.
- φ_m : l'angle à partir duquel un système statique se met en mouvement.
- $\varphi_{\max}$: l'angle maximum permettant un régime permanent stable du mouvement des sphères.

Figure 2.5 : Diagramme des phases donnant la hauteur de la masse de sphères en mouvement (H) par rapport à l'angle d'inclinaison de la surface φ ; a) cas 2D et b) cas 3D (tirée de Silbert et al., 2003).

Dans la région de mouvement stable $\varphi_r < \varphi < \varphi_{\max}$, Silbert et al. (2003) distinguent trois régimes de vitesses selon l'angle φ :

i) $\varphi >> \varphi_r$; la vitesse moyenne des particules le long de la couche en mouvement est proportionnelle à $H^{3/2}$ (H est l'épaisseur de la couche en mouvement).

ii) $\varphi \geq \varphi_r$; le profil des vitesses des particules est proportionnel à H, le long de la couche en mouvement.

iii) $\varphi \sim \varphi_r$; le déplacement des sphères est de 'type avalanche', caractérisé par un mouvement relativement lent combiné à des événements isolés en surface.

Dans ces expériences, lorsque $\varphi < \varphi_r$, aucun mouvement n'est observé; lorsque $\varphi > \varphi_{\max}$, le mouvement est instable et on assiste à une 'chute' de l'ensemble des sphères du haut vers le pied de la pente.

Autres types de ségrégation

Un autre mécanisme de ségrégation peut survenir lors d'un déversement de particules. Ce dernier provoque une stratification oblique des granulats sous forme de couches constituées de particules à surface lisse qui alternent avec celles constituées de particules à surface rugueuse. C'est la différence entre l'angle de repos des deux types de particules qui est à la base de ce mécanisme (Makse et al., 1997). Trois conditions sont nécessaires pour qu'une telle stratification se produise (Grasselli et al., 1998; Makse et al., 1997) : a) il faut un mélange binaire dont la rugosité de la surface et le rapport entre les dimensions des particules considérées soit égale à une certaine valeur (gros grains de sable par rapport à des petites billes de verre par exemple); b) ces particules doivent être versées entre deux plans parallèles et verticaux espacés d'une distance d [L]; c) il faut respecter un certain débit, w [MT^{-1}], lors du déversement.

La stratification est induite par un mouvement superficiel des particules sur un plan incliné. Elle peut donc s'apparenter à une ségrégation superficielle. Grasselli et al. (1998) décrivent une expérience menant à une stratification. Au tout début du déversement, aucune ségrégation n'apparaît. La figure 2.6 (en bas à gauche) montre cette zone où l'on trouve un mélange des deux types de granulats. L'ampleur de cette zone est très liée au débit : elle augmente quand w augmente. Pour un débit donné, il faut donc que l'empilement atteigne une certaine dimension pour que le phénomène se produise. Il faut aussi que le rapport entre les dimensions des particules soit supérieur à 1,5 pour que le déclenchement de la stratification se fasse (voir figure 2.7). Une fois déclanchée, la stratification se poursuit jusqu'à une certaine limite. Après, il faut déplacer le point d'alimentation verticalement ou horizontalement pour que le processus se poursuive.

Dans les expériences menées par Grasselli et al., (1998), w varie de 0,32 g/s à 5,25 g/s et d varie de 1 à 6 mm pour des plans de 20x30 cm. Le diamètre des grains varie de 60 à

450 µm pour les billes de verre et de 70 à 630 µm pour les grains de sable. La densité des deux type de granulats est presque la même, mais la rugosité de leur surface est différente. La différence entre l'angle de repos des grains de sable et celui des billes de verre est de 10°.

Figure 2.6 : Empilements de particules (sable et billes de verre) formant une stratification. Le rapport des dimensions sable/billes de verre est égal à 3,6, le débit w est de 1,2 g/s et la séparation des plans est de 3 mm (tirée de Grasselli et al., 1998).

Figure 2.7 : Diagramme des phases montrant les caractéristiques des empilements en fonction des dimensions des grains (le débit w est ici de 2,5 g/s et la séparation des plans est de 3 mm) (tirée de Grasselli et al., 1998).

On considère que λ [L] est la moyenne des distances qui séparent le centre de deux couches successives (pâles et foncées sur la figure 2.6). Grasselli et al. (1998) ont montré que λ tend vers une limite finie équivalente aux diamètres des grains quand w tend vers 0. La conservation de masse permet alors d'écrire (Grasselli et al., 1998) :

$$w = \rho_e v d \lambda \tag{2.1a}$$

ou bien

$$\lambda = w / \rho_e v d \tag{2.1b}$$

où ρ_e [ML^{-3}] est la masse volumique de l'empilement, v [LT^{-1}] est la vitesse de formation de couches (de l'ordre de 10 cm/s, elle dépend de w) et d [L] est l'espace entre les plans.

On observe que λ tend vers 0 (pas de stratification) quand l'espace entre les plans d tend vers l'infinie, d'après l'équation 2.1b. Ceci montre le rôle et l'importance de la distance qui sépare les deux plans dans la stratification. Si on augmente l'espacement d entre les deux plans il faut augmenter, proportionnellement, le débit en surface pour conserver la même épaisseur de stratification λ. Ce type de ségrégation a souvent été observé sur les haldes à stériles (e.g. Wilson et al., 2000; voir aussi figure 2.8)

D'autres mécanismes de ségrégation existent aussi. On peut mentionner la ségrégation dite 'noix du Brésil' qui apparaît quand un mélange de grains secs de même nature est soumis à une vibration (Richard et al., 1999). Cette dernière favorise le déplacement vers la surface des grains les plus grossiers. La rotation d'un cylindre rempli à moitié de particules (ou disques) de différentes grandeurs cause aussi une ségrégation. Par exemple, dans un cylindre qui tourne horizontalement sur son axe, les petits disques se concentrent au centre tandis que les plus grands se déplacent vers la périphérie (e.g. Richard et al., 1999).

Figure 2.8 : Structure interne de la halde de la mine Golden Sunlight, USA (tirée de Azam et al., 2006).

2.1.1.3 Haldes à stériles

La construction des haldes

Il existe quatre principales méthodes de construction des haldes à stériles (Morin et al., 1991; Fala, 2002; Aubertin et al., 2002). Avec la méthode de déversement à la benne ("end-dumping"), les stériles sont déversés directement à l'aide de camions porteurs le long de la crête de la halde. Avec la méthode de déversement avec épandage au butoir ("push-dumping"), les stériles sont déposés à proximité de la crête à l'aide de camions porteurs ou de convoyeurs, puis déversés du haut de la pente par un engin de type bélier mécanique ("dozer"). La méthode de déversement à la benne avec régalage ("free-dumping") consiste à déposer les stériles le long de la surface de la halde, sous forme d'empilements individuels d'environ 2 m de hauteur. La surface est ensuite régalée et compactée. La dernière méthode implique l'utilisation de la pelle à benne traînante

("drag-line") pour le transport et la manutention des stériles. Cette méthode est typique des exploitations de charbon et de sable bitumineux de grande envergure.

Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend de la topographie du site, du type et des dimensions de la mine et des équipements employés pour la manutention et le transport des stériles, ainsi que des caractéristiques physico-chimiques des stériles. Chacune des méthodes identifiées ci-dessus conduit à un degré de compaction et de ségrégation granulométrique différents. Ces paramètres agissent à leur tour sur le mouvement de l'eau, des gaz et des particules solides au sein de la halde (Morin et al., 1991; Fala et al., 2003, 2005, 2006). Plus de détails sur cet aspect sont présentés dans Fala (2002) et Martin (2003).

Ségrégation granulométrique des stériles

Nichols (1987) a réalisé plusieurs expériences *in situ* sur des empilements de taille relativement petite (longueur de pente maximale de 2 m), pour étudier la ségrégation qui se produit lors de la construction d'une halde. Les méthodes testées sont celles de déversement à la benne et de déversement avec épandage au butoir. Le but de cette étude était de déterminer la quantité et les conditions favorisant la déposition des grosses particules à la base des haldes pour les mines de charbon d'Elk Valley au sud est de la Colombie Britannique. Cette ségrégation favorise le drainage des terrains sur lesquels les haldes ont été construites.

Deux types de particules bien graduées ont été utilisées : i) un gravier grossier de 37 mm de diamètre maximal et contenant 1 à 3 % de silt et d'argile; ii) un gravier 'fin' de 19 mm de diamètre maximal avec 4 % de silt et d'argile. Les quantités de granulats testés varient de 8,8 à 29,7 kg (avec une moyenne de 17,2 kg). Dans toutes ces expériences, l'angle de la pente a été fixé à 35°, avec des longueurs de pentes de 1 et 2 m.

Les résultats de ces expériences montrent que le déversement à la benne crée trois zones le long de la pente :

- Une zone avec concentration de particules fines près de la crête;
- Un zone de mélange de particules grossières et de fines dans la partie centrale;
- Une zone de grande dispersion de particules grossières à la base.

La figure 2.9 montre la granulométrie le long de la pente de 2 m de longueur, avec la présence de trois zones (voir aussi figure 2.14 plus loin).

Figure 2.9 : Distributions granulométriques sous forme de 3 zones de ségrégation le long de la pente : 0-20 cm, 20-120 cm et >120 cm, dans le cas du déversement à la benne pour une longue pente (2 m). Chaque courbe représente la moyenne de 5 tests (tirée de Nichols, 1987).

Lorsque le test se fait sur une pente plus courte (1m), le même type de ségrégation apparaît. L'effet de la longueur de la pente se manifeste au niveau de la réduction de

l'écart entre les courbes granulométriques le long de la pente. Une pente plus courte engendre un écart plus petit entre les courbes granulométriques des 3 zones, et donc moins de ségrégation (voir figure 2.10)

Figure 2.10 : Distributions granulométriques des 3 zones de ségrégation : 0-10 cm, 10-60 cm et > 60 cm, dans le cas du déversement à la benne pour une courte pente (1 m). Chaque courbe représente la moyenne de 2 tests (tirée de Nichols, 1987).

En utilisant un gravier plus fin sur une pente courte, on retrouve le même type de ségrégation (voir figure 2.11), mais elle est moins prononcée comparativement aux deux premiers cas (avec matériau plus grossier)

Figure 2.11 : Distributions granulométriques dans le cas du déversement à la benne pour une courte pente (1 m) et un gravier fin. Chaque courbe représente la moyenne pondérée de 2 tests (tirée de Nichols, 1987).

Dans le cas du déversement avec épandage au butoir, on a surtout observé une séparation des éléments grossiers de l'ensemble de la masse. Ces particules grossières vont se déposer vers le bas de la pente. La figure 2.12 montre ce type de ségrégation pour le cas d'un déversement de gravier grossier sur la pente courte (on note l'absence d'une zone de particules plus fines en surface)

Figure 2.12 : Distributions granulométriques dans le cas du déversement avec épandage au butoir pour une courte pente et un gravier grossier. Chaque courbe représente la moyenne de 2 tests (tirée de Nichols, 1987).

Les courbes granulométriques de la figure 2.12 montrent que la granulométrie change très peu le long de la pente. Elle demeure proche de celle du gravier original. Malgré cela, les éléments les plus grossiers vont se déplacer plus loin pour se déposer à la base de la pente (voir aussi figure 2.15).

Les expériences menées par Nichols (1987) révèlent qu'en moyenne de 75 % des grosses particules atteignent la base de la pente dans le cas du déversement à la benne, contre 40 % dans le cas du déversement avec épandage au butoir.

Nichols (1987) a fait une autre constatation concernant la différence entre les deux méthodes de déposition. Dans le cas du déversement au butoir, la plupart des particules

se déposent dans les 2/3 supérieurs de la pente alors que dans le cas du déversement à la benne la plupart des particules se déposent dans les 2/3 inférieurs de la pente (voir figure 2.13).

Figure 2.13 : Quantités relatives de matériau déposé le long des pentes dans le cas des déversements à la benne et avec épandage au butoir (tirée de Nichols, 1987).

Dans le cas du déversement avec épandage au butoir, les éléments grossiers restent, pour la plus part d'entre eux, pris avec les particules fines dans le haut de la pente, faute d'énergie suffisante pour se déplacer plus loin sur la pente. Cette situation peut créer une certaine instabilité mécanique de la halde. En effet une accumulation continue des particules dans la partie supérieure de la halde conduit à une déposition avec un angle supérieur à celui au repos par temps sec. Ainsi, par temps pluvieux, la masse accumulée finie par s'écrouler vers la base de la halde. Par contre, dans le cas du déversement à la benne, les particules en crête de la halde commencent à rouler et acquièrent rapidement une vitesse angulaire suffisamment grande pour vaincre la résistance due à la présence des autres particules. Le phénomène est d'autant plus accentué que le diamètre des

particules est plus élevé. Cette vitesse angulaire mène les particules, par ordre de diamètre croissant, vers la base de la pente.

Après avoir visité plusieurs mines de la Colombie Britannique (Byron Creek Collieries, Fording Coal, Line Creek et Westar mines), Nichols (1987) a constaté que :

- la plupart des haldes dans la région ont été construites par déversement à la benne;
- la granulométrie des stériles est bien étalée, avec un diamètre maximum de 1 à 2 m;
- toutes les haldes visitées présentent une ségrégation similaire à celle montrée par ses expériences (3 zones bien distinctes, voir figures 2.14 et 2.15);
- dans la région d'Elk Valley, la hauteur des haldes varie de 30 à 300 m;
- Le déversement avec épandage au butoir n'est pas une méthode commune de construction des haldes à Elk Valley. Elle est utilisée uniquement quand la hauteur de la halde est inférieure à 5 m, ou si l'on veut construire des seuils au niveau de la crête, ou encore lorsque les stériles sont très fins et que leur consistance ne permet pas d'utiliser le déversement à la benne comme moyen de déposition.

Avec la méthode de déversement à la benne avec régalage, la ségrégation est très faible et le matériau demeure plus dense que dans les deux autres méthodes. Quand on utilise la pelle à benne traînante (moins utilisée par les mines profondes), la ségrégation est faible, mais le matériau est moins dense qu'il ne l'est avec le déversement à la benne avec régalage (Morin et al., 1991).

Figure 2.14 : Similarité de la distribution granulométrique dans une halde de 60 m de hauteur construite par déversement à la benne (à Byron Creek Collieries) à gauche vs celle observée lors du test de déversement par la même méthode dans le cas d'une courte pente et d'un gravier grossier, à droite (tirée de Nichols, 1987).

Figure 2.15 : Similarité de la distribution granulométrique dans une halde de 5 m de hauteur construite par déversement avec épandage au butoir (à Byron Creek Collieries), à gauche vs celle observée lors du test de déversement par la même méthode dans le cas d'une courte pente et d'un gravier grossier, à droite (tirée de Nichols, 1987)

2.1.2 L'eau dans les matériaux granulaires

Dans la section précédente, on a décrit (qualitativement) certaines des caractéristiques des MG et des stériles secs, en terme de distribution granulométrique et certains des phénomènes qui ont donné naissance à cette distribution au sein d'une halde. Dans ce qui suit, on présente les équations qui régissent l'interaction entre l'eau et les particules solides dans le cas général des milieux saturés ou non saturés en eau. Une application de ces notions aux cas des stériles est introduite vers la fin de cette section.

2.1.2.1 Tension superficielle

La tension superficielle résulte d'un phénomène qui se produit à l'interface de deux fluides. Dans le cas d'un liquide en présence d'un gaz, le liquide réagit comme s'il est couvert par une membrane élastique qui tend à maintenir les molécules du liquide dans un minimum de volume. Sur une section quelconque de l'interface liquide-gaz, la tension superficielle [MT^{-2}] est égale à la tension de la membrane sur la longueur de celle ci (e.g. Hillel, 1998).

Différents liquides montrent différentes tensions superficielles; mentionnons (Hillel, 1998) :

Eau : $7{,}27 \times 10^{-2}$ N/m (à 20 ° C)
Éther éthylique : $1{,}7 \times 10^{-2}$ N/m
Alcool éthylique : $2{,}2 \times 10^{-2}$ N/m
Benzène : $2{,}9 \times 10^{-2}$ N/m
Mercure : $4{,}3 \times 10^{-1}$ N/m

La tension superficielle diminue quand la température augmente (en raison de l'agitation moléculaire croissante). La tension superficielle est aussi influencée par les substances

solubles dans le liquide. Par exemple 1% de NaCl dans de l'eau augmente légèrement sa tension superficielle de $1{,}7 \times 10^{-4}$ N/m (à 20 °C).

2.1.2.2 Angle de contact

Si on pose une goutte de liquide sur la surface horizontale d'un solide, le liquide va généralement déplacer le gaz et s'étendre sur le solide. À l'équilibre, sur le pourtour de la goutte, le liquide formera un angle (α) avec le solide; α s'appelle l'angle de contact (voir figure 2.16).

Figure 2.16 : Équilibre des forces de tension superficielles (adaptée d'après Hillel, 1998).

Vues sur une section, les trois phases se rencontrent en un point et forment un angle de 180° (voir figure 2.16). On a alors (Hillel, 1998):

$$\cos(\alpha) = (\sigma_{gs} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lg} \tag{2.2}$$

où σ_{sl} [MT^{-2}] est la tension superficielle entre le solide et le liquide, σ_{gs} [MT^{-2}] est la tension superficielle entre le solide et le gaz et σ_{lg} [MT^{-2}] est la tension superficielle entre le liquide et le gaz.

L'angle α est usuellement aigu, parce qu'il y a plus d'affinité entre les molécules du solide et celles du liquide qu'avec celles du gaz. On dit alors que le liquide mouille le solide. Un angle de contact $\alpha=0$ veut dire que la goutte s'étale complètement sur la surface du solide et que le liquide mouille complètement le solide. Ce dernier montre alors une très nette préférence pour le liquide que pour le gaz. Un angle de contact de 180° indique un rejet du liquide par le solide et sa nette préférence du gaz. Dans ce cas, la goutte garde sa forme sphérique sans s'étendre sur la surface du solide. Les surfaces sur lesquelles l'eau forme un angle obtus ($>90^\circ$) sont dites hydrophobes.

En réalité, lorsqu'on dépose une goutte de liquide sur la surface d'un solide, l'angle de contact α peut prendre une valeur comprise entre deux valeurs limites α_a et α_r (voir figure 2.17). Par exemple, à l'aide d'une seringue, il est possible d'ajouter du liquide et ainsi augmenter le volume d'une goutte déjà en place. Le volume augmente jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle la surface interfaciale va changer (augmenter). Dans ce cas, la valeur maximale que peut prendre l'angle de contact est α_a. Si on retire du liquide de la goutte, son volume diminue jusqu'à une valeur minimale α_r, en-deçà de laquelle la surface interfaciale diminuera. On appelle α_a et α_r les angles d'avancée (ou avançant) et au retrait, respectivement (Carre, 1989).

Figure 2.17 : Détermination de l'angle avançant et de l'angle au retrait (adaptée d'après Carre, 1989)

Par ailleurs, un solide parfaitement lisse est relativement rare dans la nature (Carre, 1989). Wenzel (1936) a montré qu'avec une surface rugueuse, l'angle de contact réel α_{re} du liquide peut être relié à l'angle de contact théorique α_0 du liquide sur la surface parfaitement lisse (représentatif des interactions fondamentales solide-liquide) par la relation :

$$r_\alpha = \frac{\cos(\alpha_{re})}{\cos(\alpha_0)} \quad \text{pour} \quad r_\alpha \geq 1 \tag{2.3}$$

Ici, r_α représente le rapport entre l'aire de l'interface solide-liquide réelle et l'aire géométrique apparente de cette interface. De l'équation (2.3), on déduit les inégalités suivantes (Carre, 1989) :

$$\alpha_{re} < \alpha_0 < \pi/2 \tag{2.4}$$

ou

$$\alpha_{re} > \alpha_0 > \pi/2 \tag{2.5}$$

Ceci veut dire que la rugosité rend la surface d'un solide plus hydrophile s'il est à l'origine hydrophile ($\alpha_0 < 90^\circ$ pour une surface lisse) et elle le rend plus hydrophobe lorsqu'il est hydrophobe à l'origine ($\alpha_0 > 90^\circ$).

Dans le cas où la surface d'un solide est constituée de deux éléments différents, S_1 et S_2, répartis de façon uniforme, Cassie et Baxter (1944) ont montré que l'angle de contact α d'un liquide sur la surface composite obéit à la relation :

$$\cos(\alpha) = s_1 \cos(\alpha_1) + s_2 \cos(\alpha_2) \tag{2.6}$$

avec $s_1 + s_2 = 1$

où s_1 et s_2 sont les fractions de surface occupées par S_1 et S_2; α_1 et α_2 sont les angles de contact sur S_1 seul et S_2 seul.

D'autre part, la relation entre la tension superficielle et les pressions dans l'eau et dans l'air, tout près d'une interface eau-air en général, est donnée par l'équation de Laplace (Iwata et al., 1988) :

$$\Delta P_r = P_{r1} - P_{r0} = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{2.7}$$

où P_{r1} Pression d'eau tout près de l'interface eau-air [$MT^{-2}L^{-1}$]

P_{r0} Pression de l'air tout près de l'interface eau-air [$MT^{-2}L^{-1}$]

σ_s Tension superficielle de l'eau [MT^{-2}]

R_1 et R_2 Principaux rayons de courbure (positifs quand la surface est convexe, négatifs quand la surface est concave; voir exemple de la figure 2.18) [L]

Notons que (Briant et Tenebre, 1989):

- Les rayons de courbures (voir exemple de la figure 2.18) correspondent aux courbes déterminées par l'intersection de la surface avec des plans perpendiculaires entre eux, et passent par la normale au point considéré. Il y a donc une infinité de rayons, mais la somme $1/R_1 + 1/R_2$ a une valeur constante pour un point donné. Si on juxtapose deux particules sphériques (figure 2.18), l'interface eau-air entre ces deux sphères est bi-concave du coté des particules, et convexe-concave au milieu. Le signe de R_1 est alors positif et celui de R_2 est négatif. Cela veut dire que selon l'équation (2.7), la pression dans l'eau P_{r1} est

inférieure à celle dans l'air P_{r0} quand R_2 est inférieur à R_1. Si on prend $P_{r0} = 0$ (valeur de référence), P_{r1} sera négative.

Figure 2.18 : Eau retenue par capillarité entre deux particules sphériques (tirée de Iwata et al., 1988).

- Il existe une orientation des plans donnant un rayon de courbure maximal pour l'un et un rayon de courbure minimal pour l'autre. Celle-ci correspond aux plans et aux rayons principaux au point considéré.

- Lorsque $R_1 = R_2 = R_c$, le cas correspond à une sphère (c'est le cas par exemple de l'interface eau-air dans un tube capillaire suffisamment fin), et on a :

$$\Delta P_r = \frac{2\sigma_s}{R_c} \tag{2.8}$$

et lorsque R_1 et R_2 ont des valeurs infinies, le ménisque forme un plan et $\Delta P_r = 0$. Le ménisque est cylindrique quand l'un des rayons est infini (voir plus loin).

- R_1 et R_2 peuvent être de signe opposé (voir figure 2.19). Dans ce cas, si $|R_1| = |R_2|$, on peut avoir une différence de pression nulle de part et d'autre de l'interface. Comme mentionné plus haut (voir équation 2.7), on considère des rayons comme

positifs du coté concave de l'interface; il faut choisir arbitrairement un côté positif et la différence de pression sera positive ou négative suivant les cas.

Figure 2.19 : Interface ayant des rayons de courbure de signe opposé (adaptée d'après Briant et Tenebre 1989).

Quand on met un tube capillaire sur la surface libre d'un petit réservoir d'eau, il se forme un ménisque qui cause une remontée. Ceci est du à l'angle de contact aigue que forme l'eau avec la paroi du tube (voir figure 2.20). Plus le rayon du tube (r_1) est petit, plus grande est la courbure du ménisque. La formation du ménisque cause une différence de pression au niveau de l'interface eau-air. Un liquide comme l'eau, qui forme un angle de contact aigu α avec le verre, forme un ménisque concave. La pression de l'eau sous le ménisque P_{r1} est alors inférieure à la pression atmosphérique P_{r0}. C'est pour cette raison que l'eau remonte dans le tube depuis sa position initiale (voir courbe en tirets à la figure 2.20) jusqu'à une position d'équilibre. Cette dernière est atteinte quand la différence de pression à l'intérieur (à la position initiale du ménisque) et à l'extérieur du tube est compensée par la pression hydrostatique exercée par la colonne d'eau dans le tube. La hauteur de la remontée capillaire se détermine d'ailleurs en calculant le bilan des forces qui s'exercent sur la colonne d'eau (e.g. Hillel, 1998).

Figure 2.20 : Remontée capillaire (adaptée d'après Hillel, 1998).

La différence de pression ΔP_r entre le liquide sous le ménisque et la pression atmosphérique est (e.g., Hillel, 1998) :

$$\Delta P_r = 2\sigma_s \cos(\alpha) / r_1 \tag{2.9}$$

Si le ménisque n'a pas d'axe de symétrie vertical, l'équation de Laplace (équation 2.7) ne suffit plus et il faut y ajouter des corrections. On montre alors (e.g. Dupeyrat, 1989) que pour les ménisques cylindriques (qui apparaissent, par exemple, au contact d'une lame solide plane sur laquelle les ménisques s'appuient avec une génératrice qui lui est parallèle et ils se raccordent à la surface plane du liquide à distance infinie), la paroi du solide n'intervient que comme condition aux limites. La forme du ménisque devient indépendante de la nature du solide (et donc de α). Elle devient semblable pour tous les solides en contact avec deux mêmes fluides (à une température donnée). Ceci donne une indication de la complexité du calcul des pressions locales dans des systèmes de pores de formes et de dimensions quelconques.

2.1.2.3 Propriétés hydriques non saturées

Comprendre l'interaction de l'eau avec un solide est une première étape dans la compréhension et la détermination des paramètres qui régissent le mouvement de l'eau dans un MG. Dans ce qui suit, nous allons définir les principales propriétés hydriques d'un MG.

Courbe de rétention d'eau

Il y a deux concepts importants associés à la conduction de l'eau dans les sols non saturés. Il s'agit de la pression négative de l'eau u_w [$MT^{-2}L^{-1}$] et de la perméabilité relative (k_r) (Espinoza, 1999). La pression négative est généralement appelée succion (ψ, [L]). Elle peut s'écrire :

$$\psi = -\frac{u_w}{\gamma_w} \tag{2.10}$$

où γ_w [$MT^{-2}L^{-2}$] est le poids volumique de l'eau.

Au dessus du niveau piézométrique, l'eau est retenue entre les grains solides par des forces capillaires et d'adhésion. Un concept proche de cette réalité est fourni par la remontée capillaire de l'eau dans un tube capillaire (comme vu à la figure 2.20). Un milieu poreux peut être considéré comme une série de tubes interconnectés, mais la remontée capillaire dans un MG (ou un sol) ne peut pas être estimée par une relation simple comme l'équation 2.9 car les pores ont des géométries beaucoup plus complexes.

Plusieurs études ont néanmoins montré que la succion est reliée à la teneur en eau volumique (ou au degré de saturation) du sol. La variation de la succion avec la teneur

en eau volumique (ou avec le degré de saturation) est appelée courbe de rétention d'eau (CRE, voir figure 2.21).

Figure 2.21 : Représentation schématique de la courbe de rétention d'eau d'un sol. θ_r [-] : teneur en eau résiduelle; ψ_0 : pression correspondant à une teneur en eau nulle (= 10^6 kPa); ψ_r : pression correspondant à la teneur en eau résiduelle; ψ_a : pression d'entrée d'air (AEV); θ_s [-] : teneur en eau à saturation (adaptée d'après Fredlund et Xing, 1994 et Aubertin et al., 1995, 2003).

De nombreuses relations mathématiques, empiriques et semi-empiriques, ont été proposées pour décrire la CRE. Un résumé des fonctions les plus utilisées est donné au tableau 2.2 (voir aussi Bussière, 1999).

D'autres modèles mathématiques permettent de prédire la CRE à partir des propriétés géotechniques de base des matériaux (granulométrie, indice des vides, limites d'Attergerg, etc). Parmi ces modèles, on trouve celui de Kovàcs (1981), et de Kovàcs modifié (MK)(Aubertin et al., 1998). Le modèle MK pour des sols granulaires peut s'écrire comme suit (Aubertin et al., 2003; Maqsoud et al., 2006) :

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - < 1 - S_a > (1 - S_c) \tag{2.11}$$

où S_r est le degré de saturation et n la porosité; S_c et S_a correspondent à la part de la succion capillaire et d'adhésion; < > représente les crochets de MacCauley ($< x >= (x + |x|)/2$).

S_c et S_a dépendent de la remontée capillaire équivalente h_{co} [L] et de la succion ψ [L]. On peut obtenir ces variables à partir des équations suivantes :

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m(h_{co}/\psi)^2] \tag{2.12}$$

$$S_a = a_c \left(1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_0/\psi_r)} \right) \frac{\ln(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_0)^{1/6}} \tag{2.13}$$

$$h_{co} = \frac{0{,}75\cos(\beta_d)}{1{,}17 e D_{10} \log(C_U) + 1} \tag{2.14}$$

Dans l'équation 2.14, D_{10} est le diamètre (en cm) correspondant à 10 % de passant dans la courbe granulométrique, β_d est l'angle de contact (considéré nul en drainage) et C_U est le coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$). Dans l'équation 2.13, a_c est une constante reliée à la succion d'adhésion, ψ_r est la succion résiduelle, ψ_n est un paramètre de normalisation (ψ_n=1 cm quand h_{co} et ψ sont exprimés en cm) et e est l'indice des vides. Dans l'équation 2.12, m est un paramètre d'ajustement. Il permet de tenir compte de la distribution des pores (plus m est élevé plus les pores sont uniformes). La valeur de m contrôle la forme et la position de la portion capillaire de la CRE. Pour les MG (matériaux non cohérents avec une faible plasticité), la valeur de m peut être considéré égale à $1/C_U$ et le coefficient a_c égal à 0,01 (quand la succion est en cm).

Tableau 2.2 : Certaines des principales fonctions disponibles pour représenter la courbe de rétention d'eau.

Relation	Référence
$S_e = \dfrac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ S_e : Saturation effective θ : Teneur en eau volumique θ_r : Teneur en eau résiduelle θ_s : Teneur en eau à saturation	
$\theta(\psi) = \left(1 + a_g \psi^{n_g}\right)^{-1}$ a_g [L^{-n_g}] et n_g [-] : Paramètres du modèle.	Gardner (1958)
$S_e = \left(\dfrac{\psi_a}{\psi}\right)^{\lambda_{BC}}$ $\quad \psi \geq \psi_a$ ψ_a : Pression d'entrée d'air (AEV) λ_{BC} [-] : Indice des pores.	Brooks et Corey (1964)
$S_e = a_b\left(a_b + \psi^{n_b}\right)^{-1}$ $\quad \psi > 0$ a_b [L^{n_b}] et n_b [-] : Paramètres du modèle.	Brutsaert (1966)
$S_e = \left(1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}\right)^{-m_v}$ α_v [L^{-1}], n_v [-] et m_v [-]: Paramètres du modèles (on utilise souvent $m_v = 1 - 1/n_v$)	van Genuchten (1980)
$\theta(\psi) = C(\psi)\dfrac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + (\psi/a_f)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}$; $C(\psi) = 1 - \dfrac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)}$ e : Nombre népérien (=2,71828). a_f [L]: Valeur approximative de ψ_a ψ_r : Succion correspondant à la teneur en eau résiduelle dans la CRE n_f [-] et m_f [-] : Paramètres du modèles	Fredlund et Xing (1994)

Conductivité hydraulique non saturée

La conductivité hydraulique $k(\psi)$ [LT^{-1}] varie avec la teneur en eau du sol (ou avec la succion). La variation de la conductivité hydraulique est communément représentée par la fonction de conductivité hydraulique relative (k_r). Elle est égale au rapport de la conductivité hydraulique non saturée et de la conductivité hydraulique à saturation k_s (e.g. Espinoza, 1999) :

$$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s} \tag{2.15}$$

La conductivité hydraulique relative varie de 1 jusqu'à une valeur très faible (proche de 0), ce qui correspond à des valeurs de teneur en eau volumique variant de θ_s à θ_r respectivement. Un résumé de certaines fonctions de conductivité hydraulique relative les plus utilisées est donné au tableau 2.3.

Rôle de l'angle de contact

Les sols hydrophiles montrent un angle de contact α entre l'eau et les particules solides inférieur à 90°. Il existe aussi des sols hydrophobes dont l'angle de contact entre l'eau et les particules solides est supérieur à 90°. Les sols hydrophobes et hydrophiles se comportent différemment vis à vis de l'écoulement d'eau même si leur granulométrie et leur porosité sont identiques car les matériaux hydrophobes retardent l'infiltration d'eau (Carrillo et al., 2000). L'essai WDTP ("Water Drop Penetration time") permet de mesurer le degré de mouillabilité d'un sol. Il consiste à mesurer le temps d'infiltration [T] d'une goutte d'eau dans un sol sec (la quantité et la forme sont standardisées). Si l'angle de contact initial entre l'eau et les grains solides est inférieur à 90°, l'eau va pénétrer d'une façon spontanée dans le sol; le WDTP est alors très faible voire nul. Si

cet angle est supérieur à 90° et si l'hydrophobie est stable, l'eau reste en surface pendant un temps très long. Généralement, l'eau s'infiltre dans les sols hydrophobes après un certain temps, ce qui veut dire que l'hydrophobie n'est pas stable. Le temps où la goutte d'eau reste en surface reflète le degré d'hydrophobie et sa persistance.

Lorsque l'angle de contact est inférieur à 90°, l'eau peut s'infiltrer dans le sol sec sous l'effet d'une pression d'eau négative (i.e., $u_w < u_a$, u_a est la pression de l'air). Dans ce cas, les plus petits pores se remplissent en premier (puisque la succion y est supérieure) et les plus grands en dernier. Par contre, lorsque l'angle de contact est supérieur à 90°, l'eau ne peut circuler que sous une pression positive et les plus grands pores se remplissent en premier et les plus petits en dernier. Pour un angle de contact de 90°, tous les pores se remplissent théoriquement en même temps (Bauters et al., 2000).

Signalons que certains produits chimiques (comme l'octadecylamine) rendent les sols partiellement et/ou temporairement hydrophobes (Carrillo et al., 2000), ce qui peut aider certains processus (tel la flottation ou le forage par exemple)

L'angle de contact a un effet sur la CRE (e.g. Maqsoud et al., 2006). Il est possible de calculer la courbe de rétention pour deux fluides (e.g. eau-petrôle) en ayant la courbe de rétention de deux autres fluides (e.g. air-eau), dans un même milieu poreux. En effet la pression capillaire dans un système de deux fluides (noté 1) peut être prédite à l'aide des données provenant d'un autre système de fluides (noté 2) selon l'équation suivante (e.g. Bradford et al. 1995) :

$$\psi_1 = \frac{\sigma_s^1 \cos\left(\alpha_1^{A,R}\right)}{\sigma_s^2 \cos\left(\alpha_2^{A,R}\right)} \psi_2 \tag{2.16}$$

où $\alpha_1^{A,R}$ et $\alpha_2^{A,R}$ sont les angles de contact avançant ou au retrait

Tableau 2.3 : Certaines fonctions de conductivité hydraulique.

Relation	Référence
$k_r(\psi) = e^{a_g^{'}\psi}$ $a_g^{'}$ [L^{-1}] : Paramètre du modèle	Gardner (1958)
$k_r(S_e) = S_e^{(2+3\lambda_{BC})/\lambda_{BC}}$ λ_{BC} : Indice des pores	Brooks et Corey (1964)
$k_r(S_e) = S_e^{1/2}\left[1-\left(1-S_e^{1/m_v}\right)^{m_v}\right]^2$ $\quad m_v = 1-1/n_v$ n_v : Paramètre du modèle	van Genuchten (1980) et Mualem (1976)
$k_r(\psi) = \sum_{i=j}^{M} \frac{\theta\left(e^{\bar{y}_i}\right)-\theta(\psi)}{e^{\bar{y}_i}}\theta'\left(e^{\bar{y}_i}\right) \Big/ \sum_{i=1}^{M} \frac{\theta\left(e^{\bar{y}_i}\right)-\theta_s}{e^{\bar{y}_i}}\theta'\left(e^{\bar{y}_i}\right)$	Fredlund et Xing (1994)

M : Nombre des sous intervalles sur la CRE.
i : Variable compteur.
j : Numéro de l'intervalle.
y_i : Point milieu du i^{ième} intervalle de succion.
θ' : Dérivée de la relation $\theta(\psi)$ donnée au tableau 2.2
θ_s : Teneur en eau volumique à saturation.

En changeant les fluides, on modifie la tension superficielle et l'angle de contact. Si on change le milieu poreux, seulement l'angle de contact change dans l'équation 2.16. Cette équation permet, en particulier, de définir la courbe de rétention d'eau pour un même milieu poreux quand son degré de mouillabilité change. Dans le cas des haldes à stériles l'équation 2.16 peut être utilisée pour évaluer la CRE des stériles quand le pH et la composition de l'eau changent par exemple.

Effet d'hystérésis

Expérimentalement, on a observé que la valeur de la succion à une teneur en eau donnée n'est pas unique. Elle dépend de l'histoire du sol en termes de mouillage et de drainage, chose qu'ignorent les modèles présentés au tableau 1.2. L'ampleur de ces effets est plus ou moins grande, selon les cas traités. Par exemple, en laboratoire, l'hystérésis dépend des dimensions de l'échantillon (Iwata et al., 1988). Sur le terrain, ces effets peuvent être très importants. Parmi les facteurs qui contribuent à l'apparition de ce phénomène, on trouve (Iwata et al., 1988; Bussière, 1999; Maqsoud et al., 2006) :

- La non uniformité de la forme des pores ("ink bottle effect");
- La dépendance de l'angle de contact avec la direction de l'écoulement;
- La présence d'air emprisonné, surtout quand le sol est initialement sec;
- Le changement de volume dû au changement de la teneur en eau, surtout dans les sols fins (ainsi que l'effet de l'eau adsorbée dans le cas des argiles).

Les deux premiers mécanismes seraient les plus importants dans le cas des matériaux granulaires (e.g. Lu et Likos, 2004; Maqsoud et al., 2006).

Les effets d'hystérésis dépendent donc de la structure interne du matériau. Plus la forme, l'arrangement et l'interconnectivité des pores dans un sol sont complexes, plus ces effets seront marqués. Les effets d'hystérésis peuvent aussi se manifester au niveau de la relation entre la fonction de la conductivité hydraulique et la succion $k(\psi)$. La figure 2.22 présente une série de CRE avec effets d'hystérésis. Sur cette figure on distingue :

- La courbe ABC, appelée courbe initiale en drainage (le drainage ici se fait à partir d'une saturation complète).
- Les deux branches, CDE et EFC, appelées courbes principales en mouillage et en drainage (après un mouillage sans saturation complète).

- Les courbes DIC et FGE, appelées courbes intermédiaires en drainage et en mouillage.
- Les courbes GH et IJ, appelées courbes secondaires en drainage et en mouillage.
- La différence de teneur en eau entre le point A et E, représente le volume de l'air qui peut rester emprisonné lors de la saturation.

Par ailleurs, signalons que la relation k - S_r (où S_r, est le degré de saturation) présente usuellement moins d'hystérésis comparativement à k - ψ ou à θ - ψ pour un même matériau et sous les mêmes conditions (e.g., Iwata et al., 1988).

Figure 2.22 : Courbes de rétention d'eau avec effet d'hystérésis en phase de mouillage et de drainage (tirée de Iwata et al., 1988).

L'effet combiné de l'hystérésis et du degré de mouillabilité sur les CRE et la conductivité hydraulique, a été étudié lors des travaux réalisés par Nieber et al., (2000). La figure 2.23 montre les courbes principales en drainage (déterminées par des essais en colonnes). Ces courbes proviennent d'un sable hydrophile contenant différents

pourcentages de ce même sable rendu hydrophobe par un traitement chimique (avec l'octadelcyltrichlorasilane).

On note que le pourcentage de particules hydrophobes (entre 3,1 et 9 %) n'a presque pas d'effet sur la courbe principale en drainage. La différence au niveau du AEV de la CRE du sable hydrophile (0 % de particules hydrophobes) par rapport aux autres a été expliquée par le fait que le traitement des grains de sable à l'octadelcyltrichlorasilane augmente la tension superficielle de l'eau (Nieber et al., 2000; Bauters et al., 2000), ce qui augmente l'AEV de ces sables.

Figure 2.23 : Courbes de rétention d'eau principales (en drainage) du sable à différents degrés de mouillabilité (tirée de Nieber et al., 2000).

Les courbes principales en mouillage, déterminées par des essais en colonnes aussi, sont montrées à la figure 2.24. Les CRE à différents degrés de mouillabilité montrent une réduction du WEV et une augmentation de la pente, quand le pourcentage des particules hydrophobes dans le sable augmente.

Nieber et al. (2000) ont appliqué le modèle de Mualem (1976) et van Guenuchten (1980) à la conductivité hydraulique dans le cas où l'angle de contact α est inférieur à 90° (sables à 0, 3,1 et 5 % de particules hydrophobes). Quand la valeur de α est supérieure à 90° (sables à 5,7 et 9 % de particules hydrophobes), la conductivité hydraulique est différente. Ceci que ce soit en mouillage ou en drainage. Cette différence est associée à la différence des paramètres α_v et n_v du modèle de van Genuchten (entre les différentes CRE en mouillage de la figure 2.24). Elle résulte aussi de la différence des paramètres du modèle appliqué qui modifient les fonctions de conductivité. Le modèle appliqué est celui proposée par Parker (1989) qui s'écrit :

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

où S_e est la saturation effective et $m_v = 1 - 1/n_v$; n_v est le paramètre de van Genuchten de la courbe principale en drainage. Ce modèle donnerait des résultats plus proches de la réalité, comparativement à celui de Mualem-van Genuchten.

La figure 2.25 montre la différence entre la conductivité hydraulique du sable hydrophile et celle du sable hydrophobe. On voit que pour un même degré de saturation, la conductivité hydraulique est plus élevée dans le sable hydrophobe. Cette différence serait due à l'inversion de la séquence de remplissage des pores (les plus grands en premier) quand le sable est hydrophobe (Nieber et al., 2000).

Figure 2.24 : Courbes de rétention d'eau principale (en mouillage) du sable à différents degrés de mouillabilité (tirée de Nieber et al., 2000).

Figure 2.25 : Conductivité hydraulique en fonction du degré de saturation pour un sable hydrophile et un autre extrêmement hydrophobe (tirée de Nieber et al., 2000).

2.1.2.4 Cas des stériles

La détermination de l'angle de contact des stériles permettrait de mieux comprendre l'interaction eau-stériles d'un point de vue hydrogéochimique. Elle permettrait aussi une meilleure prédiction de leur comportement en mouillage à partir de celui en drainage (et vice-versa). Dans le paragraphe suivant, on présente quelques résultats issus de la littérature concernant ce paramètre.

Angle de contact des minéraux représentatifs

Dans la plupart des cas en hydrogéologie ou en géotechnique, on considère que l'angle de contact α est nul (en drainage). Il peut toutefois être très variable d'un matériau à un autre en pratique. En particulier pour les stériles contenants des minéraux sulfureux (matériau peu ordinaire), il serait utile de connaître l'angle de contact. Le tableau 2.4 donne l'angle de contact de certains minéraux représentatifs de ce que l'on retrouve souvent dans les stériles miniers (pour un pH neutre).

Tableau 2.4 : Valeurs de l'angle de contact de divers minéraux (adapté d'après Yotsumoto, 2006)

Mineral/ Roche	Angle de contact
Galène	70-75°
Sphalérite	71-72°
Pyrite	58-73°
Quartz	55-58°
Calcite	45°
Schiste	13°
Grès	0°

Le tableau 2.5 donne une classification des minéraux en fonction des propriétés physicochimique de leur surface. Ce sont ces propriétés qui conditionnent le degré de mouillabilité des minéraux. Une surface non polaire est hautement hydrophobe (groupe A). Dans les autres groupes, la mouillabilité est variable selon le degré de polarité de la surface du minéral. Ainsi, le groupe F est le plus hydrophile. D'après le tableau 1.5, les sulfures (groupe B) sont des minéraux peu hydrophiles.

D'autres résultats montrent que l'angle de contact de la chalcopyrite, de la chalcocite et de la galène varie en fonction du pH. Dans ces expériences des angles de contact élevés ont été associés à des pH faibles (Kelebek et al. 2002).

Tableau 2.5 : Classification des minéraux selon les propriétés de leur surface (adaptée d'après Yotsumoto, 2006).

Groupe	Propriété de la surface	Minéraux
A	Non polaire	Graphite, soufre, molybdénite, diamant, charbon, talc.
B	Polaire	Sulfures : bornite, chalcopyrite, galène, pyrite, sphalérite, stibine, argentite, arsénopyrite, etc. Métaux natifs : Au, Pt, Ag, Cu
C	Polaire	Sulfates : Barytine, anhydrite, gypse, anglésite
D	Polaire	Carbonates : cérusite, malachite, azurite, smithsonite, sidérite, calcite, withérite, dolomite. Autres minéraux : fluorite, apatite, monazite, scheelite.
E	Polaire	Oxydes : hématite, magnétite, goethite, chromite Ilménite, rutile, corindon, pyrolusite, limonite, wolframite, cassitérite.
F	Polaire	Silicates : zircon, willémite, hémimorphite, béryl, feldspath, grenat, quartz.

Angle de contact de l'eau avec les stériles

Les résultats présentés plus haut indiquent que les minéraux sulfureux ont naturellement un angle de contact élevé alors que celui des silicates est faible. Trois cas types peuvent

se présenter lorsque l'on définit l'angle de contact des stériles. Une goutte d'eau peut se trouver sur i) un élément du groupe F (du tableau 2.5) et α peut alors être considéré comme nul; ii) sur un élément du groupe B et dans ce cas l'angle de contact est relativement grand ($>60^\circ$); iii) sur les deux en même temps et dans ce cas, la valeur de α peut être calculée en utilisant la formule 2.6. À titre d'exemple, une goutte qui se trouve sur une surface constituée à 70% de silicate ($\alpha=0^\circ$) et 30% de sphalérite ($\alpha=71{,}5^\circ$) fera un angle de contact apparent de 37° environ.

Ces différences au niveau de l'angle de contact ont un effet direct sur les propriétés hydriques des stériles. La remontée capillaire et l'AEV changent en fonction de α (surtout en mouillage), pour une même granulométrie et porosité. Par exemple, si un tube capillaire de diamètre donnée, avec un angle de contact nul, la remontée capillaire est de 1 m, cette remontée devient alors égale à 80 cm pour un angle de 37°, et à 32 cm seulement pour un angle de contact de 71,5°.

La remontée capillaire varie aussi avec la composition chimique et le pH de l'eau. Ceci indique qu'il peut y avoir de grandes différences entre le comportement des stériles lors d'un mouillage et lors d'un drainage, ou lors d'un mouillage avec de l'eau à un pH neutre et avec un pH faible (eau acide).

2.1.3 Écoulements préférentiels

Les écoulements préférentiels peuvent impliquer un ou plusieurs processus physiquement distincts. Il peut s'agir des écoulements dans les macropores, des écoulements essentiellement gravitaires instables, des écoulements avec effet de barrière capillaire 2D, ou des écoulements hétérogènes dus à l'hétérogénéité du milieu poreux (Nieber et al. 2000).

Les écoulements dans les macropores sont surtout reliés au mouvement de l'eau, non capillaire, dans des silts ou argiles fissurés. À saturation, l'eau se déplace en court-circuitant les micropores (primaires) de faible conductivité hydraulique. On peut aussi rencontrer ce type d'écoulement dans les sols qui ont été le siège d'une activité animale ou végétale (racines). Dans le cas des haldes à stériles, où l'étalement de la granulométrie est grande, les macropores peuvent être causés par l'empilement de petits blocs (ou cailloux) sur de gros blocs, empêchant les particules plus fines de remplir entièrement les vides lors de la mise en place. D'autres phénomènes favorisent la création de macropores, comme le mouvement des particules au sein de la halde (e.g. Morin et al. 1991; Fala, 2002), ou la dissolution de minéraux.

D'autre part, les écoulements gravitaires instables (écoulement digitiforme ou sous forme de doigts, "fingering flow") peuvent survenir dans les sols homogènes à granulométrie assez grossière (sables, graviers), dans des sols plus fins (sables fins) mais hydrophobes ou dans le sol grossier d'un système bicouche de sol fin sur sol grossier (effet de barrière capillaire 1D). Le "fingering" (écoulement digitiforme) est le résultat d'une instabilité du front de mouillage. Il peut provoquer le déplacement de l'eau et de contaminants à une vitesse approchant celle à saturation (e.g., Ogawa, 1998; Glass, 1988), même si le milieu est initialement sec. Bien que les écoulements du type "fingering" fassent partie des divers modes d'écoulement préférentiel, ils ont un caractère spécial. En effet les équations classiques d'écoulements et de transport ne sont pas applicables dans ces cas. Ces dernières nécessitent des développements théoriques fondamentaux (Steenhuis et al., 1995) afin de tenir compte des instabilités au niveau du front de mouillage. Les premiers documents qui parlent des écoulements préférentiels du type "fingering" datent du début des années 60 (Tabuchi, 1961; Peck, 1965). La première étude systématique du phénomène a été publiée par Hill et Parlange (1972), qui ont effectué des expériences pour l'évaluation des conditions de développement des doigts et pour mesurer leurs dimensions et leur vitesse. Lors de cette étude, les écoulements préférentiels ont été reliés, pour la première fois d'une façon

expérimentale, à l'instabilité du front de mouillage. Ces dernières années, il y a eu un intérêt accru pour les écoulements préférentiels. Des études ont alors montrées que des cas de contamination des eaux souterraines sont reliés à ce type d'écoulements préférentiels (Hillel, 1987 ; Steenhuis et al., 1990b).

Pour que ce genre d'écoulement survienne, il faut que le matériau soit initialement sec. Par exemple, Glass (1985) a observé qu'une humidification préalable du sol de 6 % (teneur en eau volumique) réduit énormément les instabilités et peut même les supprimer. Or, bien que les stériles puissent être secs au moment de la mise en place, ils ne le resteront pas à long terme (e.g. Fala et al. 2006). Une halde se construit avec ajout de quantités limitées de stériles sur plusieurs années; il y a donc un effet de mouillage progressif, compte tenu du caractère humide du climat québécois. Il peut néanmoins y avoir un assèchement des stériles en surface lorsque le taux d'évaporation dépasse le taux d'infiltration (en été). Comme on le verra plus loin (simulations numériques), la partie sèche ne concerne alors que la partie superficielle de la halde.

La suite de la thèse montrera d'autre part l'importance des écoulements avec effets de barrière capillaire en 2D qui surviennent quand un matériau fin repose sur un grossier avec une interface inclinée (e.g. Bussière et al., 2003; Cifuentes et al., 2006). Cette situation provoque un mouvement latéral de l'eau et une accumulation de cette dernière dans les zones plus basses (le bas de pentes). À noter que dans ce cas, l'écoulement digitiforme peut aussi se développer dans le matériau grossier à partir de l'interface. Les écoulements hétérogènes se développent dans les sols où l'hétérogénéité du milieu a une forte corrélation spatiale (Nieber et al. 2000).

Dans la suite de cette thèse, on négligera les effets du "fingering" qui peuvent survenir dans la partie superficielle d'une halde formée de matériau homogène, ainsi que les écoulements dans les macropores. Les effets de barrière capillaire et le rôle des

hétérogénéités à forte corrélation spatiale dans les écoulements de l'eau dans les haldes seront toutefois traités dans la suite.

2.2 Infiltration dans les matériaux granulaires : phénoménologie et prédiction

Dans cette section on présente un aperçu de la théorie d'infiltration et des techniques développées pour analyser le phénomène. Il s'agit surtout de solutions analytiques ou empiriques. Au chapitre 6, on présentera le principe des solutions numériques qui ont fait leur apparition ces dernières années. Une approche analytico-numérique proposée dans le cadre de cette thèse sera présentée au chapitre 3.

2.2.1 Quelques notions et définitions reliées à l'infiltration

Les précipitations sont généralement décrites par leur intensité (i_p) [LT^{-1}] et par l'ampleur des précipitations cumulées (I_p) [L]. L'intensité des précipitations représente le taux auquel ces dernières sont appliquées à la surface du sol. Les précipitations cumulées (I_p) représentent l'aire en dessous de la courbe i_p en fonction du temps t

Le taux d'infiltration auquel l'eau pénètre dans le sol via la surface d'infiltration à un temps t donné varie de 0 jusqu'à une valeur maximale égale à la capacité d'infiltration (f) [LT^{-1}]. La capacité d'infiltration représente le taux maximum auquel un sol peut absorber de l'eau depuis la surface. Durant une précipitation prolongée, la valeur de f décroît dans le temps jusqu'à atteindre une valeur minimale. Cette valeur minimale est atteinte après un temps plus ou moins grand, selon le type de sol et l'ampleur de i_p. L'aire en dessous de la courbe de la capacité d'infiltration f en fonction du temps t donne la capacité d'infiltration cumulée du sol (F) [L]. Elle représente le volume maximum d'eau par unité de surface qu'un sol peut absorber durant une période de temps donnée.

Au début des précipitations, la capacité d'infiltration d'un sol sec est très grande et l'eau peut s'infiltrer rapidement. Au fur et à mesure que les précipitations s'accumulent la capacité d'infiltration du sol diminue (voir figure 2.26, cas B et C). Si l'intensité des précipitations (i_p) est plus petite que la capacité d'infiltration (f), alors toutes les précipitations s'infiltrent dans le sol pendant la période des précipitations. Si l'intensité des précipitations (i_p) est plus grande que la capacité d'infiltration du sol (f), il y a accumulation ou ruissellement d'eau en surface. La quantité maximale d'eau accumulée ou ruisselée en surface peut être estimée par la différence entre les précipitations cumulées (I_p) et la capacité d'infiltration cumulée (F) du sol.

La figure 2.26 montre les trois scénarios typiques décrits par Mein et Larson (1973) pour une infiltration verticale (1D), lors de précipitations d'intensité constante (i_p), pour un sol homogène possédant une conductivité hydraulique saturée k_s. On note :

- Lorsque l'intensité des précipitations est inférieure à la valeur minimale de la capacité d'infiltration du sol (i.e., $i_p < k_s \leq f$), indépendamment du temps, toutes les précipitations s'infiltrent dans le sol et aucune accumulation en surface n'est observée (cas A, figure 2.26).

- Lorsque l'intensité des précipitations est plus grande que la valeur minimale de la capacité d'infiltration d'un sol mais ne la dépasse pas (i.e., $k_s < i_p \leq f$), aucun ruissellement n'apparaît (cas B, figure 2.26).

- Quand une accumulation d'eau survient, cela peut créer un ruissellement (si la surface est inclinée); la capacité d'infiltration continue de diminuer jusqu'à ce qu'un minimum de f soit atteint (i.e., $k_s < f \leq i_p$; cas C, figure 2.26).

Figure 2.26 : Scénarios typiques lors de l'infiltration (adaptée d'après Espinoza, 1999)

2.2.2 Modèles d'infiltration

Plusieurs équations analytiques et formulations semi-empiriques ont été développées pour décrire une infiltration 1D (horizontale ou verticale) dans un sol homogène avec des conditions initiales simplifiées (e.g. Green and Ampt, 1911; Kostiakov, 1932; Horton, 1940; Philip, 1957a; Philip, 1984; Haverkamp et al., 1988). La plupart des modèles d'infiltration supposent que les précipitations appliquées en surface peuvent s'infiltrer pendant une longue période de temps d'une façon constante (i.e. milieux semi infinis avec une surface piézométrique très profonde), et qu'une stagnation d'eau survient au tout début du processus d'infiltration.

La quantité d'eau qui peut s'infiltrer en surface est directement liée à la teneur en eau initiale du sol. La variation d'humidité, la conductivité hydraulique et les hétérogénéités du sol sont les propriétés qui influencent le plus la quantité d'eau qui s'infiltre. Les modèles supposent généralement une teneur en eau initiale uniforme comme condition de départ, même si en pratique le profil de teneur en eau est loin d'être uniforme dans plusieurs cas. Un exemple typique de profil de teneur en eau dans un sol homogène est

donné à la figure 2.27. Au temps t_0, le sol est saturé sous le niveau de la surface piézométrique et le degré de saturation diminue verticalement en allant vers la surface du sol. Ce profil en conditions d'équilibre (i.e. aucun écoulement dans le sol c'est-à-dire que la charge *h* est constante), est similaire à celui de la courbe de rétention d'eau CRE du sol pour un milieu homogène (voir figure 2.21). La figure 2.27 montre aussi l'évolution (schématique) du profil de la teneur en eau à différents temps ($t_0<t_1...<t_7$) pour des précipitations appliquées à la surface mais sans stagnation d'eau. On voit sur cette figure que la teneur en eau change d'abord près de la surface puis l'eau continue à se propager vers le bas au fur et à mesure que le temps passe. Le niveau de la nappe augmente une fois la partie du sol tout près du niveau initial est saturée.

Une infiltration d'eau dans un sol ne peut avoir lieu que si le gradient est non nul. Elle peut être considérée comme un cas particulier d'un écoulement dans un milieu poreux non saturé, dont la solution est donnée uniquement au niveau de la frontière, en surface. De ce fait, d'anciennes expressions de capacité d'infiltration (e.g. Green et Ampt, 1911) ont été reprises dans le cadre plus général des écoulements non saturés (e.g. Philip, 1969; Mein et Larson,1973; Morel-Seytoux et Khanji, 1974).

Figure 2.-27 : Profil de teneur en eau à différents temps lors d'une séquence d'infiltration de durée t_7-t_0 (tirée de Espinoza, 1999)

2.2.3 Équations générales d'écoulement

Une description complète du processus d'infiltration implique une évaluation de la variation de la teneur en eau en fonction des coordonnées (x, y et z) et du temps t, dans un domaine donné. L'équation générale d'écoulement (équation de Richards, 1931) pour un milieu isotrope s'écrit (e.g. Mein et Larson, 1973; Hillel, 1998) :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial \psi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)+\frac{\partial k}{\partial z}=-\frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{2.18}$$

où

k : Conductivité hydraulique isotrope [L/T]

ψ : Succion L]

θ : Teneur en eau volumique [-]

t : Temps [T]

En intégrant la teneur en eau volumique sur tout le domaine d'infiltration (Ω) on obtient la capacité d'infiltration cumulée :

$$F(t)=\frac{1}{S_\Omega}\int_\Omega \theta(x,y,z,t)d\Omega \tag{2.19}$$

où S_Ω est la surface d'infiltration de l'eau (supposée constante) dans le domaine (Ω).

Pour profiter des propriétés de l'équation 2.18 sous sa forme 'diffusive', quelques chercheurs (e.g. Philip, 1969) l'ont exprimée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)+\frac{\partial k}{\partial \theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}=-\frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{2.20}$$

où D est le coefficient de diffusion (ou diffusivité) de l'eau [L^2T^{-1}] :

$$D(\theta) = k(\theta)\frac{d\psi}{d\theta} \tag{2.21}$$

Dans la partie gauche de l'équation 2.20, le dernier terme à droite représente la contribution des forces gravitaires à l'écoulement de l'eau, alors que les trois premiers représentent celle des forces capillaires. On peut négliger la part des forces gravitaires dans un écoulement essentiellement horizontal et cette équation (pour un écoulement 1D) devient identique à l'équation de diffusion dont plusieurs solutions analytiques sont connues (e.g. Crank, 1975).

2.2.4 Équations de la capacité d'infiltration

2.2.4.1 Solution de Green et Ampt

Green et Ampt (1911) ont été les premiers à tenter de trouver une solution analytique au problème d'infiltration. Ils ont proposé une solution approximative basée sur un écoulement saturé dans une direction verticale (1D). Dans leur modèle, le front de mouillage est défini par une succion constante (ψ_f) au dessus de laquelle le déficit d'humidité ($\Delta\theta_i$) est uniforme. La conductivité hydraulique (k) et la charge à la surface d'infiltration (h_0) sont aussi constantes durant le processus d'infiltration. La figure 2.28a schématise le modèle. La principale hypothèse que sous tend le modèle de Green et Ampt (1911) concerne le profil de la teneur en eau durant le processus d'infiltration : on considère que le sol au dessus du front de mouillage est complètement saturé tandis que le sol en dessous est à la teneur en eau initiale. Ceci revient à considérer que la tangente de la pente de la CRE du matériau est infinie.

Figure 2.28 : Modèle de Green et Ampt (adaptée d'après Espinoza, 1999).

Sur la figure 2.28b, on peut voir qu'à $t = t_1$ le sol est à saturation complète ($S_r = 1$) depuis la surface jusqu'au front de mouillage (Z_f). Par application de la loi de Darcy et du principe de la continuité entre la surface et le front de mouillage, Green et Ampt (1911) ont proposé, pour la capacité d'infiltration, l'expression suivante :

$$f = k\frac{(Z_f + \psi_f + h_0)}{Z_f} = \frac{d(Z_f \Delta\theta_i)}{dt} \tag{2.22}$$

Le taux d'infiltration (f) donné par l'équation 2.22 décroît avec le temps et tend vers la valeur de k à des temps élevés. C'est un comportement typique qui est en accord avec les observations expérimentales. Cette équation prédit aussi le fait qu'à des très petits temps la capacité d'infiltration est élevée. Le taux d'infiltration à $t = 0$ est, par contre, infini. L'intégration de l'équation 2.22 donne la capacité d'infiltration cumulée (F) en fonction du temps (t) :

$$F = Z_f \Delta\theta_i = kt + \Delta\theta_i(\psi_f + h_0)\ln\left[1 + \frac{F}{\Delta\theta_i(\psi_f + h_0)}\right] \tag{2.23}$$

Morel-Seytoux et Khanji (1974) ont obtenu une expression similaire à l'équation 2.23 en exploitant un modèle d'écoulement biphasique (air et eau).

En plus de sa relative simplicité, le modèle de Green et Ampt (1911) a l'avantage d'être basé sur des propriétés mesurable des sols. Le profil de teneur en eau qui correspond le mieux au profil hypothétique de Green et Ampt (figure 2.28b) est rencontré lors d'infiltration dans des sols grossiers et relativement secs (Philip, 1957d). Ceci constitue une bonne approximation pour les stériles. Pour les autres cas, le modèle s'éloigne de la réalité.

Il est à noter que l'équation 2.23 n'est pas une fonction explicite du temps. Ceci nécessite une procédure itérative pour la détermination de F en fonction du temps. L'équation 2.23 peut s'écrire sous une forme adimensionnelle (Espinoza, 1999) :

$$t^* = F^* - \ln(1 + F^*) \tag{2.24}$$

où F* et t* représentent respectivement l'infiltration cumulative (sans dimension) et le temps (sans dimension), qui s'expriment (Espinoza, 1999) :

$$F^* = \frac{F}{\Delta\theta_i(\psi_f + h_0)} \tag{2.25}$$

$$t^* = \frac{kt}{\Delta\theta_i(\psi_f + h_0)} \tag{2.26}$$

La courbe F^* en fonction de t^* peut être utilisée pour trouver une valeur approximative de l'infiltration cumulative F à un temps donné sans avoir recours à une

procédure itérative en utilisant une courbe F^* vs t^* de référence et en connaissant k, $\Delta\theta_i$, ψ_f et h_0 d'un matériau en particulier (Espinoza, 1999).

Temps de percolation

Au tout début de l'infiltration, toutes les précipitations percolent dans le sol et il n'y a aucune stagnation d'eau à la surface d'infiltration. Pendant cette période, le sol est non saturé. Au temps t_p (voir figure 2.26), le taux d'infiltration devient égal à la capacité d'infiltration du sol, et la pression à la surface devient nulle. Ces événements marquent le début de la stagnation d'eau.

Selon le profil de la figure 2.28b, la profondeur réelle du front de mouillage (où S_r =100%) peut alors être estimée par :

$$Z_f = F/\Delta\theta_i \tag{2.27}$$

En remplaçant f par i_p et h_0 par 0 dans l'équation 2.22, l'infiltration cumulée (F_p) durant la période de percolation d'eau devient :

$$F_p = \frac{k\Delta\theta_i\psi_f}{(i_p + k)} \tag{2.28}$$

Le temps correspondant à la fin de cette période est alors (e.g. Espinoza, 1999) :

$$t_p = \frac{F_p}{i_p} = \frac{k\Delta\theta_i\psi_f}{i_p(i_p + k)} \tag{2.29}$$

Détermination des paramètres du modèle de Green et Ampt

La bonne correspondance entre les données d'infiltration mesurées et celles calculées a entrainé une grande popularité du modèle de Green et Ampt (e.g. Bouwer, 1969; Childs et Bybordi, 1969; Whisler et Bouwer, 1970; Rawls et Brakensiek, 1982; Van Mullen, 1991). Mais cette bonne correspondance nécessite une sélection appropriée des paramètres $\Delta\theta_i$, k et ψ_f.

Le déficit d'humidité ($\Delta\theta_i$) peut être estimé sur terrain en mesurant la teneur en eau initiale et la porosité du matériau ($\Delta\theta_i = n - \theta_{in}$). L'air emprisonné dans le sol au dessus du front de mouillage réduit la conductivité hydraulique (k) par rapport à celle à saturation (k_s). Les données montrent que la conductivité hydraulique dans la zone mouillée varie typiquement de $0{,}4\,k_s$ à $0{,}6\,k_s$. Pour la plupart des applications une valeur de k moyenne de $0{,}5\,k_s$ peut être adoptée (Bouwer, 1966).

Plusieurs expressions, basées sur des études théoriques et expérimentales, ont été proposées pour estimer le paramètre ψ_f. Des études expérimentales (Bouwer, 1966) montrent que l'utilisation de la pression d'imbibition complète ψ_{im} lors d'un mouillage du sol (figure 2.29) comme valeur de ψ_f est en accord avec les résultats théoriques et expérimentaux. Rawls et al. (1983b), se basant sur une compilation de données publiées sur les caractéristiques hydriques de sols (5000 sols environ), donnent les paramètres d'infiltration ($\Delta\theta_i$, k et ψ_f) pour divers types de sols. Un extrait de valeurs typiques de ces paramètres est donné au tableau 2.6. Notons que ces valeurs ne correspondent pas parfaitement aux valeurs communément admises pour les matériaux en question. Ceci est du au fait que le modèle n'est qu'une approximation de la réalité. Le modèle est plutôt utilisé pour calculer les taux d'infiltration (et pas la détermination des

caractéristiques d'un sol). Les valeurs des paramètres du tableau 2.6 sont donc arrondies pour pouvoir retrouver des taux d'infiltration plus réalistes.

Figure 2.29 : Représentation schématique de la courbe de rétention d'eau (air entry value = AEV $=\psi_a$; fully wet pressure = ψ_{im} ; water entry value = WEV $=\psi_w$) en mouillage et en drainage (adaptée d'après Espinoza, 1999).

En utilisant l'équation de Richards (1931) (équation 2.18), Mein et Farrel (1974) et Swartzendruber (1987) ont proposé une expression théorique pour estimer ψ_f . Elle correspond à l'aire sous la courbe de la conductivité hydraulique relative (déterminée expérimentalement) :

$$\psi_f = \int_0^{\psi_i} k_r(\psi)\, d\psi \tag{2.30}$$

où ψ_i est la succion correspondant à la teneur en eau initiale. Des résultats expérimentaux ont montré que l'équation 2.30 donne une bonne approximation de ψ_f (Morel-Seytoux et Khanji, 1974; Mein and Farrel, 1974; Brakensiek, 1977;

Swartzendruber, 1987). Rawls et al. (1983a) ont donné ψ_f en fonction des paramètres de rétention d'eau (ψ_a et λ_{BC}) de Brooks et Corey (1964) :

$$\psi_f = \frac{2+3\lambda_{BC}}{1+3\lambda_{BC}}\left(\frac{\psi_a}{2}\right) \tag{2.31}$$

Une étude expérimentale réalisée par Brakensiek (1977) a montré que la succion au niveau du front de mouillage ψ_f peut être approchée à $0{,}76\psi_a$.

Tableau 2.6 : Valeurs typiques des paramètres du modèle de Green et Ampt (tiré de Espinoza, 1999)

Type de sol	n	$\Delta\theta$	ψ_f (m)	k (m/s)
Sable	0,437	0,417	0,0495	3,25E-05
Sable limoneux	0,437	0,401	0,0613	8,31E-06
Limon sableux	0,453	0,412	0,1101	3,03E-06
Limon	0,463	0,434	0,0889	9,44E-07
Limon silteux	0,501	0,486	0,1668	1,81E-06
Limon sablo-argileux	0,398	0,33	0,2185	4,17E-07
Limon argileux	0,464	0,309	0,2088	2,78E-07
Limon silto-argileux	0,471	0,432	0,273	2,78E-07
Argile sableuse	0,43	0,321	0,239	1,67E-07
Argile silteuse	0,479	0,423	0,2922	1,39E-07
Argile	0,47	0,412	0,2772	8,33E-08

Les paramètres $\Delta\theta_i$, k et ψ_f peuvent être aussi déterminés en utilisant l'équation 2.23 par un ajustement des données d'infiltration. Même si cette approche est moins compliquée que les essais en laboratoire que nécessite l'équation 2.30 (mesure de la conductivité hydraulique saturée et non saturée), les valeurs obtenues ne peuvent pas être utilisées pour n'importe quelles conditions initiales et d'infiltration. L'évaluation du paramètre ψ_f ainsi que sa précision dépendra donc des données disponibles.

2.2.4.2 Solution de Philip

Ce modèle part de l'équation des écoulements non saturés (équations 2.18 ou 2.20) appliquée à un écoulement 1D. Philip (1957a) a présenté d'abord une solution analytique de la capacité d'infiltration en considérant que l'apport des forces gravitaires est négligeable (i.e., 4ème terme de l'équation 2.18 nul). Pour un sol homogène avec une teneur en eau initiale uniforme (θ_i) et une teneur en eau égale à θ_s en surface, il a développé une solution sous forme de série pour l'infiltration cumulée (F).

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\theta) t^{n/2} + k_i t \tag{2.32}$$

où les coefficients A_n [$LT^{-n/2}$] sont en fonction de la teneur en eau volumique. Ces coefficients correspondent à des solutions d'équations différentielles ordinaires et k_i à la conductivité hydraulique du sol à sa teneur en eau initiale. Philip (1957b) a montré que, pour des temps assez grands, la série $A_n(\theta)$ ne converge plus. Il limite donc son domaine de définition de 0 au temps t_c (Philip, 1969), où t_c correspond au temps où les forces gravitaires (qui agissent sur l'eau en mouvement et qui sont très faibles au début de l'infiltration) deviennent égales aux forces de rétention capillaire (qui agissent sur l'eau en mouvement et qui sont prépondérantes au début de l'infiltration). En outre, pour des temps petits, Philip (1957b) a montré que seulement deux termes de la série peuvent suffire pour approcher la plupart des cas qu'on peut rencontrer en pratique. Pour un temps inférieur à t_c, l'infiltration cumulée peut s'écrire, simplement :

$$\mathrm{F} = \mathrm{S}t^{1/2} + \mathrm{A}t \quad 0 \le t \le t_c \tag{2.33}$$

où S [$LT^{-1/2}$] est la sorptivité et A [LT^{-1}] est un paramètre calculé par une intégration numérique. La sorptivité mesure la capacité du milieu à absorber de l'eau par capillarité.

Les paramètres S et A, définis par Philip (1957a), dépendent de la teneur en eau à saturation (θ_s) et de la teneur en eau initiale (θ_i) du sol. Ils sont définis comme suit :

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \phi_1(\theta)\, d\theta \tag{2.34}$$

$$A = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \phi_2(\theta)\, d\theta + k_i \tag{2.35}$$

où ϕ_1 [$LT^{-1/2}$] et ϕ_2 [LT^{-1}] sont des fonctions de teneur en eau nécessitant une procédure numérique, donnée par Philip (1957a), pour être calculées. Les paramètres S et A ne sont pas reliés intrinsèquement au sol mais dépendent des conditions initiales et frontières spécifiques à chaque cas d'infiltration.

Philip (1969) donne une limite supérieure du temps t_c pour garantir la convergence de la série $A_n(\theta)$:

$$t_c = \frac{S^2}{4(k-A)^2} \tag{2.36}$$

En dérivant l'équation 2.33 par rapport au temps, on obtient la capacité d'infiltration (Philip, 1957a) :

$$f = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A \qquad 0 \le t \le t_c \tag{2.37}$$

Pour un temps élevé (quasi infini), Philip (1957b) a développé une solution pour le front de mouillage. Le taux d'infiltration est alors donné par :

$$f = k \qquad t > t_c \tag{2.38}$$

La conductivité hydraulique k dans les équations 2.36 et 2.38 serait inférieure à la conductivité hydraulique à saturation (k_s) parce que l'infiltration à travers le sol à partir de la surface emprisonne l'air (qui, par la suite, réduit la surface disponible pour la circulation d'eau).

En intégrant l'équation 2.38, la capacité d'infiltration cumulée pour des temps élevés devient (Philip, 1987) :

$$F = kt + t_c(k - A) \text{ pour } t > t_c \tag{2.39}$$

Le second terme de la partie droite de l'équation 2.39 permet de retrouver la capacité d'infiltration à $t = t_c$ tel que calculé par l'équation 2.33. Ceci assure la continuité de F dans le temps.

La description de la capacité d'infiltration avec le modèle de Philip nécessite donc l'obtention des paramètres S, A et k.

Plusieurs essais expérimentaux et numériques ont confirmé la validité du modèle de Philip (e.g. Youngs, 1957; Philip, 1957c; Brutsaert, 1968; Talsma et Parlange, 1972; Warrick et al., 1985; Davidoff et Selim, 1986). L'avantage principal de ce modèle est qu'il ne pose aucune hypothèse (restriction) concernant le profil de la teneur en eau durant le processus d'infiltration.

Temps de percolation

Lors d'une précipitation avec une intensité constante (i_p), la stagnation survient lorsque celui-ci égale la capacité d'infiltration (i.e. $f = i_p$). Une expression donnant le temps de percolation avec le modèle de Philip peut être obtenue d'après la définition du temps de percolation (donnée par Mein et Larson, 1973, i.e. $t_p = F_p / i_p$). Les équations 2.33 et 2.37 permettent d'écrire :

$$F = \frac{S^2(f - A/2)}{2(f - A)^2}, \text{ avec } f \geq A \tag{2.40}$$

En remplaçant f par i_p dans l'équation 2.40, le temps de percolation devient :

$$t_p = \frac{S^2(i_p - A/2)}{2i_p(i_p - A)^2}, \text{ pour } i_p \geq A \tag{2.41}$$

Détermination des paramètres du modèle de Philip

Malgré le fait que le modèle de Philip ait été validé avec de nombreux résultats expérimentaux, la procédure numérique proposée par Philip (1957a) pour obtenir les paramètres S et A est peu commode dans des applications pratiques. Dans beaucoup de cas, S et A sont déterminés par simple ajustement des données d'infiltration au modèle de Philip. Les paramètres obtenus de cette manière ne sont applicables qu'à une intensité d'infiltration et une teneur en eau initiale données.

Beaucoup de recherches ont été entreprises pour évaluer de façon plus représentative les paramètres S et A du modèle de Philip. Le but est souvent de trouver une forme quasi-exacte de ces paramètres en fonction des propriétés fondamentales d'un sol (e.g. Brutsaert, 1968; Parlange, 1975a; Brutsaert, 1976; Parlange et al., 1982; Warrick et al.,

1985; Philip, 1987). En ce sens, plusieurs solutions reliant S à la conductivité hydraulique relative (ou à la diffusivité) et à la succion ont été développées. Par exemple, Brutsaert (1968) a proposé la formule suivante pour un sol relativement sec :

$$S = [2a_b k_s(\Delta\theta_i)/\eta]^{-1/2} \tag{2.42}$$

où a_b est un paramètre d'ajustement (qu'on retrouve dans le modèle de rétention d'eau de Brutsaert, 1966); le paramètre η est égal à $(2+3\lambda_{BC})/\lambda_{BC}$, où λ_{BC} est l'indice des pores du modèle de Brooks et Corey (1964). Pour sa part, Parlange (1975a) a proposé une autre équation de la sorptivité :

$$S = \left[\int_0^{\psi_i} (\theta_s + \theta(\psi) - 2\theta_i) k(\psi)\, d\psi \right]^{1/2} \tag{2.43}$$

où ψ_i est la succion correspondant à la teneur en eau initiale. Pour un profil de teneur en eau presque rectangulaire (voir figure 2.28b), l'équation 2.43 peut être simplifiée comme suit :

$$S^2 = 2\Delta\theta_i k_s \int_0^{\psi_i} k_r(\psi)\, d\psi = 2\Delta\theta_i k_s \psi_f \tag{2.44}$$

Parlange et al. (1982) ont ensuite développé une nouvelle expression de la capacité d'infiltration. Dans cette approche, le paramètre A du modèle de Philip peut être approché par :

$$A = (k - k_i)(2-\beta)/3 \tag{2.45}$$

où k_i est la conductivité hydraulique initiale et β est donné par :

$$\beta = \frac{1}{\theta_s - \theta_i} \int_{\theta_i}^{\theta_s} \frac{k_s - k(\theta)}{(k_s - k_i)} d\theta \quad \text{où } 0 \leq \beta \leq 1 \tag{2.46}$$

D'après l'équation 2.45, A peut varier de $(k - k_i)/3$ à $2(k - k_i)/3$. Pour déterminer le paramètre β, il est nécessaire de connaître la variation de la conductivité hydraulique avec la teneur en eau.

Philip (1969) a montré expérimentalement que la valeur de A se situe entre $0{,}378k$ et $0{,}667k$ pour différents types de profils de teneur en eau pour l'argile Yolo (light clay). Il rapporte aussi les résultats de Talsma (1969) concernant trois sols : A=0,382k (Jondaryan loam), A=0,350k (Banna loamy sand) et A=0,333k (Camarooka clay). Les résultats de simulations numériques et de solutions analytiques quasi-exactes suggèrent l'approximation $A \approx 0{,}363k$ pour des sols où la teneur en eau initiale est faible (Philip, 1987).

D'autre part, il est commun d'utiliser l'équation 2.37 sans aucune restriction au niveau du temps. Comme f tend vers k ($k < k_s$) pour un temps élevé, il s'en suit que $A = k$ pour des temps élevés. Mais il faut insister sur le fait que la série développée par Philip (équation 2.32) n'est valide que pour des temps petits ($t < t_c$). Il est donc incorrect d'interpréter A comme étant la conductivité hydraulique k.

L'usage d'expressions généralisées pour évaluer les paramètres du modèle de Philip (e.g. équation 2.43) est plus complexe que de faire un ajustement des données d'infiltration à l'équation 2.33, car la détermination générale nécessite la connaissance

de la fonction de conductivité relative et la courbe de rétention d'eau. Mais cette complexité additionnelle est compensée par une plus grande généralité des valeurs de S et A obtenues.

Généralisation du modèle de Philip

Philip (1969b) a considéré que l'effet des forces de gravité sur l'infiltration est négligeable pour la généralisation de son modèle en 2D et en 3D. Ceci rend le modèle applicable uniquement à des temps très petits ou à des matériaux très fins. De plus, Philip a abordé deux surfaces d'infiltration bien spécifiques : demi cylindre (de rayon r_0) dans le cas 2D (m=2; voir équations 2.48, 2.49 et 2.50 plus bas) et demi sphère (de rayon r_0) dans le cas 3D (m=3 voir équations plus bas). Sous ces conditions, le premier terme dans la partie droite de l'équation 2.32 se trouve remplacé par une série (Philip 1969b). On obtient :

$$F = St^{1/2} + \frac{A_{*2}t}{r_0} + \frac{A_{*3}t^{3/2}}{r_0^2} + \cdots + \frac{A_{*n}t^{n/2}}{r_0^{n-1}} \tag{2.47}$$

où A_{*n} $[L^nT^{-n/2}]$ sont des intégrales de ϕ_n(des fonctions de teneur en eau). En particulier on a :

$$A_{*2} = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \left(\frac{m-1}{2}\phi_1^2 + \phi_2 \right) d\theta \tag{2.48}$$

$$A_{*3} = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \left(\frac{(m-1)(m-2)}{2.3}\phi_1^3 + (m-1)\phi_1\phi_2 + \phi_3 \right) d\theta \tag{2.49}$$

et $A_{*2(m=3)} = 2A_{*2(m=2)}$ (2.50)

Philip (1969b) a montré que dans le cas 3D (surface d'infiltration en demi sphère), l'écoulement atteint, à des temps élevés, un régime permanent même en l'absence de force gravitaires.

Une solution analytique générale du modèle de Philip, incluant une absorption par capillarité et par gravité s'avère très complexe (Dooge, 2002). À des temps élevés (régime permanent) une simplification de la fonction de la conductivité hydraulique permet cependant de trouver une solution. En effet une fonction exponentielle de k en fonction de la succion (du type Gardner 1958), donne une forme linéaire de l'équation de l'écoulement (équation 2.18), plus facilement traitable (Philip, 1969b). Pour trouver une solution complète en régime transitoire, des progrès ne peuvent être réalisés que si on garde la forme exponentielle de la fonction de conductivité hydraulique et on ajoute une autre simplification : prendre une diffusivité constante (Dooge, 2002). Ceci revient à prendre une conductivité qui varie linéairement en fonction de la teneur en eau θ. Ces constatations ont servi de base pour le développement d'autres équations similaires à la relation 2.33 pour le cas 3D (e.g., Smettem et al., 1994; Haverkamp et al., 1994; Vandervaere et al., 2000).

2.2.4.3 Autres solutions

En assimilant la diffusivité de l'équation 2.21 à la fonction de distribution delta, Parlange (1975a) et Parlange et al. (1982) ont développé plusieurs expressions pour la capacité d'infiltration en fonction des paramètres de Philip (1957a). Se basant sur des résultats numériques, Smith et Parlange (1978) ont montré que certaines de ces équations constituent les limites supérieure et inférieure de la plupart des solutions exactes de la capacité d'infiltration.

Swartzendruber (1987) a proposé une expression de la capacité d'infiltration similaire à celle de Green et Ampt (1911), qui ne nécessite pas l'hypothèse d'un profil de teneur en

eau rectangulaire (profil montré à la figure 2.28b) comme pour le modèle de Green et Ampt. Swartzendruber et Hogarth (1991) ont inclus l'effet d'une charge d'eau non nulle à cette équation.

Plusieurs autres équations empiriques ont été proposées pour décrire le processus d'infiltration (e.g. Kostiakov, 1932; Horton , 1940; Holtan, 1961; Smith, 1972). Elles montrent souvent un bon accord avec les résultats d'essais d'infiltration puisque les coefficients utilisés dans ces équations sont usuellement obtenus par un ajustement de ces équations aux données d'infiltration. L'inconvénient majeur de la plupart de ces équations est qu'elles dépendent non seulement du type de sol mais aussi des précipitations et des conditions initiales.

Notons que les modèles de Philip et Green et Ampt sont les plus communément utilisés pour calculer la capacité d'infiltration (Espinoza, 1999). Dans le cas des stériles, l'utilisation de l'un ou l'autre modèle dépend des paramètres recherchés et des hypothèses d'applicabilité de ces modèles. Une bonne pratique consiste à utiliser plusieurs modèles et effectuer une moyenne en donnant un poids supérieur aux paramètres résultant du modèle qui s'applique le plus au cas traité.

CHAPITRE 3

ESSAIS D'INFILTRATION : PROPOSITION D'UNE MÉTHODE D'INTERPRÉTATION PAR APPROCHE MIXTE (ANALYTIQUE ET NUMÉRIQUE)

3.1 Généralités

Depuis 2002, plusieurs essais d'infiltration ont été effectués à la surface du banc supérieur de la halde no 1 au site Laronde. Le but de ces essais est l'évaluation, *in situ*, des caractéristiques hydriques des stériles. Les solutions présentées au chapitre 2 permettent de trouver, à partir des caractéristiques hydriques d'un sol, le temps de percolation (t_p) et le volume d'eau infiltré dans le sol (F ou f) lors d'une infiltration suite à des précipitations de pluie (I_p ou i_p), pour un écoulement 1D (pour les écoulements 2D et 3D, la surface d'infiltration doit être soit cylindrique ou sphérique, respectivement). Les divers modèles d'infiltration développés pour l'interprétation des essais d'infiltration, exigent le respect de plusieurs conditions (tête d'eau en surface nulle, non nulle mais constante; conditions frontières données sous forme de teneur en eau volumique; généralement une infiltration 1D, etc.). Ces modèles donnent la sorptivité et la conductivité hydraulique comme résultats. Dans ce chapitre on présentera une technique d'interprétation basée sur des calculs numériques menés à partir d'une formulation analytique. Cette approche est basée sur les données d'essais d'infiltration en 3D (radial) pour aboutir aux caractéristiques hydriques du modèle analytique de van Genuchten (1980) d'un milieu poreux.

3.1.1 Méthode et objectifs

La méthode proposée vise à évaluer 4 des 5 caractéristiques hydriques en mouillage d'un matériau homogène, soit : θ_s , α_v , n_v et k_s . On part ici du principe que pour un matériau donné, il existe une seule et unique courbe $q=f(t)$ pour des conditions initiales et frontières données. Quant à la teneur en eau résiduelle θ_r il est possible de l'estimer, indirectement, à l'aide d'un modèle prédictif de la CRE à partir des propriétés de base du matériau (e.g., Aubertin et al., 1998; Houston et al., 2006). La même approche peut être appliquée dans le cas d'un matériau dont les caractéristiques hydriques ne sont pas uniformes. On cherche, dans ce cas, le matériau homogène équivalent dont le comportement hydrique est le plus proche (en termes de taux d'infiltration).

Avec la technique proposée ici, on exploite les propriétés des équations adimensionnelles d'écoulement obtenues directement des principes de similitude (e.g. Kline 1965; Sedran et al., 2001; Fala et al., 2002). On utilise alors les simulations numériques afin de définir des relations entre divers paramètres sans dimension. Ensuite, ces relations sont utilisées pour trouver les caractéristiques hydriques du matériau d'intérêt (pour les mêmes conditions initiales et frontières que celles utilisées dans les modèles numériques). Cette méthode demande, toutefois, plusieurs calculs numériques. Par exemple, l'interprétation d'un seul essai peut demander 70 à 100 simulations, dont chacune peut durer de quelques heures à quelques jours (pour les cas traités ici).

Les matériaux utilisés pour la démonstration de la technique proposée sont virtuels (synthétiques). L'application qui viendra par la suite sera faite sur des essais réalisés en laboratoire et sur terrain.

3.1.2 Hypothèses de calcul à la base de la méthode proposée

La méthode proposée est basée sur les principales hypothèses suivantes :

- Les conditions d'application de la loi de Darcy (et de Richards) et des équations de l'écoulement (vues au chapitre 2) sont satisfaites.

- On néglige les effets de la température (sol et eau) et de la composition chimique de l'eau; ces effets peuvent induire des différences aux niveaux de la viscosité, densité et conductivité hydraulique de l'eau. De même, on néglige le coefficient d'emmagasinement causé par la déformation du matériau et de l'eau.

- Lors d'un essai d'infiltration, la teneur en eau initiale diffère d'un cas à l'autre et constitue donc une inconnue supplémentaire. Pour éviter cela, on se limite aux cas où la teneur en eau initiale est égale à la teneur en eau résiduelle θ_r du matériau.

3.2 Équations d'écoulement sans dimension

On utilise l'équation de Richards (1931) (équation 2.18) écrite sous forme de débits spécifiques (e.g. Hillel, 1998):

$$\frac{\partial}{\partial x}(q_x)+\frac{\partial}{\partial y}(q_y)+\frac{\partial}{\partial z}(q_z)=-\frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{3.1}$$

L'écriture des équations 2.18 et 3.1, sous forme adimensionnelle, donne (e.g. Fala, 2002; Fala et al. 2002):

$$\pi_1 \frac{\partial}{\partial x^*}\left(k^* \frac{\partial \psi^*}{\partial x^*}\right) + \pi_2 \frac{\partial}{\partial y^*}\left(k^* \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*}\right) + \pi_3 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(k^*\left(\pi_4 \frac{\partial \psi^*}{\partial z^*} + 1\right)\right) = -\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} \tag{3.2}$$

$$\pi_5 \frac{\partial}{\partial x^*}\left(q_x^*\right) + \pi_6 \frac{\partial}{\partial y^*}\left(q_y^*\right) + \pi_7 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(q_z^*\right) = -\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} \tag{3.3}$$

où les coefficients sans dimension sont définis comme suit :

$$\pi_1 = \frac{\alpha_x^2 \alpha_\theta}{\alpha_k \alpha_\psi \alpha_t} \tag{3.4}$$

$$\pi_2 = \frac{\alpha_y^2 \alpha_\theta}{\alpha_k \alpha_\psi \alpha_t} \tag{3.5}$$

$$\pi_3 = \frac{\alpha_z \alpha_\theta}{\alpha_k \alpha_t} \tag{3.6}$$

$$\pi_4 = \frac{\alpha_z}{\alpha_\psi} \tag{3.7}$$

$$\pi_5 = \frac{\alpha_x \alpha_\theta}{\alpha_{q_x} \alpha_t} \tag{3.8}$$

$$\pi_6 = \frac{\alpha_y \alpha_\theta}{\alpha_{q_y} \alpha_t} \tag{3.9}$$

$$\pi_7 = \frac{\alpha_z \alpha_\theta}{\alpha_{q_z} \alpha_t} \tag{3.10}$$

Exprimer l'équation de Richards (équation 1.18) de deux façons (équations 1.18 et 3.1) permet d'établir une relation entre les débits spécifiques et les autres paramètres comme la pression et la conductivité hydraulique dans les équations sans dimension (équations 3.2 et 3.3). Les facteurs d'échelles α_x [L^{-1}], α_y [L^{-1}], α_z [L^{-1}], α_ψ [L^{-1}], α_k [TL^{-1}], α_θ

[-], α_t [T^{-1}], α_{q_x} [TL^{-1}], α_{q_y} [TL^{-1}] et α_{q_z} [TL^{-1}] sont définis comme suit: $x^* = \alpha_x x$, $y^* = \alpha_y y$, $z^* = \alpha_z z$, $\psi^* = \alpha_\psi \psi$, $k^* = \alpha_k k$, $\theta^* = \alpha_\theta \theta$, $t^* = \alpha_t t$, $q_x^* = \alpha_{q_x} q_x$, $q_y^* = \alpha_{q_y} q_y$ et $q_z^* = \alpha_{q_z} q_z$. Les variables étoilées sont sans dimension.

Les facteurs d'échelle représentent l'inverse des quantités de référence pour chaque variable. Ces quantités correspondent, généralement, à la valeur maximale que peut prendre la variable dans une simulation donnée (par exemple la teneur en eau à saturation pour θ). Les quantités de référence peuvent aussi prendre des valeurs spécifiques de la variable (par exemple la pression d'entrée d'air pour la succion). Dans ce qui suit, on utilise les quantités de références suivantes :

- r (rayon de la surface d'infiltration),
- k_s (conductivité hydraulique à saturation),
- q_z (taux d'infiltration au temps t),
- t (temps de mesure de q_z).

On aura donc : $\alpha_x = 1/r$, $\alpha_k = 1/k_s$, $\alpha_{q_z} = 1/q_z$ et $\alpha_t = 1/t$.

Considérons maintenant les transformations vues au chapitre 2 (équations 2.25 et 2.26) :

$$F^* = \frac{F}{\Delta\theta_i(\psi_f + h_0)} \tag{3.11}$$

$$t^* = \frac{Kt}{\Delta\theta_i(\psi_f + h_0)} \tag{3.12}$$

Dans ces équations, les quantités de référence pour la succion et la teneur en eau sont $\psi_f + h_0$ et $\Delta\theta_i$. En les réécrivant avec des facteurs d'échelle, on obtient :

$$F^* = F\alpha_\theta\alpha_\psi \tag{3.13}$$

$$t^* = t\Big/\frac{\alpha_k}{\alpha_\psi\alpha_\theta} \tag{3.14}$$

Dans la suite, on conservera ces facteurs d'échelle (équations 3.13 et 3.14), et on utilisera les quantités de référence ψ_a (AEV) et θ_s pour la pression et la teneur en eau, respectivement. On aura donc :

$$\alpha_\psi = 1/\psi_a \tag{3.15}$$

$$\alpha_\theta = 1/\theta_s \tag{3.16}$$

En dérivant l'équation 3.13 par rapport au temps (sans dimension), on obtient le taux d'infiltration sans dimension :

$$f^* = q_z^* = \alpha_k q_z \tag{3.17}$$

Dans la suite on utilisera les paramètres, sans dimension, k_{ra} (rapport relié à la conductivité hydraulique) et t_{ra} (rapport relié au temps) tel que :

$$k_{ra} = \alpha_{q_z}\Big/\alpha_k = k_s\Big/q_z \tag{3.18}$$

$$t_{ra} = \frac{1}{\alpha_t}\Big/\frac{\alpha_k}{\alpha_\psi\alpha_\theta} = \frac{k_s}{\theta_s\psi_a}t \tag{3.19}$$

Pour tenir compte des dimensions de la surface d'infiltration, il faut, en plus, définir le rapport relié à la pression $\psi_{ra} = \alpha_x/\alpha_\psi = \psi_a/r$ (intégré dans π_1, il constitue l'équivalent de π_4 pour une dimension horizontale).

Connaissant la relation entre ψ_{ra} et k_{ra}, on peut trouver le taux d'infiltration à travers une surface de rayon *r* à un temps donné pour un ψ_a donné. Il est possible de tracer la courbe ψ_{ra} vs k_{ra} en faisant des simulations numériques (voir le modèle conceptuel présenté au paragraphe suivant) dans lesquelles on fait varier ψ_a, ce qui permet d'obtenir la valeur de *q (t)* correspondante.

On doit aussi considérer un autre rapport qui influence le calcul du taux d'infiltration, soit ψ_a/ψ_w (où ψ_w est la pression d'entrée d'eau, WEV, ou "water entry value"). Dans la suite, on verra la procédure qui permet de trouver la relation ψ_{ra} vs k_{ra} pour un t_{ra} et un ψ_a/ψ_w donnés. Mais il est utile de rappeler d'abord la nature des paramètres obtenus à la suite de mesures d'infiltration. Dans un essai d'infiltration, mise à part la teneur en eau résiduelle, tous les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) peuvent être différents de ceux déterminés habituellement en laboratoire où les caractéristiques hydriques d'un matériau sont généralement déterminées en drainage. Aussi, la conductivité hydraulique est mesurée en laboratoire à une saturation quasi complète des matériaux, alors que dans un essai d'infiltration *in situ,* la saturation maximale est plus faible (comme mentionné plus haut). Bien que certains travaux (Miyazaki, 2006) indiquent que les paramètres en drainage donnent un comportement (exprimé en terme de déplacement du front de mouillage en fonction du temps pour un limon sableux initialement sec et pour un taux d'infiltration en surface constant et inférieur à k_s) proche de la réalité, il faut faire néanmoins une certaine distinction entre les deux séries de paramètres. On notera les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) extraits à partir d'un essai d'infiltration de la façon suivante: $\theta_s^{'}$ au lieu de θ_s, $\alpha_v^{'}$ au lieu de α_v, $n_v^{'}$ au lieu de n_v, $k_s^{'}$ au lieu de k_s, $\psi_a^{'}$ au lieu de ψ_a et $\psi_w^{'}$ au lieu de ψ_w; à noter que $\theta_r = \theta_r^{'}$ (la teneur en eau résiduelle est un paramètre repère dans le passage d'un drainage à un mouillage elle est donc constante) et $\psi_w = \psi_w^{'}$ (car en

drainage la pression à la teneur en eau résiduelle est noté ψ_r voir figure 2.29) . De même, on aura $\alpha_k^{'}$, $\alpha_\psi^{'}$, $\alpha_\theta^{'}$, $\psi_{ra}^{'}$, $k_{ra}^{'}$ et $t_{ra}^{'}$ au lieu de α_k, α_ψ, α_θ, ψ_{ra}, k_{ra} et t_{ra} respectivement. Cette distinction permet d'indiquer qu'ils correspondent à des caractéristiques en mouillage.

3.3 Infiltration dans un sol aux caractéristiques hydriques uniformes

L'objectif principal de la procédure présentée ici est de déterminer les 4 paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) d'un matériau homogène à travers lequel un essai d'infiltration axisymétrique a été réalisé. En combinant les paramètres $\psi_{ra}^{'}$, $k_{ra}^{'}$, $t_{ra}^{'}$ et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$, on peut obtenir les 3 relations suivantes:

$$k_{ra}^{'} = f_1\left(\psi_{ra}^{'}\right) \tag{3.20}$$

$$k_{ra}^{'} = f_2\left(t_{ra}^{'}\right) \tag{3.21}$$

$$k_{ra}^{'} = f_3\left(\psi_a^{'}/\psi_w^{'}\right) \tag{3.22}$$

La 4e relation utilisée vient de l'essai lui-même :

$$q = f_4(t) \tag{3.23}$$

Ces équations permettent donc de trouver les 4 paramètres recherchés pour le modèle analytique de van Genuchten (1980), soient $\theta_s^{'}$, $\alpha_v^{'}$, $n_v^{'}$ et $k_s^{'}$ (N.B. $m_v^{'} = 1 - 1/n_v^{'}$ et le paramètre ℓ est considéré égal à 0,5 pour tous les matériaux dans la fonction de la conductivité hydraulique). Pour illustrer l'approche utilisée pour déterminer les relations f_1, f_2 et f_3, 4 matériaux fictifs ont été utilisés (types sables et silts). Leurs caractéristiques sont montrées au tableau 3.1 et aux figures 3.1 et 3.2. Tout ces matériaux ont les mêmes θ_r, $\theta_s^{'}$ et $k_s^{'}$. Les valeurs de $\psi_a^{'}$ et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ sont par contre

différentes. En changeant α'_ψ, on change aussi le rapport $\frac{\alpha'_k}{\alpha'_\psi \alpha'_\theta}$ dans t'_{ra} (équation 3.19). On peut donc garder θ'_s et k'_s constants pour les matériaux M1 à M4. Cette simplification ne change pas l'approche, qui aurait pu être appliquée avec des valeurs variables de θ'_s et k'_s. La valeur de θ_r est gardée constante (=0,0296) pour tous les calculs. Ces matériaux vont servir uniquement pour la détermination des relations 3.20, 3.21 et 3.22. Ces trois relations seront réutilisées dans l'interprétation de l'essai d'infiltration dans le cas d'un matériau hétérogène et dans le cas de l'essai effectué en laboratoire (section 3.4.2).

Tableau 3.1: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour les matériaux M1 à M4.

Matériau	θ_r	θ'_s	α'_v (m^{-1})	n'_v	k'_s (m/s)	ψ'_a (m)	ψ'_a/ψ'_w
M1	0,0296	0,40	5,0	1,6	1,157x10^{-5}	2,43x10^{-2}	0,0315
M2	0,0296	0,40	3,2	2,74	1,157x10^{-5}	12,10x10^{-2}	0,1842
M3	0,0296	0,40	1,6	5,48	1,157x10^{-5}	41,39x10^{-2}	0,4590
M4	0,0296	0,40	0,8	10,96	1,157x10^{-5}	102,99x10^{-2}	0,6863

Comme le montre le tableau 3.1, ψ'_a/ψ'_w varie de 0,0315 à 0,6863. Les valeurs de θ_r et ψ'_a/ψ'_w sont choisies arbitrairement mais la valeur de θ_r est basée sur des propriétés représentatives de matériaux grossiers et celles de ψ'_a/ψ'_w sur un intervalle assez large d'étalement granulométrique. L'intervalle de variation du rapport ψ'_a/ψ'_w pourrait être agrandi au besoin. De même, la valeur de θ_r choisie ici peut ne pas correspondre à celle recherchée. Cette situation sera traitée plus loin.

À partir de chaque matériau (M1 à M4), 12 modèles sont créés. Les caractéristiques hydriques et/ou géométriques utilisées dans ces derniers ne sont pas à l'échelle 1/1 (elles sont multipliées par un facteur d'échelle); par opposition au prototype (i.e., cas réel) où tout est à l'échelle 1/1. Dans notre cas, le prototype est le matériau sur lequel on a effectué un essai d'infiltration. Ce sont les caractéristiques hydriques du prototype qu'on recherche. Dans les modèles, la succion (dans la CRE et dans la fonction de la conductivité hydraulique) et le temps ont été changés (i.e., multipliés par un même facteur). Cela signifie que le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ reste constant pour tous les modèles issus d'un même matériau (i.e., M1, M2, M3 ou M4).

Figure 3.1: Courbes de rétention d'eau des matériaux M1 à M4, selon le modèle analytique de van Genuchten (1980) et les paramètres donnés au tableau 3.1.

Figure 3.2: Conductivité hydraulique des matériaux M1 à M4, selon le modèle analytique de Mualem (1976) et van Genuchten (1980) (voir van Genuchten et al., 1991).

Le temps de référence est un temps repère où on effectue la lecture d'un taux d'infiltration f pour un $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ donné. Son choix est arbitraire. Il est fixé ici à 8,64 s pour un $\psi_a^{'}$ égal à 2,43x10^{-2} m, un $k_s^{'}$ égal à 1,157x10^{-5} m/s et un $\theta_s^{'}$ égal à 0,4. Ceci donne un $t_{ra}^{'}$ = 0,0103. Dans chaque simulation, on échantillonne un temps (qu'on peut qualifier de temps de mesure) et la valeur de f correspondante. Le temps de mesure est variable d'un modèle à l'autre, mais le rapport $t_{ra}^{'}$ est constant pour tous les modèles associés aux matériaux M1, M2, M3 et M4. Le tableau 3.2 présente les 12 valeurs de $\psi_a^{'}$ (AEV), les facteurs d'échelle et les temps de mesure utilisés pour tous les modèles basés sur les 4 matériaux. Le nombre et les valeurs des facteurs d'échelle ont été choisis pour permettre une bonne description de la courbe $k_{ra}^{'} = f_1(\psi_{ra}^{'})$ pour des valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et de $t_{ra}^{'}$ données. Pour chaque valeur de $\psi_a^{'}$ mentionnée dans le tableau 3.2, on effectue 4 simulations chacune avec un modèle des matériaux M1, M2, M3 ou M4.

Chaque test numérique (calcul des taux d'infiltration) effectué pour l'évaluation des caractéristiques hydriques d'un matériau nécessite 2 étapes (voir paragraphe 3.3.2):

i) Estimer les quantités $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ relatives à ce matériau;

ii) Évaluer $\alpha_\psi^{'}$ qui permet d'obtenir $\alpha_k^{'}$ et $\alpha_\theta^{'}$ (en utilisant la valeur de $t_{ra}^{'}$) selon les courbes $k_{ra}^{'}$ vs $\psi_{ra}^{'}$.

Tableau 3.2: Facteurs d'échelle, $\psi_a^{'}$ et temps de mesure utilisés avec les modèles ($k_s^{'}$ est égale à 1,157x10^{-5} m/s, $\theta_s^{'}$ est égale à 0,4 et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est égal à 0,0315, 0,1842, 0,4590 ou 0,6863, pour M1 à M4 respectivement). Le temps de référence est de 8,64 s (ou 10^{-4} j).

$\psi_a^{'}$ (m)	Facteurs d'échelle				Temps de mesure (s)
	M1	M2	M3	M4	
2,43x10^{-2}	1	0,2005	0,0586	0,0236	8,64
4,85x10^{-2}	2	0,4006	0,1171	0,0471	17,28
7,28x10^{-2}	3	0,6015	0,1758	0,0707	25,92
12,13x10^{-2}	5	1,0024	0,2931	0,1178	43,2
24,26x10^{-2}	10	2,0049	0,5862	0,2356	86,4
48,52x10^{-2}	20	4,0097	1,1723	0,4711	172,8
1,21	50	10,0243	2,9308	1,1778	432
2,43	100	20,0487	5,8616	2,3556	864
4,85	200	40,0974	11,7232	4,7112	1728
7,28	300	60,1461	17,5848	7,0667	2592
9,70	400	80,1948	23,4464	9,4223	3456
12,13	500	100,2434	29,3080	11,7780	4320

3.3.1 Paramètres numériques

Le modèle numérique représente une colonne (figure 3.3) à la surface de laquelle on effectue un essai d'infiltration axisymétrique. Les calculs ont été faits à l'aide d'HYDRUS2D (version 2, Simunek et al., 1999). La validation de ce logiciel a été effectuée dans d'autres travaux (e.g., Fala, 2002). La surface d'infiltration est un cercle

(rayon r = 13,5 cm) qui se situe au centre de la colonne (leur axe de symétrie coïncident). À la surface d'infiltration, on applique une tête d'eau sous forme d'une pression (ici la pression est nulle) et à la base un drainage libre (gradient de pression nul). La teneur en eau résiduelle θ_r est prise comme condition initiale (sur toute l'épaisseur) dans toutes les simulations.

Figure 3.3 : Configuration géométrique du modèle d'infiltration d'eau dans un matériau uniforme (conditions axisymétriques).

Pour uniformiser et faciliter les calculs, on adopte les conditions suivantes :

- Un seul type d'éléments à été utilisé dans toutes les simulations : des éléments carrés. Pour avoir une meilleure précision, on utilise la densité maximale permise par HYDRUS2D pour des éléments rectangulaires (dans le plan), soit 255x255 éléments.

- Les dimensions du maillage sont ajustées pour chaque simulation en prenant en considération l'effet des parois au niveau des extrémités de la colonne (voir figure 3.3). Le rayon (R) et l'épaisseur (H) de la colonne sont ajustés pour avoir les plus petits éléments possible sans que le front de mouillage (surface qui divise la colonne en deux domaines : un domaine où la teneur en eau est égale à la teneur en eau résiduelle et un autre où la teneur en eau est supérieure à celle-ci) ne touche ni à la paroi ni à la base, à la fin de la simulation. Le rayon R et l'épaisseur H sont égaux dans une même simulation; ils varient de 16 à 135 cm.

- Les critères de convergence par défaut d'HYDRUS2D ont été adoptés pour toutes les simulations

- $\psi_a^{'}$ et $\psi_w^{'}$ (pression d'entrée d'air et d'eau) ont été évalués sur les CRE des matériaux M1 à M4 (figure 3.1) à l'aide de la méthode des tangentes.

À la fin de chaque simulation, on récupère la courbe f vs t (capacité d'infiltration ou taux d'infiltration) directement d'HYDRUS2D.

3.3.2 Procédures d'interprétation d'un essai.

La figure 3.4 montre la relation $\psi_{ra}^{'}$ vs $k_{ra}^{'}$ pour différents rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et pour $t_{ra}^{'}$ =0,0103. Les interpolations ont été effectuées à l'aide de fonctions polynomiales par morceaux (Bsplines; e.g., Mortenson, 1985). On remarque l'influence de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ sur l'emplacement relatif des courbes (0 <$\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ <1). Plus ce rapport est grand, plus les courbes se rapprochent (à l'intérieur de l'intervalle des $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ considéré ici) ce qui nécessite une grande précision des résultats pour être en mesure de les discriminer. Théoriquement, chacune de ces courbes permet de déterminer $\alpha_k^{'}(=1/k_s^{'})$ et $\alpha_\theta^{'}$ $(=1/\theta_s^{'}$

) d'une façon unique, à partir d'un point $P(t,q)$ de la courbe de f (taux d'infiltration calculé par HYDRUS2D ou provenant d'un essai d'infiltration) et d'une valeur de α'_ψ ($=1/\psi'_a$), pour un t'_{ra} et un ψ'_a/ψ'_w donnés. Les valeurs de α'_ψ et ψ'_a/ψ'_w permettent ensuite de déterminer les valeurs de α'_v et n'_v du modèle analytique de van Genuchten. En entrant les paramètres $\theta_r, \theta'_s, \alpha'_v, n'_v$ et k'_s obtenus dans une simulation numérique, la courbe f résultante passera par le point P (pour les mêmes conditions initiales et frontières).

Les courbes ψ'_{ra} vs k'_{ra} montrées à la figure 3.4 couvrent une plage de ψ'_{ra} allant de 0,1797 à 89,8556. On remarque que la forme des courbes montrées à la figure 3.4 est similaire à celle de la fonction de conductivité hydraulique selon le modèle analytique de Mualem-van Genuchten. Chaque courbe est définie par 12 coefficients, C0 à C11. Ces derniers correspondent aux 12 points provenant des résultats des 12 simulations (dans lesquelles la succion et le temps ont été multipliés par un même facteur). La figure 3.5 donne une interpolation des 4 courbes. Ceci permet de disposer d'une courbe correspondant à un ψ'_a/ψ'_w en particulier ($0{,}0315 \leq \psi'_a/\psi'_w \leq 0{,}6863$).

Dans ce qui suit, on illustre l'application de la méthode afin d'obtenir les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour un essai fictif sur le matériau MM1.

3.3.2.1 Exemple de détermination des paramètres du modèle analytique de van Genuchten - Matériau MM1

Dans cette première illustration de la méthode, on vise à estimer les 4 paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour le matériau MM1 (qui peut s'apparenter à un silt). On ne connaît que la relation *f(t)* (montrée à la figure 3.6) et la surface d'infiltration (cercle de rayon 13,5 cm). Les caractéristiques du sol MM1 sont

données au tableau 3.3 (comme on utilise ici des simulations numériques, un nombre élevé de chiffres significatifs est utile pour faire une discrimination entre les matériaux). La courbe de la figure 3.6 a été obtenue à l'aide d'une simulation numérique respectant les paramètres numériques du paragraphe 3.3.1.

Figure 3.4: Relation entre k'_{ra} et ψ'_{ra} pour diverses valeurs de ψ'_a/ψ'_w, pour t'_{ra} égal à 0,0103 (échelle ln-ln).

Tableau 3.3: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) de MM1.

Matériau	θ_r	θ'_s	α'_v (m^{-1})	n'_v	k'_s (m/s)	ψ'_a (m)	ψ'_a/ψ'_w
MM1	0,0296	0,4800	0,14632	7,03	5,79x10^{-6}	5	0,5500

Figure 3.5: Ci (coefficients utilisés pour les courbes de la figure 3.4) en fonction de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ pour t_{ra} égal à 0,0103.

Figure 3.6: Taux d'infiltration dans MM1 simulés à l'aide d'HYDRUS2D.

L'évaluation des caractéristiques hydriques de MM1 se fait en 2 étapes:

i) Estimer les quantités $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ (en entier) relatives à MM1;

ii) Évaluer $\alpha_\psi^{'}$ qui permet d'obtenir $\alpha_k^{'}$ et $\alpha_\theta^{'}$ en utilisant les courbes de la figure 3.4 et la valeur de $t_{ra}^{'}$ (des courbes $k_{ra}^{'}$ vs $\psi_{ra}^{'}$).

Pour déterminer les 4 inconnues du modèle analytique de van Genuchten (1980), il faut avoir recours à un processus itératif. Après une première estimation de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$, on peut fixer un point sur la courbe *f* vs *t* (figure 3.6), puisque $\alpha_t^{'} = \frac{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}{\alpha_k^{'}}\frac{1}{t_{ra}^{'}}$ et $t_{ra}^{'}$ est donnée par la courbe $k_{ra}^{'}$ vs $\psi_{ra}^{'}$ qu'on utilise. Puis on passe à la recherche de $\alpha_\psi^{'}$. À chaque fois que l'on fait une estimation de $\alpha_\psi^{'}$, on obtient le $\alpha_k^{'}$ correspondant, à l'aide de la relation $\psi_{ra}^{'}$ vs $k_{ra}^{'}$ de la figure 3.4 (pour un $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ donné). Puis on obtient $\alpha_\theta^{'}$ par le biais de $t_{ra}^{'}$ (connaissant $\alpha_\psi^{'}$ et $\alpha_k^{'}$). Avec le même $t_{ra}^{'}$, on peut tester plusieurs $\alpha_\psi^{'}$. Pour chaque série de paramètres estimés $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$, $\alpha_\psi^{'}$, $\alpha_k^{'}$ et $\alpha_\theta^{'}$, on lance une simulation numérique avec HYDRUS2D. Cette dernière permet d'évaluer si les paramètres estimés sont représentatifs. Ils sont retenus comme paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour le matériau MM1 si la courbe *f* obtenue coïncide bien (en tout point) avec la courbe de la figure 3.6. Dans le cas contraire, on adopte une autre valeur de $\alpha_\psi^{'}$ (ou on change $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ et /ou $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$). Les valeurs initiales de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et $\alpha_\psi^{'}$ peuvent être estimées à partir d'observations visuelles sur le matériau testé et des valeurs typiques de ces paramètres (e.g., caractéristiques des matériaux graveleux, sableux ou silteux). La procédure générale à suivre est donnée à la figure 3.7.

Figure 3.7: Procédure pour la détermination des propriétés hydriques (modèle analytique de Mualem-van Genuchten) d'un sol homogène soumis à un essai d'infiltration.

Les taux d'infiltration utilisés pour illustrer l'application dans cet exemple sont (selon la figure 3.6):

- 4,36x10^{-4} m/s à 889,92 s;
- 4,10x10^{-4} m/s à 1736,64 s;
- 3,85x10^{-4} m/s à 4320 s.

Signalons que les valeurs de $\alpha_\psi^{'}$, $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$, $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et les points provenant de la figure 3.6 montrées ici pour illustration ne sont pas les seuls qui ont été testés. Les autres tentatives donnaient des taux d'infiltration loin de ceux de la figure 3.6.

Dans cette application, on a commencé par utiliser les 4 rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (0,0315, 0,1842, 0,4590 et 0,6863 pour des modèles issus des matériaux M1 à M4 du tableau 3.1). Ceci permet de déterminer, graphiquement, le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ approprié pour MM1. Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent les courbes *f* calculées pour des temps très petits, pour $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ =86400 s (point t=889,92 s, q=4,36x10^{-4} m/s de la figure 3.6) et $\alpha_\psi^{'}$ = 0,33, 0,25 et 0,20 m^{-1}. Ces valeurs donnent les courbes les plus proches de celle de la figure 3.6. Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent qu'à des temps très petits (de l'ordre de 9x10^{-4} s dans ce cas), on peut estimer avec précision le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (les irrégularités qui apparaissent sur les courbes sont dues à quelques inévitables instabilités numériques; ces dernières sont locales et ne nuisent pas à l'interprétation). En effet, les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent que le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ de MM1 se situe entre 0,459 et 0,6863 (selon les valeurs de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ des courbes qui l'encadrent). La courbe des taux d'infiltration de MM1 est presque à mi-chemin entre les deux courbes qui l'encadrent. Ceci indique que le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ recherché se situe presque au milieu de l'intervalle [0,459, 0,6863]. On remarque aussi qu'au tout début de l'essai, le taux d'infiltration est peu influencé par

la valeur de α'_ψ. C'est pour cela que l'écart entre la courbe de MM1 et celles qui l'encadrent est presque le même dans les trois figures (3.8, 3.9 et 3.10)

Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 montrent, quant à elles, les taux d'infiltration obtenus avec α'_ψ =0,33, 0,25 et 0,20 m^{-1}, pour des temps relativement élevés (N.B. l'aspect en escalier des courbes est dû à la troncature des valeurs que fournit HYDRUS2D). Toutes ces courbes de taux d'infiltration coïncident au point t=889,92 s et q=4,36x10^{-4} m/s. Elles ne coïncident toutefois pas en tout point avec la courbe du taux d'infiltration à travers MM1 (figure 3.6). Ceci veut dire que les estimations n'étaient pas totalement adéquates. Une autre valeur de $\frac{\alpha'_k}{\alpha'_\psi \alpha'_\theta}$ (= 168480 s) a été testée. Elle correspond au point t=1736,64 s, q=4,1x10^{-4} m/s. Les résultats correspondants ne sont cependant pas montrés car ils ne sont pas concluants.

Pour trouver le bon rapport ψ'_a/ψ'_w (et donc la bonne courbe dans la figure 3.4) il faut se servir de la figure 3.5 qui donne une interpolation des 4 courbes de la figure 3.4. La figure 3.14 montre les taux d'infiltration pour ψ'_a/ψ'_w = 0,5039 (avec α'_ψ = 0,2 m^{-1}) et pour ψ'_a/ψ'_w = 0,55 (avec α'_ψ =0,2 et 0,167 m^{-1}) comparativement aux taux donnés par MM1.

Figure 3.8: Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour α'_{ψ} = 0,25 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w. En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports ψ'_a/ψ'_w et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes.

Figure 3.9 Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour α'_{ψ} = 0,33 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w. En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports ψ'_a/ψ'_w et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes.

Figure 3.10 : Taux d'infiltration calculées avec HYDRUS2D pour α'_{ψ} = 0,20 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w. En abscisse : taux d'infiltration prélevés pour MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports ψ'_a/ψ'_w et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=889,92 s pour l'ensemble des courbes.

Figure 3.11: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour α'_{ψ} = 0,25 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w.

Figure 3.12: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour α'_{ψ} = 0,33 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w .

Figure 3.13: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés, pour α'_{ψ} = 0,20 m^{-1} et pour différentes valeurs de ψ'_a/ψ'_w .

Figure 3.14: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps petits. (0,5039/0,2 veut dire que $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,5039 et $\alpha_\psi^{'}$ = 0,2 m^{-1}). En abscisse : taux d'infiltration de MM1. En ordonnée : taux d'infiltration calculés pour les 4 rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et celui de MM1. Les taux d'infiltration sont relevés à des temps inférieurs à t=4320 s pour l'ensemble des courbes.

Le rapport $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ obtenu est alors égal à 419417 s (le point correspondant est t=4320 s, q=3,85x10^{-4} m/s). La figure 3.15 montre les taux d'infiltration calculés pour des temps plus grands. Comme on peut le constater aux figures 3.14 et 3.15), les valeurs $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,55 et $\alpha_\psi^{'}$=0,2 m^{-1} donnent les taux d'infiltration les plus proches de ceux correspondant à MM1 (sur toute la courbe de MM1, pour des temps petits et grands, malgré les inévitables irrégularités des taux d'infiltration observés à la figure 3.14 au début de la simulation).

Figure 3.15: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D à des temps élevés. (0,5039/0,2 veut dire que $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,5039 et $\alpha_\psi^{'}$ = 0,2 m^{-1}). Cas de la figure 3.14.

Les caractéristiques du matériau MM1 selon cette procédure sont montrées au tableau 3.4 (pour les paramètres du modèle analytique de van Genuchten 1980). Elles ont été obtenues comme suit :

- $\alpha_\psi^{'}$ (0,2 m^{-1}) et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (0,55) permettent de calculer α'_v et n'_v ;
- La valeur q (=3,85x10^{-4} m/s) et $k_{ra}^{'}$ (0,0150) permettent de calculer k'_s ;
- $t_{ra}^{'}$ (0,0103), $\alpha_\psi^{'}$ et $\alpha_k^{'}$ et t (4320 s) permettent de calculer $\theta_s^{'}$.

Les caractéristiques montrées au tableau 3.4 sont similaires à celles du tableau 3.3 (celles qui ont servi pour calculer les taux d'infiltration de la figure 3.6). L'écart le plus élevé est celui entre les deux teneurs en eau volumiques $\theta_s^{'}$ prédite et initiale (0,4855 valeur prédite vs 0,48 valeur initiale). Pour les autres paramètres de van Genuchten

(1980), les prédictions coïncident avec les valeurs initiales (mis à part la valeur de θ_r qui est constante pour l'ensemble des simulations).

On voit ici que pour MM1 (dont les caractéristiques hydriques sont homogènes et uniformes), il a fallut trouver un point de la figure 3.6 (le point t=4320 s, q=3,85x10^{-4} m/s en l'occurrence) qui permet de caractériser le matériau. Il faut alors diviser la courbe des taux d'infiltration en un certain nombre de portions et procéder à une vérification systématique des points. On réduit la zone de recherche au fur et à mesure que les taux d'infiltration calculés commencent à se rapprocher des taux mesurés, jusqu'à l'obtention du point recherché.

Tableau 3.4: Caractéristiques hydrique de MM1 déterminées à partir de la courbe du taux d'infiltration (paramètres de van Genuchten 1980).

Matériau	θ_r	θ_s'	α_v' (m^{-1})	n_v'	k_s' (m/s)	ψ_a' (m)	ψ_a'/ψ_r'
MM1	0,0296	0,4855	0,14634	7,03	5,79x10^{-6}	5	0,55

3.4 Infiltration dans un matériau non uniforme

Dans le cas d'un matériau uniforme (section précédente), une seule courbe de la figure 3.4, correspondant à un t_{ra}' et un ψ_a'/ψ_w' donnés suffit pour déterminer les caractéristiques hydriques du matériau. Il faut alors chercher le bon point (t,q) sur la courbe du taux d'infiltration *f*. Les taux d'infiltration calculés (à partir des caractéristiques hydriques estimées) coïncident avec ceux du matériau MM1 (figure 3.6) en tout point. Ce point (t,q) permet de déterminer les caractéristiques de MM1. Autrement dit, en ayant un point de la courbe du taux d'infiltration (mesurés), on doit déterminer, à l'aide de simulations numériques, la courbe reliant ψ_{ra}' et k_{ra}' (correspondant au bon rapport ψ_a'/ψ_w'). Si on veut déterminer les caractéristiques

hydriques d'un matériau pour plusieurs points de la courbe du taux d'infiltration, il faut avoir d'autres courbes ψ'_{ra} vs k'_{ra} correspondant à d'autres t_{ra}. Ceci permet de déterminer les caractéristiques d'un matériau selon plusieurs point de la courbe des taux d'infiltration (et donc à plusieurs profondeurs du front de mouillage). Dans le cas d'un matériau homogène, toutes ces courbes doivent donner les mêmes caractéristiques hydriques.

Cette approche peut aussi être utilisée dans le cas d'un matériau où les caractéristiques hydriques changent en fonction de la profondeur. Ceci constitue un cas plus général. L'hétérogénéité dont il est question ici pourrait être de n'importe quelle nature, pourvu que l'on accepte qu'elle soit décrite par les paramètres et le modèle analytique de van Genuchten (1980). Un cas type est présenté dans l'exemple qui suit.

Pour cet exemple, d'autres temps de référence ont été considérés pour tracer d'autres courbes ψ'_{ra} vs k'_{ra}. Le tableau 3.5 donne les temps de référence utilisés et les t'_{ra} correspondants (y compris le premier temps de référence de 8,64 s). La figure 3.19 (présentée plus loin) montre l'allure générale des courbes calculées. Le choix des temps de référence est arbitraire. Le seul souci ici est d'aboutir à un échantillonnage adéquat des temps de mesure provenant des modèles pour permettre une bonne description des courbes ψ'_{ra} vs k'_{ra}. Chaque t'_{ra} donne lieu à 12 points de mesure (comme pour les courbes de la figure 3.4). Le temps de mesure pour ces 12 points est égal à celui présenté au tableau 3.2 multiplié par le facteur t'_{ra}/0,0103 (0,0103 étant le t'_{ra} calculé avec le temps de référence 8,64 s) pour chaque modèle (similaire).

Tableau 3.5 : Temps de référence retenus et les valeurs de t'_{ra} correspondantes, dans le cas d'un matériau non uniforme.

Temps de référence (s)	$8{,}64\text{x}10^{-3}$	$1{,}73\text{x}10^{-2}$	$4{,}32\text{x}10^{-2}$	$8{,}64\text{x}10^{-2}$	0,432	0,864
t'_{ra}	$1{,}030.10^{-5}$	$2{,}061.10^{-5}$	$5{,}152.10^{-5}$	$1{,}030.10^{-4}$	$5{,}152.10^{-4}$	$1{,}030.10^{-3}$
Temps de référence (s)	4,32	8,64	17,28	25,92	34,56	43,2
t'_{ra}	$5{,}152.10^{-3}$	$1{,}030.10^{-2}$	$2{,}061.10^{-2}$	$3{,}091.10^{-2}$	$4{,}122.10^{-2}$	$5{,}152.10^{-2}$

3.4.1 Exemple 2- Matériau MM1+MM2

Dans cet exemple d'évaluation des paramètres hydriques, on ajoute un deuxième matériau (MM2) à celui utilisé dans la section précédente (MM1), comme illustré à la figure 3.16. Les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) du matériau MM2 sont donnés au tableau 3.6. MM2 est un matériau synthétique. Il possède un AEV supérieur à celui de MM1 et une conductivité hydraulique plus faible. MM1+MM2 est considéré ici comme un seul matériau hétérogène constitué de deux matériaux homogènes MM1 et MM2. Le but ici est d'obtenir les caractéristiques hydriques d'un matériau homogène équivalent, compris entre la surface d'infiltration et le front de mouillage, qui montre un comportement (en termes de taux d'infiltration) très proche de celui de MM1+MM2. Aucun changement dans les conditions initiales, frontières ou dans les paramètres numériques de la section 3.3.1 n'a été effectué.

Tableau 3.6: Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour le matériau MM2.

Matériau	θ_r	θ'_s	α'_v (m^{-1})	n'_v	k'_s (m/s)	ψ'_a (m)	ψ'_a/ψ'_r
MM2	0,0296	0,4000	0,08	9,2992	$1{,}16\text{x}10^{-6}$	9,92	0,6400

Dans la partie supérieure du domaine d'infiltration, le taux d'infiltration est le même que celui de l'exemple 1 avec MM1. Au contact de MM2, la vitesse d'écoulement change et cela se reflète sur le taux d'infiltration en surface, comme le montre la figure 3.18. La séparation par rapport à l'exemple 1 se produit à t=463,1 s.

Dans l'exemple 2, les caractéristiques hydriques du matériau MM1+MM2 varient en fonction de la profondeur. Le domaine d'infiltration présente ici une stratification : une couche intercalée d'un deuxième matériau MM2 dans le matériau MM1. Pour interpréter ce genre d'essais en utilisant les outils vus plus haut, on considère qu'à chaque instant (à partir du début de l'infiltration), le matériau de la zone mouillée, correspondant à un volume de matériau limité par la surface d'infiltration et le front de mouillage, se comporte comme s'il était homogène avec des paramètres de van Genuchten uniques.

Figure 3.16 : Configuration géométrique du modèle numérique avec les matériaux MM1 et MM2 (essai d'infiltration axisymétrique simulé avec HYDRUS2D).

Le taux d'infiltration calculé à l'aide d'HYDRUS2D pour MM1+MM2 (figure 3.16) est donné à la figure 3.17.

Figure 3.17 : Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D, pour une pression d'eau nulle en surface, dans le matériau MM1+MM2, selon la configuration géométrique montrée à la figure 3.16.

Figure 3.18 : Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D pour les matériaux MM1 (exemple 1) et MM1+MM2 (cas de la figure 3.16).

Cette approximation permet de suivre l'évolution des caractéristiques du matériau en fonction du temps (et donc en fonction de la profondeur du front de mouillage). Par la

suite, la procédure à suivre est la même que celle annoncée à la section précédente. Dans ce cas, le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est connu (égal à 0,55), car les caractéristiques de MM1 sont déjà connues. Comme indiqué plus haut, ce rapport a un rôle prépondérant sur les premières valeurs du taux d'infiltration (au tout début de l'essai). Il a été calculé aux temps petits dans l'exemple 1 pour la partie du matériau qui se trouve tout près de la surface. Les caractéristiques du matériau MM1+MM2 sont celles de MM1 jusqu'à la profondeur 22,5 cm (soit de t=0 jusqu'au t=463,1 s, temps où les deux taux d'infiltration de la figure 3.18 se séparent pour la première fois). Selon les caractéristiques du matériau, c'est plus ou moins tard durant l'essai ($t_{ra}^{'}$ élevé) que l'effet de $\alpha_{\psi}^{'}$ devient prépondérant. On peut constater cela à la figure 3.19 : plus $t_{ra}^{'}$ est petit, moins sensible est la courbe à la variation de $\psi_{ra}^{'}$.

Figure 3.19 : Valeurs de $k_{ra}^{'}$ en fonction de $\psi_{ra}^{'}$ pour $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ = 0,5500 et pour $t_{ra}^{'}$ variant de $1{,}03 \times 10^{-5}$ à $5{,}15 \times 10^{-2}$.

On choisit trois autres temps sur la courbe montrée à la figure 3.17 : 843,26 s, 1304,64 s et 1788,48 s. Leur taux d'infiltration correspondants sont $4{,}45 \times 10^{-4}$ m/s, $4{,}29 \times 10^{-4}$ m/s et $4{,}12 \times 10^{-4}$ m/s. Ces trois points se situent entre le point de séparation des deux taux d'infiltration et le point où ils se rejoignent à nouveau (à t=2030,4 s, voir figure 3.18). Le choix de ces points est arbitraire (pour illustration) et on aurait pu choisir n'importe quels autres points. Puisque les caractéristiques de MM1 sont connues, les valeurs de t'_{ra} (et les bonnes courbes à utiliser dans la figure 3.19) sont connues jusqu'au temps 463,1 s (i.e. t'_{ra}=0,0011). Les deux taux d'infiltration (celui de MM1 et MM1+MM2) se rejoignent au temps 2030,4 s, alors on peut déduire le t'_{ra} à ce temps : il est égal à 0,0049 (voir figure 3.18).

Pour estimer les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) à des temps correspondant à des profondeurs données du front de mouillage, on procède comme suit :

- À partir des taux d'infiltration mesurés à travers le matériau MM1+MM2 et du temps correspondant (figure 3.17), on essaie diverses valeurs de t'_{ra} (t'_{ra} varie de 0,0011 à 0,0049 entre le temps 463,1 s et 2030,4 s). Ceci permet d'estimer le rapport $\frac{\alpha'_k}{\alpha'_\psi \alpha'_\theta}$, puis ψ'_a, k'_s et θ'_s comme indiqué plus haut (équations 3.18 et 3.19 et figure 3.19).

- Une simulation numérique est alors lancée à la suite de chaque estimation du triplet ψ'_a, k'_s et θ'_s (comme ψ'_a/ψ'_w est connu, cela donne α'_v et n'_v).

- Les courbes des taux d'infiltration ne peuvent coïncider en tout point ici, car comme indiqué plus haut, on ne cherche qu'un matériau dont les caractéristiques s'approchent le plus de celles du matériau testé (MM1+MM2). On retient alors

les 3 paramètres qui donnent les taux d'infiltration qui s'approchent le plus de ceux mesurés sur le matériau MM1+MM2 (en terme de distances entre les points des deux courbes).

Afin d'illustrer cette procédure (voir figure 3.20), on utilisera les matériaux MM3 à MM15. Ces derniers ont été retenus pour démonstration (parmi plusieurs autres dont les caractéristiques estimées donnaient des taux d'infiltration différents de ceux donnés par MM1+MM2).

Figure 3.20: Procédure proposée pour la caractérisation du matériau MM1+MM2, lorsque les caractéristiques de MM1 sont déjà connues.

La figure 3.21 montre les taux d'infiltration à travers les matériaux MM3, MM4, MM5 et MM6 (t'_{ra} égal à 0,001191, 0,001293, 0,001403 et 0,001097 respectivement, voir les caractéristiques hydriques au tableau 3.7), tels que calculée avec HYDRUS2D. Ces 4 matériaux ont été utilisés pour le point P1(t=843,26 s, q=4,45x10^{-4} m/s). Pour le point P2(t=1304,64 s, q=4,29x10^{-4} m/s), on utilise les matériaux MM7, MM8 et MM9 pour les calculs (t'_{ra} est égale à 0,002111, 0,001946 et 0,001793 respectivement, voir caractéristiques hydriques au tableau 3.8). Pour le troisième point de l'intervalle [463,1 s, 2030,4 s], P3(t=1788,48 s, q=4,12x10^{-4} m/s), on utilise les matériaux MM10, MM11 et MM12 pour les calculs (t'_{ra} est égal à 0,003455, 0,003745 et 0,002931 respectivement, voir caractéristiques au tableau 3.9). Tous ces matériaux présentent des taux d'infiltration proches de ceux de MM1+MM2 aux points considérés (voir les figures 3.21, 3.22 et 3.23). On prendra donc la moyenne arithmétique des caractéristiques des matériaux utilisés pour chaque point. Les moyennes des valeurs des paramètres du modèle de van Genuchten, pour les points P1, P2 et P3 (MMP1, MMP2 et MMP3), sont données au tableau 3.7, 3.8 et 3.9.

Tableau 3.7 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP1) pour les matériaux MM3, MM4, MM5 et MM6.

Matériau	θ_r	θ'_s	α'_v (m^{-1})	n'_v	k'_s (m/s)	ψ'_a (m)	ψ'_a/ψ'_w
MM3	0,0296	0,434	0,1045	7,03	4,29x10^{-6}	7	0,5500
MM4	0,0296	0,457	0,1126	7,03	4,55x10^{-6}	6,50	0,5500
MM5	0,0296	0,436	0,1143	7,03	4,64x10^{-6}	6,40	0,5500
MM6	0,0296	0,456	0,1031	7,03	4,21x10^{-6}	7,10	0,5500
MMP1	0,0296	0,446	0,1084	7,03	4,42x10^{-6}	6,75	0,5500

a)

b)

Figure 3.21 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM3, MM4, MM5 et MM6 (tableau 3.7), et MM1+MM2 (matériau à caractériser). b) mise en relief d'une partie de la figure en (a).

Tableau 3.8 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP2) pour les matériaux MM7,MM8 et MM9.

Materiau	θ_r	θ_s'	α_v' (m-1)	n_v'	k_s' (m/s)	ψ_a' (m)	ψ_a'/ψ_w'
MM7	0,0296	0,437	0,1125	7,03	$4{,}6\text{x}10^{-6}$	6,50	0,5500
MM8	0,0296	0,435	0,1076	7,03	$4{,}41\text{x}10^{-6}$	6,80	0,5500
MM9	0,0296	0,425	0,1016	7,03	$4{,}2\text{x}10^{-6}$	7,20	0,5500
MMP2	0,0296	0,432	0,1072	7,03	$4{,}4\text{x}10^{-6}$	6,83	0,5500

Figure 3.22 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM7, MM8 et MM9 (tableau 3.8) et MM1+MM2 (matériau à caractériser).

Tableau 3.9 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) et leur moyenne (MMP3) pour les matériaux MM10, MM11 et MM12.

Matériau	θ_r	θ_s'	α_v' (m^{-1})	n_v'	k_s' (m/s)	ψ_a' (m)	ψ_a'/ψ_w'
MM10	0,0296	0,450	0,1262	7,03	$5{,}04\text{x}10^{-6}$	5,80	0,5500
MM11	0,0296	0,445	0,1307	7,03	$5{,}22\text{x}10^{-6}$	5,60	0,5500
MM12	0,0296	0,451	0,1161	7,03	$4{,}66\text{x}10^{-6}$	6,30	0,5500
MMP3	0,0296	0,449	0,1243	7,03	$4{,}97\text{x}10^{-6}$	5,90	0,5500

Figure 3.23 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour les matériaux MM10, MM11 et MM12 (tableau 3.9) et MM1+MM2 (matériau à caractériser).

La figure 3.30 présente l'évolution du front de mouillage (simulée à l'aide d'HYDRUS2D) en fonction du temps à travers le matériau MM1+MM2. Cette figure, montre la déformation du front de mouillage au moment où il entre en contact et quand il traverse le matériau MM2. Cette déformation est reliée aux propretés hydriques de MM2 en relation avec celles de MM1. Les caractéristiques de MM1+MM2 au point où les courbes des taux d'infiltration de MM1 et de MM1+MM2 se rejoignent sont connues (à t=2030,4 s) : elles sont les mêmes que celles de MM1. Les mêmes opérations ont été effectuées pour 3 autres points se situant en dehors de l'intervalle [463,1 s, 2030,4 s]. Le but est de trouver les caractéristiques équivalentes de MM1+MM2 lorsque le front de mouillage dépasse, par le bas, le matériau MM2 (voir figure 3.30e). Pour ces points, les courbes des taux d'infiltration s'éloignent d'avantage de celle du matériau MM1+MM2 (voir figure 3.24, 3.25 et 3.26). Ceci parce que l'une des courbes provient d'un matériau uniforme et l'autre d'un matériau non uniforme. Les caractéristiques retenues sont celles des matériaux MM13 (t'_{ra} = 0,004792) pour le point (t=3438,72 s, q=3,84x10^{-4} m/s), MM14 (t'_{ra} = 0,006126) pour le point (t=4622,4 s, q=3,74x10^{-4} m/s) et MM15 (t'_{ra}

= 0,007833) pour le point (t=6065,28 s, q=3,66x10^{-4} m/s). Les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) de ces matériaux sont présentés au tableau 3.10. Les taux d'infiltration (calculés avec HYDRUS2D) à la surface de ces mêmes matériaux sont montrés aux figures 3.24 à 3.26.

Tableau 3.10 : Paramètres du modèle analytique de van Genuchten pour les matériaux MM13, MM14 et MM15.

Matériau	θ_r	θ_s'	α_v' (m^{-1})	n_v'	k_s' (m/s)	ψ_a' (m)	ψ_a'/ψ_w'
MM13	0,0296	0,471	0,1109	7,03	4,33x10^{-6}	6,60	0,5500
MM14	0,0296	0,471	0,1092	7,03	4,23x10^{-6}	6,70	0,5500
MM15	0,0296	0,485	0,1092	7,03	4,2x10^{-6}	6,70	0,5500

Figure 3.24 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM13 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser).

Figure 3.25 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM14 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser).

Figure 3.26 : Valeurs des taux d'infiltration (calculées par HYDRUS2D) pour le matériau MM15 (tableau 3.10) et MM1+MM2 (matériau à caractériser).

À partir de t=463,1 s, quand le front de mouillage rencontre le matériau MM2 (voir figure 3.30a), les valeurs estimées de $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ commencent à varier. Les figures

3.27, 3.28 et 3.29 montrent la variation de ces paramètres en fonction du temps (et donc en fonction de la profondeur du front de mouillage). Les valeurs de $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ dans les figures 3.27, 3.28 et 3.29 respectivement sont celles retenues plus haut (MMP1, MMP2, MMP3, MM13, MM14 et MM15) en plus de celle de MM1. Le $\psi_a^{'}$ augmente alors de 5 m jusqu'à 6,83 m. Cette valeur a été atteinte vers le milieu de l'intervalle de temps [463,1 s, 2030,4 s], c'est-à-dire pendant la période où le front de mouillage traverse le matériau MM2 (voir figures 3.30a,b,c), pour ensuite redescendre au $\psi_a^{'}$ de MM1 (5 m). Cette augmentation est due au fait que le $\psi_a^{'}$ de MM1 est inférieur à celui de MM2 (égale à 9,92 m). Parallèlement, le $k_s^{'}$ diminue (voir figure 3.28) puisque le $k_s^{'}$ de MM2 est égale à $1{,}16 \times 10^{-6}$ m/s. La valeur de $\theta_s^{'}$ diminue aussi (voir figure 3.29) pour s'approcher de 0,40 ($\theta_s^{'}$ de MM2). Dans cet exemple, l'influence de MM2 sur le taux d'infiltration atteint son maximum à environ t=1304,64 s (voir profondeur du front de mouillage aux figures 3.30a,b,c et d et le taux d'infiltration à la figure 3.18). À t=2030,4 s (voir profondeur du front de mouillage à la figure 3.30e), l'influence de MM2 disparaît. En effet, les caractéristiques relevées (surtout $k_s^{'}$ et $\psi_a^{'}$) tendent vers des valeurs constantes se situant entre celles de MM1 et celles de MM2 (voir figures 3.27 et 3.28). Par contre la valeur de $\theta_s^{'}$ tend rapidement vers celle de MM1 (voir valeur de $\theta_s^{'}$ après t=1304,64 s dans la figure 3.29). Il y a plusieurs raisons à cela : tout d'abord l'absorption d'eau par capillarité dans MM2 est très réduite à ce stade. Ensuite, l'écoulement est essentiellement horizontal dans MM2, ce qui réduit encore la recharge dans MM2. Enfin, le volume de MM2 contenu dans le volume de sol traversé par le front de mouillage devient, au fur et à mesure que le temps s'écoule, négligeable devant celui de MM1 (voir proportion saturée de MM2 par rapport à celle de MM1 dans les figures 3.30f,g et h).

Les caractéristiques hydriques de MM1+MM2 obtenues de cette façon ne sont pas nécessairement les caractéristiques réelles du sol. En pratique, on ne connaît pas le type d'hétérogénéité.

Figure 3.27 : Variation du AEV de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10).

Figure 3.28 : Variation de la conductivité hydraulique à saturation de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10).

Figure 3.29 : Variation de la teneur en eau à saturation de MM1+MM2 en fonction du temps (résultats présentés aux tableaux 3.7 à 3.10).

a) t=463,1 s. b) t=843,3 s.

c) t=1304,6 s.

d) t=1788,5 s.

e) t=2030,4 s.

f) t=3438,7 s

g) t=4622,4 s. h) t=6065,3 s.

Figure 3.30 : Contours de pression (en cm) dans MM1+MM2 (valeurs multipliées par 10^{-3}).

L'interprétation d'essais d'infiltration à l'aide de l'approche mixte proposée ici permet d'estimer les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour un matériau homogène ou hétérogène (caractéristiques variables en fonction de la profondeur). La démonstration de cette approche a été effectuée avec des matériaux synthétiques. Dans les sections suivantes, on traitera de matériaux réels.

3.5 Essai en laboratoire

On présente dans cette section une application de l'approche mixte d'interprétation des essais d'infiltration à un essai réalisé en laboratoire. Ceci consiste à déterminer, à partir

de la mesure des taux d'infiltration, les caractéristiques hydriques d'un matériau qui a fait l'objet d'une caractérisation (partielle) auparavant. Plus loin, on traitera des essais effectués sur terrain.

3.5.1 Propriétés du matériau et mode opératoire

Le matériau testé est un sable naturel qui provient d'un site situé près d'une ancienne mine (Kam Kotia) en Ontario, Canada. Ce sable a été caractérisé au laboratoire de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers, dans le cadre d'autres projets (ou à d'autres stades de celui ci). Ce sont les résultats de ces essais qui sont montrés dans ce qui suit. Ils sont utilisés ici à titre indicatif, pour une comparaison avec les caractéristiques qui seront obtenues à partir de l'essai d'infiltration. La granulométrie du sable Kam Kotia est celle d'un sable moyen assez uniforme (voir figure 3.31). La conductivité hydraulique saturée est de l'ordre de $7x10^{-4}$ m/s pour une porosité d'environ 0,32. Un résumé des caractéristiques de ce sable, en termes de valeurs moyennes, est donné au tableau 3.11. La figure 3.32 montre deux CRE obtenues l'un en drainage et l'autre en mouillage dans deux colonnes remplies avec du sable Kam Kotia (étant donné que la densité du sable dans les deux colonnes est différente, la teneur en eau résiduelle est aussi différente). Le tableau 3.12 présente les caractéristiques de la CRE en mouillage et en drainage de ce sable.

Tableau 3.11 : Caractéristiques géotechniques du sable Kam Kotia. Cas des échantillons de la figure 3.31 (D_{10} : diamètre des grains représentant 10% des passants. C_U : coefficient d'uniformité; C_c : coefficient de courbure; D_r : densité des grains; k_s : conductivité hydraulique à la saturation).

D_{10} moy (mm)	C_U moy	C_c moy	D_r moy	k_s moy (m/s)
0,279	3,73	0,996	2,712	$7x10^{-4}$

Figure 3.31: Courbes granulométriques du sable Kam Kotia. La courbe notée Éch1 est celle qui provient du sable testé par l'auteur.

Figure 3.32: Courbe de rétention d'eau en drainage et en mouillage du sable Kam Kotia (voir les paramètres au tableau 3.12. VG : ajustement des données au modèle de van Genuchten, les mesures ont été effectuées dans le cadre d'autres projets ou à d'autres stades de celui ci)

Tableau 3.12 : Paramètres de la courbe de rétention d'eau du sable Kam Kotia, en mouillage et en drainage (voir les courbes à la figure 3.32). Les symboles avec une apostrophe (') indiquent les paramètres en mouillage.

θ_r	θ_s	α_V	n_V	ψ_a (m)	ψ_a/ψ_w
0,077	0,42	4,45	9,17	0,18	0,64
θ_r'	θ_s'	α_V'	n_V'	ψ_a' (m)	ψ_a'/ψ_w'
0,045	0,30	13,18	3,30	0,036	0,26

Le dispositif expérimental utilisé pour l'essai d'infiltration est composé, comme le montre la figure 3.33, d'un réservoir d'eau, d'une balance (précision 1g), d'une pompe péristaltique (débit maximum 1 l/min), d'une caméra vidéo numérique et de la colonne remplie du sable Kam Kotia.

Le sable a été mis en place, légèrement humide, par couches successives d'environ 5 cm avec un léger compactage dans une colonne. L'épaisseur totale du sable est de 24,3 cm, le diamètre intérieur de la colonne est de 54,2 cm. À la base de la colonne (sur son axe central) se trouve un exutoire d'eau, sous forme d'un trou de 1,43 cm de diamètre. Ce dernier a été recouvert d'un géotextile (pour éviter une érosion du sable durant l'essai) ne laissant passer que l'eau. Le sable a été saturé (par le haut, en en fermant l'exutoire et en remplissant la colonne d'eau) et drainé pendant une semaine avant l'essai d'infiltration, pour atteindre sa teneur en eau résiduelle (des mesures de teneur en eau volumique à l'aide de sonde TDR ont été effectuées tous les jours pour vérifier l'atteinte d'une valeur presque constante).

Pendant l'essai, la quantité d'eau versée sur la surface d'infiltration est comptabilisée à l'aide de la balance et enregistrée (toutes les 1/30 s) à l'aide de la caméra. Le débit d'eau qui arrive par gravité à la surface d'infiltration (surface circulaire de 7,58 cm de diamètre) est contrôlé de deux façons : à l'aide d'un robinet mis au bout du tuyau d'alimentation et avec une pompe péristaltique. On visait à ce que l'alimentation en eau soit suffisamment grande pour satisfaire l'absorption du sable (surtout au début de

l'essai) et suffisamment petite pour garder la tête d'eau en surface nulle (voir paramètres numériques à la section 3.3.1). Le rôle de la pompe est d'éliminer l'excès d'eau (en l'aspirant) au niveau de la surface d'infiltration (le tuyau relié à la pompe est placé près de la surface d'infiltration de telle sorte que la tête d'eau reste nulle). Ceci permet de respecter les conditions initiale (teneur en résiduelle) et frontière (tête d'eau nulle et surface d'infiltration circulaire) fixées lors des calculs numériques effectués à la section 3.3.1.

L'essai d'infiltration dans le sable, initialement à sa teneur en eau résiduelle, n'a duré que quelques minutes à cause de la faible épaisseur (24,3 cm). Il a été arrêté dès que l'eau a atteint la base de la colonne (marqué par le début de l'écoulement à l'exutoire). On remarque l'effet de la base sur le taux d'infiltration (voir résultats de l'essai à la figure 3.34). Ce taux décroît rapidement à l'approche de la base.

a)

b)

Figure 3.33: Dispositif expérimental utilisé pour l'essai d'infiltration réalisé en laboratoire (a) et sa schématisation (b).

3.5.2 Résultats

Les résultats de l'essai sous forme de taux d'infiltration mesurés en surface en fonction du temps sont montrés à la figure 3.34.

a)

b)

Figure 3.34: Taux d'infiltration mesurés à la surface du sable Kam Kotia. a) échelle arithmétique et b) échelle logarithmique.

L'interprétation de l'essai commence par une estimation du rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (en mouillage) près de la surface. Pour cela, on a théoriquement besoin de taux d'infiltration appliqués à des temps très petits, ce qui a été impossible faute de matériel adéquat (la fréquence de prise de photos est faible et n'a pas permis de prendre des mesures au tout

début de l'essai). Les propriétés hydriques du sable Kam Kotia ont donc été estimées en utilisant plusieurs rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Les points de la courbe d'infiltration *f* (figure 3.34) qui ont été utilisés dans l'interprétation (en considérant une courbe moyenne) sont : P1(t=6,57 s, q=0,0043 m/s), P2(t=8,68 s, q=0,0039 m/s), P3(t=12,60 s, q=0,0032 m/s) et P4(t=26,38 s, q=0,0028 m/s). Le premier point doit être suffisamment loin de l'origine pour permettre de bien ajuster les taux d'infiltration mesurés et ceux calculés (l'ajustement des deux taux se fait pour des temps inférieurs au temps du point utilisé). Le dernier point doit être choisi avant que le taux d'infiltration ne soit affecté par l'effet de la base (voir diminution plus rapide des taux d'infiltration après P4 à la figure 3.34). Les points P2 et P3 ont été pris dans l'intervalle [P1, P4]. En suivant la procédure présentée précédemment (voir l'organigramme de la figure 3.7), on détermine les propriétés $\psi_a^{'}$, $\theta_s^{'}$ et $k_s^{'}$ en supposant que le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est égal à une des valeurs qui ont été utilisées pour déterminer les courbe k_{ra} vs ψ_{ra} de la figure 3.4 (soient : 0,0315, 0,1842, 0,459 et 0,6863) et que la teneur en eau résiduelle est égale à 0,0296 (valeur gardée fixe dans toutes les simulations qui ont servi pour tracer les courbes k_{ra} vs ψ_{ra} ; elle constitue une estimation initiale de la teneur en eau résiduelle).

Pour estimer les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) aux temps des points P1 à P4, on procède comme suit :

- À partir des taux d'infiltration mesurés à travers le sable Kam Kotia et du temps correspondant (les points P1 à P4 de la figure 3.34), on essaie diverses valeurs de $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$. On estimer ensuite le $t_{ra}^{'}$, puis $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ comme indiqué plus haut (équations 3.18 et 3.19 et figure 3.19).

- Une simulation numérique est alors lancée à la suite de chaque estimation du triplet $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$.

Les valeurs retenues de $\frac{\alpha_k^{'}}{\alpha_\psi^{'}\alpha_\theta^{'}}$ varient de 129 s à 518 s environ. La valeur de $t_{ra}^{'}$ est de 0,051 entre les temps 6,57 s et 26,38 s. Le tableau 3.13 montre les caractéristiques hydriques obtenues suite à diverses simulations (MM16 à MM28). Elles correspondent à celles de matériaux dont les taux d'infiltration s'approchent le plus du taux d'infiltration mesuré (lissé par une moyenne mobile) pour le sable Kam Kotia, pour des temps inférieurs au temps des points P1 à P4. Les figures 3.35 à 3.38 montrent les taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D en considérant les paramètres du tableau 3.13.

Tableau 3.13 : Paramètres du modèle de van Guenuchten (1980) en mouillage utilisés lors de l'analyse avec les matériaux MM16 à MM28.

Point	Matériau	$\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$	$\psi_a^{'}$ (m)	θ_r	$\theta_s^{'}$	$\alpha_v^{'}$ (m^{-1})	$n_v^{'}$	$k_s^{'}$ (m/s)
P1	MM16	0,0315	0,16	0,0296	0,19	0,7582	1,6	$2,373x10^{-4}$
P1	MM17	0,1842	0,16	0,0296	0,27	2,4202	2,74	$3,36x10^{-4}$
P1	MM18	0,4590	0,16	0,0296	0,31	4,1390	5,48	$3,94x10^{-4}$
P1	MM19	0,6863	0,16	0,0296	0,33	5,1497	10,96	$4,12x10^{-4}$
P2	MM20	0,1842	0,16	0,0296	0,32	2,4202	2,74	$3,00x10^{-4}$
P2	MM21	0,4590	0,17	0,0296	0,33	3,8960	5,48	$3,37x10^{-4}$
P2	MM22	0,6863	0,17	0,0296	0,35	4,8468	10,96	$3,52x10^{-4}$
P3	MM23	0,1842	0,16	0,0296	0,38	2,4202	2,74	$2,51x10^{-4}$
P3	MM24	0,4590	0,17	0,0296	0,41	3,8960	5,48	$2,82x10^{-4}$
P3	MM25	0,6863	0,17	0,0296	0,42	4,8470	10,96	$2,95x10^{-4}$
P4	MM26	0,1842	0,21	0,0296	0,43	1,8440	2,74	$1,75x10^{-4}$
P4	MM27	0,4590	0,23	0,0296	0,43	2,8793	5,48	$1,93x10^{-4}$
P4	MM28	0,6863	0,24	0,0296	0,41	3,4331	10,96	$1,94x10^{-4}$

Figure 3.35: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P1, pour les matériaux MM16, MM17, MM18 et MM19 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,0315, 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement).

Figure 3.36: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P2, pour les matériaux MM20, MM21 et MM22 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement).

Figure 3.37: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P3, pour les matériaux MM23, MM24, et MM25 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement).

a)

b)

c)

Figure 3.38: Taux d'infiltration calculés avec HYDRUS2D jusqu'au point P4, pour les matériaux MM26, MM27, et MM28 ($\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ égal à 0,1842, 0,4590 et 0,6863 respectivement). b) et c) sont des vues rapprochées de a)

On remarque que pour le point P1 (MM16 à MM19, figure 3.35), le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ =0,0315 engendre une teneur en eau à la saturation trop faible (0,189, au tableau 3.13). Ce rapport est donc à éliminer. Un rapport plus petit donne une teneur en eau à la saturation encore plus faible. Avec les trois autres rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ considérés, la teneur

en eau à saturation varie de 0,27 à 0,33 et le $k_s^{'}$ de 3,36x10^{-4}à 4,12x10^{-4} m/s (tableau 3.13). La valeur de $\psi_a^{'}$ est égal à 0,16 m pour les trois rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Les taux d'infiltration calculés avec les rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ de 0,1842, 0,459 et 0,6863 sont plus proches des taux mesurés durant l'essai, jusqu'à P1 (voir figure 3.35). Signalons que les rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ supérieurs à 0,6863 n'ont pas été considérés ici car leur influence sur les résultats, à ce stade de l'essai, serait très faible (voir la différence entre les taux d'infiltration pour différents rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ à la figure 3.35). La figure 3.35 montre aussi que plus le temps est petit plus les taux d'infiltration calculés se distancient les uns des autres, indiquant ainsi que pour les discriminer (trouver le $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ qui correspond à celui du sable Kam Kotia), il faut avoir des mesures à des temps plus petits. Cette étape n'étant pas franchie, une incertitude sur le paramètre $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ demeurera pour la suite des estimations des propriétés du sable.

Pour les 3 autres points (P2 à P4), les trois rapports $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ considérés donnent des taux d'infiltration très similaires les uns aux autres. Le résultat aurait pu être différent si on avait été en mesure de déterminer le rapport exact au début de l'essai (par une mesure plus précise du taux d'infiltration). Selon les résultats numériques, le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est donc compris entre 0,1842 et 0,6863.

Ces résultats indiquent que le sable Kam Kotia testé présente une certaine hétérogénéité (puisque les caractéristiques données au tableau 3.13 ne sont pas les mêmes pour les points P1 à P4) même si, visuellement, elle est considéré comme homogène.

Par ailleurs, pour favoriser un drainage complet du sable, on a attendu 5 semaines (environ) après la fin de l'essai avant d'effectuer une mesure de la densité du sable. On a procédé à un démantèlement de la colonne du sable couche par couche d'une épaisseur d'environ 3 cm. La masse volumique sèche moyenne a été calculée (la somme de toutes

les masses sèches des couches divisée par le volume calculé de la colonne de sable). Elle est de l'ordre de 1790 kg/m^3. La porosité moyenne est alors de 0,34. La teneur en eau volumique dans les couches varie de 0,004 à 0,1 avec une moyenne de 0,04 (qu'on peut considérer comme teneur en eau résiduelle). Les mesures effectuées après le démantèlement de la colonne sont données à l'annexe 1

Si on compare les résultats obtenus (à partir de l'essai d'infiltration) par rapport à ceux présentés au début de cette section (réalisés pour d'autres projets ou dans d'autres stades de l'étude), on remarque que la conductivité hydraulique à saturation (valeurs présentées au tableau 3.13) est comparable à celle mesurée en laboratoire (valeurs données à la section 3.4.2.1). Elle reste toutefois légèrement inférieure pour les quatre points P1 à P4. Ceci peut être expliqué par le fait que le sable Kam Kotia n'est pas complètement saturé pendant l'essai d'infiltration. Le AEV donné par l'essai d'infiltration est généralement plus proche du AEV mesuré en laboratoire lors de l'essai, en drainage (tableau 3.12). Le AEV mesuré en mouillage est nettement inférieur à celui mesuré à l'aide de l'essai d'infiltration (pour les points P1 à P4, voir tableaux 3.12 et 3.13). Les teneurs en eau à saturation données par l'essai d'infiltration sont quant à elles, croissantes de P1 à P4 (tableau 3.13). Elles sont proches de la valeur de la porosité moyenne mesurée lors du démantèlement de la colonne pour le point P2. Le point P1 donne des valeurs légèrement inférieures à 0,34 (porosité moyenne mesurée après l'essai). Alors que les points P3 et P4 donnent des valeurs de teneurs en eau à saturation supérieures. Par rapport aux mesures en drainage et en mouillage, les points P1 et P2 montrent des teneurs en eau plus proches des mesures en mouillage, alors que les mesures aux points P3 et P4 (les deux derniers points) s'approchent plus des mesures en drainage (voir tableaux 3.12 et 3.13). Le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (qu'on n'a pas pu déterminer avec précision avec l'essai d'infiltration dans ce cas) est variable dans un intervalle légèrement plus grand que celui constitué par le $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ mesuré en mouillage et en drainage (voir tableau 3.12). On peut donc dire que les caractéristiques hydriques du sable Kam Kotia, en termes de l'AEV et de la conductivité hydraulique à saturation, sont plus proches de

celles obtenues en drainage, présentés à la section 3.4.2.1 (comme mentionné par Miyazaki, 2006). La différence entre ces résultats et les valeurs mesurées en mouillage (présentées au tableau 3.12) peut aussi être attribuée , en partie, aux incertitudes sur les mesures, qui sont particulièrement marquées en mouillage (compte tenu des difficultés expérimentales engendrées). Pour sa part, la teneur en eau à saturation varie entre les deux types de mesure, selon le stade (dans le temps) de l'essai (voir tableaux 3.12 et 3.13). Le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$, quand à lui, se situe environ entre les rapports mesurés en mouillage et en drainage (voir tableaux 3.12 et 3.13).

Pour évaluer si la teneur en eau résiduelle choisie au départ est réaliste, on utilise le modèle MK (Aubertin et al., 2003, Maqsoud et al., 2006) et le modèle FX (Fredlund et Xing, 1994; Houston et al., 2006) présentés à la section 2.1.2. L'intérêt de ces derniers réside principalement dans le fait que l'évaluation de la teneur en eau résiduelle se fait en considérant que la teneur en eau est théoriquement nulle lorsque la succion est égale à 10^5 m (à la différence du modèle de van Genuchten qui considère qu'un sol reste à sa teneur en eau résiduelle quelle que soit la succion au delà de ψ_r). En plus, la CRE peut être estimée à partir des propriétés physiques du sol pour ces deux modèles (e.g. Fredlund et al., 2002; Aubertin et al., 2003; Maqsoud et al., 2006; Houston et al., 2006). Il est possible de les utiliser pour estimer la teneur en eau résiduelle (même si le modèle FX donne la CRE en drainage seulement). En effet la teneur en eau résiduelle est pratiquement indépendante de l'effet d'hystérésis. Le modèle MK donne la CRE d'un matériau pulvérulent à partir de 3 paramètres (D_{10}, C_u et $\theta_s^{'}$). Le modèle de Fredlund et Xing (1994) permet de décrire la CRE à partir de 5 paramètres (a_f, ψ_r, n_f, m_f et $\theta_s^{'}$). La démarche suivie ici consiste à faire varier (dans un chiffrier Excel) les 3 paramètres du modèle MK ou les 5 paramètres du modèle FX jusqu'à l'obtention d'une CRE possédant les mêmes $\psi_a^{'}$, $\psi_w^{'}$ et $\theta_s^{'}$ que celles évalués à partir de l'essai d'infiltration. En considérant qu'un matériau dont la CRE a été estimée par le modèle MK ou FX et ayant les mêmes valeurs des paramètres $\psi_a^{'}$, $\psi_w^{'}$ et $\theta_s^{'}$ que ceux du sable Kam Kotia

aura la même teneur en eau résiduelle $\theta_r^{'}$ que celui ci, la teneur en eau résiduelle est déterminée à l'aide de la CRE calculée avec le modèle MK ou celui de Fredlund et Xing. Elle correspond à la teneur en eau (donnée par les deux modèles) à la pression d'entrée d'eau $\psi_w^{'}$ calculée à partir de l'essai d'infiltration (le $\psi_w^{'}$ et le ψ_r sont deux abscisses des courbes de mouillage et de drainage respectivement, qui possèdent la même ordonnée $\theta_r^{'}$ ou θ_r). Par la suite, on compare la teneur en eau résiduelle obtenue avec celle qui a été utilisée dans toutes les simulations numériques (égale ici à 0,0296 qui constitue l'estimation de départ). Si la différence est trop grande, il faut refaire les simulations numériques depuis le début (y compris celles pour déterminer la relation k_{ra} vs ψ_{ra}) avec une autre teneur en eau résiduelle. La procédure à suivre est montrée à la figure 3.39 (la première estimation de $\theta_r^{'}$ peut se faire à partir d'observation qualitatives du matériau).

Figure 3.39: Procédure à suivre pour l'estimation de la teneur en eau résiduelle ($\theta_{MK/FX}$ est la teneur en eau calculée à l'aide du modèle MK ou FX).

La figure 3.40 montre un exemple d'ajustement des modèles MK et FX sur la CRE obtenue à partir de l'essai d'infiltration (en utilisant la démarche qu'on vient de décrire). Les teneurs en eau résiduelles calculées sont montrées au tableau 3.14.

Tableeau 3.14 : Teneurs en eau résiduelles du sable Kam Kotia évaluées à l'aide du modèle MK ($\theta_{r,MK}$) et celui de Fredlund et Xing ($\theta_{r,FX}$).

Point	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P3	P3	P3	P4	P4	P4
ψ_a'/ψ_w'	0,184	0,459	0,686	0,184	0,459	0,686	0,184	0,459	0,686	0,184	0,459	0,686
$\theta_{r,MK}$	0,13	0,10	0,12	0,11	0,10	0,14	0,12	0,12	0,16	0,09	0,13	0,16
$\theta_{r,FX}$	0,06	0,05	0,07	0,06	0,06	0,04	0,08	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06

On voit que les teneurs en eau résiduelles données par les modèle MK et FX sont supérieures à celle utilisée dans les calculs numériques (0,0296). Le modèle FX donne cependant des teneurs en eau résiduelles plus proches de celle utilisée dans les calculs. En se fiant aux valeurs données par le modèle MK, il faudra refaire tous les calculs en adoptant une autre teneur en eau résiduelle supérieure à 0,0296 mais inférieure à 0,12 (environ la moyenne des valeurs données par le modèle MK). Par contre, si on tient compte des résultats donnés par le modèle FX, on peut considérer que la valeur de la teneur en eau résiduelle utilisée est convenable (si on reprend les simulations numériques avec une teneur en eau résiduelle $0{,}03<\theta_r'<0{,}06$ la différence au niveau des résultats serait très faible). La figure 3.41 montre un exemple de reprise des calculs des taux d'infiltration en modifiant la teneur en eau résiduelle dans le cas des matériaux MM19 (P1) et MM26 (P4). Les teneurs en eau utilisées sont 0 et 0,1 dans les deux cas (aucun autre paramètre n'a été modifié). Si on considère que les variations des taux d'infiltration dans les matériaux MM19 et MM26 induites par l'utilisation des nouvelles teneurs en eau résiduelle (0 et 0,1) dans toutes les simulations depuis le début sont comparables à celles provoquées par une modification directe des teneurs en eau résiduelles dans MM19 et MM26 (en utilisant les paramètres du modèle de van

Genuchten données au tableau 3.13), on voit à la figure 3.41 que ces variations sont du même ordre de grandeur que les fluctuations des taux d'infiltration mesurés. Il n'est donc pas nécessaire dans ce cas ci de refaire les calculs. Dans le cas des essais d'infiltration *in situ* (section suivante) on adoptera une valeur intermédiaire (entre 0 et 0,1) de la teneur en eau résiduelle (égale à 0,05) pour l'ensemble des calculs, vue la nature des stériles qui sont plus grossiers.

Figure 3.40: Ajustement des modèles MK (MK) et Fredlund et Xing (FX) sur la CRE du matériau MM18 (modèle de van Genuchten, vG).

Figure 3.41 : Effet de la teneur en eau résiduelle sur les taux d'infiltration.

3.6 Site de la Mine Laronde

Dans cette section, nous présentons une interprétation des essais d'infiltration effectués à la surface du banc supérieur de la halde no 1 de la mine Laronde. Avant cela, on rappellera le contexte de l'étude et les résultats des travaux qui s'y sont faits depuis l'année 2002. Ces études sont présentées en détail dans les articles, rapports et mémoires de Tripodi (2003), Pucelle (2003), Poisson et al., (2007), Gamache-Rochette (2004), Campos (2004), Dubreuil-Boiclair (2005) et Anterrieu (2006).

3.6.1 Historique et situation

L'activité de la mine Laronde est concentrée en grande partie sur une surface d'environ 490 ha située dans les municipalités de Cadillac et Bousquet (District Minier de Rouyn-Noranda, en Abitibi-Témiscamingue). Cette mine se trouve à environ 550 km au nord ouest de Montréal et à 50 km à l'est de Rouyn Noranda. Le permis émis en octobre 1988 a été enregistré sous le nom de Mines Dumagami Ltée (ancien nom de la mine). En 2000, l'expansion de l'activité de la mine a atteint la zone appelée El Coco qui appartenait à Agnico Eagle Ltée. En 2001, un nouveau permis minier, adjacent au premier, a été émis au nom d'Agnico Eagle, pour une superficie d'environ 60 ha dans la municipalité de Cadillac (District minier de Val d'or). C'est dans cette zone que l'infrastructure minière souterraine de la mine Laronde qu'on connaît aujourd'hui a été installée (Gosselin, 2003).

Depuis 1988, la mine Laronde a produit plus de 2,9 M onces d'or. Ses réserves en or s'élèveraient aujourd'hui à environ 5,3 M onces ce qui en fait le plus gros gisement d'or au Canada. Pour l'année 2007, la mine Laronde projette produire 240 K onces d'or, 4,7 M onces d'argent, 8700 tonnes de cuivre et 75000 tonnes de zinc (avec 7300 tonnes de minerais traités par jour).

La propriété est actuellement située dans les municipalités de Preissac et Cadillac, presque à mi-chemin (60 km) entre Rouyn-Noranda et Val d'Or (Québec).

3.6.2 Topographie, géologie, sols et climat

Les terrains sur le site de mine Laronde sont relativement plats (dénivelée totale de 40m environ). Ils sont légèrement inclinés vers le sud. Les eaux de ruissellement sont toutes drainées vers le sud-est, soit vers le ruisseau Dormenan qui suit les frontières sud de la propriété. Ce ruisseau se jette dans le ruisseau Noir situé à 2 km vers l'est. Ce dernier coule vers le nord sur 4 km jusqu'au lac Preissac (Gosselin, 2003).

Les infrastructures de surface (usines, parcs à résidus miniers, haldes etc.) utilisent environ 60 % de la superficie attribuée au site de la mine. Une forêt de type boréale, constituée principalement d'épinettes noires et de bouleaux, couvre le reste (Gosselin, 2003).

La mine est située dans la sous province géologique de l'Abitibi, qui fait partie de la province supérieure (datant de 2,5 à 4 Ga). La formation géologique exploitée de Laronde se situe dans la portion sud de la ceinture volcanique archéenne, au sein de la formation Bousquet. Cette dernière fait partie du groupe volcanique Blake River. L'épaisseur de la formation Bousquet, qui contient d'importantes minéralisations d'or et de métaux de base, varie de 150 à 550 m. Elle est caractérisée par une dominance de quartz, de feldspath porphyrique et de roches pyroclastiques. La minéralisation à la mine Laronde se trouve à l'extrémité est de la formation Doyon-Dumagami, orientée est-ouest. Cette structure est aussi reliée aux gisements d'or des mines Mouska, Doyon, Bousquet I et Bousquet II situées à l'ouest et au nord de la mine Laronde (Beaudoin et al., 2000). Les zones de minéralisation or-cuivre et zinc-argent exploitées par la mine se trouvent sous forme de lentilles de sulfures massifs et disséminés dans la partie felsique sud de l'unité Blake River (Beaudoin et al., 2000).

D'un point de vue géotechnique, les sols du territoire de mine Laronde sont constitués principalement d'unités préquaternaires (roches métamorphiques du précambrien) et quaternaire (dépôts glacio-lacustres). On trouve aussi, secondairement, des dépôts postglaciaires du quaternaire (Veillette et al., 2003). Le socle métamorphique est constitué de roches intrusives (granitoïdes, intrusions mafiques et ultramafiques) volcaniques (felsiques et mafiques) et sédimentaires. Les unités glacio-lacustres sont formées de sable, sable silteux gravier et blocs dont l'épaisseur varie de 1 à 20 m. les formations postglaciaires sont formées, quant à elles, soit de tourbes et débris végétaux de 0,5 à 5 m d'épaisseur (dépôts organiques) ou de sable silteux, sable argileux et sable et gravier de 1 à 5 m d'épaisseur (Veillette et al., 2003).

Les conditions climatiques sur le site ressemblent à celles de la région de Latulipe (municipalité qui se trouve à 150 km au sud de Rouyn-Noranda). Des statistiques sur les caractéristiques climatiques de Latulipe sont données en annexe 4. Certaines de ces données seront utilisées au chapitre 4.

3.6.3 La halde no 1

Les stériles formant la halde no 1 proviennent principalement d'une ancienne exploitation à ciel ouvert, appelée zone 4. Cette zone minéralisée en or se présente sous la forme d'une bande étroite (moins de 10 mètres) de sulfures siliceux (pyrite, sphalérite et un peu de chalchopyrite-bornite) disséminés dans un schiste à séricite. La roche encaissante qui constitue une grande partie des stériles est constituée de tuf volcanique à lapilli felsique et de tuf felsique œillé de cristaux de quartz (Campos, 2004). La figure 3.42 montre une photo de la halde à stériles de la mine Laronde qui est située à l'ouest de la route qui va vers Preissac.

Figure 3.42 : Photo de la halde no 1 de la mine Laronde.

La halde no 1 s'étend sur une superficie d'environ 5 ha. Elle a une forme presque ovale, et est constituée de deux principaux bancs d'une hauteur totale d'environ 25 m. L'accès au banc supérieur se fait par une rampe à partir du sud ouest de la halde (voir figure 3.43). L'angle de la pente de la halde est d'environ 37°, et il est presque constant comme en témoignent la régularité de la densité des courbes de niveaux de la figure 3.43.

La halde no 1 a fait l'objet de plusieurs études touchant divers aspects et faisant appel à plusieurs disciplines : géophysique, géochimique, géotechnique et hydrogéologie. Ces études ont été menées entre les années 2002 et 2005 (voir les détails dans Tripodi, 2003; Pucelle, 2003; Campos et al., 2003; Poisson et al., 2007 ; Gamache-Rochette, 2004 ; Campos, 2004; Dubreuil-Boiclair, 2005; Chouteau et al., 2005; Anterrieu, 2006; Anterrieu et al., 2007). L'auteur de cette thèse a participé à plusieurs campagnes de mesures sur la halde. Le but principal de ces investigations était d'élaborer une méthode qui permet de définir la structure interne de la halde, incluant la présence de couches constituées de matériaux fins ou grossiers et leur configuration géométrique. Lors de ces études, plusieurs essais et mesures en laboratoire et in situ ont été effectués. De plus, 8 sondages et 5 tranchées ont été creusées. La figure 3.43 montre l'emplacement et la nature des divers points de mesures.

On donne dans ce qui suit les principaux résultats obtenus lors de ces diverses études.

a)

b)

Figure 3.43 : Reconnaissances menées sur la halde no 1. a) vue globale b) détails concernant le volet hydrogéologique (adaptée d'après Anterrieu, 2006).

3.6.3.1 Minéralogie

Les stériles provenant de la partie superficielle de la halde (5 échantillons prélevés entre 0 et 5 m de profondeur) contiennent un pourcentage important de quartz (50 à 70%). On note aussi la présence d'albite (10 à 30 %) ainsi que des phyllosilicates (produits d'altération des roches volcaniques) incluant la muscovite (10 à 30 %), la chlorite (2 à 10%) et la montmorillonite (2 à 10%). On trouve aussi des quantités variables (allant de traces à 30%) de divers autres minéraux tels que la calcite, la dolomite/ankerite, la pyrite, la jarosite, l'alunogène/alunite, la rhomboclase et le gypse/basanite. D'autres minéraux argileux pourraient être présents comme la palygorskite, kaolinite ou lizardite. En somme, les échantillons analysés indiquent que les stériles sont constitués d'un mélange de roches volcaniques (felsiques et non felsiques), de schiste à chlorite-séricite (parfois pyriteux) et de fragments de sulfures massifs riches en pyrite (Gamache-Rochette, 2004)

3.6.3.2 Géochimie

Les échantillons partiellement oxydés (identifiables par leur couleur ocre) prélevés en tranchée contiennent entre 1 et 4,3 % de pyrite. D'autres échantillons en apparence non oxydés contiennent beaucoup moins de pyrite (≤ 1 %). Les échantillons oxydés présentent des teneurs plus élevées en fer (ferrique) et en sulfates. Ceci pourrait provenir d'hydroxydes de fer ferrique, comme par exemple la ferrhydrite et la jarosite. La fraction fine des échantillons (<5 mm) contient, en général, une plus grande teneur en métaux (Cu, Pb, Zn et Ba). Le pH de la pâte (échantillons broyé avec eau) varie de 3,45 à 9,92 (la moyenne de 10 essais est de 7,9). On pense que cela est causé par la présence des minéraux argileux (Gamache-Rochette, 2004). Antérrieu (2006) mentionne des teneurs en pyrite du même ordre de grandeur (1 et 3,5 %), mais indique qu'elles peuvent atteindre plus de 30 % à certains endroits.

Des analyses chimiques ont été effectuées sur le soufre total, les sulfures, le carbone inorganique total et un titrage acide-base. Ceci a permis d'estimer la capacité des stériles à produire et à neutraliser de l'acide. Les résultats obtenus indiquent que tous les échantillons sont potentiellement générateurs d'eaux acides. Le potentiel neutralisant est assez faible en raison de la faible quantité de carbonates (Gamache-Rochette, 2004).

3.6.3.3 Propriétés géotechniques de base

La densité des particules stériles varie de 2,78 à 2,82 (moyenne, sur 3 échantillons, de 2,79) (Gamache-Rochette, 2004). La densité en place donnée par 2 mesures est de 1650 kg/m^3 et 2270 kg/m^3 (Antérrieu, 2006). Ces mesures ont été effectuées pour un volume de 2,7 l de stériles (assez fins).

La granulométrie des stériles est très étalée. Le coefficient d'uniformité (C_U) est usuellement supérieur à 250,0. Trois essais granulométriques donnent des D_{10} variant de 0,01 à 0,1 mm environ (Gamache-Rochette, 2004). Deux autres échantillons écrêtés à 10 cm donnent des C_U de 38,4 et 39,9 (Anterrieu, 2006).

Les sondages effectués le long de la partie ouest de la halde permettent de faire une estimation du pourcentage (en volume) des particules fines (sable et silt surtout) en estimant la partie manquante des carottes. Ce pourcentage est de l'ordre de 76 % (voir figure 3.44). Les sondages fournissent aussi des informations concernant le Dmax des particules dans la halde (voir tableau 3.15). Ce dernier peut être estimé par les plus longs morceaux de carotte rencontrés lors d'un sondage. Ils varient de 8 cm (sondage 8) à 67 cm (sondage 2). La figure 3.45 présente la variation de la longueur des morceaux de carottes (> 5-10 mm) à différentes profondeurs (appelée diamètre des grossiers sur les graphiques).

Tableau 3.15 : Diamètre maximum (Dmax) estimé dans les sondages 1 à 8.

Sondage	1	2	3	4	5	6	7	8
Dmax(cm)	37	67	42	49	36	43	13	8
Profondeur max. (m)	24	24	24	24	24	24	24	6

Les sondages, espacés d'environ 7,5 m, ne montrent pas de tendance générale dans la distribution des gros blocs et la proportion des particules fines en fonction de la profondeur pour la partie ouest de la halde. Seul le sondage 2 montre une augmentation du Dmax et en même temps une diminution de la proportion des particules fines en fonction de la profondeur, entre 0 et 9 m. Ceci montre qu'il y a un léger granoclassement entre 0 et 9 m. Une augmentation progressive de la grosseur des particules accompagnée d'une diminution de la proportion des particules fines, jusqu'à leur disparition à la base d'un banc serait un cas idéalisé de granoclassement. La perte de particules fines lors des sondages (en fait, il y avait pas eu de retour d'eau de lubrification, faute de pression suffisante pour forcer sa remontée en surface) indiquerait la présence de vide dans la halde (observé, d'ailleurs, sur le terrain par Antérrieu (2006) dans la tranchée centrale à 1,40 et à 2,50 m de profondeur environ).

3.6.3.4 Hydrogéologie

Quinze mesures de conductivité hydraulique à saturation ont été effectuées en laboratoire (Gamache-Rochette, 2004). Les valeurs de k_s varient de 3,93 x10^{-8} à 3,74x10^{-5} m/s en fonction de la porosité et du type d'essais (voir figure 3.46).

Figure 3.44 : Proportions de la carotte constituées de particules fines (sable et silt surtout) en fonction de la profondeur (mesures basées sur les données de Dubreuil-Boiclair, 2005).

Figure 3.45 : Intervalle de variation de la longueur des morceaux de carottes en fonction de la profondeur (basé sur les données de Dubreuil-Boiclair, 2005).

Figure 3.46 : Conductivité hydraulique à saturation des stériles en fonction de la porosité (adaptée d'après Gamache-Rochette, 2004)

Trois essais en cellule Tempe ont été réalisés sur des échantillons écrêtés à 5mm, dans le but d'estimer la courbe de rétention d'eau, en drainage. Le tableau 3.16 donne ces résultats en termes de paramètres du modèle de van Genuchten (1980) (Gamache-Rochette, 2004).

Tableau 3.16: Paramètres de rétention d'eau des stériles (≤ 5 mm) selon le modèle de van Genuchten (1980) (adapté d'après Gamache-Rochette, 2004).

	θ_r	θ_s	α_v (m)	n_v	ψ_a (m)	ψ_a/ψ_r
Echantillon1	0,0475	0,2470	0,20	1,64	0,6629	0,0358
Echantillon2	0,0501	0,2400	0,19	1,63	0,683	0,0347
Echantillon3	0,1531	0,3320	0,92	1,17	0,0159	0,0016

Des mesures de teneur en eau massique (Anterrieu, 2006), de succion et de température à quelques profondeurs (Gamache-Rochette, 2004) ont été relevées sur le terrain. La teneur en eau moyenne dans les tranchées est, ouest et centrale (figure 3.43) varie de 5 à 20 %. La succion moyenne (sur 3-4 jours à une profondeur donnée) varie de 0 à 27 kPa entre 0,1 et 1,8 m de profondeur. La plus forte succion a été mesurée au mois de juin 2003 à 0,25 m. La température moyenne des stériles en été (sur 3-4 jours à une

profondeur donnée) varie de 20 à 25,5 °C entre 0,1 et 1,8 m de profondeur. La plus forte température a été mesurée en mois de juillet 2003 à 1,8 m de profondeur. Les mesures de succion et de température ont été faites dans la tranchée no 2 (figure 3.43).

3.6.3.5 Structure de la halde no1

Suite à des investigations géophysiques, Antérieu (2006) a proposé une structure approximative de la halde. Ce modèle 2D s'étend sur 160 m d'Est en Ouest (voir figure 3.47). Ce modèle tient compte des résultats des études géophysiques antérieures (effectuées dans l'aire géophysique montrée à la figure 3.43) de Campos (2004) et de Poisson et al., (2007). En termes de résistivité électrique, il met en évidence une alternance de couches conductrices (10 Ohm.m) et résistives (100 Omh.m) à l'est de la halde. Dans la portion ouest du banc supérieur, le modèle présente de grandes stratifications obliques (900 et 200 Ohm.m). De même qu'un feuillet conducteur (30 Ohm.m. à x=50 m). La figure 4.47 présente également la localisation des couches résistives mises en évidence par les mesures en trous de sondage (en rouge). Pour rendre compte de l'hétérogénéité du milieu, certaines cellules ont été affectées de valeurs de résistivité très différentes de la résistivité de la zone dans laquelle elles sont situées (voir figure 3.47).

Figure 3.47 : Modèle électrique de la structure interne de la halde, d'ouest (gauche) en est. L'aire géophysique est représentée en jaune, et les couches résistives déterminées par les mesures en forages sont présentées en rouge (tirée de Anterrieu, 2006).

3.7 Essais *in situ*

Plusieurs essais d'infiltration à petite échelle ont été réalisés à la surface de la halde 1 sur le site de la mine Laronde (voir figure 3.43). Huit résultats ont été choisis pour interprétation (voir emplacement à la figure 3.49). Le choix a été fait pour couvrir le maximum d'espace de la halde avec un minimum d'essais (pour optimiser le volume des calculs requis). Ces essais ont été réalisés à l'aide de contenants en plastique rigide (seau ou chaudière d'infiltration) de forme cylindrique (diamètre intérieur de 27 cm, surface égale à 0,0573 m^2) au fond desquels on a percé 7 trous de 5 cm de diamètre (voir photo, figure 3.48). Des essais à grande échelle dans des bassins de plus de 10 m^2 de surface ont aussi été réalisés (voir Gamache-Rochette, 2004). Ces essais ne seront pas toutefois traités ici car ils nécessitent l'utilisation d'un autre code et la programmation de modules de calcul supplémentaires pour tenir compte de la variation de la surface d'infiltration en fonction du temps (les taux d'infiltration correspondant aux essais à petite échelle et grande échelle sont montrés en annexe 2).

Dans les essais à petite échelle, l'eau parvenait aux contenants par gravité à partir d'une canalisation reliée à un réservoir. La quantité d'eau infiltrée est comptabilisée à l'aide d'une balance sur laquelle est posé le réservoir. La hauteur d'eau est mesurée à l'aide d'une échelle graduée fixée sur la paroi des contenants.

Durant chaque essai, trois paramètres sont notés : la hauteur de l'eau dans le contenant h, le volume d'eau cumulé sortant du réservoir $V_{cum,r}$ et le temps t. La diminution du volume d'eau dans le réservoir est donnée par la différence entre la masse d'eau initiale et celle à un temps donné.

Figure 3.48 : Contenant utilisé pour effectuer les essais à petite échelle

3.7.1 Résultats

Le traitement des mesures de terrain consiste, dans un premier temps, à déterminer la quantité d'eau infiltrée en fonction du temps. Ceci correspond à la fonction *F(t)*) et aux taux d'infiltration *f(t)* pour chaque essai. Pour cela on effectue les calculs suivants :

$$V_{cum}(t_i) = V_{cum,r}(t_i) - V_c(t_i) \tag{3.24}$$

$$F(t_i) = \frac{V_{cum}(t_i)}{S_{in}} \tag{3.25}$$

$$f(t_i) = \frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \tag{3.26}$$

avec

V_{cum} Volume d'eau infiltré cumulé à t_i [L^3]

$V_{cum,r}$ Diminution du volume d'eau cumulée dans le réservoir à t_i [L^3]

V_c Volume d'eau dans le contenant à t_i [L^3]

S_{in} Surface d'infiltration [L^2]

t_i ième lecture de temps [T]

Figure 3.49: Emplacement des divers essais d'infiltration à la surface de la halde (le numéro i est équivalent à Chi dans la figure 3.50). Cet emplacement des essais correspond à celui montrée à la figure 3.43b (adaptée d'après Tripodi, 2003).

Les résultats de ces opérations, donnés sous forme de taux d'infiltration (*f(t)*) et de la hauteur d'eau dans le contenant en fonction du temps (*h(t)*), sont présentés à la figure 3.50.

Figure 3.50: Données des essais d'infiltration effectués à la surface de la halde no1 aux endroits montrés à la figure 2.49 (le trait plein correspond à la moyenne mobile de 2 à 4 périodes); les échelles varient d'une figure à l'autre.

Figure 3.50 (suite et fin): Données des essais d'infiltration effectués à la surface de la halde no1 aux endroits montrés à la figure 3.49 (le trait plein correspond à la moyenne mobile de 2 à 4 périodes); les échelles varient d'une figure à l'autre.

Pour chaque essai, il faut chercher à déterminer numériquement les relations k_{ra} vs ψ_{ra} à différents t_{ra} et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ comme indiqué aux sections 3.3 et 3.4. Mais à nouveau dans ces essais, la détermination du rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ s'est avérée difficile. Pour pouvoir interpréter les essais (pour les temps grands), on considère le rapport calculé $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ à partir des essais de caractérisation en laboratoire (voir section 3.6.3). La valeur adoptée pour $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est la moyenne des trois essais (cellule Tempe) effectués sur les stériles provenant de la halde no 1. Cette valeur est égale à 0,0241. La teneur en eau résiduelle, quant à elle, est prise égale à 0,05 pour toutes les simulations (valeur intermédiaire entre 0 et 0,1; choisie parce que la différence induite dans les taux d'infiltration, jusqu'à une teneur en eau résiduelle de 0,1, est comparable aux fluctuations locales de ces derniers).

On procède en suite au choix des points P(q,t) sur le graphique f pour lesquels on veut connaître les propriétés hydriques des stériles compris entre la surface d'infiltration et la position du front de mouillage au temps t. Dans l'ensemble des essais présentés ici, on a divisé la courbe f en 3 à 5 intervalles avec un point à la fin de chacun. On applique la procédure montrée à l'organigramme de la figure 3.7 pour chaque point. Ceci permet d'estimer les caractéristiques hydriques des stériles selon le modèle analytique de van Genuchten (1980) à un temps donné. Les résultats de l'ensemble des essais en termes de caractéristiques hydriques à divers points de mesure sont montrés au tableau 3.20. On montrera dans ce qui suit l'interprétation de l'essai CH1 à titre d'exemple. Le détail des autres essais est donné en annexe 3.

Pour tracer les courbes k_{ra} vs ψ_{ra} à différents t_{ra}, on utilise d'abord un autre matériau pour les calculs (M5, voir figure 3.51). Ici on n'a besoin que d'un seul matériau puisque $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ est maintenant considéré connu suite aux essais en laboratoire (égal à 0,0241). Les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) de M5 sont montrés au tableau 3.17.

À partir du matériau M5, on crée 12 modèles. La succion (de la CRE et de la fonction de conductivité hydraulique) et le temps, au niveau des conditions frontières, ont été changés (multiplié par un même facteur) pour chaque modèle. Chaque modèle donne donc un point d'une courbe k_{ra} vs ψ_{ra} à un t_{ra} donné. Le temps de référence (fixé arbitrairement) est de 76,9 s pour un $\psi_a^{'}$ égal à 2,43x10^{-2} m, un $k_s^{'}$ égal à 1,16x10^{-5} m/s et un $\theta_s^{'}$ égal à 0,4. Ceci donne un t_{ra} = 0,092.

Tableau 3.17: Paramètres du modèle analytique de van Guenuchten (1980) pour le matériau M5.

Material	θ_r	$\theta_s^{'}$	$\alpha_v^{'}$(m^{-1})	$n_v^{'}$	$k_s^{'}$(m/s)	$\psi_a^{'}$(m)	$\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$
M5	0,05	0,40	5	1,527	1,16x10^{-5}	0,0202	0,0241

Figure 3.51: Teneur en eau volumique et fonction de la conductivité hydraulique du matériau M5, selon le modèle analytique de van Genuchten (1980).

On effectue 12 simulations numériques avec les $\psi_a^{'}$ du tableau 3.18. Dans ces simulations, on multiplie le temps dans la fonction h(t) (montrée à la figure 3.50) par le facteur d'échelle correspondant (tableau 3.18). On adopte plusieurs t_{ra} pour obtenir plusieurs courbes k_{ra} vs ψ_{ra}. Les résultats sont montrés au tableau 3.19. La surface d'infiltration est un cercle de 13,5 cm de rayon (le même que celui du contenant). La tête d'eau est variable en fonction du temps. À la base du modèle numérique on applique

un drainage libre (gradient de pression nul). La teneur en eau résiduelle (θ_r=0,05) est prise comme conditions initiales, sur toute la hauteur, dans toutes les simulations.

La figure 3.52 montre la relation ψ_{ra} vs k_{ra} pour différents t_{ra} (les figures correspondant aux autres essais sont données en annexe 3). Chacune de ces courbes permet, à partir d'un point $P(t,q)$ de la courbe de f vs t (taux d'infiltration provenant d'un essai d'infiltration) et d'une valeur de $\alpha_\psi (=1/\psi_a^{'})$, de déterminer $\alpha_k (=1/k_s^{'})$ et α_θ $(=1/\theta_s^{'})$ d'une façon unique pour un t_{ra} donné. Les valeurs de α_ψ et $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ permettent ensuite d'estimer $\alpha_v^{'}$ et $n_v^{'}$. En entrant les paramètres $\theta_r, \theta_s^{'}, \alpha_v^{'}, n_v^{'}$ et $k_s^{'}$ dans une simulation numérique, la courbe f obtenue passera par le point P (pour les conditions frontières de l'essai en considérant que la teneur en eau initiale des stériles est de 0,05).

Les points de la courbe f (figure 3.50) utilisés pour l'interprétation de l'essai CH1 sont :

P1: 1,887x10^{-3} m/s à 540 s
P2: 1,782x10^{-3} m/s à 876 s
P3: 1,431x10^{-3} m/s à 1620 s
P4: 1,389x10^{-3} m/s à 1896 s

Pour chacun de ces points on applique la procédure montrée à la figure 3.7 pour trouver les 3 paramètres de van Genuchten ($\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ en considérant que 0,20<$\theta_s^{'}$<0,60, intervalle proche de celui de la porosité théorique dans les sols naturels, voir section 2.1.1). Les caractéristiques hydriques obtenues dans le cas de CH1 (et pour les 7 autres essais) sont montrées au tableau 3.20. Ce dernier présente aussi les profondeurs d'investigations (Zi) (la profondeur d'investigation à un temps t est la profondeur du front de mouillage à t, dans une simulation numérique où on a utilisé les paramètres du

modèle analytique de van Genuchten (1980) qui ont été calculés au point d'interprétation P(q,t)). La figure 3.53 montre les taux d'infiltration calculés par HYDRUS2D comparés à ceux de l'essai, du début jusqu'aux points d'interprétation (les figures correspondant aux autres essais sont données en annexe 3).

Tableau 3.18: Facteurs d'échelle et AEV des 12 modèles (cas de l'essai CH1).

ψ'_a (m)	Facteurs d'échelle
$2{,}426 \times 10^{-2}$	1
$3{,}395 \times 10^{-2}$	1,3994
$8{,}393 \times 10^{-2}$	3,4594
0,1413	5,8242
0,1703	7,0190
0,2762	11,3843
0,3027	12,4781
0,3685	15,1891
0,4075	16,7973
0,5109	21,0570
0,5980	24,6485
0,6182	25,4795

Tableau 3.19: Temps de référence et t_{ra} correspondants (cas de l'essai CH1).

Temps de réf. (s)	t_{ra}
76,9	0,092
130,8	0,156
207,7	0,248
346,2	0,413
569,3	0,679
938,6	1,119
1546,4	1,844
1954,1	2,331

Figure 3.52: Courbes k_{ra} vs ψ_{ra} pour $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ =0,0241 à diverses valeurs de t_{ra} (cas de l'essai CH1).

Figure 3.53 : Taux d'infiltration mesurés (CH1) et calculés. Légende : CH1_i correspond au point Pi. Le trait plein correspond à une moyenne mobile des taux d'infiltration mesurés.

Pour l'ensemble des essais (tous points et profondeurs confondus) la teneur en eau à saturation, la conductivité hydraulique à saturation et le AEV varient de 0,20 à 0,60, de $1{,}9 \times 10^{-5}$ à $2{,}0 \times 10^{-4}$ m/s et de 0,0285 à 0,50 m respectivement. La profondeur d'investigation varie de 0,18 à 1,01 m. Les valeurs de la conductivité hydraulique et celles du AEV s'apparentent à celles d'un matériau sableux (voir figures 3.54 et 3.55).

Les figures 3. 56, 3.57 et 3.58 montrent la variation de la teneur en eau à saturation, de l'AEV et de la conductivité hydraulique à saturation en fonction de la profondeur (profondeur du front de mouillage, calculée à l'aide de simulations numériques, à un temps de mesure et à un emplacement donnés). Ces figures indiquent que la teneur en eau à saturation varie entre deux valeurs extrêmes (0,2 et 0,6). Alors que la valeur de la conductivité hydraulique à saturation est généralement de l'ordre de 1×10^{-4} m/s. L'AEV montre une légère augmentation en fonction de la profondeur.

Figure 3.54 : Fuseau des teneurs en eau volumique (selon les données présentées au tableau 3.20) de l'ensemble des mesures effectuées sur la halde no 1.

Tableau 3.20: Caractéristiques hydriques de la halde no 1, à divers endroits et profondeurs (Zi) pour les points choisis sur la courbe *f(t)*.

Essais	q (m/s)	t (s)	Zi	$\theta_s^{'}$	$\psi_a^{'}$ (m)	$k_s^{'}$ (m/s)
CH1_1	$1{,}887 \times 10^{-3}$	540	0,74	0,20	0,50	$1{,}171 \times 10^{-4}$
CH1_2	$1{,}782 \times 10^{-3}$	876	0,72	0,28	0,42	$1{,}371 \times 10^{-4}$
CH1_3	$1{,}431 \times 10^{-3}$	1620	0,66	0,58	0,25	$1{,}738 \times 10^{-4}$
CH1_4	$1{,}389 \times 10^{-3}$	1896	0,65	0,60	0,25	$1{,}782 \times 10^{-4}$
CH4_1	$1{,}040 \times 10^{-4}$	660	0,22	0,23	0,08	$2{,}0993 \times 10^{-5}$
CH4_2	$9{,}578 \times 10^{-5}$	1380	0,18	0,60	0,036	$2{,}5964 \times 10^{-5}$
CH4_3	$6{,}944 \times 10^{-5}$	1860	0,19	0,60	0,0285	$2{,}0389 \times 10^{-5}$
CH4_4	$7{,}489 \times 10^{-5}$	2961	0,25	0,60	0,032	$2{,}2787 \times 10^{-5}$
CH4_5	$9{,}155 \times 10^{-5}$	4467	0,49	0,21	0,084	$2{,}1551 \times 10^{-5}$
CH6_1	$1{,}135 \times 10^{-3}$	700	0,60	0,25	0,35	$1{,}027 \times 10^{-4}$
CH6_2	$1{,}139 \times 10^{-3}$	1098	0,79	0,20	0,40	$9{,}574 \times 10^{-5}$
CH6_3	$1{,}198 \times 10^{-3}$	1740	0,92	0,21	0,41	$1{,}004 \times 10^{-4}$
CH6_4	$1{,}247 \times 10^{-3}$	2280	1,01	0,21	0,42	$1{,}040 \times 10^{-4}$
CH8_1	$1{,}048 \times 10^{-3}$	360	0,29	0,59	0,19	$1{,}342 \times 10^{-4}$
CH8_2	$8{,}733 \times 10^{-4}$	840	0,37	0,60	0,177	$1{,}256 \times 10^{-4}$
CH8_3	$7{,}568 \times 10^{-4}$	1620	0,44	0,60	0,168	$1{,}183 \times 10^{-4}$
CH12_1	$8{,}400 \times 10^{-4}$	794	0,30	0,58	0,15	$1{,}035 \times 10^{-4}$
CH12_2	$1{,}260 \times 10^{-3}$	1350	0,53	0,60	0,169	$1{,}197 \times 10^{-4}$
CH12_3	$1{,}141 \times 10^{-3}$	1560	0,36	0,60	0,155	$1{,}118 \times 10^{-4}$
CH12_4	$9{,}169 \times 10^{-4}$	2220	0,47	0,60	0,15	$1{,}094 \times 10^{-4}$
CH12_5	$6{,}497 \times 10^{-4}$	2520	0,53	0,60	0,136	$9{,}855 \times 10^{-5}$
CH14_1	$2{,}054 \times 10^{-3}$	390	0,61	0,21	0,54	$1{,}307 \times 10^{-4}$
CH14_2	$1{,}805 \times 10^{-3}$	840	0,50	0,60	0,282	$2{,}036 \times 10^{-4}$
CH14_3	$1{,}688 \times 10^{-3}$	1246	0,56	0,60	0,277	$1{,}989 \times 10^{-4}$
CH14_4	$1{,}605 \times 10^{-3}$	1624	0,61	0,60	0,275	$1{,}961 \times 10^{-4}$
CH15_1	$1{,}207 \times 10^{-4}$	540	0,22	0,20	0,077	$1{,}849 \times 10^{-5}$
CH15_2	$1{,}164 \times 10^{-4}$	1359	0,32	0,20	0,08	$1{,}893 \times 10^{-5}$
CH15_3	$9{,}927 \times 10^{-5}$	2164	0,38	0,21	0,077	$1{,}888 \times 10^{-5}$
CH15_4	$7{,}547 \times 10^{-5}$	3240	0,45	0,20	0,083	$1{,}919 \times 10^{-5}$
CH17_1	$9{,}315 \times 10^{-4}$	1140	0,43	0,60	0,178	$1{,}272 \times 10^{-4}$
CH17_2	$6{,}155 \times 10^{-4}$	2011	0,48	0,60	0,148	$1{,}052 \times 10^{-4}$
CH17_3	$3{,}784 \times 10^{-4}$	3840	0,53	0,60	0,126	$8{,}902 \times 10^{-5}$

Figure 3.55 : Fuseau des fonctions de conductivité hydraulique (selon les données présentées au tableau 3.20) de l'ensemble des mesures effectuées sur la halde no 1.

Figure 3.56 : Valeurs des teneurs en eau à saturation mesurées à la surface de la halde no 1.

Figure 3.57 : Valeurs des pressions d'entrée d'air (AEV) mesurées à la surface de la halde no 1.

Figure 3.58 : Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation mesurées à la surface de la halde no 1.

De point de vue statistique, le test de Kolmogorov-Smirnov (Haan, 1977) montre que les trois séries de valeurs ($\theta_s^{'}, \psi_a^{'}$ et $k_s^{'}$) ne suivent ni une distribution normale ni

lognormale. Le tableau 3.21 présente la moyenne et l'écart type de ces trois séries de paramètres (le nombre de mesure est de 32).

Tableau 3.21 : Moyenne et écart type des propriétés hydriques des stériles à la surface de la halde no1.

	$\theta_s^{'}$	$\psi_a^{'}$ (m)	$k_s^{'}$ (m/s)
Moyenne	0,44	0,21	$9{,}9 \times 10^{-5}$
Ecart type	0,19	0,14	$5{,}8 \times 10^{-5}$

L'approche d'interprétation d'essais d'infiltration présentée dans ce chapitre nous a permis d'estimer les paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour le sable Kam Kotia en laboratoire, et pour 8 essais effectués sur le banc supérieur de la halde no 1. Les trois séries de valeurs des paramètres $\theta_s^{'}, \psi_a^{'}$ et $k_s^{'}$ (tableau 3.20), obtenus après l'interprétation des 8 essais *in situ*, seront reprises pour l'évaluation de leurs corrélations spatiales (c'est-à-dire leur variabilité en fonction des distances qui les séparent) dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES HALDES À STÉRILES STATISTIQUEMENT HOMOGÈMES

Les essais d'infiltration présentés au chapitre 3 permettent d'estimer les caractéristiques hydriques des matériaux d'une halde. Les résultats d'essais aident à faire un choix éclairé sur les propriétés à adopter dans les simulations numériques. Le but de l'ensemble des simulations présentées ici est d'évaluer l'effet des propriétés, avec variabilité spatiale des caractéristiques hydriques, sur le comportement hydrogéologique des haldes. On vise aussi à évaluer l'importance et l'impact des écoulements préférentiels sur le mouvement de l'eau, qui affecte la génération du DMA (ou du drainage neutre contaminé, DNC). Ces investigations font suite aux travaux réalisés par Fala (2002) sur le comportement hydrogéologique des haldes. Dans ce chapitre on traite le cas de haldes statistiquement homogènes (les propriétés hydriques des stériles possèdent une seule moyenne et écart-type). Le chapitre 5 présentera un cas de haldes statistiquement hétérogènes (propriétés hydriques des stériles qui possèdent deux moyennes et écarts-types). Avant de passer aux simulations numériques, on présente tout d'abord certaines notions relatives à la variabilité spatiale des propriétés des sols et comment il est possible d'en tenir compte dans les modèles numériques.

4.1 Variabilité spatiale des propriétés des sols

4.1.1 Hétérogénéité

L'hétérogénéité (ou l'homogénéité) des propriétés des sols (et autres matériaux meubles) peut être définie en terme de la variabilité spatiale de propriétés telles la densité, la teneur en eau à saturation, la distribution granulométrique, etc. Puisque la

plupart de ces propriétés sont définies et mesurées par rapport à un élément de volume de taille limitée, la définition de l'homogénéité (et de l'hétérogénéité) des sols dépend des dimensions de cet élément. Généralement, plus le volume est grand, plus l'hétérogénéité est réduite et plus les propriétés mesurées sont uniformes (Miyazaki, 2006). A contrario, plus l'élément de volume considéré est petit, plus la différence des propriétés mesurées d'un élément à l'autre est grande, montrant ainsi plus d'hétérogénéité pour l'ensemble des éléments.

4.1.2 Volume élémentaire représentatif

La taille d'un élément utilisée pour définir l'hétérogénéité sur le terrain est appelée le volume élémentaire représentatif (VER) (e.g. Hillel, 1998; Miyazaki, 2006; Chin, 2006). Pour être représentatif de l'ensemble du milieu, la grandeur d'un VER est généralement définie par trois critères (Miyazaki, 2006) :

- un VER doit produire un écart type minimal au niveau de la valeur des mesures de la propriété.

- un VER doit être représentatif de la structure globale du milieu.

- un VER doit permettre l'application de modes opératoires pratiques et non encombrants pour la mesure des propriétés d'intérêt.

Le premier de ces 3 critères demande usuellement un grand VER, car plus un VER est grand et plus faible sera l'écart type des mesures pour l'ensemble des éléments. Le deuxième critère, par contre, nécessite un petit VER pour que les propriétés locales soient représentées dans un VER. Le troisième critère est de nature pratique mais il est très important car des mesures, opérationnellement compliquées, peuvent donner lieu à des imprécisions. Ce critère exige des dimensions modérées d'un VER pour que les

mesures soient commodes. Une fois les dimensions du VER définies pour un site donné, on considère les mesures indépendantes d'un VER à un autre. Les propriétés globales sont alors déterminées par l'ensemble des mesures provenant de chaque VER testé.

4.1.3 Variabilité spatiale

Pour définir l'hétérogénéité *in situ* en termes de VER, il faut supposer que les VER sont indépendants. Cela veut dire que chaque propriété (mesurée sur un VER) est considérée comme indépendante (Miyazaki, 2006). Par ailleurs, il est admis que la valeur d'une même propriété mesurée dans deux volumes de sol dépend de la distance qui les sépare : plus les VER sont proches, plus leurs propriétés sont proches. Ceci est dû au fait que deux VER proches possèdent généralement un même historique géologique et géographique qui leur confère des propriétés similaires (Miyazaki, 2006). Ce type de variabilité spatiale des propriétés des sols peut être traité statistiquement. Elle ne concerne toutefois pas, en général, les défauts structuraux à grande échelle tels que les stratifications, les macropores, les fissures, etc. Certains de ces types d'hétérogénéité ne peuvent pas être traités statistiquement bien qu'ils aient une grande influence sur les propriétés d'un sol (Miyazaki, 2006).

Une approche permettant d'examiner quantitativement la variabilité spatiale des propriétés des sols est basée sur le coefficient d'autocorrélation (Warrick et al., 1980) :

$$\rho_E(J) = \frac{1}{\sigma_E^2}\left(\frac{1}{n-J-1}\right)\sum_{i=1}^{n-J}(x_i - \mu_E)(x_{i+J} - \mu_E) \tag{4.1}$$

x_1, x_2,.... x_n sont les mesures de la propriété aux endroits 1,2,3,... n.

J sert à séparer les intervalles de distance entre les VER ("lag position J").

μ_E est la moyenne des mesures x_i.

σ_E est l'écart type des mesures x_i.

Pour un J donné, le ρ_E obtenu représente l'autocorrélation de x_1 avec x_{1+J} , x_2 avec x_{2+J} ,..., et de x_{n-J} avec x_n .

Le coefficient d'autocorrélation ρ_E atteint une valeur maximale de 1 pour J=0. Lorsque les mesures sont spatialement corrélées, ρ_E diminue progressivement au fur et à mesure que J augmente. Dans le cas contraire, les valeurs de ρ_E se situent près de 0 (ou varient d'une façon désordonnée). Pratiquement, des mesures spatialement corrélées signifient que deux VER situés à des endroits proches l'un de l'autre possèdent des propriétés assez similaires (Warrick et al., 1980); plus les mesures sont éloignées et plus leur propriétés diffèrent.

HYDRUS2D (Simunek et al., 1999) est utilisé ici pour étudier l'effet de la variabilité spatiale des propriétés hydriques sur le mouvement de l'eau dans les haldes. Pour y parvenir, ce logiciel utilise la procédure décrite dans ce qui suit. Notons que d'autres approches peuvent être appliquées pour appréhender la variabilité spatiale des propriétés hydriques des sols (e.g., Smith et Freeze, 1979; Zhang, 2002; Yetes et Warrick, 2002; Vereecken et al., 2007).

Supposons que l'on cherche à générer (numériquement) un champ 2D de valeurs d'un paramètre A_{ij} ayant les caractéristiques suivantes :

- Les valeurs sont définies dans une grille i=1,2, ... I et j=1,2, ...M;
- La population est normalement distribuée avec une moyenne de μ_A et un écart type σ_A (N(μ_A , σ_A));
- Le processus stochastique est stationnaire (un seul μ_A et σ_A) et posséde une structure autocorrélée définie par la relation exponentielle suivante (Freeze, 1980; El Kadi, 1986):

$$\rho_A(l) = \exp(-\alpha_A |l|) \tag{4.2}$$

ρ_A est le coefficient d'autocorrélation à la distance l; α_A [L^{-1}] est appelé le paramètre d'autocorrélation spatial pour A. $1/\alpha_A$ est appelé la longueur de corrélation; elle représente la distance moyenne sur laquelle les valeurs A_{ij} sont corrélées.

La valeur de ρ_A définie par l'équation 4.2 découle d'un modèle empirique général de la fonction d'autocorrélation. Il est largement utilisé pour décrire la distribution spatiale des propriétés géologiques, géotechniques et hydrogéologiques (Smith et Freeze, 1979). On aura donc une représentation à 3 paramètres pour la population normale à générer, soit N(μ_A, σ_A, α_A). La valeur de A_{ij} peut alors être reliée à une série ε_{ij} , prise dans la population N(0,1, α_A), comme suit :

$$A_{ij} = \mu_A + \varepsilon_{ij}\sigma_A \tag{4.3}$$

La génération du champ A_{ij} (i=1à I et j=1à J) peut se réduire donc à la génération d'un champs de résidus ε_{ij} à partir du processus stochastique N(0,1, α_A).

Pour générer ce champ, on utilise une variable aléatoire w_m dont la distribution est donnée par la fonction G_m en relation avec la fonction d'autocorrélation ρ_A pour ε_{ij}. Le champ des résidus (variable aléatoire qui affecte l'écart type σ_A) est donné par (Mejia et Rodriguez-Iturbe, 1974; Freeze, 1980; El Kadi, 1986) :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon(x_i, y_j) = \left(\frac{2}{N'}\right)^{1/2} \sum_{m=1}^{N'} \cos\left[w_m\left(x_i \sin\gamma_m + y_j \cos\gamma_m + \phi_m\right)\right] \tag{4.4}$$

où N'>50; γ_m et ϕ_m sont pris d'une distribution uniforme entre [0, 2π] (variable aléatoire dont la fonction de densité de probabilité est égale à $1/2\pi$ dans l'intervalle [0, 2π] est nulle ailleurs). La variable w_m est définie par :

$$w_m = \alpha_A \left\{ \left[\frac{1}{1-G_m} \right]^2 - 1 \right\}^{1/2} \tag{4.5}$$

où G_m est choisi selon une distribution uniforme dans l'intervalle (0,1).

Il est aussi possible d'utiliser un modèle d'autocorrélation 3D (Chin, 2006):

$$\rho_A(x,y,z) = \exp(-((\alpha_1 x)^2 + (\alpha_2 y)^2 + (\alpha_3 z)^2)^{1/2}) \tag{4.6}$$

où α_i [L^{-1}] (i=1, 2 ou 3) représente le paramètre d'autocorrélation selon les directions x, y et z; $1/\alpha_i$ est la longueur de corrélation selon la direction x, y ou z.

On a ici appliqué ce modèle empirique aux valeurs de $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ obtenues sur le terrain (tableau 3.20). Ces données ont permis d'estimer la longueur de corrélation selon chaque direction pour les 3 paramètres (voir tableau 4.1), en ajustant le modèle empirique (équation 4.6) sur les résultats obtenus à partir du coefficient d'autocorrélation réel (équation 4.1). La figure 4.1 montre les coefficients d'autocorrélation en fonction de la distance pour les trois paramètres. Dans cette figure, la relation 4.6 (ρ_A empirique, avec A qui représente $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ ou $\theta_s^{'}$) est ajustée aux coefficients d'autocorrélation calculés à l'aide de l'équation 3.1 (ρ_A calculé, avec A qui représente $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ ou $\theta_s^{'}$)

Tableau 4.1 : Longueurs de corrélation pour $\psi_a^{'}$, $k_s^{'}$ et $\theta_s^{'}$ (R^2 est le coefficient de corrélation qui mesure ici le degré d'ajustement entre les données et le modèle empirique).

	$\theta_s^{'}$	$\psi_a^{'}$	$k_s^{'}$	$\ln(k_s^{'})$
$1/\alpha_1$ selon les x (m)	14,7	14,2	12,2	419,4
$1/\alpha_2$ selon les y (m)	54,4	150,5	14,8	34,6
$1/\alpha_3$ selon les z (m)	0,1	0,1	0,3	0,7
R^2	0,71	0,55	0,69	0,72

On remarque que les longueurs de corrélation sont reliées à l'étendu du domaine de mesure (surtout pour $\psi_a^{'}$ et $\theta_s^{'}$). Elles sont élevées selon la direction des x et des y, qui représentent la largeur et la longueur de la zone où les mesures ont été effectuées. Elles sont faibles selon la direction des z qui représente la profondeur des mesures (voir figure 3.49 et tableau 3.20). Quant à la conductivité hydraulique, les longueurs de corrélation sont semblables selon les deux directions x et y. La longueur de corrélation selon z est comparable à celles des deux autres paramètres (voir tableau 4.1). Ceci veut dire que les valeurs des propriétés hydriques sont relativement proches les unes des autres sur une grande distance selon l'axe y (qui montre la plus grande longueur de corrélation). En x, la longueur de corrélation est un peu plus faible qu'en y de sorte que les écarts entre les valeurs des propriétés sont usuellement plus grands pour une distance du même ordre de grandeur que la longueur de corrélation selon l'axe des y. Cette tendance est encore plus marquée en z, qui montre une longueur de corrélation nettement plus petite. L'utilisation de $\ln(k_s^{'})$ donne une légère amélioration de R (0,85 au lieu de 0,83). Les longueurs de corrélation sont plus élevées dans ce cas (voir tableau 4.1). Ceci donne une idée de la différence qu'il peut y avoir entre la longueur de corrélation d'une propriété et celle du logarithme de cette propriété (la conductivité hydraulique à saturation est généralement considérée comme une propriété qui suit une loi lognormale sur le terrain; Warrick et Nielsen 1980).

.

a)

b)

c)

Figure 4.1 : Autocorrélation spatiale en prenant le point CH17 (figure 3.49) comme origine. a) de $\theta_s^{'}$. b) de $\psi_a^{'}$ et c) de $k_s^{'}$.

HYDRUS2D (Simunek et al., 1999) génère un champ 2D de facteurs d'échelle relatifs à la conductivité hydraulique (α_k), à la succion (ou la pression, α_ψ) et à la teneur en eau (α_θ) (voir par exemple la figure 4.9 plus loin). Tout revient donc à considérer le champ des paramètres A_{ij} comme étant un champ de facteurs d'échelle (relatif à la conductivité hydraulique, à la succion et à la teneur en eau) dans l'équation 4.3. Chaque point sur les figures 4.9a,b et c indique que la conductivité hydraulique (dans la fonction de conductivité hydraulique), la succion (dans la fonction de la conductivité hydraulique et sur la courbe de rétention d'eau) et la teneur en eau (sur la courbe de rétention d'eau) ont été multipliées par des facteurs d'échelle spécifiques (facteurs multiplicateurs sans unité, voir figure 4.2). L'étendue de l'espace où les facteurs d'échelle sont proches dépend de la valeur de la longueur de corrélation ($1/\alpha_A$) selon la direction horizontale et verticale. La distribution des facteurs d'échelle suit une loi lognormale avec une moyenne de 1 est un écart type σ_k (relatif à la conductivité hydraulique), σ_ψ (relatif à la succion) et σ_θ (relatif à la teneur en eau). On considère souvent en pratique que les propriétés hydrauliques suivent une loi lognormale (surtout la conductivité hydraulique et donc leur logarithme suivent des lois normales). Les valeurs des paramètres du modèle analytique de van Genuchten entrées au départ, sont considérées comme valeurs moyennes. Notons que bien qu'ils jouent des rôles similaires, ces facteurs d'échelle sont différents de ceux utilisés au chapitre 3. Ici, ils n'ont pas d'unité car on n'a pas besoin de quantités de références (voir figure 4.2). Ils permettent de faire le lien entre les propriétés moyennes et les propriétés réellement appliquées selon l'emplacement dans la halde.

a) b)

Figure 4.2 : Facteurs d'échelle. a) relatifs à la pression (α_ψ), b) relatifs à la teneur en eau et à la conductivité hydraulique (α_θ et α_k respectivement).

4.2 Définition des conditions de modélisation

4.2.1 Caractéristiques des matériaux

Les propriétés hydriques des matériaux de la halde de mine Laronde (évaluées au chapitre précédent; voir aussi Gamache-Rochette, 2004) indiquent que les stériles se comportent globalement comme un sable grossier. Pour représenter les stériles, on utilise ici les caractéristiques d'un sable grossier (appelé SBL). À titre de comparaison, on utilisera aussi un autre matériau de conductivité hydraulique plus élevée. Il s'agit d'un matériau graveleux (GRV). Le rapport ψ_a/ψ_w de GRV qui s'approche de celui des stériles (voir tableau 3.16). D'autres séries de simulations présenteront une combinaison de ces deux matériaux dans une même halde, ou la combinaison d'un troisième matériau plus fin (matériau silteux SLT) avec le matériau graveleux GRV (voir scénarios étudiés plus bas). Les propriétés de ces matériaux ont été tirées d'études antérieures (Aubertin et al., 1996; Bussière, 1999; Fala, 2002). Les caractéristiques des matériaux SBL et GRV ont été privilégiées dans le choix des matériaux pour effectuer les simulations numériques (plutôt que celles estimées à l'aide des essais d'infiltration)

parce qu'une certaine incertitude demeure au sujet du rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (estimé à l'aide d'essais en laboratoire dans le cadre d'autres projets) et de la teneur en eau à saturation (essais d'infiltration vraisemblablement effectués dans un volume élémentaire non représentatif). L'utilisation des deux matériaux SBL et GRV permet néanmoins de donner un portrait général du comportement des haldes à stériles. Les propriétés du matériau SBL (en termes de pression d'entré d'air (ψ_a=AEV et de conductivité hydraulique à saturation k_s) sont similaires à celle mesurées sur la partie superficielle de la halde no 1. En plus, l'adoption d'une variabilité spatiale (à divers degrés) des propriétés hydriques de SBL avec une distribution lognormale et une forte corrélation selon une direction donnée, permet de couvrir les caractéristiques mesurées sur la partie superficielle de la halde no 1. Les simulations avec l'autre matériau (GRV) représente le cas où une halde se comporte (globalement) comme un matériau encore plus grossier (un comportement semblable à celui d'un matériau plus fin qu'un sable n'a pas été observé sur le terrain). La figure 4.3 présente les courbes de rétention d'eau (CRE) et les fonctions de conductivité hydraulique des 3 matériaux (SBL, GRV et SLT). Les caractéristiques hydriques de ces matériaux sont celles obtenues en drainage (comme c'est habituellement le cas). On reconnaît cependant que cette simplification (i.e. ignorer les effets d'hystérésis) pourrait expliquer les différences parfois observées entre des comportements réels et prédits.

Le tableau 4.2 donne les paramètres des équations de van Genuchten (1980) pour ces matériaux. La pression d'entrée d'air et le rapport ψ_a/ψ_r (ψ_r est la pression à la teneur en eau résiduelle) sont donnés au tableau 4.3.

Figure 4.3 : Courbes de rétention d'eau et fonctions de conductivité hydraulique en drainage des trois matériaux.

Tableau 4.2 : Paramètres de la CRE du modèle analytique de van Genuchten (1980) pour les trois matériaux utilisés (en drainage).

	θ_r	θ_s	α_v (m^{-1})	n_v	k_s (m/s)
GRV	0	0,39	14960	1,45	4,7x10^{-3}
SBL	0,01	0,29	3	3,72	5,1x10^{-5}
SLT	0,054	0,43	0,36	2,88	3,15x10^{-6}

On note que les matériaux GRV et SBL possèdent un faible AEV comparativement à celui de SLT, car ils sont plus grossiers.

Tableau 4.3 : Pressions d'entrée d'air (ψ_a=AEV) et d'entrée d'eau ($\psi_w = \psi_r$ = pression correspondant à la teneur en eau résiduelle en drainage).

	ψ_a (m)	ψ_a / ψ_r
GRV	5,3x10^{-6}	0,0171
SBL	0,175	0,3044
SLT	1,141	0,2029

Pour tenir compte de l'hétérogénéité des propriétés hydriques des stériles, on adopte l'approche stochastique mentionnée plus haut dans les simulations de l'écoulement de l'eau dans les haldes. HYDRUS2D permet de prendre les caractéristiques hydriques d'un matériau comme valeurs moyennes sur la halde (dans notre cas SBL et/ou GRV et/ou SLT), alors que les valeurs effectives varient selon une distribution spatiale choisie

à l'avance. Le traitement stochastique peut porter sur la conductivité hydraulique k ou/et la succion ψ ou/et la teneur en eau volumique θ. HYDRUS2D permet une distribution lognormale de ces paramètres.

Dans les simulations de nature stochastique, les paramètres à entrer sont la moyenne de la variable (valeur nominale : k_s, θ_s, θ_r α_v, n_v), l'écart-type des facteurs d'échelle (l'étendue de la variation souhaité) et la longueur de corrélation (mode de distribution de la caractéristique dans l'espace : $1/\alpha_A$ relatif à la conductivité hydraulique et/ou la succion et/ou la teneur en eau volumique). HYDRUS2D génère pour chaque série de paramètres une distribution de facteurs d'échelle pour la conductivité hydraulique et/ou la pression et/ou la teneur en eau (i.e. des multiples de la valeur nominale). La distribution aura une forte corrélation (ou autocorrélation) selon une direction (horizontale, verticale ou mixte) quand les facteurs d'échelle forment des rangées parallèles de facteurs proches les uns des autres, selon cette direction. Pratiquement, ceci est équivalent à avoir des "pseudo" stratifications horizontales, verticales ou obliques dans la halde (voir par exemple figures 4.9, 4.18 et 4.27 plus loin). Les valeurs des longueurs de corrélation utilisées varient de 5 à 1000 m (dans toutes les directions). Le choix d'une longueur de corrélation pour une simulation et une direction données dépend de la distribution spatiale des propriétés hydriques recherchées. Ce qui est en lien avec les distributions granulométriques observées dans les haldes (voir par exemple la halde de la figure 2.8). Quant aux écarts types, ils sont de 1, 5, 10 ou 100 pour la conductivité hydraulique et la succion et de 0,1 pour la teneur en eau (étant donné sa faible variabilité par rapport à la conductivité hydraulique ou à l'AEV qui peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur). Le but est d'évaluer l'effet d'une augmentation progressive (jusqu'à une valeur extrême) de l'écart type sur le comportement hydrique des haldes. Signalons que la génération de la distribution stochastique des caractéristiques hydriques (conductivité hydraulique, pression et teneur en eau) se fait d'une façon indépendante pour chacune.

4.2.2 Conditions frontières et initiales

Les conditions appliquées à la surface des haldes sont montrées à la figure 4.4 (les valeurs de précipitation, ou infiltration, appliquées numériquement en surface sont constantes pour tout le mois, pour chacun des mois de mars à novembre). Elles représentent des conditions climatiques typiques de l'ouest du Québec et consistent en :

- La moyenne quotidienne des précipitations (Pr. Latulipe, calculée à partir d'une moyenne mensuelle) enregistrées à la station de Latulipe (Ouest du Québec) entre 1971 et 2000 (Environnement Canada, 2007). Signalons que les valeurs de précipitations données par le Ministère comprennent l'apport de la neige (1 cm de neige = 1 mm de pluie).
- La moyenne quotidienne des précipitations (Pr. Addis Abeba, calculée à partir d'une moyenne mensuelle) provenant d'Addis abeba (Éthiopie, Dingman 1994). Ce cycle sera utilisé au chapitre 6 pour simuler une année particulièrement pluvieuse au Québec.
- La moyenne quotidienne de l'évaporation potentielle (Ev. Latulipe, calculée à partir d'une moyenne mensuelle sans tenir compte de la sublimation) enregistrées à la même station entre 1971 et 1999 (Environnement Canada, 2007).

Signalons que durant les années d'observation à la station Latulipe, il y avait eu des précipitations de pluie en fin d'automne et en hiver (et donc des températures supérieures à 0°C) durant les trois premiers et les 2 derniers mois de certaines années. De même, les statistiques montrent que seuls les mois de juillet et d'août ont été exempts de chute de neige pendant la période d'observation (voir données météo de la station Latulipe en annexe 4). Il est donc jugé plus représentatif de considérer l'infiltration simultanée de la pluie et de la neige tout au long de l'année dans la halde (sans période de gel prolongée).

Comme conditions initiales, une teneur en eau résiduelle a été adoptée dans toutes les simulations (sauf indication contraire). Ceci veut dire que la nappe se trouve à une profondeur égale ou supérieure au ψ_r de la halde (ce qui correspond aux conditions de mise en place des stériles). À la base, un drainage libre a été adopté (représentatif de la couche de blocs qu'on y retrouve usuellement). Dans la première série de calculs, nous avons visé l'atteinte du régime quasi-permanent dans toutes les simulations. Ceci veut dire que les mêmes cycles (Pr. Latulipe et Ev. Latulipe) ont été appliqués plusieurs fois de suite (équivalent à plusieurs années), en reprenant dans chaque simulation i les résultats de la simulation i-1 comme conditions initiales. À la fin de la première année, le front de mouillage atteint une certaine profondeur p1 (selon les caractéristiques hydriques des stériles et des conditions initiales); à la fin de la deuxième année ce même front atteint la profondeur p2 (p2>p1)... et ainsi de suite jusqu'à ce que le front de mouillage franchisse et dépasse la base de la halde. Après l'application des cycles Pr. Latulipe et Ev. Latulipe un certain nombre de fois (n), les contours de teneur en eau et de succion commencent à se répéter; c'est-à-dire qu'à l'application des mêmes cycles (pour la n+1 ème fois ou plus), on retrouve les mêmes contours de teneur en eau et de succion (dans toute la halde) que ceux à l'année n, à n'importe quel moment de l'année. Le nombre n de cycles (Pr. Latulipe et Ev. Latulipe) à appliquer pour atteindre ce régime (dit quasi-permanent) dépend des propriétés hydriques et géométriques de la halde. Une fois ce régime atteint, les contours de teneurs en eau et de succion et donc le comportement hydrique de la halde deviennent indépendants des conditions initiales (voir Fala et al. 2006 pour plus de détails à ce sujet). Ceci donne des renseignements plus justes sur le comportement hydrique des haldes à long terme.

La configuration de base étudiée ici est celle d'une halde circulaire (axisymétrique). À quelques reprises, un modèle numérique 2D a aussi été utilisé pour comparaison. L'ensemble des modèles utilisés sera présenté au début de chaque série de simulations (voir scénarios à l'étude au paragraphe suivant). Dans ces modèles, les éléments utilisés sont triangulaires (cas général, sans restriction du nombre d'éléments dans

HYDRUS2D). Le nombre d'éléments est généralement d'environ 40000 par simulation. La durée de calcul est de quelques jours (par simulation) pour la première série de calculs. Elle varie de quelques heures à quelques jours pour les autres séries (voir scénarios à l'étude au paragraphe suivant). La vitesse des processeurs utilisés (Pentium 4 ou Centrino) varie de 1 à 2,80 GHz. Le calcul pour la première série de simulations a nécessité plus de temps car il fallait atteindre le régime quasi-permanent qui survient entre 4 et 10 ans pour les simulations de cette série (avec les critères de convergence par défaut d'HYDRUS2D, qui se basent sur la tolérance sur la teneur en eau volumique et la pression). Les résultats sont présentés à la section 4.3.

Période	Pr. Latulipe (m/s)	Pr. Addis Abeba (m/s)	Ev. Latulipe (m/s)
Janvier	2.264E-08	4.977E-09	0.000E+00
Février	1.769E-08	1.470E-08	0.000E+00
Mars	2.146E-08	2.546E-08	0.000E+00
Avril	2.591E-08	3.322E-08	5.324E-09
Mai	3.063E-08	3.322E-08	2.743E-08
Juin	3.314E-08	5.289E-08	3.924E-08
Juillet	3.638E-08	1.076E-07	4.711E-08
Août	3.600E-08	1.157E-07	3.993E-08
Septembre	3.706E-08	7.373E-08	2.431E-08
Octobre	3.356E-08	7.755E-09	1.030E-08
Novembre	2.919E-08	5.787E-09	0.000E+00
Décembre	2.549E-08	1.968E-09	0.000E+00
Total (m/an)	0.91	1.24	0.50

Figure 4.4 : Conditions climatiques utilisées. Légende : Pr = précipitations. Ev.= évaporation (Environnement Canada, 2007).

4.2.3 Scénarios à l'étude

Plusieurs séries de simulations ont été réalisées. Les objectifs visés dans chaque série de simulations seront présentés plus loin. Les résultats des modélisations sont présentés en six séries :

- Dans la série 1 (S1 à S20), on considère des haldes avec les propriétés hydriques d'un seul matériau soit, SBL ou GRV. Les résultats de cette série de simulations

correspondent à ceux obtenus après l'atteinte du régime quasi-permanent (après 4 à 10 ans dans les cas traités ici).

- Dans la série 2 (S21 à S27), on combine les matériaux SBL et GRV ensemble, sous forme d'une couche horizontale de faible épaisseur de SBL sur une couche plus épaisse de GRV (effets de barrière capillaire 1D).

- Dans la série 3 (S28 à S35), on incline l'interface SBL/GRV pour favoriser les effets de barrière capillaire 2D; l'angle d'inclinaison est de 5%.

- Dans la série 4 (S36 à S38), on augmente l'angle d'inclinaison de l'interface SBL/GRV à 10%.

- Dans la série 5 (S39 à S46), on explore l'effet d'un changement du matériau fin (on utilise le silt SLT à la place du sable SBL) sur le comportement global de la halde; l'angle d'inclinaison SLT/GRV est de 5%.

- Dans la série 6 (S47 à S49), on augmente l'angle d'inclinaison de l'interface SLT/GRV à 10 %.

Dans toutes les simulations, les valeurs moyennes des caractéristiques hydriques correspondent à celles introduites au départ (tableau 4.2). Au niveau local, ces caractéristiques sont variables selon une distribution log-normale et selon une corrélation spatiale pré-choisie (définie pour chaque cas).

Les principaux résultats sont donnés sous forme de contours de teneur en eau à la fin de 4 périodes (dans la série 1, les contours de teneur en eau présentés sont ceux calculés pour l'année qui suit l'arrivée au régime quasi-permanent), soient :

- 3 mois après le début du cycle (fin du mois de mars);
- 6 mois après le début du cycle (fin du mois de juin); ce mois correspond au début d'une évaporation plus intense (voir figure 4.4);
- 8 mois après le début du cycle (fin du mois d'aout); c'est le dernier mois où l'évaporation est supérieure aux précipitations.
- 12 mois après le début du cycle (fin du mois de décembre).

Les caractéristiques des stériles sont présentées sous forme de distribution de facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique, de la pression et de la teneur en eau, avant les résultats de chaque simulation.

4.3 Simulation de haldes statistiquement homogènes (un seul matériau, Série 1)

On commence par 2 simulations de base avec S1 et S2 où les caractéristiques hydriques sont uniformes sur tout la halde (matériau SBL et GRV). La configuration géométrique adoptée, basée sur un cas général (type mine Laronde), pour les simulations de la série 1 est montrée à la figure 4.5.

Figure 4.5 : Configuration géométrique des haldes de la série 1, cas des simulations S1 à S22.

Le tableau 4.4 donne les caractéristiques statistiques des simulations S1 à S20 (série 1).

Tableeau 4.4 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S1 à S20.

Id.*	Mat.**	σ_k	σ_ψ	σ_θ	k		ψ		θ	
					Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z
S1	GRV	0	0	0						
S2	SBL	0	0	0						
S3	GRV	1	1	0,1	100	5	100	5	100	5
S4	SBL	1	1	0,1	100	5	100	5	100	5
S5	GRV	5	5	0,1	100	5	100	5	100	5
S6	SBL	5	5	0,1	100	5	100	5	100	5
S7	GRV	10	10	0,1	100	5	100	5	100	5
S8	SBL	10	10	0,1	100	5	100	5	100	5
S9	GRV	1	1	0,1	5	100	5	100	5	100
S10	SBL	1	1	0,1	5	100	5	100	5	100
S11	GRV	5	5	0,1	5	100	5	100	5	100
S12	SBL	5	5	0,1	5	100	5	100	5	100
S13	GRV	10	10	0,1	6	100	5	100	5	100
S14	SBL	10	10	0,1	6	100	5	100	5	100
S15	GRV	1	1	0,1	100	90	100	90	100	90
S16	SBL	1	1	0,1	100	90	100	90	100	90
S17	GRV	5	5	0,1	100	90	100	90	100	90
S18	SBL	5	5	0,1	100	90	100	90	100	90
S19	GRV	10	10	0,1	100	90	100	90	100	90
S20	SBL	10	10	0,1	100	90	100	90	100	90

*Identification; **Matériaux; σ_k, σ_ψ et σ_θ : Écart-type relatif à k, ψ et θ; Cor-x : Longueur de corrélation selon l'axe des x (m).

4.3.1 Cas de base (caractéristiques constantes)

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S1 et S2 sont montrées à la figure 4.6. Les figures 4.7 et 4.8 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 4.6 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S1 et S2.

Figure 4.7 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S1 (avec GRV).

Figure 4.8 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S2 (avec SBL).

Dans les simulations S1 (figure 4.7) et S2 (figure 4.8), la halde est constituée d'un seul matériau (GRV ou SBL). L'eau s'infiltre et se propage dans la halde d'une façon quasi-uniforme (puisque les propriétés hydriques sont uniformes). À la fin de la deuxième et quatrième périodes de calcul (mois juin et de décembre), la partie supérieure de la halde montre une teneur en eau correspondant aux conditions atmosphériques appliquées en surface et la partie inférieure montre une teneur en eau correspondant aux conditions atmosphériques appliquées aux périodes précédentes (mois de mars et d'août). Ceci parce que le régime quasi permanent a été atteint. La teneur en eau volumique varie de 0 à 0,10 et de 0 à 0,04 dans le matériau graveleux et dans le matériau sableux respectivement. La pente au flanc de la halde induit une légère différence au niveau de la teneur en eau : la teneur en eau est plus faible au centre de la halde. Cette différence persiste pendant toute l'année et sur toute la hauteur de la halde. En été, quand

l'évaporation dépasse les précipitations, il se produit un pompage vers la surface et la partie superficielle de la halde se dessèche. C'est ce qui rend le constat, vu plus haut, concernant la teneur en eau en surface et à la base entre la troisième et la deuxième période (mois d'août et de juin respectivement) moins évident. Cette situation ne dure pas tout l'été même si il y a plus d'évaporation que de précipitations pendant la période estivale. La teneur en eau devient alors presque nulle sur une épaisseur d'environ 10 et 25 cm pour GRV et SBL respectivement.

4.3.2 Distribution avec une forte corrélation horizontale

4.3.2.1 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=1

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S3 et S4 sont montrées à la figure 4.9 (pour le cas où on lui attribue une forte corrélation horizontale). Les contours de teneur en eau obtenus sont montrés aux figures 4.10 et 4.11.

Dans les simulations S3 (figure 4.10) et S4 (figure 4.11), on a introduit une légère dispersion des facteurs d'échelle des caractéristiques hydriques (écart type de 1 pour la conductivité hydraulique et la pression et de 0,1 pour la teneur en eau) avec une forte corrélation horizontale (de 100 m comparativement à 5 m verticalement) menant à une stratification plutôt horizontale des propriétés hydriques. On constate que le comportement de la halde change. Le front de remouillage (car les stériles n'étaient pas secs au début) devient presque vertical dans le cas du matériau SBL et il est non uniforme (voir figure 4.11d). L'eau, selon les endroits, se rend plus ou moins loin dans la halde (d'une façon préférentielle donc) à un temps donné. L'eau se déplace plus loin, horizontalement, là où l'AEV est relativement plus grand (voir résultats S3 et S4). De même, le front de "drainage/séchage" (partie superficielle de la halde affectée par pompage d'eau vers la surface) devient lui aussi non uniforme (voir figure 4.11c). Dans

Figure 4.9 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S3 et S4.

Figure 4.10 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S3 (GRV).

Figure 4.11 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S4 (SBL).

le cas du matériau GRV la profondeur du front de "drainage/séchage" reste comparable au cas de base (S1). Par contre dans le cas du matériau SBL, la partie sèche pendant le mois d'août est relativement plus grande que celle de la simulation S2 (quelques décimètres dans S2 contre plusieurs mètres dans S4, voir la figure 4.11c). On trouve aussi des niveaux où la teneur en eau est relativement élevée sans que l'AEV soit nécessairement grand (notamment dans la partie supérieure de la halde où la teneur en eau atteint 0,20 à 0,25 dans S3 et 0,23 à 0,30 dans S4). Cette forte teneur en eau est la conséquence ici d'une plus faible conductivité hydraulique, probablement combinée à un effet de barrière capillaire local (voir partie supérieure de la halde, à la figure 4.9). Dans le reste de la halde, la teneur en eau varie de 0,05 à 0,12 et de 0,01 à 0,05 pour S3 et S4 respectivement.

4.3.2.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=5

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S5 et S6 sont montrées à la figure 4.12. Les figures 4.13 et 4.14 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 4.12 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S5 et S6.

Dans les simulations S5 (figure 4.13) et S6 (figure 4.14), l'écart type des caractéristiques hydriques a été multiplié par 5. Dans le cas du matériau GRV (S5), les résultats sont comparables à ceux de S3 : la teneur en eau varie entre 0 et 0,10 environ. Dans le cas du matériau SBL, la non uniformité du front du remouillage est plus marquée par rapport à celle obtenue pour GRV. Pour le matériau SBL, la teneur en eau varie de 0,01 à 0,14. Les teneurs en eau les plus élevées (de 0,08 à 0,14) s'observent sur une large bande horizontale vers la base de la halde. Cette bande est moins marquée dans le cas du matériau GRV. Dans ce cas, la faible conductivité hydraulique est accompagnée d'un grand AEV (voir les facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique et la succion à ce

Figure 4.13 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S5 (GRV).

Figure 4.14 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S6 (SBL).

niveau à la figure 4.12). Notons que dans la simulation S4 (SBL avec un écart type de 1) on peut distinguer le front de remouillage au mois de décembre (à la fin du cycle; voir figure 4.11), alors que dans S6 (SBL avec un écart type 5 fois plus grand), ceci n'est pas possible. Le front de remouillage dans le dernier cas dépasse l'axe de symétrie de la halde.

4.3.2.3 Distribution avec σ_θ =0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =10

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles pour les simulations S7 et S8 sont montrées à la figure 4.15. Les figures 4.16 et 4.17 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 4.15 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S7 et S8.

Figure 4.16 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S7 (GRV).

Figure 4.17 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S8 (SBL).

Les résultats des simulations S7 (figure 4.16) et S8 (figure 4.17), où l'écart type des caractéristiques hydriques a été multiplié par 10 par rapport à S3 et S4, montrent que la teneur en eau varie de 0 à 0,10 dans S7 (GRV) et de 0 à environ 0,08 dans S8. Le front de remouillage dans S7 est bien visible à l'intérieur de la halde, à la fin du cycle (voir résultats de S7 pour le mois de décembre). Avec une augmentation des écarts types, l'eau va beaucoup plus vite vers l'intérieur de la halde. À partir d'un certain seuil (atteint dans le cas du SBL avec S6, et pas encore atteint dans le cas du GRV pour S7), le front de remouillage dépasse l'axe de symétrie de la halde. Ceci donne une idée de la vitesse avec laquelle l'eau se déplace dans la halde en fonction de l'écart type des propriétés hydriques. Remarquons aussi que dans le cas du matériau SBL, une large partie de la halde se trouve à sa teneur en eau résiduelle au mois d'août. Ceci est relié au fait que le matériau SBL, avec un écart type des propriétés hydriques de 10, se comporte comme un matériau plus fin que dans les simulations S2 ou S4. Ceci permet de garder une conductivité hydraulique relativement élevée même si la succion est élevée. La profondeur du front de séchage/drainage est beaucoup plus importante dans le cas de SBL. Elle atteint plusieurs mètres (environ 5 m) au mois d'août.

4.3.3 Distribution avec une forte corrélation verticale

4.3.3.1 Distribution avec σ_θ =0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =1

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles pour les simulations S9 et S10, sont montrées à la figure 4.18. Les figures 4.19 et 4.20 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Dans les simulations S9 à S14, on applique une forte corrélation des caractéristiques hydriques dans le sens vertical (longueur de corrélation de 100 m comparativement à 5 ou 6 m horizontalement). Pour la simulation S9 (GRV avec un écart-type des

a)

b) c)

Figure 4.18 : Facteurs d'échelle de la conductivité (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S9 et S10.

a) b)

c) d)

Figure 4.19 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S9 (GRV).

Figure 4.20 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S10 (SBL).

caractéristiques hydriques de 1, figure 4.19), le front de remouillage est visible mais il est non uniforme (voir résultats de S9, mois de décembre). La teneur en eau varie de 0 à 0,15 environ. La teneur en eau est plus élevée sur deux bandes verticales qui se trouvent près de la périphérie de la halde. À ces endroits on retrouve des conductivités hydrauliques relativement faibles (voir les facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique à la figure 4.18). Il est à noter qu'avec le matériau sableux SBL on ne distingue presque plus les deux bandes de teneur en eau relativement plus élevée par rapport au reste de la halde (même si la distribution des facteurs d'échelle et leur écart-type sont les mêmes dans les deux cas). C'est la nature du matériau SBL qui est peut être non favorable à une accumulation d'eau dans ces endroits. Dans le cas de SBL (S10 avec un écart type des caractéristiques hydriques de 1), le front de remouillage est sur le point de d'atteindre la base de la halde près du centre (voir S10, mois de décembre). La teneur en eau varie globalement de 0,01 à 0,06 environ. Les endroits où les teneurs en

eau sont plus élevées forment des bandes verticales (voir les résultats de S10 à la figure 4.20) qui alternent avec d'autres bandes de teneurs en eau moins élevées. Les fronts de remouillage et de drainage/séchage dans ces simulations se déplacent préférentiellement du haut vers le bas, à la différence des simulations où la forte corrélation est horizontale (S3 à S8, les fronts de remouillage et de drainage/séchage se déplacent de l'extérieur vers l'axe de la halde).

4.3.3.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=5

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles pour les simulations S11 et S12, sont montrées à la figure 4.21. Les figures 4.22 et 4.23 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 4.21 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S11 et S12.

Figure 4.22 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S11 (GRV).

Figure 4.23 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S12 (SBL).

Pour la simulation S11, avec un écart type de 5 (pour la pression et la conductivité hydraulique), le front de remouillage est visible seulement dans le cas du GRV (voir résultats de S11 pour le mois de décembre à la figure 4.22). La teneur en eau dans cette simulation varie de 0,03 à 0,1 environ, mais elle peut dépasser 0,3 (θ_s moyen = 0,39) à des endroits où la conductivité hydraulique est plus faible, notamment près de la périphérie de la halde. Dans le cas du SBL (S12, figure 4.23), le front de remouillage atteint la base de la halde. La teneur en eau varie de 0 à 0,05 dans la majeure partie de la halde, mais peut atteindre 0,30 (θ_s moyen = 0,29) près de la périphérie de la halde. Encore ici, on retrouve moins de bandes verticales ayant une teneur en eau relativement plus élevée (comparativement à GRV). La profondeur du front de séchage/drainage au mois d'août est beaucoup plus importante dans le cas de SBL (car le matériau SBL est plus fin). Elle est de l'ordre de 4-5 m.

4.3.3.3 Distribution avec σ_θ =0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =10

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles pour les simulations S13 et S14 sont montrées à la figure 4.24. Les figures 4.25 et 4.26 montrent les contours de teneurs en eau obtenus.

Lorsque l'écart type sur la pression et la conductivité hydraulique est de 10, le comportement du GRV (S13, figure 4.25) est semblable à celui observé dans S11. Avec le sable SBL (S14, figure 4.26), le front de remouillage est indétectable et la teneur en eau varie de 0,01 à 0,07. Elle atteint une valeur maximale de 0,25 dans les endroits où la conductivité hydraulique est relativement faible (voir figure 4.24). On remarque que ces endroits sont moins nombreux que dans le cas du GRV. Dans le matériau GRV, la teneur en eau varie entre 0 et 0,08 environ pour la majeure partie de la halde. À certains endroits (sous forme de bandes verticales) la teneur en eau atteint 0,3. Ces bandes sont étroites près du centre de la halde (quelques décimètres) et sont plus larges près de la

a)

b) c)

Figure 4.24 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S13 et S14.

a) b)

c) d)

Figure 4.25 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S13 (GRV).

Figure 4.26 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S14 (SBL).

périphérie (plus d'un mètre). Encore ici, la profondeur du front de séchage/drainage est plus importante dans le cas de SBL (de l'ordre de 5m).

4.3.4 Distribution avec forte corrélation mixte

4.3.4.1 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=1

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S15 et S16 sont montrées à la figure 4.27. Les figures 4.28 et 4.29 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

a)

b) c)

Figure 4.27 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S15 et S16.

a) b)

c) d)

Figure 4.28 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S15 (GRV).

Figure 4.29 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S16 (SBL).

Dans les simulations S15 à S20, la corrélation spatiale des caractéristiques hydriques est presque la même verticalement et horizontalement (90 et 100 m respectivement). Ceci donne, en coupe, des propriétés hydriques orientées selon une direction oblique.

Dans les simulations S15 et S16, l'écart type est de 1 (pour la pression et la conductivité hydraulique). Dans le cas de GRV (S15, figure 4.28), le front de remouillage est visible et il semble plus uniforme que le front de drainage/séchage (voir S15, mois d'août et décembre). La teneur en eau varie entre 0 et 0,12 environ. Dans le cas de SBL (figure 4.29) le front de remouillage et celui de drainage/séchage sont plus uniformes et ils se déplacent obliquement. La teneur en eau varie entre 0,01 et 0,06. On observe des bandes obliques discontinues de teneur en eau (entre 0,05 et 0,05) qui alternent avec d'autres bandes de teneur en eau plus faibles (entre 0,03 et 0,04), en fin de cycle par exemple. La

concordance entre les valeurs de la teneur en eau et la distribution des propriétés hydriques est moins apparente dans le cas de GRV que dans celui de SBL.

4.3.4.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=5

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S17 et S18 sont montrées à la figure 4.30. Les figures 4.31 et 4.32 montrent les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 4.30 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S17 et S18.

Figure 4.31 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S17 (GRV).

Figure 4.32 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S18 (SBL).

Pour les simulations S17 (figure 4.31) et S18 (figure 4.32), on a un écart type 5 fois plus grand par rapport à S15 et S16 (les échelles de teneur en eau sont différentes dans les simulations S17 et S18. Ce qui crée une différence exagérée dans la distribution des teneurs en eau dans les deux simulations). Les teneurs en eau restent dans les mêmes ordres de grandeur que dans les simulations S17 et S18, sauf aux périphéries de la halde (zone de faible conductivité hydraulique) où la teneur en eau peut atteindre 0,09 dans SBL et 0,30 dans GRV. Le front de remouillage est visible, au centre et vers la base de la halde, dans les deux cas. On voit peu la distribution oblique des propriétés hydriques dans le cas de GRV (contrairement à SBL). Le front de drainage/séchage est non uniforme dans SBL et GRV (surtout dans SBL), et il va plus profondément dans le cas de SBL.

4.3.4.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S19 et S20 sont montrées à la figure 4.33. Les figures 4.34 et 4.35 montent les contours de teneur en eau obtenus.

Dans les simulations S19 (figure 4.34) et S20 (figure 4.35, avec un écart type de 10 pour la pression et pour la conductivité hydraulique), la teneur en eau varie de 0 à 0,06 et de 0,01 à 0,04 dans GRV et SBL respectivement (les échelles de teneur en eau sont différentes dans les deux simulations). Dans la partie supérieure vers le centre de la halde, Certaines valeurs dépassant 0,25 dans le gravier et atteignent 0,055 dans le sable (les teneurs en eau dans GRV sont généralement plus élevées que celles dans SBL car pour une pression donnée la conductivité hydraulique de SBL est plus grande -voir figure 4.3- ce qui provoque une accumulation d'eau supérieure dans GRV et donc une teneur en eau supérieure). Le front de remouillage est visible dans le cas du matériau GRV. Il est plus près de la base de la halde comparativement à S18 (figure 4.32), dans le cas du matériau SBL (voir résultats de S20 : la teneur en eau à la

Figure 4.33 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S19 et S20.

Figure 4.34 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S19 (RGV).

Figure 4.35 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S20 (SBL).

base et au centre de la halde au mois de mars est supérieure à celle au mois de décembre). Remarquons que le front de drainage/séchage va plus profondément dans le cas de SBL. Il atteint plus de 6m à la périphérie de la halde, alors que sa profondeur est de l'ordre de 35 cm dans GRV (voir résultats de S19 et S20 au mois d'août). La distribution des variations de la teneur en eau met en relief la distribution oblique des propriétés hydriques. Cet aspect est plus visible dans le cas de SBL.

4.3.5 Sommaire des résultats de simulation de la série 1

Les divers résultats de la série 1 indiquent que la variation de la teneur en eau suit la distribution des caractéristiques hydriques (i.e. les teneurs en eau sont fortement corrélées verticalement dans une distribution où les caractéristiques hydriques sont fortement corrélées verticalement par exemple). Cette tendance est toutefois moins

marquée dans le cas du matériau GRV, surtout lorsque la corrélation est mixte (S15 à S20). Le front de remouillage se déplace lui aussi d'une façon privilégiée, selon la direction de la forte corrélation des propriétés hydriques. Plus l'écart type des propriétés hydriques est élevé plus vite l'eau se déplace dans la halde. Ceci rend le front de remouillage indétectable lorsque l'écart type dépasse un certain seuil (entre 1 et 5), pour le matériau SBL et pour une corrélation des propriétés hydriques fortement verticale ou horizontale. Pour le matériau GRV (avec des corrélations selon les trois directions) et lorsque la corrélation est mixte pour SBL, le front de remouillage est encore détectable même à un écart type des propriétés hydriques supérieur à 10. Ceci est dû au fait que l'eau à plus de distance à parcourir, pour atteindre la base, dans le cas où la distribution des propriétés hydriques est oblique.

La série 1 de simulations illustre donc l'influence du type de corrélation spatiale des propriétés hydriques sur l'écoulement de l'eau vers l'intérieur de la halde. Une corrélation fortement verticale ou fortement horizontale (c'est-à-dire une "pseudo" stratification verticale ou horizontale des propriétés hydriques) mène l'eau en profondeur ou vers l'axe central de la halde (respectivement) plus rapidement qu'une corrélation mixte (pour un écart type donné). Mis à part quelques endroits isolés (généralement là où la conductivité hydraulique est la plus faible), la teneur en eau moyenne pour les divers cas est comparable aux cas de base S1 et S2. Ceci est causé, en partie, par le fait que l'écart type des facteurs d'échelle de la teneur en eau adoptée est assez faible dans toutes les simulations (égal à 0,1). Dans l'ensemble de ces simulations, la teneur en eau varie entre 0 et 0,1 et entre 0,01 et 0,05 environ dans GRV et SBL respectivement (mais elle peut dépasser 0,3 à certains endroits très localisés surtout dans GRV).

La présence de l'eau avec un si faible degré de saturation en présence des sulfures dans les stériles constitue un facteur favorable à la production du DMA (e.g. Molson et al., 2005). Pour pouvoir contrôler la génération du DMA, Fala (2002) a proposé une

configuration avec une couche de matériau fin (comme SBL) qui repose sur des stériles grossiers (comme GRV); dans cette configuration l'interface matériau fin/matériau grossier devrait être légèrement inclinée vers l'extérieur de la halde (Fala et al., 2003, 2005; Molson et al., 2005). En réalité, une halde ne peut pas être représentée (hydrogéologiquement) par seulement deux matériaux distincts. On introduit donc dans les séries de simulations du chapitre suivant une variation des propriétés hydriques selon des distributions préétablies en fonction de la position dans la halde.

Notons que dans les séries qui suivent, on ne cherche pas à atteindre le régime quasi-permanent comme dans le cas des simulations de la série 1. Ici on ne s'intéresse pas au comportement à long terme de la halde mais seulement à son comportement lors d'un seul cycle, puisqu'elle est supposée être encore en construction. Ceci est encore plus vrai dans le cas d'une interface de matériau fin/ matériau grossier inclinée (cas traités plus loin : série 3 à série 6), car la partie imbibée d'eau dans le matériau grossier change au fur et à mesure que la halde d'élargie horizontalement.

CHAPITRE 5

COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES HALDES À STÉRILES STATISTIQUEMENT HÉTÉROGÈNES

Dans les simulations numériques présentées dans ce chapitre (séries 2, 3, 4, 5 et 6), on place une couche de matériau SBL à la surface d'un empilement de GRV, pour chaque banc de la halde. Ceci donne lieu à une halde statistiquement hétérogène, bien que les matériaux SBL et GRV soient statistiquement homogènes individuellement. L'interface GRV/SBL est soit horizontale soit inclinée. La couche peut être le résultat direct de l'utilisation du déversement à la benne comme méthode de construction de la halde (voir section 2.1.1). Notons aussi qu'une configuration assez similaire a été étudiée par d'autre auteurs (e.g., Lamontagne, 2001), afin d'évaluer son efficacité dans le contrôle du DMA.

5.1 Cas d'une interface SBL/GRV horizontale (Série 2)

La figure 5.1 montre la configuration géométrique adoptée pour cette série de simulations.

Figure 5.1 : Configuration géométrique des haldes simulées lors de la série 2 (simulations S21 à S27).

Les paramètres statistiques pour la série 2 sont donnés au tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations de la série 2 (S21 à S27).

Id.*	Mat.**	σ_k	σ_ψ	σ_θ	k		ψ		θ	
					Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z
S21	GRV SBL(h)	0	0	0						
S22	GRV SBL(h)	10	10	0,1	100	6	100	5	100	5
S23	GRV SBL(h)	10	10	0,1	8	100	6	100	5	100
S24	GRV SBL(h)	10	10	0,1	100	90	100	90	100	90
S25	GRV SBL(h)	100	100	0,1	100	5	100	5	100	5
S26	GRV SBL(h)	100	100	0,1	5	100	50	1000	5	100
S27	GRV SBL(h)	100	100	0,1	100	90	100	90	100	90

*Identification; **Matériaux; σ_k, σ_ψ et σ_θ : Écart-type relatif à k, ψ et θ; Cor-x : Longueur de corrélation selon l'axe des x (m); SBL(h) : Couche horizontale de SBL.

5.1.1 Cas de base (caractéristiques constantes)

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S21 sont montrées à la figure 5.2. La figure 5.3 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Dans la première simulation de la série 2 (S21, figure 5.3) la couche de matériau SBL atteint rapidement des teneurs en eau relativement élevées à la base (θ = 0,2 à 0,28 pour des degrés de saturation de 69 à 97 %) grâce aux effets de barrière capillaire 1D. Cette partie de la couche à haut degré de saturation a une épaisseur d'environ 20 cm (au dessus de l'interface avec GRV). À partir du deuxième mois (non montré), SBL commence à transmettre de l'eau au gravier GRV. Le passage de l'eau au matériau GRV sous jacent se fait par des "zones de suintements", là où la pression dépasse le ψ_r

Figure 5.2 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S21.

Figure 5.3 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S21.

du matériau GRV (Bussière et al., 2003; Cifuentes, 2006). L'apparition de ces zones est ici reliée, en partie, à l'irrégularité de l'interface inférieure entre le sable et le gravier (situation qui apparaîtrait dans la réalité). Une description détaillée de ces écoulements localisés et de leur origine est donnée par Fala (2002). On évalue dans la suite l'impact d'une distribution stochastique des caractéristiques hydriques sur la distribution des points de suintements (par rapport à la simulation de base, S21).

5.1.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =10

5.1.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelle, pour la simulation S22 sont montrées à la figure 5.4. La figure 5.5 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.4 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S22.

Figure 5.5 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S22.

Pour la simulation S22 (figure 5.5), l'écart type des propriétés hydriques est de 10 avec une forte corrélation horizontale. Les zones de suintement deviennent alors plus larges quand elles entrent dans la couche de GRV. Au début de l'année (voir figure 5.5a), leur nombre est plus élevé mais il y a une diminution de la teneur en eau (environ 0,07 contre 0,13 dans S21). En conséquence, le GRV qui se trouve immédiatement sous la couche du sable est imbibé d'eau sous les deux couches du matériau SBL. Cette situation peut mener à une disparition de l'effet de barrière capillaire entre le sable et le gravier sous jacent. Vers la fin de l'année, la teneur en eau augmente légèrement (à 0,09) dans les zones de suintement se trouvant à la périphérie du premier banc. Elle peut atteindre 0,15 environ dans des pointes de suintement se trouvant près du centre de la halde dans le banc supérieur (la couche de SBL dans ce banc est proche de la saturation au début et à la fin de l'année). La longueur des zones d'infiltration localisées augmente mais leur largeur reste à peu près stable. L'eau dans le matériau GRV au niveau de la pente, entre plus profondément en comparaison avec la simulation S21. Une autre différence par

rapport à S21 est observée au niveau de la teneur en eau dans la couche du sable. Elle présente une teneur en eau uniforme qui peut atteindre 0,20 et 0,35 dans le banc inférieur et supérieur (respectivement) dans S22 (comparativement à une teneur en eau de 0,20 à 0,28 sur seulement une épaisseur de 20 cm de la couche de SBL dans S21).

5.1.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S23 sont montrées à la figure 5.6. La figure 5.7 présente les contours de teneur en eau volumique obtenus.

Lorsque la corrélation spatiale des propriétés hydriques des deux matériaux est fortement verticale (S23, figure 5.7), le nombre de points de suintement devient légèrement plus faible par rapport à S22. L'eau dans le matériau GRV pénètre, encore là, plus profondément au niveau de la pente (par rapport à S21). La teneur en eau volumique varie de 0 à 0,25 environ. Il est à noter que les couches de SBL (surtout celle du banc inférieur) semblent être grossièrement découpées en trois segments où la teneur en eau est faible (proche de 0) et quatre segments où la teneur en eau est élevée (proche de 0,30; voir figure 4.41, mois d'août). Dans deux des endroits où la teneur en eau est faible (à droite et près du centre de la halde), l'AEV est faible et la conductivité hydraulique est faible (voir facteurs d'échelle à la figure 5.6). Entre ces deux zones le AEV est faible aussi mais la conductivité hydraulique est élevée. Cette segmentation semble être reliée à une modification des conditions d'écoulement (surtout une réduction du AEV de SBL par rapport à celui du GRV), ce qui a fait disparaître l'effet de barrière capillaire entre SBL et GRV, du moins à certains endroits.

a)

b) c)

Figure 5.6 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S23.

a) b)

c) d)

Figure 5.7 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S23.

5.1.2.3 Distribution avec une forte corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S24 sont montrées à la figure 5.8. La figure 5.9 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Dans la simulation S24 (figure 5.9) où la corrélation des propriétés hydriques est mixte (avec le même écart type de 10), le comportement des stériles est assez semblable à celui de la simulation S22. Mais dans ce cas, l'eau ne va pas aussi profondément dans le matériau GRV au niveau de la pente (voir résultats de S24, mois de décembre). La teneur en eau varie entre 0,30 à 0,34 environ dans les couches de sable. Elle est de l'ordre de 0,08 dans le matériau GRV, mais elle atteint 0,15 dans quelques pointes de suintement et va jusqu'à 0,23 environ à la périphérie de la halde.

a)

b) c)

Figure 5.8 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S24.

Figure 5.9 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S24.

5.1.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100

5.1.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S25 sont montrées à la figure 5.10. La figure 5.11 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Dans les trois dernières simulations de la série 2 (S25, S26 et S27) on augmente l'écart type des propriétés hydriques à 100. Dans S25 (figure 5.11), la transmission de l'eau de SBL au GRV commence à l'intérieur de la halde (près de son axe central). La seule zone de suintement observée dans le banc inférieur est large; elle occupe environ 15m au mois de mars, et sa largeur augmente jusqu'à plus de 20 m à la fin de l'année (voir

résultats de S25). Le banc supérieur est complètement imbibé d'eau. La teneur en eau dans le matériau GRV est de l'ordre de 0,06, mais on note la présence d'un niveau

a)

b) c)

Figure 5.10 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S25.

a) b)

c) d)

Figure 5.11 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S25.

à la base du banc supérieur où la teneur en eau est de l'ordre de 0,20 (la conductivité hydraulique y est très faible). Dans la couche de matériau SBL du banc supérieur, la teneur en eau est proche de 0 dans la partie supérieure de la couche. Cette situation est similaire à celle observée dans S23 (figure 5.7). Ici le faible AEV réduit la rétention d'eau dans cette partie de la couche. Dans la partie inférieure de la couche de SBL, le matériau est presque saturé; la teneur en eau est égale à 0,23 environ. Dans la couche de matériau SBL du banc inférieur, la teneur en eau varie entre 0,24 et 0,30 environ (près du centre et de la périphérie respectivement).

5.1.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S26 sont montrées à la figure 5.12. La figure 5.13 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.12 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S26.

Figure 5.13 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S26.

L'augmentation de l'écart type des facteurs d'échelle dans S26 à 100 (relativement à 10 dans S23, figure 5.7), a provoqué une augmentation du nombre des points de suintement comparativement à la simulation S23. Le volume de stériles encore sec à la fin de l'année est toutefois supérieur à celui de la simulation S25 (où la corrélation des propriétés hydriques est fortement horizontale). La teneur en eau θ dans les couches de sable varie entre 0,1 et 0,25 et entre 0 et 0,07 environ dans la majeure partie imbibée du matériau GRV. Près de la périphérie de la halde, θ peut atteindre 0,25 environ.

5.1.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S27 sont montrées à la figure 5.14. La figure 5.15 donne les contours de teneur en eau obtenus.

a)

b) c)

Figure 5.14 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S27.

a) b)

c) d)

Figure 5.15 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S27.

Lorsque la corrélation spatiale des propriétés hydriques des stériles est mixte (S27, figure 5.15) et l'écart type est de 100, le comportement hydrique des matériaux est assez semblable à celui de la simulation S26 (figure 5.13). La teneur en eau est ici légèrement plus élevée dans les couches de SBL (environ 0,15 à 0,30) et elle est proche pour la majeure partie de GRV. Dans le banc supérieur la teneur en eau θ peut atteindre une valeur maximale d'environ 0,23 à la fin de l'année, à certains endroits localisés au milieu du banc.

On voit donc que l'augmentation de l'écart type des facteurs d'échelle réduit l'ampleur de la partie sèche de la halde, soit en élargissant les zones de suintement (quand la corrélation des caractéristiques hydriques est fortement horizontale ou mixte) soit en augmentant leur nombre (quand la corrélation des caractéristiques hydriques est verticale). La réduction de la zone sèche dans GRV est plus prononcée dans le cas d'une forte corrélation horizontale.

5.2 Cas d'une interface SBL/GRV inclinée (séries 3 et 4)

Dans les prochaines séries de simulations (séries 3 à 6) on verra l'effet d'une faible inclinaison de la couche du matériau SBL sur le nombre des zones de suintement et sur le mouillage du matériau graveleux. On sait que pour les deux matériaux SBL et GRV homogène, une inclinaison de l'interface SBL/GRV réduit le nombre de zones d'infiltration localisée (Fala et al., 2003, 2005; Molson et al., 2005). Dans le but d'évaluer son influence sur les zones d'infiltration localisée, on procédera dans la suite à l'introduction d'une variabilité spatiale des propriétés des matériaux SBL et GRV. Dans les séries 5 et 6 on remplacera le matériau SBL par un silt SLT.

La configuration géométrique du modèle utilisé pour les simulations avec une couche inclinée (axisymétrique ou 2D) est schématisée à la figure 5.16. L'angle d'inclinaison de la couche de matériau fin peut être de 5% (série 3) ou de 10% (série 4).

Figure 5.16: Configuration géométrique des haldes (axisymétrique ou 2D) dans les séries 3 à 6 (simulations S28 à S49).

Les caractéristiques statistiques des séries de simulations 3 et 4 sont présentées au tableau 5.2.

5.2.1 Cas de base (caractéristiques constantes et pente de 5%)

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S28 et S29 sont montrées à la figure 5.17. Les figures 5.18 et 5.19 présentent les contours de teneur en eau obtenus (cas axisymétrique et 2D respectivement).

Tableau 5.2 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S28 à S38 (séries 3 et 4).

Id.*	Mat.**	σ_k	σ_ψ	σ_θ	k		ψ		θ	
					Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z
S28	GRV SBL(i)	0	0	0						
S29	GRV SBL(i)	0	0	0						
S30	GRV SBL(i)	10	10	0,1	100	5	100	5	100	5
S31	GRV SBL(i)	10	10	0,1	5	100	5	100	5	100
S32	GRV SBL(i)	10	10	0,1	100	90	100	90	100	90
S33	GRV SBL(i)	100	100	0,1	100	5	100	5	100	5
S34	GRV SBL(i)	100	100	0,1	5	100	5	100	5	100
S35	GRV SBL(i)	100	100	0,1	100	90	100	90	100	90
S36	GRV SBL(i)	100	100	0,1	100	5	100	5	100	5
S37	GRV SBL(i)	100	100	0,1	5	100	5	100	5	100
S38	GRV SBL(i)	100	100	0,1	100	90	100	90	100	90

*Identification; **Matériaux; σ_k , σ_ψ et σ_θ : Écart-type relatif à k, ψ et θ; Cor-x : Longueur de corrélation selon l'axe des x (m); SBL(i) : Couche inclinée de SBL.

Figure 5.17 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S28 et S29.

Figure 5.18 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S28 (axisymétrique).

Figure 5.19 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S29 (2D).

La simulation S28 (figure 5.18) représente une halde où la couche de SBL, sur chaque banc, est inclinée d'un angle de 5% vers l'extérieur. On remarque la réduction marquée du nombre de points de suintement comparativement à S21 (figure 5.3) où la couche de SBL repose horizontalement sur la couche de GRV. En jouant sur l'épaisseur de la couche de sable et sur l'angle d'inclinaison, il est possible de réduire (voire éliminer) les points de suintement à l'intérieur de la halde (Fala, 2002). Dans le cas de la simulation S28, la teneur en eau varie entre 0,05 à 0,20 dans les couches de SBL. Elle varie entre 0 et 0,10 environ dans les couches de GRV au niveau des parois de la halde mais elle est de l'ordre de 0,12 dans les zones de suintement.

La simulation S29 (figure 5.19) est un cas 2D. La différence entre cette configuration et celle (axisymétrique) de S28 se trouve au niveau du nombre de points de suintement et au niveau de la distribution de la teneur en eau dans la halde. Ceci est relié au fait

qu'une tranche de 1 m d'épaisseur de la halde en 2D possède un volume différent de celui d'une portion de 1 radian dans une halde axisymétrique (pour une même configuration géométrique par rapport à l'axe ou plan de symétrie). Avec un même taux d'infiltration pendant un temps donné, on se retrouve avec deux volumes d'eau différents dans deux volumes de stériles différents. Ceci induit une différence dans la teneur en eau volumique. En présence des effets de barrière capillaire, le nombre de points de suintement peut être amplifié dans l'une ou l'autre configuration en fonction des propriétés hydriques des deux matériaux en présence (comme on le verra plus loin avec le matériau SLT, simulations S39 et S40). Le volume des stériles et la surface d'infiltration sont des paramètres importants qu'il faut considérer dans le dimensionnement des haldes (voir chapitre 6). À la fin de l'année, la partie imbibée d'eau dans la couche de SBL du banc inférieur est plus grande dans S29 que dans S28. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la teneur en eau θ dans la couche de SBL (surtout vers l'extérieur de la halde à environ 0,28 comparativement à 0,20 dans S28) et aussi d'une augmentation du nombre de points de suintement dans S29.

5.2.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 et une pente de 5%

5.2.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S30 sont montrées à la figure 5.20. La figure 5.21 présente les contours de teneur en eau obtenus.

Pour les autres simulations de cette série (S30 à S38), on applique une distribution stochastique des propriétés hydriques des stériles. Dans la simulation S30 (figure 5.21), l'écart type des propriétés hydriques est de 10 et la corrélation spatiale de la conductivité hydraulique, de la teneur en eau et de la pression est fortement horizontale. On note à la figure 3.55 la disparition des points de suintement à l'interface SBL/GRV à l'intérieur

a)

b) c)

Figure 5.20 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S30.

a) b)

c) d)

Figure 5.21 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S30.

de la halde. Toute l'eau est alors acheminée vers la périphérie de la halde. Elle circule exclusivement dans les couches de SBL et au niveau des parois de la halde, dans le matériau GRV. La teneur en eau varie entre 0,05 et 0,35 et entre 0 et 0,16 dans SBL et GRV respectivement. Les teneurs en eau les plus élevées sont observées près de la périphérie pour les deux matériaux, sauf pour le SBL dans le premier banc où la teneur en eau est la plus élevée près de l'axe de la halde, en raison de la faible conductivité hydraulique à cet endroit (voir figure 5.20).

5.2.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S31 sont montrées à la figure 5.22. La figure 5.23 présente les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.22 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S31.

Figure 5.23 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S31.

Lorsque la corrélation des propriétés hydriques est fortement verticale (S31, figure 5.23), on observe quelques points d'écoulement localisés à l'interface. La teneur en eau est légèrement plus faible dans SBL (θ entre 0,05 et 0,30), et plus élevée dans GRV (θ entre 0 et 0,25 environ) par rapport à S30. Elle varie entre 0 et 0,10 pour la majeure partie imbibée d'eau du matériau GRV. Les teneurs en eau les plus élevées sont observées à la périphérie près de la base du premier banc pour le GRV et à la périphérie et au centre des deux bancs pour le SBL. On rencontre ici encore dans le matériau SBL des sections où la teneur en eau est proche de 0 jusqu'à la fin de l'année. Il s'agit du même phénomène observé dans la simulation S23 (figure 5.7). Le phénomène est lié à la disparition de l'effet de barrière capillaire qui favorise l'écoulement de l'eau au dessous de l'interface.

5.2.2.3 Distribution avec une corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S32 sont montrées à la figure 5.24. la figure 5.25 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.24 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S32.

Avec une corrélation mixte des propriétés hydriques (S32, figure 5.25), le comportement est assez semblable au cas où la corrélation est fortement horizontale (S30, figure 3.55). La teneur en eau varie entre 0,15 et 0,36 environ dans les couches de matériau SBL et entre 0 et 0,20 environ dans le matériau GRV. La teneur en eau dans le matériau GRV est d'environ 0,15 à la périphérie de la halde (le long du lieu de déversement de la couche SBL). La teneur en eau maximale dans GRV est atteinte près de la paroi, là où la conductivité hydraulique est relativement faible (voir figure 5.24). Notons qu'ici aussi l'eau ne va pas aussi profondément dans GRV que dans le cas d'une forte corrélation horizontale ou verticale (voir résultats de S32, mois de décembre).

Dans les trois prochaines simulations, l'écart type des propriétés hydriques sera augmenté à 100.

Figure 5.25 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S32.

5.2.3 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 5%

5.2.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S33 sont montrées à la figure 5.26. La figure 5.27 montre les contours de teneur en eau obtenus.

a)

b) c)

Figure 5.26 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S33.

a) b)

c) d)

Figure 5.27 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S33.

Une augmentation de l'écart type des facteurs d'échelle à une valeur de 100 provoque un élargissement des zones de suintement dans le cas de S33 présenté à la figure 5.27 (comparativement à S30, figure 5.21). La transmission de l'eau au matériau GRV se fait ici sur toute l'interface SBL/GRV. Ceci veut dire qu'il existe un intervalle d'écart type des propriétés hydriques (avec une borne supérieure inférieure à 100) pour lequel les points de suintement seraient fortement réduits. La teneur en eau dans la simulation S33 varie entre 0,15 et 0,35 environ dans SBL. On trouve les valeurs maximales de la teneur en eau à la périphérie de la halde. La teneur en eau dans les zones imbibées du matériau GRV est d'environ 0,05.

5.2.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S34 sont montrées à la figure 5.28. La figure 5.29 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.28 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S34.

Figure 5.29 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S34.

Dans la simulation S34 (figure 5.29), où la corrélation des propriétés hydriques est fortement verticale, le nombre de points de suintement est plus élevé qu'à la simulation S31 (figure 5.23, avec un écart type 10). La teneur en eau varie ici entre 0,05 et 0,32 et entre 0 et 0,25 environ dans les couches de SBL et de GRV respectivement. Dans les couches du matériau SBL, les valeurs maximales de teneur en eau sont observées vers le centre et à la périphérie de la halde. Dans la majeure partie de la halde imbibée d'eau (matériau GRV), la teneur en eau varie entre 0,02 et 0,10 environ. Les valeurs maximales de teneur en eau se trouvent à la périphérie près de la pente du premier banc.

5.2.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S35 sont montrées à la figure 5.30. La figure 5.31 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.30 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S35.

Figure 5.31 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S35.

Avec une corrélation mixte des propriétés hydriques (S35, figure 5.31), le comportement est semblable à celui dans S33 (où la corrélation des propriétés hydriques est fortement horizontale, figure 5.27), mais la transmission de l'eau au matériau GRV ne se fait pas sur toute l'interface SBL/GRV dans S35. La teneur en eau θ varie entre 0,10 et 0,33 et entre 0 à 0,30 dans SBL et GRV respectivement. Les valeurs maximales (0,33 et 0,30 dans SBL et GRV respectivement) de la teneur en eau se trouvent à la périphérie du banc inférieur de halde pour les deux matériaux, SBL et GRV.

5.2.4 Distribution avec σ_θ =0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =100 et une pente de 10 %

Dans les trois prochaines simulations (S36 à S38) on augmente l'angle d'inclinaison des couches du matériau SBL à 10%. L'écart-type de la conductivité hydraulique et de la pression est de 100. Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles (pour une distribution avec une forte corrélation horizontale, verticale et mixte), et des contours de teneur en eau pour les simulations S36 à S38 sont montrées aux figures 5.32 à 5.37.

a)

b) c)

Figure 5.32 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S36.

Figure 5.33 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S36.

Figure 5.34 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S37.

Figure 5.35 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S37.

Figure 5.36 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S38.

Figure 5.37 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S38.

Pour les trois types de corrélation (horizontale, verticale et mixte, correspondant aux simulations S36, S37 et S38), le nombre de points de suintement a été réduit. Toutefois, quand la corrélation des propriétés hydriques est fortement verticale (S37, figure 5.35), l'effet de cette inclinaison est moins marquée. On note aussi que les comportements sont pratiquement similaires pour S36 et S38 (fortes corrélations horizontale et mixte, respectivement). On déduit de ces résultats que pour deux matériaux (un fin mis au dessus d'un autre grossier) et des conditions climatiques données, il semble possible d'éliminer (ou à tout le moins réduire fortement) l'imbibition du matériau grossier qui se trouve à l'intérieur de la halde, en augmentant l'inclinaison de l'interface entre les deux matériaux. Ceci s'appliquerait pour une corrélation spatiale des propriétés hydriques horizontale, verticale ou mixte et même avec un écart type des facteurs d'échelle allant jusqu'à 100.

Dans le cas d'un matériau grossier (comme un gravier), la différence de rétention d'eau (AEV) devient de moins en moins perceptible dès que le diamètre des particules dépasse quelques millimètres (e.g., la différence dans les AEV d'un gravier dont le diamètre des particules est de 25 mm et celui d'un autre gravier dont le diamètre des particules est de 5 mm est difficilement mesurable); cette différence est notable quand il s'agit d'un matériau plus fin (e.g., un sable dont le diamètre des particules est de 2,5 mm a un AEV très différent de celui d'un sable très fin dont le diamètre des particules est de 0,5 mm). Sur le terrain, la couche de matériau fin en surface peut être formée d'un sable (AEV de quelques centimètres) jusqu'à un silt (AEV de plusieurs mètres). Il est donc important d'évaluer si les tendances observées dans la série précédente de simulations se maintiennent lorsque le matériau en surface est plus fin que le sable SBL.

5.3 Cas d'une interface SLT/GRV inclinée (Séries 5 et 6)

Dans les deux séries de simulations qui suivent (série 5 et 6, simulations S39 à S49), on utilise le silt SLT à la place du sable SBL. Le matériau SLT possède un AEV de 1,1 m (supérieur plus de 6,5 fois que celui de SBL) et une conductivité hydraulique à saturation de $3{,}2 \times 10^{-6}$ m/s (inférieure plus de 1 ordre de grandeur que celle de SBL). Les caractéristiques statistiques des séries de simulations 5 et 6 sont montrées au tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Paramètres statistiques adoptés dans les simulations S39 à S49 (séries 5 et 6).

Id.*	Mat.**	σ_k	σ_ψ	σ_θ	k		ψ		θ	
					Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z	Cor-x	Cor-z
S39	GRV SLT(i)	0	0	0						
S40	GRV SLT(i)	0	0	0						
S41	GRV SLT(i)	10	10	0,1	1000	50	1000	50	100	5
S42	GRV SLT(i)	10	10	0,1	50	1000	50	1000	5	100
S43	GRV SLT(i)	10	10	0,1	100	90	100	90	10	9
S44	GRV SLT(i)	100	100	0,1	100	5	100	5	100	5
S45	GRV SLT(i)	100	100	0,1	50	1000	50	1000	5	100
S46	GRV SLT(i)	100	100	0,1	1000	900	1000	900	100	90
S47	GRV SLT(i)	100	100	0,1	100	5	100	5	100	5
S48	GRV SLT(i)	100	100	0,1	5	100	5	100	5	100
S49	GRV SLT(i)	100	100	0,1	100	90	100	90	100	90

*Identification; **Matériaux; σ_k , σ_ψ et σ_θ : Écart-type relatif à k, ψ et θ; Cor-x : Longueur de corrélation selon l'axe des x (m); SLT(i) : Couche inclinée de SLT.

5.3.1 Cas de base (caractéristiques constantes et pente de 5%)

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour les simulations S39 et S40 sont montrées à la figure 5.38. Les figures 5.39 et 5.40 montrent les contours de teneur en eau obtenus (pour le cas axisymétrique et 2D respectivement).

a)

b) c)

Figure 5.38 : Facteurs d'échelle (égaux à 1) de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas des simulations S39 et S40.

a) b)

c) d)

Figure 5.39 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S39 (axisymétrique).

Figure 5.40 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S40 (2D).

Comme dans la série précédente (série 4), on simule d'abord les cas où la halde est circulaire puis allongée (2D) avec des propriétés hydriques homogènes. Les deux premières simulations (S39, figure 5.39 et S40, figure 5.40) montrent les différences dans le comportement hydrique de la halde en fonction de sa configuration géométrique externe (axisymétrique ou 2D). À la différence des simulations S28 et S29 (figures 5.18 et 5.19), qui ont montré qu'une halde allongée est plus propice à l'apparition de points de suintement, on observe pour la halde circulaire avec le silt SLT (S39) une grande accumulation d'eau dans le silt et, par la suite, le développement de plus de points de suintement. Une comparaison des deux couches de silt du banc inférieur, dans S39 et S40 à la fin de l'année, permet de constater que dans le cas d'une halde allongée (S40) la teneur en eau varie de 0,15 à 0,45 alors qu'elle varie de 0,42 à 0,45 dans la couche du silt de la halde circulaire. La teneur en eau varie de 0 à 0,13 dans le matériau GRV, dans

les deux simulations. L'eau va plus vers l'intérieur dans la halde circulaire dans les couches de SLT, surtout au niveau de la couche SLT du banc inférieur.

5.3.2 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=10 et une pente de 5%

5.3.2.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S41 sont montrées à la figure 5.41. La figure 5.42 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.41 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S41.

Dans les trois simulations (S41, S42 et S43), l'écart type des facteurs d'échelle est de 10. La simulation S41 (figure 5.42) montre qu'avec cet écart type (et avec une forte corrélation horizontale), il y a une concentration des points de suintement plus près des parois de la halde (voir résultats de S41). Ce résultat est similaire à celui de la simulation S30 (avec le sable SBL comme matériau fin). La teneur en eau varie entre

0,30 et 0,35 dans la couche de SLT du banc inférieur et entre 0,30 et 0,47 environ dans la couche de sable du banc supérieur. Elle varie entre 0 et 0,15 environ dans le matériau GRV.

Figure 5.42 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S41.

5.3.2.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S42 sont montrées à la figure 5.43. La figure 5.44 présente les contours de teneur en eau obtenus.

a)

b) c)

Figure 5.43 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S42.

a) b)

c) d)

Figure 5.44 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S42.

Dans la simulation S42 (figure 5.44), l'application d'une forte corrélation verticale des propriétés hydriques n'a pas eu beaucoup d'influence sur le comportement de la halde (comparativement à S41). Le matériau SLT a permis l'élimination des points de suintement à l'intérieur de la halde (S42). Ce résultat est assez comparable à celui de la simulation S31 même si le sable SBL n'a pas éliminé tous les points de suintement (voir résultats de S31, figure 5,23d). La teneur en eau pour S42 varie entre 0,30 et 0,55 environ dans les couches de SLT, et entre 0 et 0,28 environ dans les couches de GRV.

5.3.2.3 Distribution avec une forte corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelle, pour la simulation S43 sont montrées à la figure 5.45. La figure 5.46 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.45 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S43.

Figure 5.46 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S43.

Lorsque la corrélation spatiale des propriétés hydriques est mixte (S43, figure 5.46), il y a apparition d'un point de suintement dans le banc inférieur de la halde à la fin de l'année. Ceci n'a pas été observé dans le cas de SBL (S32, figure 5.25). Remarquons aussi que l'eau n'atteint pas complètement la base des bancs dans le matériau GRV au niveau des pentes dans S42 et S43, contrairement au cas de S41. Ceci vient du fait que la composante horizontale de la vitesse de l'eau (qui est prépondérante dans le cas où la corrélation est fortement horizontale) favorise le déplacement de l'eau des parois vers l'intérieur de la halde à toute élévation. La teneur en eau dans S43 varie entre 0,30 et 0,50 dans les couches de SLT. Elle varie entre 0,02 et 0,08 environ dans la partie imbibée d'eau des couches de GRV, mais atteint 0,22 environ près des parois du banc inférieur.

On augmente maintenant l'écart type des facteurs d'échelle à 100 Pour les simulations S44, S45 et S46.

5.3.3 Distribution avec σ_θ =0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$ =100 et une pente de 5%

5.3.3.1 Distribution avec une forte corrélation horizontale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S44 sont montrées à la figure 5.47. La figure 5.48 présente les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.47 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S44.

Les résultats de S44 (corrélation fortement horizontale, figure 5.48) montrent qu'en augmentant l'écart type des propriétés hydriques de 10 à 100, les points de suintement s'élargissent et une grande partie de la halde est imbibée d'eau. La teneur en eau dans la couche supérieure de SLT est faible. Elle varie entre 0,02 et 0,08 environ à cause du faible AEV de SLT à cet endroit (voir figure 5.47). Dans la couche inférieure de SLT, la teneur en eau varie entre 0,45 et 0,5 environ. La teneur en eau dans les couches de GRV

se situe entre 0,02 et 0,08 environ dans la majeure partie mouillée. Près de la base des deux bancs, on note la présence d'un niveau avec une teneur en eau d'environ 0,20.

Figure 5.48 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S44.

5.3.3.2 Distribution avec une forte corrélation verticale

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S45 sont montrées à la figure 5.49. La figure 5.50 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Avec une forte corrélation verticale des propriétés hydriques dans S45 (figure 5.50), le volume de stériles imbibés d'eau dans la halde à la fin de l'année est légèrement inférieur à celui de S44. La teneur en eau dans les couches de SLT varie entre 0,30 à 0,52 environ. Elle se situe entre 0,02 et 0,08 environ dans la partie imbibée des couches de GRV.

a)

b) c)

Figure 5.49 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S45.

a) b)

c) d)

Figure 5.50 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S45.

5.3.3.3 Distribution avec une forte corrélation mixte

Les caractéristiques des stériles, en terme de facteurs d'échelles, pour la simulation S46 sont montrées à la figure 5.51. La figure 5.52 montre les contours de teneur en eau obtenus.

Figure 5.51 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S46.

Avec une forte corrélation mixte des propriétés hydriques (S46, figure 5.52), le volume des stériles qui sont imbibés d'eau à la fin de l'année, est comparable à celui dans S45 (figure 5.50). La teneur en eau varie de 0,25 à 0,45 dans les couches de SLT et de 0,02 à 0,08 environ dans les zones mouillées des couches de GRV. À quelques endroits très localisés près de la paroi du banc inférieur, la teneur en eau peut atteindre 0,25.

Figure 5.52 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S46.

5.3.4 Distribution avec σ_θ=0,1, $\sigma_k = \sigma_\psi$=100 et une pente de 10 %

Dans les simulations suivantes (S47, figure 5.54; S48, figure 5.56 et S49, figure 5.58) on augmente à 10 % la pente des couches de SLT. Les caractéristiques des stériles pour ces simulations, en termes de facteurs d'échelles (pour les distributions avec une forte corrélation horizontale, verticale et mixte), sont montrées aux figures 5.53, 5.55 et 5.57.

En augmentant la pente de la couche de SLT à 10% dans les simulations S47, S48 et S49, on réduit le volume des stériles grossiers imbibés (surtout dans le banc inférieur) pour les trois types de corrélations des propriétés hydriques. Dans ces trois simulations, la teneur en eau θ varie entre 0,1 et 0,54 dans les couches du matériau SLT, et entre 0 et 0,20 dans le matériau GRV.

Figure 5.53 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S47.

Figure 5.54 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S47.

a)

b) c)

Figure 5.55 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S48.

a) b)

c) d)

Figure 5.56 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S48.

a)

b) c)

Figure 5.57 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique (a), de la succion (b) et de la teneur en eau volumique (c). Cas de la simulation S49.

a) b)

c) d)

Figure 5.58 : Contours de teneur en eau volumique à la fin des mois de mars (a), juin (b), août (c) et décembre (d). Cas de S49.

On en déduit donc qu'un matériau plus fin que le sable peut induire des modifications dans le comportement hydrique de la halde. L'angle d'inclinaison de l'interface matériau fin/matériau grossier reste néanmoins un des paramètres clés pour réduire le nombre et l'envergure des points de suintement. Ceci s'applique pour les trois types d'orientation de la corrélation des propriétés hydriques et pour un écart type (avec une distribution lognormale) des facteurs d'échelle allant jusqu'à 100. Une discussion sur l'impact des écoulements préférentiels sera présentée au chapitre 6.

5.4 Sommaire des résultats des simulations numériques

En résumé, l'ensemble des résultats de simulations présentés aux chapitres 4 et 5 permet de déduire ce qui suit :

- L'eau se déplace d'une façon préférentielle selon la direction de la corrélation spatiale des propriétés hydriques. Elle se déplace des parois vers le centre de la halde, quand la corrélation est forte horizontalement ou du haut vers la base de la halde, quand la corrélation est forte verticalement. Dans le cas d'une corrélation mixte, l'eau se déplace obliquement du haut vers la base. Elle met donc plus de temps pour aller profondément dans la halde. En général, ces tendances s'amplifient avec l'augmentation de l'écart type.

- La configuration géométrique externe influence le mouvement de l'eau à l'intérieur de la halde. Les simulations numériques ont montré qu'une halde allongée (écoulement 2D) est plus propice à l'accumulation d'eau et à la création de points de suintement à l'interface matériau fin/matériau grossier quand le matériau fin est le SBL. Lorsqu'on utilise le matériau SLT, la halde circulaire (écoulement axisymétrique) paraît plus favorable au développement des points de suintement. Ceci est dû d'une part à la différence de volume entre une tranche de 1m de halde en 2D et une portion de 1 radian d'une halde axisymétrique, pour une même quantité

d'eau qui s'infiltre dans les deux volumes (en considérant que la configuration géométrique par rapport à l'axe ou plan de symétrie est la même). Les propriétés hydriques des deux matériaux et les effets de barrière capillaire qu'ils créent donnent lieu à des zones de suintement plus ou moins importantes dans l'un ou l'autre cas.

- Une variabilité spatiale des propriétés hydriques modérées (écart type inférieur à 100) permet de supprimer les points de suintement dans le matériau grossier (pour une configuration géométrique donnée), au moment où des matériaux homogènes les induisent (voir les simulations S28 à S32).

Suite à ces résultats, on présentera au chapitre suivant des outils d'optimisation de la construction des haldes. Ces outils visent un meilleur contrôle de l'écoulement de l'eau qui peut permettre de contrôler la production du DMA (ou du DNC) pendant la vie de la mine et faciliteraient la restauration de la halde à la fin de ses opérations.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente une discussion des résultats obtenus aux chapitres précédents. On discutera aussi des écoulements préférentiels de l'eau dans les haldes à stériles et de leur impact potentiel sur le DMA (ou le DNC). Par la suite, on présentera certaines pratiques suggérées pour une construction optimale des haldes (qui minimiseront les risques de contamination du milieu environnant).

6.1 Analyse des résultats

6.1.1 Essais d'infiltration

L'approche présentée au chapitre 3 vise à estimer les paramètres hydriques du modèle de van Genuchten (1980) à partir des résultats d'un essai d'infiltration. L'estimation des paramètres du modèle analytique de van Genuchten (1980) engendre toutefois des incertitudes. Ces dernières sont reliées aux calculs numériques ou à l'essai lui-même. Les incertitudes de mesures peuvent provenir du mode opératoire, de l'appareillage de mesure, des lectures etc. L'ampleur de ces incertitudes peut aussi varier en fonction des paramètres de l'essai comme sa durée ou la surface d'infiltration. La précision des mesures pendant les premiers instants de l'essai a une grande influence sur les résultats (puisque les incertitudes et les mesures sont du même ordre de grandeur). Les imprécisions à ce stade affectent surtout l'évaluation du rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Il faut donc adapter l'approche expérimentale afin de maximiser la précision. Une automatisation des opérations d'acquisition de données au laboratoire ou sur terrain serait alors très utile. Pour notre essai de laboratoire, l'utilisation de la caméra numérique a permis d'avoir une bonne précision des résultats car l'enregistrement du temps et de la masse d'eau infiltrée ont été combinés durant tout l'essai. Ceci permet d'éviter le décalage qui

peut exister entre les deux types de mesures faites séparément (manuellement). Lors des essais à petite échelle sur terrain, il n'était pas possible d'acquérir automatiquement les données. Dans notre cas, des lectures directes de la masse d'eau infiltrée, du temps et de la tête d'eau ont été effectuées. Un léger décalage entre ces mesures était donc inévitable. Ceci a engendré une imprécision (qui dépend de la durée du décalage et du stade de l'essai) pour l'estimation de certains paramètres.

Imprécisions d'origine conceptuelle

Les incertitudes numériques peuvent être d'ordre conceptuel ou reliées aux calculs par ordinateur. À cet égard, il faut s'assurer que le modèle numérique corresponde le plus possible à la réalité (incluant la forme de la surface d'infiltration et le type d'infiltration pendant toute la durée de l'essai). Pour de tels essais, on néglige souvent la variation de la surface d'infiltration en fonction du temps dans les essais avec une tête d'eau supérieure ou égale à 0. Quand la surface d'infiltration est parfaitement plane, le temps t_0=0 correspond généralement au début de l'écoulement de l'eau sur la surface d'infiltration. Mais en réalité, l'eau ne remplit complètement la surface qu'après un certain temps t_1. Pendant cette courte période, la surface d'infiltration est variable. Faute de données (variation de la surface d'infiltration en fonction du temps de $t_0 = 0$ à t_1), on considère que la surface d'infiltration est constante. Or, on a vu que le début de l'essai est très important pour l'estimation du rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Une façon pour atténuer l'ampleur de cette imprécision est de réduire au minimum la grandeur de la surface d'infiltration (c'est ce qui a été fait pour l'essai en laboratoire). Dans le cas où il est nécessaire d'avoir une grande surface d'infiltration (essais à grande échelle), il est préférable d'utiliser une surface conique qui permet une augmentation régulière (et facile à comptabiliser) de la surface d'infiltration (voir figure 6.1).

Figure 6.1 : Essai d'infiltration (à grande échelle) à travers une surface conique avec mesure de la hauteur d'eau en fonction du temps (les données de cet essai sont présentées à l'annexe 2)

Il faut aussi réduire autant que possible l'incertitude sur la teneur en eau résiduelle et initiale. Pour les matériaux grossiers, la teneur en eau résiduelle est généralement faible (une valeur proche de 0,05 est raisonnable). Elle peut par contre être élevée dans le cas d'un matériau contenant un pourcentage non négligeable de particules fines. Dans cette situation, la détermination itérative de la teneur en eau résiduelle (procédure présentée à la figure 3.39) devient très utile. La teneur en eau initiale *in situ* devrait idéalement être égale à la teneur en eau résiduelle. Si on estime que la teneur en eau naturelle (ou initiale) est plus élevée que la teneur en eau résiduelle sur le terrain, il suffit de mettre, peu de temps avant l'essai, une couverture étanche à la surface de la zone prévue pour l'essai. Même s'il est possible que cette couverture réduise l'évaporation, elle empêche une éventuelle augmentation de la teneur en eau lors de précipitations et permet en même temps au matériau de se drainer avant l'essai. L'étendue et le temps de mise en place de cette couverture avant l'essai doivent être d'autant plus grands que le matériau est fin et que la durée prévue de l'essai est grande. Des simulations numériques

préalables peuvent donner une idée de la grandeur et de la durée de couverture nécessaires.

Imprécisions d'origine numérique

En plus de l'uniformisation des calculs dont on a parlé au chapitre 3, il faut vérifier le bon déroulement des calculs d'une façon systématique par l'observation de la conservation de masse (paramètre important dans ce genre de simulations numériques). La déviation devrait être de 1 % ou moins (Anderson et al., 2002). Les principaux paramètres à ajuster sont (e.g., Al-Maktoumi et al., 2007) : la discrétisation de l'espace et du temps et les paramètres de convergence (qui sont spécifiques à chaque code). Il faut aussi vérifier régulièrement la concordance entre les fonctions de la teneur en eau et de la conductivité hydraulique extraites et celles introduites au départ (Chapuis et al., 2001; Fala, 2002).

La caractérisation hydrique (CRE en mouillage et en drainage en colonne) du sable Kam Kotia a été effectuée en deux temps. La CRE en drainage a d'abord été réalisée dans le cadre d'un autre projet, et la CRE en mouillage a été mesurée dans une autre colonne (autre que celle qui a servi pour l'essai d'infiltration). Plusieurs mesures d'infiltration ont été effectuées avant d'arriver à réussir un essai (celui présenté au chapitre 3). Le traitement des données prend beaucoup de temps (échantillonnage des photos à partir de la vidéocassette : une photo toutes les 1/30 s au début de l'essai et au moins une photo toutes les secondes après 1 ou 2 minute(s); puis le transfert de ces données sur Excel), avant de pouvoir juger de la valeur de l'essai en question. Les problèmes rencontrés étaient surtout d'ordre opératoire : teneur en eau résiduelle pas encore atteinte dans toute la colonne, surface d'infiltration trop grande, difficulté de maintenir la tête d'eau nulle en surface, difficulté de mettre au point un dispositif qui permet d'avoir dans une même image (où une lecture est possible) la mesure du temps et du volume d'eau infiltré, etc. À chaque fois qu'un essai d'infiltration est invalidé (pour l'une de ces raisons), il fallait

attendre plusieurs jours avant que le sable n'atteigne sa teneur en eau résiduelle. La détermination de la courbe de rétention d'eau elle-même, que se soit en mouillage ou en drainage, prend plusieurs jours ou semaines (e.g. Chapuis et al., 2006). La différence au niveau de la porosité du sable dans les colonnes qui ont servi pour la mesure de la CRE en mouillage et en drainage crée une différence entre les teneurs en eau à saturation en mouillage et en drainage ($\theta_s^{'}$ et θ_s). Généralement, la teneur en eau résiduelle en mouillage et en drainage sont pratiquement égales. La différence, observée à la figure 3.32, au niveau de la teneur en eau résiduelle du sable Kam Kotia en mouillage et en drainage ($\theta_r^{'}$ et θ_r) serait principalement causée par la différence de porosité dans les deux colonnes.

En pratique, le paramètre le plus difficile à déterminer à partir d'un essai d'infiltration est le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Son calcul nécessite la mesure précise des taux d'infiltration dans les premiers instants de l'essai. La précision limitée de cette mesure combinée au fait que conceptuellement toute la surface d'infiltration doit être remplie d'eau (à t=0 avec la tête d'eau requise), engendre une difficulté à déterminer avec certitude la valeur de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. On peut contourner ces problèmes en mesurant directement ou en estimant ce rapport. Pour cela on peut par exemple prélever la partie superficielle de l'endroit où l'essai a été effectué (avec une mesure de la densité *in situ*), puis la soumettre à des essais en laboratoire. Ces derniers serviront à estimer le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ à partir des mesures; ceci peut aussi se faire à l'aide des modèles prédictifs (e.g. Gamache-Rochette, 2004; Hernandez, 2007).

Les résultats des essais d'infiltration *in situ* (tableau 3.20) qui sont affectés par les propriétés en drainage d'un matériau (Miyazaki, 2006), peuvent être comparés aux valeurs mesurées en laboratoire. Cette comparaison montre que les valeurs de la conductivité hydraulique obtenues sur le terrain (moyenne de $9{,}9 \times 10^{-5}$ m/s et écart-type de $5{,}8 \times 10^{-5}$ m/s) sont de même ordre de grandeur que celles mesurées en laboratoire

avec des essais à charge constante sur des stériles de la halde de la mine Laronde selon Gamache-Rochette (2004) pour des porosités variant de 0,3 à 0,4 (voir la figure 3.46). Pour des porosités en dehors de cet intervalle, la conductivité hydraulique à saturation mesurée en laboratoire est plus faible. Les valeurs de la conductivité hydraulique mesurées sur la halde sont également comparables à d'autres mesures effectuées en laboratoire (Azam et al., 2006; Williams et al., 2007). Pour ce qui est de la CRE, la valeur du AEV des stériles varie d'environ 0,2 cm pour Azam et al. (2006) à 10 cm pour Williams et al. (2007). Ces valeurs sont relativement faibles comparativement aux valeurs mesurées ici sur la halde de la mine Laronde (moyenne de 21 cm et écart-type de 14 cm). La teneur en eau à saturation varie de 0,29 à 0,34 pour Azam et al. (2006) et Williams et al. (2007), ce qui est inférieur à la valeur moyenne de teneur en eau mesurée ici sur la halde (0,44 et écart-type de 0,19).

Les valeurs estimées de la teneur en eau à saturation $\theta_s^{'}$ varient d'ailleurs beaucoup selon nos résultats (de 0,20 et 0,60, voir figure 3.54). Ceci peut signifier que la porosité serait très faible par endroits (probablement à cause de la présence de blocs rocheux sur le chemin de l'eau), et/ou que la porosité est très élevée ailleurs (due à la présence de macropores sur le chemin de l'eau). Il peut aussi y avoir (au moins) deux autres causes à l'origine de cette grande variation de $\theta_s^{'}$. La première est l'incertitude sur le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$. Ainsi, dans un même essai, un rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ plus petit que 0,0241 (valeur de $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ adoptée pour tous les essais *in situ*) réduira la valeur estimée de $\theta_s^{'}$; un rapport plus grand que 0,0241 augmentera $\theta_s^{'}$. Une deuxième cause peut être la non adéquation entre la surface d'infiltration (donc de l'essai) et la surface correspondant au volume élémentaire représentatif du matériau de la halde. Ces écarts peuvent masquer la porosité réelle des stériles (mesurée dans un volume représentatif). Cela indiquerait que les essais effectués sont peut-être mal adaptés pour effectuer des mesures d'infiltration sur la halde à stérile ayant une granulométrie si étalée. La figure 6.2 montre la variation schématisée de la porosité en fonction du volume (sphérique de rayon L) où la mesure a

été effectuée. Pour des valeurs de L trop petites ($L<L_0$), le volume peut être affecté par une surabondance de vides ou de particules solides. La porosité est alors mal estimée et elle présente une forte variabilité (ce qui s'apparente à notre cas). Lorsque L est grand ($L>L_1$), le volume peut dépasser les limites du domaine dans lequel on veut mesurer la porosité. Cette augmentation serait alors plus régulière. Entre ces deux intervalles extrêmes ($L_0 \leq L \leq L_1$), la porosité présente beaucoup moins de variabilité et elle serait indépendante de L (pour un matériau macroscopiquement homogène). Dans ce cas, la porosité n'est pas associée à la dimension du volume de mesure. Le volume de rayon L_0 constitue le VER nécessaire pour la mesure de la porosité (e.g., Chin 2006).

Figure 6.2: L'effet de l'échelle sur la mesure de la porosité (adaptée d'après Chin, 2006).

Par ailleurs, il est aussi possible de faire une estimation des caractéristiques hydriques d'un sol en évaluant numériquement la solution inverse de l'équation de Richards (1930) à partir des données d'infiltration (e.g. Simunek et al., 1998a et b; Abdellah, 1999; Zhang et al., 2004). Une façon d'obtenir la solution inverse consiste à résoudre le problème d'optimisation non linéaire. Pour cela, on définit une fonction "objectif" φ qui peut s'écrire (e.g. Simunek et al., 1998a et b)

$$\varphi(\chi, q_1, q_2, \cdots, q_m) = \sum_{j=1}^{m} \left(v_j \sum_{j=1}^{n_j} w_{ij} \left(q_j^*(t_i) - q_j(t_i, \chi) \right)^2 \right) \tag{6.1}$$

où

n_j : Le nombre de mesures dans une série donnée;

$q_j^*(t_i)$: Les mesures spécifiques au temps t_i pour la jème série;

χ : Le vecteur des paramètres optimisés (e.g. θ_r, θ_s, ks… etc);

$q_j(t_i, \chi)$: Les prédictions du modèle pour le vecteur χ ;

v_i et w_{ij} : Les poids associés respectivement à une série de mesure ou à un point en particulier.

m : Le nombre des diverses séries de mesures telles que les résultats d'infiltration, teneurs en eau, etc.

Le but visé est alors de réduire l'écart entre les observations expérimentales et l'estimation obtenue par le modèle numérique. Ceci est équivalent à minimiser la valeur de φ dans l'équation 6.1, selon la méthode des moindres carrés (généralement on utilise l'algorithme de Marquardt-Levenberg (Marquardt,1963) pour cela), en partant de valeurs initiales des paramètres à estimer.

Cette technique nécessite souvent la mesure du taux d'infiltration à plusieurs paliers de pressions (négatives) en surface (par exemple en utilisant un infiltromètre à disque; Perroux et al., 1988), ou d'autres données supplémentaires comme la teneur en eau avant et après l'essai. L'inconvénient majeur de l'inversion de l'équation générale de l'écoulement (outre les difficultés numériques) est la non unicité de la solution qui peut survenir dans plusieurs cas lorsque le nombre des paramètres à estimer devient grand (e.g. Abdellah, 1999; Zhang et al., 2004).

L'interprétation des essais d'infiltration selon la méthode présentée au chapitre 3 illustre la particularité de la solution de ce problème. On a vu qu'il est très difficile (voire impossible) de déterminer, à partir des taux d'infiltration seuls, le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ à des temps grands. Il n'est donc pas possible d'évaluer $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ (c'est-à-dire l'un des paramètres du modèle analytique de van Genuchten α_v ou n_v) à des temps grands. Cet aspect est ignoré dans la formulation de l'inversion numérique. On a également analysé l'importance des taux d'infiltration à des temps très petits. Cette partie de l'essai est généralement ignorée (dans la littérature), alors qu'elle peut apporter des informations précieuses sur le matériau.

6.1.2 Modélisation des écoulements dans les haldes

Sur le terrain, la méthode de construction utilisée peut produire divers types de distribution avec fortes corrélations (horizontale, verticale ou mixte) et ce dans une même halde. Les simulations montrent que ce sont surtout les caractéristiques hydriques des couches de matériau fin près de la surface et celles du matériau grossier près des flancs de la halde (au niveau des pentes) qui influencent le plus le mouvement de l'eau à l'intérieur de la halde.

Dans nos calculs, les facteurs d'échelle relatifs à la conductivité hydraulique, à la succion et à la teneur en eau ont été générés d'une manière indépendante. Ceci peut mener dans certains cas à des distributions stochastiques de conductivité hydraulique, de teneur en eau et de pression non cohérentes, puisqu'en réalité il existe une relation entre la conductivité à saturation (k_s), la porosité (n) et l'AEV (ψ_a) d'un matériau (e.g. Mbonimpa et al., 2000). Les distributions stochastiques utilisées ici constituent néanmoins des cas généraux qui sont utiles pour évaluer l'effet d'une variation de ces propriétés.

Comme il a été signalé au chapitre 4, l'écart type des facteurs d'échelle a été choisi entre 1 et 100 dans le but d'évaluer une variation progressive sur la réponse hydrique des haldes. Il faut noter que la valeur de 100 est très élevée, ceci veut dire par exemple que l'AEV de SBL peut être de 15 m et plus. La valeur de l'AEV de GRV reste par contre faible (de l'ordre de $5x10^{-4}$ m). Un même écart type (de 100) a été utilisé dans les simulations où les deux matériaux (GRV et SBL) sont présents car HYDRUS2D ne permet pas de spécifier un écart type différent pour chacun des matériaux.

Les distributions stochastiques utilisées dans cette étude ne constituent qu'une réalisation particulière pour chaque simulation. Pour les mêmes longueurs de corrélation et les mêmes valeurs de la moyenne et de l'écart type, on peut théoriquement avoir une infinité de distributions stochastiques (possédant les mêmes caractéristiques). Des simulations numériques avec d'autres réalisations (pour les mêmes longueurs de corrélation et les mêmes valeurs de la moyenne et de l'écart type) non présentées ici (plusieurs dizaines de simulations) ont montré que le comportement hydrogéologique des haldes est similaire à celui exposé aux chapitres 4 et 5. Les distributions choisies ici sont parmi celles qui contiennent le moins de zones où les facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique et de la pression sont proches de 0 (car cela aurait créé des instabilités numériques).

Les longueurs de corrélation calculées à partir des essais *in situ* donnent une valeur de la corrélation verticale (selon z) et deux valeurs pour la corrélation horizontale (selon x et y), pour la conductivité hydraulique, la pression et la teneur en eau (voir tableau 4.1). Dans les résultats de simulations présentées au chapitre 4, on ne tenait pas compte de la deuxième dimension des corrélations horizontales car cela demande un code 3D. De plus, les valeurs des longueurs de corrélation adoptées sont différentes des valeurs mesurées. Par exemple, la figure 6.3 montre les facteurs d'échelle du logarithme de la conductivité hydraulique pour les longueurs de corrélation calculées à partir des essais in situ (voir tableau 4.1) pour un écart type de 5. La longueur de corrélation verticale est

de 0,7 m alors qu'au niveau horizontal, il y a deux valeurs : une longueur de corrélation de 34,6 m (selon l'axe des y) et une de 416,4 m (selon l'axe des x). La distribution des propriétés hydriques dans les deux cas montrés à la figure 6.3 est différente de celles utilisées au chapitre 4 et ceux pour deux raisons. D'abord, ces valeurs ne concernent que la partie superficielle d'une portion de la halde no 1 (environ 1 m d'épaisseur). On ne peut donc pas faire une généralisation à toute la halde. De plus, le choix des valeurs utilisées dans ces simulations a été guidé surtout par les observations effectuées sur terrain (voir par exemple la figure 2.8).

a) b)

Figure 6.3 : Facteurs d'échelle de la conductivité hydraulique pour un écart type de 5 et une longueur de corrélation de 0,7 selon l'axe des z. La longueur de corrélation est de 34,6 m selon l'axe des y (a) et de 419,4 m selon l'axe des x (b).

Impacts des écoulements préférentiels

Les points de suintement observés dans les simulations numériques représentent un phénomène assez semblable aux écoulements digitiformes ("fingering"), bien que physiquement ils soient très différents (voir section 2.1.3). L'analyse des conditions de suintement va nous permettre de mieux comprendre l'impact potentiel des écoulements digitiformes et ceux dans les macropores sur le DMA (ou le DNC) dans les haldes.

Pour évaluer l'impact des écoulements localisés sous forme de "points de suintement" sur la formation du DMA ou DNC, on a effectué deux autres simulations (S50 et S51) similaires à la simulation S21 (figure 5.3, SBL sur GRV avec interface horizontale).

On simule ici des colonnes de hauteur 20 m et de rayon 5 m. L'épaisseur de la couche SBL est de 1 m, elle est placée au dessus de GRV. Au lieu des éléments triangulaires utilisés dans toutes les autres simulations, on adopte des éléments rectangulaires (HYDRUS2D permet ce genre de simulation uniquement quand la géométrie est relativement simple avec un nombre limité d'éléments). Les éléments rectangulaires permettent d'avoir une interface SBL-GRV parfaitement plane, chose qu'on n'obtient pas nécessairement avec HYDRUS2D quand on génère automatiquement un maillage pour une géométrie quelconque avec des éléments triangulaires. La teneur en eau résiduelle des deux matériaux est prise comme condition initiale. Pour les conditions frontières, on utilise le cycle Pr. Latulipe et Ev. Latulipe en surface et un drainage libre à la base (soit les mêmes conditions initiale et frontière qui ont été utilisées dans les simulations du chapitre 4). Les résultats sont donnés en termes de contours de teneur en eau pour la simulation S50 à la figure 6.4.

Figure 6.4 : Contours de teneur en eau après 1 an. Cas de la simulation S50.

On constate sur la figure 6.4 que la teneur en eau dans SBL atteint une teneur en eau de 0,29 à la base de la couche. Elle est de 0,095 dans GRV sur environ 4 m d'épaisseur. Sur le reste de la colonne, la teneur en eau est nulle (égale à la teneur en eau résiduelle de GRV). L'eau se transmet de SBL à GRV presque uniformément sur toute l'interface, ce qui n'est pas le cas avec S21 où l'eau passe dans le GRV par des zones localisées (voir figure 5.3).

Dans la simulation suivante (S51), on introduit une petite dépression à l'interface SBL-GRV. Cette dépression est simulée en créant un léger creux à l'interface comme le montre la figure 6.5. L'affectation du matériau dans HYDRUS2D se fait aux nœuds peut importe la forme de l'élément; ainsi on peut affecter un matériau à un seul nœud d'un élément. La profondeur de la dépression ne dépasse pas 8 cm (des éléments de 8 cm x 8 cm correspondent à la densité maximale que HYDRUS2D permet avec de telle géométrie). C'est le seul changement qui a été fait par rapport à S50. Les résultats de S51 sont montrés à la figure 6.6.

Figure 6.5 : Grille d'éléments carrés (8 cm x 8 cm) montrant un creux dans la couche du sable SBL à l'interface SBL-GRV.

Figure 6.6 : Contours de teneur en eau après 1 an. Cas de la simulation S51.

Les contours de teneur en eau de la simulation S51 montrent que la transmission d'eau à l'interface SBL-GRV se produit sous forme d'un point de suintement (écoulement préférentiel) causé par les irrégularités géométriques à l'interface. Notons que de telles irrégularités peuvent être créées lors de la génération automatique (par HYDRUS2D) des grilles de géométries quelconques (ou volontairement tel que montré à la figure 6.5).

Les teneurs en eau volumiques selon la coupe AB (à l'élévation 18m) dans la zone d'écoulement uniforme et préférentiel sont différentes entre S50 et S51. Dans la zone d'écoulement préférentiel, la teneur en eau volumique θ présente un pic de 0,162 (S_r=42%), à la fin de l'année (figure 6.6). Cette valeur se conserve le long de la colonne. Dans le cas d'un écoulement uniforme (figure 6.4), la teneur en eau θ est de 0,095 (S_r=24%). Cette différence au niveau de la teneur en eau est causée par le type d'écoulement. Quand ce dernier est uniforme, l'eau occupe toute la largeur de la

colonne. Dans l'autre cas, l'eau circule d'une façon plus concentrée laissant la majeure partie de la colonne à sa teneur en eau résiduelle. Même s'il peut y avoir une oxydation des sulfures, l'eau est immobile dans ces zones (Molson et al. 2005) et elle ne contribuerait donc pas à la formation du DMA au bas de la halde.

Une autre différence importante entre les deux modes d'écoulement est le temps de résidence de l'eau dans la colonne. Quand l'écoulement est uniforme, l'eau met plus de 3,5 années pour atteindre la base de la colonne alors que dans le cas de l'écoulement préférentiel, l'eau atteint la base au 11ème mois. La figure 6.7 montre la variation, sur 4 ans, de la teneur en eau en un point situé au milieu de la coupe AB (à l'intersection des droite AB et CD), dans la simulation S50. Cette figure montre, d'une part, qu'à partir de la deuxième année la distribution de la teneur en eau commence à se répéter et d'autre part, que cette teneur en eau θ varie à l'intérieur d'un intervalle [0,05, 0,095]. La variation de la teneur en eau pour ce même point pour la simulation S51 est montrée à la figure 6.8. L'allure de la variation de la teneur en eau est semblable à celle concernant la simulation S50. Il y a toutefois une différence au niveau de la valeur maximale de la teneur en eau. Dans le cas de S51, la teneur en eau varie à l'intérieur d'un intervalle plus grand [0,05, 0,162].

Le temps de résidence de l'eau dans la colonne est plus petit (< 3,5 ans pour S50 et < 11mois pour S51) une fois le régime quasi-permanent atteint (i.e., une fois que le front de mouillage aura dépassé la base de la colonne, car la configuration géométrique de SBL et de GRV est simple ici). Un temps de résidence élevé peut, dans certains cas, favoriser le développement des divers processus d'oxydation des stériles au sein de la halde et la production accrue à long terme du DMA (pour des stériles potentiellement générateur d'acide).

Figure 6.7 : Variation de la teneur en eau au milieu de la coupe AB. Cas de la simulation S50.

Figure 6.8 : Variation de la teneur en eau au milieu de la coupe AB. Cas de la simulation S51.

Pour les haldes à stériles, les écoulements préférentiels peuvent être bénéfiques, dans certains cas (notamment quand l'écoulement se fait verticalement), pour lutter contre la contamination de l'eau. L'eau qui circule dans les haldes provient de la pluie au départ et elle est donc dépourvue de tout contaminant (ou presque). Plus son temps de

résidence au sein des stériles est grand, plus elle sera chargée de contaminants solubles. Les écoulements préférentiels agissent de deux façons : i) en réduisant le temps de résidence de l'eau dans les haldes, et ii) en circulant dans des canaux étroits réduisant ainsi le volume de stériles imbibés d'eau (quand le matériau est homogène).

Lorsque l'écoulement se fait dans des stériles hétérogènes (avec des propriétés hydriques variant selon une forte corrélation spatiale), les simulations vues au chapitre 5 indiquent que les points de suintement s'élargissent, parfois avec une réduction de leur teneur en eau. Cet élargissement s'amplifie avec l'augmentation de l'écart type (ou du coefficient de variation) des propriétés hydriques (peu importe la direction de la variabilité spatiale). Il est donc possible qu'avec des stériles hétérogènes, la vitesse de l'écoulement des points de suintements et le volume des stériles imbibés soient assez similaires à ceux du cas d'un écoulement uniforme (S50)

Les écoulements digitiformes et ceux localisés dans les macropores constituent deux autres façons permettant à l'eau d'atteindre la base de la halde en court-circuitant une partie des stériles. Dans les écoulements sous forme de doigts, l'eau peut circuler à une vitesse approchant celle à saturation. Dans les macropores, elle peut être encore plus rapide, surtout quand ils sont saturés. Lorsque les macropores ne sont pas complètement remplis d'eau (non saturés) l'eau peut couler sur leurs parois sous forme de pellicules d'eau. L'écoulement dans les macropores (même non saturés) demeure un moyen rapide pour acheminer l'eau vers la base de la halde.

Pour qu'un écoulement préférentiel vertical dans une halde soit moins propice à la contamination qu'un écoulement uniforme (non préférentiel), il ne faut pas qu'il se produise n'importe où dans la halde. Les points de suintement qui apparaissent à l'intérieur de la halde deviennent avec le temps des chemins préférentiels par où l'eau transite en continue. L'utilisation d'une couche de matériau fin sur une autre de matériau grossier avec une interface inclinée vers l'extérieur de la halde permet de limiter le

nombre des points de suintement et de concentrer l'écoulement dans les couches de matériau fin près de la périphérie (dans le matériau grossier), ceci même si on considère une variabilité spatiale modérée des propriétés hydriques. En plus de garder la majeure partie du matériau grossier plus sec à l'intérieur de la halde, cette configuration peut favoriser l'augmentation de la teneur en eau près de la bordure extérieure de la halde permettant ainsi une certaine réduction (relative) du mouvement d'oxygène vers l'intérieur de la halde. Avec l'élargissement horizontal de la halde (pendant sa construction), la partie périphérique se trouve en perpétuel renouvellement (voir section suivante). Ceci élimine l'effet de courts circuits permanents de l'écoulement préférentiel.

6.2 Optimisation de la méthode de construction des haldes

On a vu au chapitre précédent que la présence d'une couche inclinée de matériau fin et dense en surface des bancs d'une halde limite la migration de l'eau vers l'intérieur de la halde et favorise un écoulement de cette eau vers sa bordure (Fala et al., 2003 et 2006). En conséquence, la teneur en eau au cœur de la halde peut demeurer pratiquement inchangée. Dans ce cas, l'humidité qu'on y retrouve est peu mobile (Molson et al., 2005). Avec cette configuration, le cheminement des écoulements peut être contrôlé et les endroits d'accumulation de l'eau sont délimités. La sortie des eaux de percolation ne se produit plus sur toute la base de la halde; elle se produit plutôt aux zones périphériques de celle ci. Or le contrôle du mouvement de l'eau dans une halde est un paramètre clé dans le contrôle du DMA ou du DNC. Dans cette section, on discutera de la configuration des haldes pour réduire l'infiltration et contrôler le mouvement de l'eau, et de la mise en œuvre de cette approche. On verra qu'une systématisation des opérations de déposition des stériles, avec des modifications mineures des pratiques courantes (et donc avec des dépenses supplémentaires minimes), devrait permettre d'atteindre l'objectif de réduction de la contamination des eaux.

6.2.1 Mise en situation

La figure 6.9 présente la configuration d'une halde à la fin de sa construction. Cette halde est construite sur un terrain plat où le niveau de la nappe est plus ou moins loin de sa base (pendant toute la période de sa construction). La configuration atteinte à la fin des opérations devrait être établie lors des études d'avant projet. Plusieurs facteurs entrent en ligne de compte quand il s'agit de la conception d'une halde (e.g. Bohnet et al., 1990; Upadhyay et al., 1990; Ernest et al., 1990; Hanby, 1991; Piteau Associates, 1991; Klohn, 1991; Aubertin et al, 2002; Hawley et al., 2003; Shahriar et al., 2007; Williams, 2007). Ces facteurs incluent le choix de la méthode et du site de construction, les caractéristiques des fondations, les équipements utilisés, les propriétés hydrogéologiques des stériles, la stabilité géotechnique, l'impact sur le milieu environnant, les considérations technico-économiques de l'après-mine etc. Dans ce qui suit, on s'attarde surtout aux paramètres qui conditionnent l'infiltration et le mouvement de l'eau dans la halde, c'est-à-dire les paramètres permettant de contrôler le niveau de contamination durant la construction et après la fermeture du site. On vise une optimisation des opérations d'entreposage des stériles dans le but de réduire l'infiltration de l'eau dans la halde et de concentrer les écoulements vers sa périphérie. Les détails plus spécifiques sur la mise en place des stériles et le suivi des travaux de construction des haldes sont donnés par Piteau (1991) et Klohn (1991).

Figure 6.9: Modèle de halde circulaire ou allongée en terrain plat, mettant en relief les stériles fins et grossiers.

On considère ici que la méthode de construction principale est le déversement à la benne (end dumping), accompagnée de certaines modifications dans la mise en place des stériles (avec une mise en place au butoir au besoin). On verra dans la suite les moyens pour assurer une certaine uniformité des propriétés de la couche de matériau fin en surface (surtout son épaisseur et son angle d'inclinaison).

Pour concevoir une halde à stériles, on devrait normalement connaître les caractéristiques suivantes :

- Le volume des stériles à entreposer;
- Les caractéristiques géotechniques et hydriques des stériles (fins et plus grossiers);
- Les conditions hydrologique, hydrogéologique et géotechnique de la région;
- Les conditions climatiques de la région.

Les paramètres à déterminer sont alors :

- L'emplacement et la surface maximale ($S_{H\max}$) de l'empreinte au sol de la halde;
- La géométrie externe : halde circulaire, allongée ou de forme irrégulière;
- L'angle de la pente périphérique avant ou après reprofilage (β_p , voir plus loin);
- L'angle de la pente globale de la halde (β_h);
- L'épaisseur des bancs (H);
- L'épaisseur de la couche de matériau fin (E_f);
- L'épaisseur de la couche de matériau grossier (E_g)
- L'angle de la pente de la couche de matériau fin (β_f);
- La largeur des bancs (en fonction de l'espace disponible, et en fonction de la différence de la largeur entre deux bancs successifs ΔL et la largeur à la base);
- Le nombre des bancs (qui combiné à H donne la hauteur de la halde).

6.2.2 Lien entre les divers paramètres

Les propriétés de base (principalement la granulométrie et la porosité), hydriques (k_s, CRE et fonction de la conductivité hydraulique des matériaux fins et grossiers) et mécanique (principalement l'angle de frottement interne ϕ') constituent les principales propriétés des stériles qui peuvent affecter le dimensionnement d'une halde. À cela s'ajoute la méthode et les moyens de construction et les conditions climatiques de la région. En effet, une meilleure diversion dépend des propriétés hydriques de stériles fins et des conditions climatiques. Pour sa part, la stabilité de la halde (glissements, tassements, érosion de la surface etc.) dépend des propriétés hydriques et mécaniques des stériles et leur interaction avec les conditions climatiques. Les mécanismes de déplacement des stériles sur les pentes jouent aussi un rôle dans la stabilité de la halde. Les mouvements instables des matériaux granulaires vus à la section 2.1.1.2 (figure 2.5) peuvent, par exemple, donner lieu à des glissements sur les pentes. L'ampleur de la ségrégation dépend de la granulométrie et de la teneur en eau des stériles lors du déversement (pour une méthode de construction de la halde et une configuration géométrique des bancs données).

On a vu également, au chapitre précédent, que la forme extérieure de la halde joue un rôle important sur le mouvement de l'eau et sur le drainage vers l'extérieur. La forme joue notamment un rôle dans la quantité d'eau qui s'infiltre dans la halde. La quantité d'eau qui circule à l'intérieur de la halde transite, en premier lieu, par sa surface (dessus et flancs). Cette quantité est proportionnelle à la surface à la base S_H (pour un taux d'infiltration donnée). Lors de sa construction, la surface à la base de la halde S_H varie dans le temps ($S_{H0} \leq S_H \leq S_{H\max}$). Pendant cette période, il est important de maximiser le volume de stériles entreposé pour une surface S donnée. Ceci permet d'avoir, en tout temps, une teneur en eau volumique moyenne (sur toute la halde) minimale. Pour

quantifier ce facteur, on adoptera dans la suite le rapport ρ [L^{-1}] qui est égal à la surface à la base S_H [L^2] sur le volume de stériles V_H [L^3].

Tableau 6.1 : Principaux facteurs d'influence dans le dimensionnement d'une halde.

Élément à dimensionner	Facteurs à considérer
Emplacement	-Coût d'aménagement -Coût de transport des stériles -Capacité portante des sols et autres propriétés hydro-géotechniques -Impact sur la population, les équipements et l'environnement (dans les conditions normales et en cas d'accidents)
Géométrie externe (axisymétrique, 2D ou autre)	- ρ -Diversion d'eau -Surface à la base
Couche de matériau fin	-Diversion d'eau -Stabilité
Bancs	- ρ -Ségrégation granulométrique -Stabilité (pente globale)
ΔL	- ρ -Volume des stériles grossiers secs -Circulation des engins -Stabilité
Nombre de bancs	- ρ -Stabilité

Analyser les divers scénarios du comportement hydrogéologique de la halde nécessite des calculs faisant appel à des méthodes numériques. L'utilisation des méthodes stochastiques permet de mieux appréhender la réalité (en tenant compte de la variabilité des mesures des propriétés géotechniques, hydriques etc.), et d'estimer la marge de manœuvre dont on dispose lors de la construction de la halde (ce qui correspond aux écarts types par rapport aux propriétés nominales). Une fois que le choix d'un scénario est fixé, il faut que la mise en œuvre respecte les recommandations des études d'avant projet. La mise en place de la couche de matériau fin en surface des divers bancs doit

être suivie de très près. Le tableau 6.1 résume les principaux facteurs à considérer lors du dimensionnement d'une halde. Ces facteurs sont présentés dans les sous sections qui suivent.

6.2.3 Emplacement

Il est préférable que le site de la halde se situe dans une zone plane et légèrement inclinée pour faciliter la collecte des eaux à leur sortie de la halde (tout en évitant les cuvettes et les sols mous). L'aménagement de la surface du sol naturel, pour la rendre imperméable, est nécessaire avant le début de la construction de la halde. Un endroit idéal serait celui où le socle rocheux est proche de la surface, car il offre une bonne capacité portante et permet de réduire le coût des travaux d'aménagement lorsqu'il ne présente pas beaucoup de fractures (Malouf, 1990). D'autres critères pour un choix judicieux de l'emplacement d'une halde sont donnés par Aubertin et al. (2002) et Shahriar et al. (2007).

6.2.4 Géométrie externe

Une halde à stériles peut être circulaire, allongée ou de forme non régulière (e.g. McCarter, 1990). Les formes non régulières sont généralement adoptées lorsque la topographie locale se prête mal à une forme plus conventionnelle (circulaire ou allongée). Réduire la surface qu'occupe la halde au sol $S_{H\max}$ est requise pour satisfaire aux exigences économiques (coût d'aménagement) et pour réduire le risque de contamination des milieux environnants.

Pour un volume donné de stériles, la configuration géométrique adoptée aura une influence sur la surface au sol occupée par la halde. L'exemple suivant illustre l'utilisation du rapport ρ pour effectuer le choix de la forme d'une halde. Prenons un volume de stériles de 484740 m^3 placé dans une halde circulaire (diamètre de 240m) ou

allongé (longueur de 240m et largeur de 203 m). Pour ces deux haldes on considère que $\Delta L = 20$ m, $\beta_p = 1V/1{,}35H$ (36,5°), $\beta_h = 15°, \beta_f = 5\%$ (couche inclinée de matériau fin selon la longueur dans le cas 2D) et H = 8 m. Le calcul de ρ peut aider à prendre une décision quant au choix de la géométrie externe. Ici ρ serait égal à 0,101 et 0,093 m^{-1} pour la halde allongée et circulaire respectivement, avec 4 bancs pour chacune. Ceci veut dire qu'on utilise plus de surface dans le cas d'une halde allongée que dans le cas d'une halde circulaire, pour la même quantité de stériles (la surface à la base $S_{H\,\max}$ est de 48744 m^2 pour la halde allongée et de 45239 m^2 dans le cas d'une halde circulaire).

La différence entre les deux surfaces au sol réduit le volume d'eau d'infiltration dans la halde d'une quantité qui peut aller jusqu'à 1402 m^3 par année dans une halde de dimension de la halde de la mine Laronde, pour un taux d'infiltration de 40 cm/an (N.B. taux d'infiltration = taux de précipitation – taux d'évaporation). Le choix d'une halde circulaire permet ici la réduction de la surface à la base d'environ 7 % (par rapport à celle d'une halde allongée), avec une réduction du coût d'aménagement et possiblement une réduction du risque de contamination. Notons que la décision finale doit être prise en tenant compte aussi des résultats des simulations des écoulements dans les deux configurations géométriques (voir simulations S54 et S55 à la section suivante et chapitre 5).

6.2.5 Bancs de la halde

6.2.5.1 Épaisseur et nombre

Les bancs forment les éléments de base d'une halde et une bonne conception de ces derniers constitue le point de départ dans la conception d'une halde moins nocive pour l'environnement. Un banc doit être dimensionné pour assurer

- Une bonne ségrégation granulométrique des stériles dans les pentes pendant la construction;
- Une bonne diversion de l'eau par la couche de matériau fin en surface;
- Un faible rapport ρ de la halde; et
- Une bonne stabilité de la halde.

Pour cela il faut agir sur ses dimensions, sa pente extérieure et sur les caractéristiques de la couche de matériau fin.

L'épaisseur optimale des bancs peut être fixée en cherchant un compromis entre une meilleure ségrégation des stériles (plus l'épaisseur est grande plus la longueur de la pente est grande et meilleure est la ségrégation), une meilleure diversion de l'eau à l'extérieur de la halde (permettant de garder un maximum de stériles à leur teneur en eau résiduelle) et un plus petit ρ. Théoriquement, il est possible de varier l'épaisseur des bancs d'un niveau à l'autre. Cependant une variation trop fréquente de l'épaisseur est déconseillée car elle limite la portée d'une standardisation des opérations, qui est à la base d'une uniformisation des propriétés (mécaniques, hydriques etc.) des stériles.

Le but premier de l'inclinaison de la couche de matériau fin est de garder le maximum de stériles à un état presque sec et d'éviter que l'eau ne circule et ne s'accumule au cœur de la halde. À ce sujet, l'épaisseur du banc peut jouer un rôle très important car l'épaisseur des bancs et le nombre de bancs sont reliés pour un volume donné de stériles. Or, plus le nombre de bancs est grand, plus le nombre de couches de matériaux fins qui favorisent la diversion de l'eau vers l'extérieur de la halde est grand et plus grand est le volume de stériles grossiers qui vont rester presque secs. Les simulations S54 et S55 donnent une illustration de cet effet pour une halde circulaire. On utilise ici les mêmes matériaux que ceux vus plus haut (SBL et GRV) mais on applique un autre cycle de taux de précipitations plus abondantes, soit celui d'Addis Abeba en Éthiopie (voir figure 4.4). Dans ce cas, les précipitations sont appliquées seules (sans évaporation) pour

simuler une année où ces précipitations sont exceptionnellement fortes. L'épaisseur de la couche de SBL est de 1 m, avec une pente de 5%.

La figure 6.10 montre les contours de teneur en eau à la fin de quatre périodes : du début janvier à fin mars, du début avril à fin juin, du début juillet à fin septembre et du début octobre à fin décembre. Cette simulation (S54) montre qu'il y a infiltration vers l'intérieur de la halde dans les deux niveaux à partir du 5ème mois. À la fin de l'année, l'eau s'est propagée presque jusqu'au centre de la halde. Seule une partie centrale (constituée d'une zone d'environ 5 m de rayon et 19 m de hauteur) a été épargnée.

Cet exemple illustre le cas d'une inadéquation entre les conditions climatiques et le dimensionnement de la couche de matériau fin et de l'épaisseur des bancs. Pour réduire les problèmes de migration de l'eau vers le centre de la halde, on pourrait augmenter le nombre de niveaux à 4 dans la halde (au lieu de 2 dans S54). Ceci réduit l'épaisseur des bancs à 5 m (au lieu de 10m dans S54). La figure 6.11 montre les résultats de la simulation S55 obtenus avec une épaisseur des couches de sable de 0,5 m (la moitié comparativement à S54) et une inclinaison de 10 % (le double comparativement à S54). Dans cette simulation, l'infiltration à travers les couches de sable SBL a commencé au 6ième mois et a atteint son maximum le 8ième mois (lorsque le taux de précipitation est le plus élevé). On constate que cette configuration géométrique a permis de réduire considérablement la propagation de l'eau à l'intérieur de la halde durant l'année (si on la compare à celle de S54).

Des considérations géométriques peuvent aussi limiter le choix de l'épaisseur des bancs. En considérant un volume donné de stériles et en cherchant toutes les combinaisons de hauteurs et de nombre de bancs possibles, on se rend compte que l'épaisseur est typiquement comprise dans un intervalle plus ou moins grand en fonction du nombre de bancs adopté. Afin d'illustrer ce point, prenons par exemple un volume de 1179750 m^3

de stériles qu'on veut entreposer dans une halde circulaire (avec ΔL = 20m, β_p = 1V/1,35H, β_f = 5 %)

Figure 6.10 : Contours de teneur en eau à la fin du mois de mars, juin, septembre et décembre (de gauche vers la droite et du haut vers le bas). Cas de la simulation S54.

Figure 6.11 : Contours de teneur en eau à la fin du mois de mars, juin, septembre et décembre (de gauche vers la droite et du haut vers le bas). Cas de la simulation S55.

Dans cet exemple, l'épaisseur des bancs varie de 40,5 à 85 m, de 24,3 à 40,4 m, de 16,1 à 24,2 m de 11,7 à 16 m, de 8,9 à 11,6 m et de 8,3 à 8,8 m, si on adopte un, deux, trois, quatre, cinq ou six bancs, respectivement (voir les détails au tableau 6.2). La pente de la couche de matériau fin joue ici un rôle important dans la détermination de l'épaisseur d'un banc. La pente de cette couche limite l'extension du rayon de la halde (ou d'un banc en particulier). De même, pour une pente et un volume de stériles donnés, l'épaisseur du premier banc (au centre) a un minimum non nul. Ce qui contribue à limiter le nombre de bancs (pour un volume donné de stériles). Ainsi dans notre exemple on ne peut pas construire plus de 6 bancs de même épaisseur car ceci impliquerait une réduction de la hauteur en deçà de 8,3 m et la réduction de la largeur de la halde à la base. La quantité de stériles récupérée après ces opérations ne sera pas suffisante pour construire une 7ème couche, à moins qu'on réduise son épaisseur.

La figure 6.12 présente les valeurs du rapport ρ en fonction de l'épaisseur des bancs. Elle montre que ρ varie de 0,035 m^{-1} dans le cas d'un seul banc à 0,072 m^{-1} dans le cas de 6 bancs. La configuration avec un seul banc minimise ρ pour une hauteur entre 40,5 et 85 m. Cependant, un banc ne permet peut être pas d'avoir la meilleure diversion de l'eau vers l'extérieur de la halde (comme illustré par les simulations S54 et S55). De plus, l'angle global de la pente (β_h) est supérieur aux valeurs recommandées (soit environ 18°, e.g. Aubertin et al., 2002) quand le nombre de bancs est inférieur à 4 (voir tableau 6.2)

Tableau 6.2 : Valeurs des épaisseurs des bancs en fonction du leur nombre pour l'exemple de la figure 6.12.

Nombre de bancs	H (m)	Rayon à la base (m)	β_h (degré)
1	85	115	36,5
	65	115,6	
	48	119,6	
	42	122,8	
	40,5	123,9	
2	38,5	120,5	28,1
	30	123,8	26,4
	25	127,6	24,9
	24,3	128,4	24,7
3	23	128,7	24,3
	22	129,7	23,9
	20	131,8	23,1
	18	134,5	22,1
	16,1	137,8	21,1
4	14	141,8	19,8
	12	147,4	18,3
	11,7	148,6	18,1
5	10	154,9	16,6
	9	160,0	15,6
	8,9	160,7	15,5
6	8,7	161,7	15,3
	8,4	163,5	15,0
	8,3	164,5	14,8

D'autre part, la longueur et l'angle de la pente sur les flancs influencent la ségrégation granulométrique. Plus cette longueur est élevée (pour une inclinaison donnée), et plus la ségrégation est prononcée (voir chapitre 2). La ségrégation granulométrique engendre un granoclassement des stériles sur l'épaisseur d'un banc (gros blocs à la base et particules plus fines en surface). Le rapport ρ augmente avec la longueur de la pente. L'exemple montré au tableau 6.3 (halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, β_f de 5 % et H de 8 m) indique que l'augmentation de la longueur de la pente (pour une hauteur donnée) réduit le volume de stériles qu'on peut mettre sur une surface (à la

base) donnée (et le nombre de bancs pour une hauteur donnée). La stabilité géotechnique est par contre meilleure avec une faible pente.

Figure 6.12 : Rapport $\rho\,(S_H/V_H)$ en fonction de l'épaisseur et du nombre de bancs pour l'exemple de la halde décrit dans le texte (voir aussi tableau 6.2).

Tableau 6.3 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, une pente de la couche de matériau fin de 5 % et des bancs d'épaisseur de 8 m.

β_p	ρ m^{-1}	Nombre de bancs	β_h	Volume max. m^3
1V/1,35H	0,0933	4	14,6°	484740
1V/2H	0,1082	4	12,5°	418089
1V/3H	0,1304	3	10,3°	346899

6.2.5.2 Couche du matériau fin

Bien qu'elle fasse partie du banc, la couche de matériau fin (qui sert à la rétention et à la diversion de l'eau) doit faire l'objet d'une attention particulière lors de la conception de la halde et lors de sa mise en œuvre (on reviendra sur ce sujet plus loin). L'objectif premier de cette couche est d'assurer une bonne diversion de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur du banc et en conséquence garder le maximum des stériles grossiers à leur teneur en eau résiduelle. Pour que les effets de barrière capillaire 2D qui sont à l'origine

de cette diversion apparaissent à l'interface matériau grossier/ matériau fin, il faut que le ψ_r du matériau grossier soit inférieur au ψ_a du matériau fin (e.g., Nicholson et al., 1989; Aubertin et al., 1996). Dans le dimensionnement de la couche de matériau fin, on doit aussi tenir compte de sa stabilité (notamment son érodabilité superficielle lors du ruissellement, et interne au contact de la couche de matériau grossier sous-jacent), de la stabilité du banc sus jacent et de la halde dans son ensemble. L'exemple présenté au tableau 6.4 (halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, pente 1V/1,35H, β_h de 14,5° et des bancs d'épaisseur de 8 m) montre qu'une augmentation de l'inclinaison de la couche de matériau fin (de 1 à 6°) peut réduire le volume maximum que peut contenir une halde (de 571127 à 460656 m^3), pour une surface à la base donnée. Par contre, le rapport ρ peut augmenter (de 0,0792 à 0,0982 m^{-1}).

Notons que même si elles empêchent l'eau de s'infiltrer vers l'intérieur, les couches fines étant constituées de stériles réactifs peuvent générer un DMA (Molson et al., 2005). Il semble donc important de limiter leur nombre si elles sont constituées de matériaux générateurs de DMA ainsi que leur épaisseur et leur inclinaison, ce qui va dans le sens d'une réduction du rapport ρ.

Tableau 6.4 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, ΔL de 20m, pente 1V/1,35H, β_h de 14,5° et des bancs d'épaisseur de 8 m.

β_f %	ρ m^{-1}	Nombre de bancs	Volume max. m^3
1	0,0792	4	571127
3	0,0854	4	529801
6	0,0982	4	460656

6.2.5.3 Largeur des paliers

La bande ΔL (voir figure 6.9) représente la différence de la largeur (ou de rayon) entre deux bancs successifs. Ces paliers doivent être assez larges pour permettre la stabilité

globale de la halde (β_h devrait être de l'ordre de 18°, e.g., Aubertin et al., 2002), la circulation des équipements, la déposition des stériles dans des conditions adéquates, répondre aux situations d'urgence etc. Les paliers devraient être assez étroits pour favoriser un drainage rapide des bancs sus jacents, maximiser le volume des stériles grossiers secs dans la halde et minimiser le rapport ρ de la halde. La valeur de ΔL à une grande influence sur le rapport ρ et sur la stabilité globale de la halde comme le montre l'exemple suivant. Le tableau 6.5 donne les valeurs de ρ dans le cas d'une halde circulaire (de 120 m de rayon, pente de 1V/1,35H, β_f de 5% et H de 8 m). Une augmentation de ΔL de 20 m (de 20 à 40 m) réduit l'angle global de la halde à 8,9° (au lieu de 14,5° pour $\Delta L = 20$); en même temps ρ augmente de plus de 56 %. Cependant la stabilité globale est meilleure avec un ΔL plus grand (l'angle global de la halde est de 8,9° au lieu de 14,5° pour $\Delta L = 20$), mais ceci s'accompagne d'une diminution du volume des stériles et du nombre de bancs qu'il est possible de construire, pour une surface à la base donnée.

Tableau 6.5 : Rapport ρ pour une halde circulaire de 120 m de rayon, pente1V/1,35H, une pente de la couche de matériau fin de 5% et des bancs d'épaisseur 8 m.

ΔL M	ρ m^{-1}	Nombre de bancs	β_h	Volume max. m^3
20	0,0933	4	14,5°	484740
40	0,1459	3	8,9°	309986

6.2.6 Déroulement des travaux

Il est important de systématiser les diverses opérations d'entreposage des stériles pour favoriser un bon contrôle du comportement hydrique de la halde. Quelques recommandations à ce sujet sont présentées dans ce qui suit.

6.2.6.1 Démarrage

Durant la période de construction de la partie centrale de chaque nouveau banc, il n'est pas possible d'utiliser le déversement à la benne comme seul moyen de construction, faute de hauteur suffisante. Il faut alors se servir d'autre engins pour le régalage et le compactage des stériles (voir figures 6.9 et 6.13). La hauteur de ce noyau central dépend de la hauteur préétablie du banc. Sa largeur devrait être réduite au minimum possible car les coûts de construction par unité de volume sont supérieurs à ceux du reste du banc. Il faut se limiter à la largeur nécessaire permettant d'atteindre la hauteur voulue du banc. Le matériau dans ce noyau est constitué de l'ensemble des stériles et il est plus dense en raison de la méthode de mise en place. Une fois cette partie construite il sera possible d'utiliser le déversement à la benne (moins cher) pour la déposition des stériles en crête (voir paragraphe suivant). Avant d'atteindre la hauteur prédéfinie du banc, il faut prévoir la présence d'un niveau de matériau grossier puis la couche de matériau fin au dessus, pour favoriser la création d'effets de barrière capillaire 2D (voir figure 6.13). L'épaisseur de la couche de stériles grossiers (E_g) peut être d'au moins 2 à 3 fois celle de la couche de stériles fins (pour s'assurer de la présence continue d'une épaisseur de la couche de matériau grossier au moins équivalente à celle de la couche de matériau fin).

Pendant cette période, on devrait procéder à la mesure des propriétés de base, hydriques et mécaniques des stériles. On effectue aussi les simulations numériques et les calculs nécessaires pour finaliser les caractéristiques nominales de la halde (selon les paramètres vus plus haut). En particulier, l'épaisseur et la pente de la couche de matériau fin à la surface de chaque banc devrait être fixée à ce stade.

Figure 6.13 : Construction de la partie centrale d'un banc, constituée de stériles avec toutes les classes granulométriques et d'un système bicouche en surface.

6.2.6.2 Mise en place du système bicouche

Pour assurer une certaine uniformité des propriétés de la couche de matériau fin en surface le long des bancs, on propose d'effectuer une séparation granulométrique en amont. Le but visé est de produire deux couches l'une constituée de stériles grossiers et l'autre de stériles fins. Les diamètres de coupure D_{c1} et D_{c2} ($D_{c2} > D_{c1}$) doivent être inférieurs ou égaux à $E_f/4$ et $E_g/4$ respectivement (pour faciliter la compaction). Ils sont à ajuster pendant la période de démarrage par des essais in situ (en fonction des propriétés vues plus haut des deux couches). Les stériles seront alors déposés en deux étapes successives:

i) le déversement de stériles grossiers (diamètre entre D_{c1} et D_{c2}) avec un réglage de la surface selon la pente nominale (β_f) suivi de

ii) la mise en place de la couche de matériau fin (diamètre inférieur à D_{c1}) formée de stériles tamisés. La circulation des engins peut aider au compactage de cette couche.

L'épaisseur E_g de la couche de matériaux grossiers peut être de 2 à 3 fois l'épaisseur E_f de la couche de matériaux fins.

Selon les méthodes d'exploitation utilisées et la nature des stériles, un cas extrême peut se présenter. C'est celui d'un manque de particules fines pour construire la couche de matériau fin. Ceci peut être évité par un ajustement des méthodes d'extraction ou par l'emprunt d'un autre matériau (sables, silts ou rejets de concentrateurs, etc.). Les matériaux du parc à résidus (ou les rejets désulfurés, e.g., Bussière, 2002) peuvent être utilisés (en partie ou en totalité), surtout si l'exploitation est assez avancée. Dans tous ces cas, une étude technico-économique est nécessaire pour juger la pertinence de telles décisions. Il se peut qu'on n'ait pas besoin de mettre en place la couche de matériau grossier (pas même dans la partie centrale des bancs). Il suffirait alors d'effectuer les essais et les ajustements nécessaires, lors du démarrage, pour que le déversement permette une ségrégation granulométrique contrôlée des stériles le long de la pente des bancs.

6.2.6.3 Croissance de la halde

Avec l'apport des stériles, la halde s'élargit horizontalement au niveau d'un même banc et verticalement avec l'ajout de bancs supplémentaires. La largeur maximale pour un banc donné dépend de la largeur du premier banc, de la pente des parois et de ΔL. Pour optimiser le paramètre ρ, il est souhaitable de développer la halde dans les deux sens en même temps (horizontalement et verticalement). Dans certains cas, il vaut mieux ne pas attendre qu'un banc soit terminé pour entamer le banc supérieur. Par exemple considérons une halde circulaire (avec ΔL = 20m, β_p = 1V/1,35H, β_h = 16,6° et β_f = 5 %). La figure 6.14 montre le rapport ρ de la halde construite avec un, deux, trois, quatre ou cinq bancs en fonction du volume des stériles.

Figure 6.14 : Valeurs de ρ (S_H / V_H) en fonction du nombre de bancs pour l'exemple discuté dans le texte.

Ici l'épaisseur des bancs (H) est maintenue à 10 m. Seul le rayon à la base a été modifié (de 15 à 220 m ce qui correspond à S_0= 706,9 m^2 et à S_{max}=152053 m^2). On voit qu'au début, l'augmentation du volume des stériles entreposés engendre une réduction de ρ. Après un certain temps, le rapport ρ commence à augmenter (pour un seul banc). Ceci parce qu'au début le volume croit plus rapidement que la surface. Après un certain temps c'est l'inverse qui se produit. Pendant la phase où ρ est faible, continuer la déposition des stériles dans le même banc perd de sa pertinence sur le plan environnemental. Le premier banc est alors assez large pour permettre la mise en place d'un deuxième banc. L'ajout d'un deuxième banc réduit ρ (voir figure 6.14). Dans ce cas, ρ diminue jusqu'à un volume d'environ 600000 m^3 puis commence à augmenter lentement. L'ajout d'un troisième banc devient plus intéressant que de continuer à déposer les stériles uniquement le long des deux bancs à partir d'un volume de 230000 m^3 environ. On remarque que la réduction de ρ devient plus marquée en fonction du volume. On note aussi qu'avec cette configuration géométrique, l'ajout d'autre bancs (4ème, 5ème, 6ème et 7ème) ne permet pas une réduction notable du rapport ρ. Bien que

celui-ci continue à diminuer, on ne fait pas de gains significatifs par rapport à la surface d'infiltration qu'on crée. Le volume maximum qu'une halde de ce genre peut contenir est d'environ 3146000 m^3 en 7 bancs. La figure 6.15 montre la séquence de construction des divers bancs en tenant compte du rapport ρ. Ce dernier permet d'indiquer à quel volume (et donc à quel rayon pour chaque banc, dans le cas d'une halde circulaire) il faut passer d'une étape à l'autre (en cherchant le ρ minimum dans le graphique de la figure 6.14)

Utilisé de cette façon, le rapport ρ peut aider à dimensionner la halde et à bien planifier les travaux de déposition des stériles le long de la période de la construction de la halde.

6.2.6.4 Rampes d'accès

Pour accéder à la surface des bancs, il faut construire des chemins facilitant la circulation des équipements miniers. La pente optimale pour le transport de stériles par camion est généralement très inférieure à celle de la pente des flancs (Hanby, 1991). La croissance de la halde doit se faire dans le sens horizontal et vertical, selon toutes les directions (car ceci réduit le temps d'exposition aux infiltrations d'eau d'une partie donnée de la halde). Cela peut imposer la construction de plusieurs chemins d'accès. Il est important de s'assurer, lorsque les chemins d'accès sont mis hors service, que les couches de matériau fin continuent de bien jouer leur rôle. La présence de ces matériaux plus fins (matériau de construction du chemin) entre une couche du matériau fin d'un banc et l'autre couche de matériau fin du banc sous-jacent peut créer un chemin préférentiel de l'écoulement de l'eau qui peut dans certains cas augmenter le volume de stériles imbibés d'eau à l'intérieur de la halde. Pour éviter ce problème, il suffit de supprimer le contact entre le matériau de construction du chemin et celui de la couche de matériau fin. Ceci peut se faire en décapant le matériau de la couche de matériau fin (voir figure 6.16). Une fois ce contact éliminé, le déversement peut se poursuivre comme avant.

Figure 6.15 : Schéma illustrant les étapes (de 1 à 13) de la croissance (horizontale et verticale) d'une halde circulaire constituée de 7 bancs (N.B. le schéma ne tient pas compte de l'inclinaison de la couche de surface et ne distingue pas le noyau central des bancs)

6.2.7 Dernières remarques

Il est important de s'assurer que les caractéristiques nominales soient bien respectées lors de la croissance de la halde (épaisseur, inclinaison et propriétés hydriques de la couche de matériau fin, épaisseur des bancs, etc.). Les résultats des simulations numériques du chapitre 5 ont montré qu'une variabilité modérée des propriétés hydriques des couches d'un même banc ne nuit pas aux effets de barrière capillaire 2D à l'interface des stériles fins/stériles grossiers. Ce genre d'analyse permet d'avoir d'établir des intervalles de valeurs de références (des propriétés hydriques) pour le suivi des travaux d'entreposage des stériles.

Le chapitre a traité le cas de haldes circulaires ou allongées sur un terrain plat. Cela ne constitue pas un cas général, mais les principes développés ici sont applicables (avec des

ajustements) aux cas de haldes avec une forme non conventionnelle ou à des terrains valonnés.

Figure 6.16 : Représentation schématique d'un banc d'une halde et de la zone à décaper d'une rampe d'accès, après sa mise hors service (le schéma ne tient pas compte de l'inclinaison des couches de matériau fin).

6.2.8 Fermeture et restauration de la halde

À la fin des opérations minières, une restauration de la halde à stériles s'impose. Elle vise principalement à : i) éliminer les risques pour la santé et à assurer la sécurité des personnes; ii) à limiter la production et la propagation de substances susceptibles de porter atteinte au milieu récepteur et; iii) à long terme, éliminer (ou réduire considérablement) l'entretien et le suivi (RSK, 1990; Aubertin et al., 2002). Les principaux facteurs à considérer à la fin de l'exploitation d'une halde sont :

- la stabilité physique (érosion superficielle ou interne, rupture de fondation, glissement, etc.);
- l'isolation hydrogéologique de la halde;
- les caractéristiques du lixiviat.

Ces facteurs doivent faire l'objet d'une évaluation particulière. Il faut les mettre dans une perspective à long terme (durée de vie de 100 ans et plus), en assurant l'entretien et le suivi. La standardisation des opérations sur la halde, le contrôle du mouvement de l'eau dans la halde et l'existence de couches de granulométrie distinctes (matériau fin par-dessus matériau grossier) constituent des mesures contre l'apparition de pressions d'eau excessives, ce qui améliorera la stabilité contre l'érosion interne et les glissements des pentes. Un reprofilage des parois des bancs peut toutefois être nécessaire pour satisfaire aux exigences de la stabilité des pentes à long terme. Il faut habituellement viser des pentes globales d'inclinaison proches de 1V/2H à 1V/3H, au lieu de 1V/1,35H (environ 37°) comme c'est souvent le cas pour les bancs individuels (e.g., Aubertin et al., 2002). En modifiant l'angle de la pente des bancs d'une halde, on modifie la valeur de ρ. Pour illustrer l'effet d'une telle modification sur ρ, on peut reprendre l'exemple de la halde circulaire (V=484740 m^3, diamètre à la base = 240 m, H = 8 m, ΔL = 20m, β_p = 1V/1,35H, β_h = 15° et β_f = 5%,). Lorsqu'on réduit la pente des parois, ρ augmente à 0,108 et à 0,1308 pour des pentes de 1V/2H et 1V/3H respectivement (au lieu de 0,0933) et on se retrouve avec un volume d'environ 66650 et 137841 m^3 de stériles en surplus pour adoucir les pentes de 1V/2H et de 1V/3H respectivement. Pour remédier à cette situation, on peut profiter du fait que le trafic minier sur la halde n'existe plus. Il est donc possible de réduire ΔL à une valeur inférieure à la valeur initiale (de 20 m ici). Des valeurs de ΔL de 14,64 m et de 6,2 m, pour les pentes 1V/2H et 1V/3H respectivement, permettent de réduire ρ à 0,0933 m^{-1} (soit sa valeur initiale), tout en mettant le volume des stériles (484740 m^3) dans les 4 bancs (avec β_h d'environ 15°). Ce genre de scénario devrait être évalué lors des études d'avant projet. Les travaux de reprofilage peuvent être effectués dans le cadre des aménagements reliés à la restauration de la halde.

L'historique des caractéristiques du lixiviat constitué durant les années d'exploitation de la mine permet de statuer sur la conformité aux règlements en vigueur. La configuration

géométrique de la halde avec des couches de matériau fin inclinées devrait réduire la production d'eau contaminée (Molson et al., 2005). Dans le cas où une réduction du flux d'oxygène ou d'eau à long terme est nécessaire, cette configuration pourra faciliter l'application de certaines solutions telle une couverture du type CEBC (voir solutions possibles dans Aubertin et al., 2002) qui ne nécessitera pas la couche de matériau grossier si le matériau fin utilisé à la surface des bancs est un sable (e.g. Zhan et al., 2001).

CHAPITRE 7

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La production d'eaux de drainage minier acides (DMA) ou de drainage neutre contaminé (DNC) dans les haldes à stériles est régie par plusieurs processus physiques, géochimiques et biologiques qui interagissent les uns sur les autres. Parmi ces derniers, l'écoulement de l'eau, qui se fait principalement en condition non saturée, joue un rôle important dans l'évolution de la qualité du lixiviat.

La mesure du taux d'infiltration à la surface d'un géomatériau constitue une méthode relativement simple et non destructive pour estimer les propriétés hydriques de celui-ci. L'interprétation de tels essais peut cependant se révéler complexe. Devant le peu de représentativité des approches analytiques existantes, généralement développées pour un écoulement 1D (ou avec des hypothèses restrictives dans le cas 2D et 3D), une approche analytico-numérique a été élaborée pour l'interprétation des essais d'infiltration. Cette dernière permet d'estimer les paramètres (hydrogéologiques saturés et non saturés) du modèle analytique de van Genuchten (1980) à partir d'essais d'infiltration. L'approche presentée ici est basée sur les propriétés des équations adimensionnelles des écoulements non saturés et utilise des simulations numériques (réalisées avec le logiciel HYDRUS2D) pour déterminer la solution en termes du taux d'infiltration mesuré. Elle a été appliquée à un sable en laboratoire et aux stériles de la mine Laronde pour caractériser la partie superficielle d'une halde.

Dans ce projet, on a aussi réalisé une étude numérique du comportement hydrogéologique des haldes à stériles à l'aide du logiciel HYDRUS2D (Simunek, 1999). Le but premier de ces travaux est d'aider à comprendre les conditions d'écoulement et de tenter de contrôler ceux-ci afin de minimiser la production d'eaux contaminées sous

forme de DMA ou de DNC. Plusieurs simulations numériques ont ainsi été réalisées et divers cas ont été étudiés en adoptant différents degrés de variabilité des propriétés hydriques (pour des distributions lognormales), selon diverses configurations géométriques et diverses conditions atmosphériques pour des périodes de simulation allant d'un an à dix ans.

À la lumière des résultats obtenus de ces deux principaux volets du projet de doctorat, les conclusions qui suivent ont été retenues.

Le développement de la méthode d'interprétation des essais d'infiltration montre l'importance des taux d'infiltration aux premiers instants d'un essai pour les conditions initiale et frontière adoptées ici (matériau à sa teneur en eau résiduelle et tête d'eau nulle en surface). Les mesures réalisées à des temps petits permettent de mieux estimer le rapport $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ de la CRE Lors d'un essai d'infiltration sur un matériau à sa teneur en eau résiduelle (avec une tête d'eau en surface nulle), la pente de la CRE du matériau influence surtout la première partie de la courbe des taux d'infiltration (à des temps très petits). À des temps plus grands, nos résultats indiquent que c'est la conductivité hydraulique à saturation $k_s^{'}$ et l'AEV ($\psi_a^{'}$) du matériau qui contrôlent les taux d'infiltration.

Les essais *in situ* effectués sur la partie superficielle de la halde à stériles ont par ailleurs montré que les propriétés hydriques des stériles ont des corrélations horizontales plus élevées comparativement à celles selon l'axe vertical. Ces résultats et les autres travaux menés sur la halde de la mine Laronde indiquent aussi que le volume élémentaire représentatif peut parfois ne pas convenir pour la mesure de certaines propriétés des stériles, vu leur granulométrie étalée (et aussi compte tenu de leur hétérogénéité à l'échelle de la mesure).

Les nombreux résultats de simulations numériques présentés aux chapitres 4 et 5 ont montré le rôle que joue la variabilité spatiale des propriétés hydriques sur les écoulements et sur l'accumulation d'eau. Par exemple, une forte variabilité spatiale horizontale mène l'eau principalement dans le sens horizontal, typiquement vers le centre de la halde. Une forte variabilité spatiale verticale la mène plutôt en profondeur. Plus l'étalement (écart-type) des propriétés hydriques est grand, plus ces effets sont accentués. Une forte corrélation mixte (celle qui est la plus réaliste sur le terrain) induit une tendance moindre à transporter l'eau vers le centre (l'eau se déplace alors en diagonale vers l'extérieur). Les résultats montrent également que la teneur en eau ne change pas beaucoup par rapport au cas de référence (avec propriétés homogènes des matériaux) si on considère une faible variabilité de la porosité au sein de la halde.

Lorsque qu'une couche de matériau fin est placée sur un matériau plus grossier avec une inclinaison vers l'extérieur à un certain angle (5 à 10 % dans les cas traités ici), il devient possible de contrôler le mouvement de l'eau à l'intérieur de la halde. Le résultat est alors différent des cas où les couches sont horizontales, qui favorisent plutôt une migration de l'eau vers le cœur de la halde. Les couches inclinées permettent de drainer le centre de la halde et acheminer l'eau vers l'extérieur grâce aux effets de barrière capillaire en 2D. En conséquence, une grande partie des stériles reste à la teneur en eau résiduelle et l'eau circule près des flancs de la haldes et dans les couches fines. Ces effets, qui peuvent se révéler bénéfiques, dépendent des caractéristiques hydriques des deux matériaux en contact, de la configuration géométrique externe de la halde (circulaire ou allongée, nombre de bancs), ainsi que de l'angle d'inclinaison et de l'épaisseur de la couche de matériau fin. Lorsqu'on introduit une variabilité spatiale des propriétés hydriques des deux matériaux (fin et grossier) le comportement du système bicouche peut changer. Avec une variabilité spatiale faible à modérée, le volume de stériles grossiers qui restent secs est supérieur à celui du cas avec des matériaux homogènes, pour une même configuration géométrique. Dans le cas d'une variabilité

spatiale élevée on a constaté que le volume de stériles grossiers affectés par le mouvement de l'eau grandit.

Pour assurer une mise en œuvre selon les hypothèses de conception avec une couche de matériau fin sur des matériaux plus grossiers (menant à un meilleur contrôle du mouvement de l'eau dans la halde), on propose d'effectuer une séparation granulométrique d'une partie des stériles en amont. Ainsi, lors de l'entreposage, on procède en deux phases : la première consiste à déverser les stériles sans distinction de classes granulométriques sur la majeure partie de la hauteur des bancs; une deuxième phase vise à mettre en place un système bicouche constitué de matériau fin sur matériau grossier avec une interface inclinée.

Les analyses effectuées au sujet de la configuration géométriques externe d'une halde à stériles indiquent que l'inclinaison de la couche de matériau fin en surface des bancs a une grande incidence sur les autres dimensions de la halde. L'utilisation du rapport ρ (surface de l'empreinte de la halde à la base sur le volume des stériles) comme outil de dimensionnement et de planification des travaux de construction des haldes suggère la construction selon plusieurs bancs pour réduire la teneur en eau volumique moyenne de la halde (pour un volume des stériles donné). La section 6.2 propose d'ailleurs une approche pour aider à concevoir la halde de façon optimale.

Cette thèse apporte plusieurs contributions scientifiques et techniques qui pourraient s'avérer utiles pour les études futures et pour des applications réelles sur le terrain. Mentionnons les points suivants :

L'approche analytico-numérique pour l'interprétation des essais d'infiltration permet d'estimer quatre des cinq paramètres du modèle de van Genuchten (1980). Le cinquième paramètre (la teneur en eau résiduelle) peut être évalué indirectement à l'aide de modèles physiques de prédiction des CRE. Cette approche comporte peu de restriction

quant à la nature de l'essai (1,2 ou 3D) ou à la forme de la surface d'infiltration. La tête d'eau en surface peut être constante (nulle ou supérieur à 0) ou variable en fonction du temps. La technique est applicable à un matériau homogène. Lorsque le matériau est hétérogène, l'interprétation donne les paramètres du modèle de van Genuchten d'un matériau homogène équivalent. Cette approche a aussi mis en lumière le rôle des divers paramètres ($\psi_a^{'}$, $\psi_a^{'}/\psi_w^{'}$ et $k_s^{'}$) dans la variation des taux d'infiltration en fonction du temps. Cette approche est généralement plus avantageuse que les méthodes numériques car elle assure l'unicité de la solution pour la détermination des propriétés hydriques d'un matériau à partir d'un essai d'infiltration, pour des conditions de simulations numériques données. Les courbes $k_{ra}^{'}$ en fonction de $\psi_{ra}^{'}$ (calculées pour un cas en particulier) sont réutilisables pour les mêmes conditions initiale et frontière, pour diverses grandeurs de la surface d'infiltration (pour un $\psi_{ra}^{'}$ allant d'environ 0,18 à 90, pour les cas traités ici). Ceci réduit le volume des calculs pour l'interprétation de nouveaux essais, une fois que ces courbes sont tracées.

Les travaux de simulation présentés dans cette thèse (aux chapitres 4 et 5) ont également contribué à améliorer nos connaissances relatives aux écoulements non saturés dans les haldes. La prise en compte d'une variabilité des propriétés hydriques avec une forte corrélation spatiale (horizontale, verticale ou mixte) reflète un comportement hydrogéologique plus réaliste des haldes à stérile. Ces travaux ont permis aussi d'évaluer le comportement du système en couches avec une interface inclinée (destiné à contrôler le mouvement de l'eau dans les halde) dans des conditions plus réalistes. Les résultats ont montré que les propriétés des deux matériaux, l'angle d'inclinaison et l'épaisseur de la couche de matériau fin sont les principaux paramètres qui influencent le comportement du système.

Enfin, la thèse présente certains outils permettant de mieux planifier la construction d'une halde. L'approche proposée vise la réduction de la quantité d'eau qui circule dans

la halde en tout temps. Ceci facilite sa restauration à la fin des opérations de la mine (si la halde contient des minéraux réactifs).

Pour les études futures, nous recommandons d'appliquer l'approche analytico-numérique pour l'interprétation des essais d'infiltration à une surface d'infiltration conique où la charge et la surface d'infiltration peuvent être facilement déterminées (ou contrôlées). Des recherches additionnelles dans ce sens permettront d'obtenir des résultats plus précis surtout pour de grandes surfaces d'infiltration.

Il serait également important de se pencher plus spécifiquement sur les méthodes de construction des haldes à stériles et d'appliquer à un cas réel les propositions présentées dans cette thèse. Il faut notamment analyser sur le terrain l'effet d'une variabilité avec une forte corrélation spatiale des propriétés hydriques sur le comportement du système en couches (matériau fin sur matériau grossier) et revoir de plus près les opérations précédant le transport des stériles vers la halde. Les approches géophysiques pourraient être très utiles à cet égard. Ceci aidera à optimiser les opérations de préparation et de mise en place des matériaux fins et plus grossiers.

Le contrôle du rapport ρ peut aider à minimiser le volume d'eau qui circule dans une halde (pour un volume donné des stériles). On a considéré ici que toute la différence entre les précipitations et l'évaporation s'infiltre dans la halde. En réalité, il faudrait tenir compte du volume d'eau de ruissellement aussi. De plus, le phénomène d'évaporation n'a pas été analysé spécifiquement dans ce projet. Il serait alors utile d'étudier l'effet de la forme, de la grandeur et de l'inclinaison des surfaces exposées au ruissellement et à l'évaporation. Ceci permettrait de définir plus spécifiquement la façon de réduire le volume d'eau qui s'infiltre dans la halde.

BIBLIOGRAPHIE

ABDALLAH, A. (1999). Modélisation de l'infiltration dans les sols fins compacts: intégration des écoulements préférentiels dans les macropores. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. École Nationale Supérieure de Nancy (École doctorale PROMEMA).

AGUIRRE, M.A.; IPPOLITO, I.; CALVO, A.; HENRIQUE, C. (1997). Effects of geometry on the characteristics of motion of particle rolling down a rough surface. Powder technology. 92: 75-80.

AL MAKTOUMI, A.; LOCKINGTON, D.A.; VOLKER, R.E. (2007). SEAWAT 2000: modeling unstable flow and sensitivity to discretization levels and numerical schemes. Hydrogeology Journal, 15: 1119-1129.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. (2002). Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport. Academic press. San Diego, California.

ANTERRIEU, O. 2006. Caractérisation géophysique de la structure interne d'une halde à stériles pour l'évaluation du transport des fluides. Mémoire de maitrise. Génie Minéral. École Polytechnique de Montréal, Canada.

ANTERRIEU, O.; CHOUTEAU, M.; AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B. (2007). A geophysical investigation of the internal structure of a waste rock pile. Mining and Environment IV Conference, Sudbury, Ontario, Canada (Octobre 19-27).

AUBERTIN, M.; BÉDARD, C.; JUNEAU, R. (1999). Gestion des rejets miniers. La stabilité et le suivi des digues. Notes de cours (non publiées), Formation donnée par l'Association Minière du Québec (AMQ).

AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B.; AACHIB, M.; CHAPUIS, R.P.; CRESPO, J. R. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. Hydrogéologie, 1, pp 3-13.

AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B.; BERNIER, L. (2002) Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur cédérom. Presses internationales Polytechnique, Montréal.

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. Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a., Projet CDT P1622, École Polytechnique de Montréal. 164p.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; JOLETTE, D.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R.P.; JAMES, M.; RIFFON, O. (2002a) Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. Défis & Perspectives : Symposium 2002 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, 3-5 novembre 2002. Développement Économique Canada/Ministère des Ressources Naturelles du Québec/CIM. Comptes-Rendus sur CD-ROM.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R.P. (2003) A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. Canadian Geotechnical Journal 40(6): 1104-1122.

AUBERTIN, M.; RICARD, J.F.; CHAPUIS, R.P. (1998). A predictive model for water retention curve: application to tailings from hard-rock mines, Canadian Geotechnical Journal, 35:55-69.

AZAM, S.; WILSON, G.W.; HERASYMUIK, G.; NICHOL, C.; BARBOUR, L.S. (2006). Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at

the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. Bull. Eng. Geol. Environ. (DOI 10.1007/s10064-006-0077-7).

BEAUDOIN, G.; PILOTE, P. (2000). Géologie de la région de Val d'Or, sous-province de l'Abitibi : volcanologie physique et évolution métallogénique. Collection MB (Géologie Québec).

BOHNET, E.; ET KUNZE, L. (1990). Waste disposal – planning and environmental protection aspects. Surface Mining (2nd ed.), pp 485-494. Kennedy, B.A. (ed.). SME

BOUTERS, T.W.J.; STEENHUIS, T.S.; DICARLO, D.A.; NIEBER, J.L.; DEKKER, I.W.; RISTEMA, C.J.; PARLANGE, J.-Y.; HAVERKAMP, R. (2000). Physics of water repellent soils. Journal of Hhydrology. 231,232: 233-243

BOUTREUX, T.; MAKSE, H.A.; GENNES, P.G. (1999). Surface flows of granular mixtures. The European Phisical Journal B. 9: 105-115

BOUWER, H. (1966). Rapid field measurements of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. Water resources research. 2, 4: 729-738

BOUWER, H. (1969). Infiltration of water into non uniform soil. J. of irrigation and drainage div., Proc. of the Am. Soc. of Civil Engineers. 95, IR4:451-462

BRADFORD, S.A.; LEIJ, F.J. (1995). Wettability effects on scaling two and three-fluid capillary pressure- saturation relations. Environ. Sci. Technol. 29, 1448-1455.

BRAKENSIEK, D.L. (1977). Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. Water resources research. 13, 3: 680-682

BRETT, D. (2007). Practical waste rock dump design for acid rock drainage control- the savage river mine experience. Australian Center for Geomechanics. Newsletter (August).

BRIANT, J.; TENEBRE, L. (1989). Généralités sur les phénomènes de surface. Dans phénomènes d'interface agents de surface, principes et modes d'action. Éditions technip, Paris

BROOKS, R.H.; COREY A.T. (1964). Hydraulic properties of porous medium. Hydrology. Paper 3, Colorado State University (Fort Collins), Colorado.

BRUTSAERT, W. (1966). Probability laws for pore-size distribution. Soil Sci. 101:85-92

BRUTSAERT, W. (1968). A solution for vertical infiltration into a dry porous medium. Water Resources Research 4: 1031-1038

BRUTSAERT, W. (1976). The concise formulations of diffusive sorption of water in a dry soil, Water Resour. Res. 12, 1118–1124.

BUSSIÈRE, B. (1999). Étude du comportement hydrique de couverture avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal, Canada.

BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R.P. (2003) The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal 40(3): 512-535.

BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; ZAGURY, G.J.; POTVIN, R.; BENZAAZOUA, M. (2005) Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des sites miniers

abandonnés générateurs de drainage minier acide. 2e Symposium sur l'Environnement et les Mines, organisé par l'ICM – Rouyn-Noranda, 15-18 mai 2005. 29p.

BUSSIÈRE, B.; BENZAAZOUA, M.; KONGOLO, M.; AUBERTIN, M. (2002) Intégration de la désulfuration dans la restauration des sites miniers générateurs de DMA. Défis & Perspectives: Symposium 2002 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, 3-5 novembre 2002. Développement Économique Canada/Ministère des Ressources Naturelles du Québec/CIM. Comptes-Rendus sur CD-ROM.

CAMPOS, D. (2004). Une étude de caractérisation de la structure interne d'une halde à stériles par méthode géophysiques. Mémoire de maitrise. Génie Minéral. École Polytechnique de Montréal, Canada.

CARRE, A. (1989). Interface solide-liquide. Dans phénomènes d'interface agents de surface, principes et modes d'action. Éditions technip, Paris

CARRILLO, M.L.K.; LETEY, J.; YATES, S.R. (2000). Unstable water flow in a layered soil: II effects of an unstable water-repellent layer. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 456-459

CASSIE, A.B.D.; ET BAXTER, S. (1944). Wettability of porous surfaces. Trans. Farad. Soc. 40, 546.

CHAPUIS, P.R.; MASSE, I.; MADINIER, B.; AUBERTIN, M. (2006). Essai de drainage en colonne pour obtenir les propriétés non saturées de matériaux grossiers. Comptes rendus du 59e conférence géotechnique canadienne et 7e conférence spéciale conjoint SCG/AIH sur les eaux souterraines. Vancouver, Canada

CHAPUIS, R.P.; CHENAF, D.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; CRESPO, R.J. (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.; CHENAF, D.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; CRESPO, R.J. (2001). A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. Canadian Geotechnical Journal. 38(5):1113-1126.

CHILDS, E.C.; BYBORDI, M. (1969). The vertical movement of water in stratified porous material. 1. Infiltration. Water Resources Research. 5,2: 446-459

CHIN, D.A. (2006). Water resources engineering. Pearson Prentice Hall. New Jersey.

CHOUTEAU, M.; POISSON, J.; CAMPOS, D.; AUBERTIN, M.; VALLIÈRES, S.; DUBREUIL-BOISCLAIR, C.; PUCELLE, A.; FALA, O. (2005) Caractérisation géophysique des haldes à stériles. Symposium 2005 sur l'Environnement et les Mines, 15-18 mai 2005, Rouyn-Noranda. CIM.

CIFUENTES, E.; AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R.P.; MOLSON, J.; BUSSIÈRE, B. (2006) Analyses of the water diversion length of inclined, layered soil covers. Sea to Sky Geotechnique 2006: Proceedings of 59th Canadian Geotechnical Conference and 7th Joint CGS/IAH Groundwater Specialty Conference, 1-4 October 2006, Vancouver, BC, Canada, pp. 1744-1749.

CRANK, J., (1975). The mathematics of diffusion. 2nd edition. Clarendon Press, Oxford, U.K.

DAVIDOFF, B.; SELIM, H.M. (1986). Goodness of fit for eight water infiltration models. Soil sci. soc. of Amer. J. 50:759-762

DERESIEWICZ, H. (1958). Mechanics of granular matter. Adv. Appl. Mech. 5, 233-306.

DINGMAN, L.S. (1994). Physical hydrology. Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey

DOLGUNIN, V.N.; UKOLOV, A.A.; IVANOV, O.O. (2006). Segregation kinetics in rapid gravity flow of granular materials. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol 40, no 4 : 393-404

DOOGE, J.C.I. (2002). Simplification plus rigorous analysis: the modus operandi of John Philip. In. Environmental mechanics – water, mass and energy transfer in the biosphere. Raats, P.A.C.; Smiles, D.; Warrick, W. (Eds). America Geophysical Union, Washington DC.

DUBREUIL-BOICLAIR, C. (2005). Caractérisation de la halde à stérile de la Mine Laronde par tomographies radar et diagraphies. Rapport de stage. École polytechnique de Montréal, Canada.

DUPEYRAT, M. (1989). Méthodes de mesure de la tension superficielle ou interfaciale. Dans phénomènes d'interface agents de surface, principes et modes d'action. Éditions technip, Paris

EL KADI, A.I. (1986). A computer-program for generating two-dimensional fields of autocorrelated parameters. Groundwater, vol 24 no 5: 663-667.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2007. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html (date 17 sep 2007)

ESPINOZA, R.D. (1999). Infiltration. In the handbook of groundwater engineering. Delleur, J. W. (ed.). CRC Press. Boca Raton, Fl.

FALA, O. (2002). Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques. Mémoire de maîtrise. École polytechnique de Montréal, Canada.

FALA, O.; AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R.P. (2002). Analyse numérique des écoulements non saturés dans les haldes à stériles. Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical Conference - 3rd Joint International Association of Hydrogeologists - Canadian National Chapter - Canadian Geotechnical Society (IAH-CNC/CGS) Conference: Ground and Water: Theory to Practice, Niagara Falls, pp.489-496. CD-ROM.

FALA, O.; AUBERTIN, M.; MOLSON, J.W.; BUSSIÈRE, B.; WILSON, G.W.; CHAPUIS, R.; MARTIN, V. (2003). Numerical modeling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. In: Farrell, T. and Taylor, G. (Eds.), Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series 3/2003, pp 895-902.

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. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 26-30 March 2006, St. Louis, Missouri, R.I. Barnhisel (ed.). The American Society of Mining and Reclamation, pp. 582-597.

FALA, O.; MOLSON, J.W.; AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B. (2005) Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. Mine Water & Environment 24(4): 172-185.

FREDLUND, D.G.; XING, A. (1994). Equations for the soil –water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31:521-532

FREDLUND, M.D.; WILAON, G.W.; FREDLUND, D.G. (2002) "Use of the grains size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve". Can. Geotech. J., 39(5), 1103-1117.

FREEZE, R.A. (1980). A stochastic-conceptual analysis of rainfall-runoff precesses on a hillslope. Water Resources Research, vol 16 no 2: 391-408.

FROSTAD, S.; KLEIN, B.; LAWRENCE, R.W. (2005) Determining the weathering characteristics of a waste dump with field tests. International Journal of Surface Mining. Reclamation and Environment. Vol 19, no 2, 132-143

GALLEGOS, J.C.C.; BAY, D.S.; BECKIE, R.; KLEIN, B.; MAYER, U.; SMITH, L.; WILSON, G.W.; BRIENNE, S.; LATIENT, H. (2007). Design and construction of Field-scale waste rock test piles at the Antamina Mine, Peru. Geotechnical news (march issue).

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. École polytechnique de montréal. Canada.

GARDNER, W.R. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. Soil Science, 85:228-232.

GARVIE, A.; LINKLATER, C. (2006). Building confidence in the long term performance of waste rock dumps following closure. Australian Center for Geomechanics. Newsletter (December).

GLASS, R.J. (1985). A study of wetting front instability in layered porous media. MS thesis. Cornell University.

GLASS, R.J. (1988). Wetting front instability in layered unsaturated porous media. Partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy thesis. Cornell University

GOSSELIN, G. 2003. Laronde mineral resource and mineral reserve estimate. AGNICO AIGLE LTD – AEM Report of foreign issuer (6-k) SIGNATURE. http://sec.edgar-online.com/2003/05/20/0001047469-03-019315/Section2.asp (date: 17 sep. 2007)

GRASSELLI, Y.; HERRMANN, H.J. (1998). Experimental study of granular stratification. Granular Matter. 1:43-47

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911). Studies on soil physics. The flow of air and water through soils. J. Agric. Sc. 4: 1-24.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911). Studies on soil physics. Part1- The flow of air and water through soils. J. Agric. Science 4,1-24

HAAN, C.T. (1977). Statistical methods in hydrology. Ames: Iowa State University Press

HANBY, I.R. (1991). Enhancement of damp truck operating efficency: part 2 – optmization of hand-road gradients. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A: Min Industry), 100: 43-45

HAVERKAMP, R.; KUTILEK, M.; PARLANGE, J.Y.; RENDON, L.; KREJKA, M. (1988). Infiltration under ponded conditions: infiltration equations tested for parameter time-dependence and predictive use. Soil Science, vol. 145, no 5.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. Water Resources Research, vol 30 no 11. 2931-2935.

HAWLEY, P.M.; OCHOA, X.; SHARON, R. (2003). Design of the Pierina waste dump. CIM Bulletin, vol 96 no 1073.

HERNANDEZ, A.M., (2007). Analyse en laboratoire pour obtenir les fonctions hydriques des matériaux grossiers. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal.

HILL, D.E.; PARLANGE, J.Y. (1972) Wetting front instability in layered soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36, 697-702.

HILL, M.C.; TIEDEMAN, C.R. (2007). Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions and uncertainty. Hoboken, N.J. (ed.). Wiley-interscience.

HILLEL, D. (1987) Unstable flow in layered soils: a review. Hydrological Processes, 1: 143-147.

HILLEL, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press. San Diego.

HOLTAN, H.N. (1961). concept for infiltration estimates in watershed engineering. U.S. Departement of agriculture, Ag. Res. Serv. Public:41-51

HORTON, R.E. (1940). approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 1939, 5: 399-417.

HOUSTON, W.N.; DYE, H.B.; ZAPATA, C.E.; PERERA, Y.Y.; HARRAZ, A. (2006). Determination of SWCC using one point suction measurement and standard curves. In Unsaturated soils. Proceeding of the 4th international conference on unsaturated soils. MILLER, G.A.; ZAPATA, C.E.; HOUSTON, S.L.; FREDLUND, D.G. (Eds). April 2-6. Carefree, Arizona.

IWATA, S.; TABUCHI, T.; ET WARKENTIN, B.P. (1988). Soil-water interaction, mecanisms and applications, Marcel Dekker, New York

KAO, C.S.; HUNT, J.R. (1996). Prediction of wetting front movement during one-dimensional infiltration into soils. Water Resources Research. 9,2: 384-395

KELEBEK, S.; YORUK, S. (2002). bubble contact angle variation of sulphide minerals in relation to their self-induced flotation. Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 196. 111-119.

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

KLINE, S.J., (1965). Similitude and approximation theory. McGraw-Hill Inc., New York.

KLOHN LEONOFF Ltd. (1991). Operation and monitoring of mine dumps - interim guidelines. Prepared for the B.C. Mine Dump Committee

KOSTIAKOV, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. 6th Com. Intern. Soc. Soil. Sci. Russian Part A. 17-21.

KOVÀCS, G. (1981). Seepage hydraulics, Elsevier Scientific Pub.

LAMONTAGNE, A. (2001). Étude de la méthode d'empilement des stériles par entremêlement par couches pour contrôler le drainage minier acide. Thèse de doctorat, Université Laval, Canada.

LAROUSSI, C.; ET BACKER, L.W. (1979). Relation between geometrical properties of glass beads media and their main hysteresis loops. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 646-650.

LEFEBVRE, R. (1994). Caractérisation et modélisation numérique du drainage minier acide dans les haldes de stériles. Thèse de doctorat, Université Laval, Canada

MAKSE, H.A.; CIZEAU, P.; ET STANLEY, E. (1997). Possible stratification mechanism in granular mixtures. Physical Review Letters. Vol 78, no 17: 3298-3301

MALOUF, E.E. (1990). Waste dumps – Mineral Leaching Technology : Heap-dump-in situ leaching of minerals. Surface Mining (2nd ed.), pp 883-889. Kennedy, B.A. (ed.). SME

MAQSOUD, A.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M., (2006) Modification of the predictive MK model to integrate hysteresis of the water retention curve. In Unsaturated soils. Proceeding of the 4th international conference on unsaturated soils. MILLER, G.A.; ZAPATA, C.E.; HOUSTON, S.L.; FREDLUND, D.G. (Eds). April 2-6. Carefree, Arizona.

MARQUARDT, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. SIAM. J. Appl. Math. 11:431-441.

MARTIN, V. (2003) Étude des propriétés non saturées des stériles miniers. Mémoire de maîtrise. École polytechnique de Montréal.

MBONIMPA, M.; AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R.P. (2000). Simple hydraulic functions using basic tailings properties. Proc. 6th Environmental Speciality Conference, Canadian Society for Civil Engineering, London, Ontario

McCARTER, M.K. (1990). Design and operating considerations for mine waste embankments. Surface Mining (2nd ed.), pp 890-899. Kennedy, B.A. (ed.). SME

MEIN, R.G.; FARREL, D.A. (1974). Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 38: 872-876

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research. 9,2: 384-395.

MEJIA, J.M.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1974). On the synthesis of random field sampling from the spectrum: an application to the generation of hydrologic spatial processes. Water Resources Research, vol 10 no 4, 705-711

MITCHELL, J.K. (1993) Fundamentals of soil behavior. Wiley (2nd Ed.). New York

MIYAZAKI, (2006) Water flow in soils. Taylor & Francis, CRC, Boca Raton

MOLSON, J.W.; FALA, O.; AUBERTIN, M.; BUSSIÈRE, B. (2005) Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. Journal of Contaminant Hydrology. 78(4): 343-371.

MOREL-SEYTOUX, H.J.; KHANJI, J. (1974). Derivation of an equation of infiltration. Water Resources Research, 10,4: 795-800

MORIN, K.A.; GERENCHER, E.; JONES, C.E.; KONASEWICH D.E. (1991). Critical literature review of acid drainage from waste rock. MEND Report 1.11.1, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 175pp.

MORIN, K.A.; HUTT, N.M. (1997). Environmental Geochemistry of Mine site Drainage: Practical Theory and Case Studies. MDAG Publishing. 333p.

MORTENSON, M.E. 1985. Geometric modeling. John Wiley and sons. New York.

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

NICHOL, C. (2005). Field scale experiments of insaturated flow and solute transport in a heterogeneous porous media. Water Resources Research, vol 41.

NICHOLS, R.S. (1987). Rock segregation in waste dumps. In proceedings of the international symposium on flow-through rock drains convened at Inn of the south, Cranbrook, BC, Canada.

NICHOLSON, R.V.; GILLHAM, R.W.; CHERRY, J.A.; REARDON, E.J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal, 26:1-8.

NIEBER, J.L.; BAUTERS T.W.J.; STEENHUIS, T.S.; PARLANGE, J.-Y. (2000) Numerical simulation of experimental gravity-driven unstable flow in water repellent sand. Journal of Hydrology.231-232 : 295-307.

OGAWA, S. (1998). Fractal geometry of preferential flow pathways in field soils. Ph.D. Thesis. Cornell University.

ORR, S.; VESSELINOV, V. (2002). Enhanced heap leaching – part 2 : Applications. Mining Engineering (October)

PARKER, J.C., (1989). Multiphase flow and transport in porous media. Review of Geophysics, 27,3:311-328.

PARLANGE, J.K.; LISLE, I.; BRADDOCK, R.D.; SMITH, R.E. (1982). The three-parameter infiltration equation. Soil sci. soc. of Amer. Proc. 5, 133, 6 : 337-341

PARLANGE, J.Y. (1975a). On solving the flow equation in unsaturated soils by optimization: horizontal infiltration. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 415-418.

PARLANGE, J.Y.; HAVERKAMP, R.; TOUMA, J. (1985). Infiltration under ponded conditions : 1 Optimal analytical solution and comparison with experimental observations. Soil sci. soc. of Amer. Proc 5, 139, 4:415-418

PECK, A.J. (1965). Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 3 vertical columns. Soil Sci, 100: 44-51

PERROUX, K.M.; WHITE, I. (1988) Designs for disc permeameters. Soil. Sci. Soc. Am. J. 52 :1205-1215.

PHILIP, J.R. (1957a). The theory of infiltration : 1. The infiltration equation and its solution. Soil Science. 83: 345-357

PHILIP, J.R. (1957b). The theory of infiltration: 2. The profile of infinity. Soil Science. 83: 435-448.

PHILIP, J.R. (1957c). The theory of infiltration: 3. Moisture profile and relation to experiment. Soil Science. 84: 163-178.

PHILIP, J.R. (1957d). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science. 84: 257-264.

PHILIP, J.R. (1969). Theory of infiltration. Advance in hydroscience. Vol 5, academic press, New York.

PHILIP, J.R. (1984). Steady infiltration from circular cylindrical cavities. Soil science society of America journal, 48:270-278.

PHILIP, J.R. (1987). The infiltration joining problem. Water Resources Research. 23,12: 2239-2245

PHILIP, J.R. (1969b). Absorption and infiltration in two and three dimensional system, in Water in the Unsaturated Zone, edited by RIJTEMA, R.E. and WASSINK, H., Proc. IASH/UNESCO Symp. Wageningen, 1966, 1, pp 503-525, UNESCO Paris.

PITEAU (1991). Investigation and design of mine dumps - Interim guidelines. Prepared for the B.C. Mine Dump Committee. Piteau Associates Engineering Ltd.

POISSON, J.; CHOUTEAU, M.; AUBERTIN, M.; CAMPOS, D. (2007). Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. Journal of Applied Geophysics (soumis)

PUCELLE, A., (2003), Caractérisation géophysique par la méthode d'imagerie électrique d'une halde à stériles réactifs de la mine Laronde (Québec). ENSMP (France)

PUDASAINI, S.P.; MOHRING, J. (2002). Mathematical model and experimental validation of free surface size segregation for polydisperse granular materials. Granular Matter. 4: 45-56

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; MILLER, N. (1983b). Predicting Green and Ampt infiltration parameters from soil data. J. Hydr. Engrg. ASCE, 1091: 62-70

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. (1982). Estimating soil water retention from soil porosities. J. Irrig. and drain. Engrg. ASCE, 1082: 166-171

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. (1983a). Agricultural management effects on soil water processes. Part I : soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. Trans ASAE. 266:1747-1752

RICHARD, P.; OGER, L.; LEMAÎTRE, J.; SAMSON, L.; MEDVEDEV, N.N. (1999). Application of the Voronoi tessellation to study transport and segregation of grains inside 2D and 3D packings of spheres. Granular Matter. 1: 203-211

RICHARDS, L.A., (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. J. Physics, 1 : 318-333.

RIGUIDEL, F.-X.; HANSEN, A.; BIDEAU, D. (1994). Gravity-driven motion of particle on an inclined plane with controlled roughness. Europhysics Letters. 28: 13-18

RITCEY, G.M. (1989). Tailings Management, Problems and Solutions in the Mining Industries. Elsevier.

RITCHIE, A.I.M. (1994). Sulphide oxydation mechanisms: Controls and rates of oxygen transport. In J.L. Jambor and D.W. Blowes (eds) : Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste. Mineralogical Association of Canada, Waterloo, Ontario, May 1994, pp. 201-245.

SAMSON, L.; IPPOLITO, I.; BATROUNI, G.G.; LEMAÎTRE, J. (1998). Diffusive properties of motion on a bumpy plane. The European Physical Journal B. 3:377-385

SEDRAN, G.; STOLLE D.F.E.; HORVATH, R.G. (2001). An investigation of scaling and dimensional analysis of axialy loaded piles. Canadian Geotechnical Journal, 38 : 530-541.

SHAHRIAR, K.; NAMIN, F.S (2007). A new approach to waste dump site selection according to the fuzzy decision-making process. CIM Magazine (Website) (September/October)

SHINOHARA, K. (2006) Segreration of particules. In: powder technology handbook. Masuda, H.; Higashitani, K. and Yoshida, H. (Eds). Taylor and Francis group. Boca Raton

SILBERT, L.E; LANDRY, J.W.; GREST, G.S. (2003). Granular flow down a rough inclined plane : Transition between thin and thick piles. Physics of Fluids. Vol 15, no1: 1-10

SILBERT, L.E.; ERTAS, D.; GREST, G.S.; HALSEY, T.C.; LEVINE, D.; PLIMPTON, S.J. (2001). Granular flow down an inclined plane: Bagnold scaling and rheology. Physical Review E. vol 64: 1-14

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, Th.M. (1999). 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.

SIMUNEK, J.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SCHAAP, M.G.; VANDERVAERE, J.P.; VAN GENUCHTEN, M.T. (1998a). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. Geoderma 86:61-81.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; GRIBB, M.M.; HOPMANS, J.W. (1998b). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. Soil and Tillage Research 47: 27-36.

SINGER, P.C.; STUMM, W. (1970). Acidic mine drainage : the rate-determining step. Science, 167 : 1121-1123.

SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y.; ROSS, P.J.; HAVERKAMP, R. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. Water Resources Research, vol 30 no 11. 2925-2929

SMITH, L.; FREEZE, R.A. (1979). Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain. Two-dimentional simulations. Water Resources Research, vol 15 no 6: 1543-1559.

SMITH, R.E. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. J. of hydrology. 17:1-21

SMITH, R.E.; PARLANGE, J.-Y. (1978). A parameter efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research. 14: 533-538

SMUDA, J.; DOLD, B.; FRIESE, K.; MORGENSTERN, P.; GLAESSER, W. (2007). Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulphide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru. Journal of Geochemical Exploration. 92, 97-110.

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.

STANTEC CONSULTING LTD (2004). Priority assessment of metal leaching in neutral drainage. Draft report submitted to MEND Initiative, CANMET, (Ref. 631-22996, July 2004).

STEENHUIS, T.S.; PARLANGE, J.Y.; ABURIME, S.A. (1995). Preferential flow in structured and sandy soils: consequences for modeling and monitoring. In Handbook of Vadose zone characterization and monitoring. Wilson L.G.; Everett, L.G.; Cullen, S.J. (Eds). CRC Press. Boca Raton, Florida.

STEENHUIS, T.S.; STAUBITZ, W.; ANDREINI, M.S.; SURFACE, J.;RICHARD, T.L.; PAULSEN, R.; PICKERING, N.B.; HAGERMAN, J.R.; GEOHRING, L.D. (1990b) Preferential movement of pesticides and tracers in agricultural soils. J. Irrig. Drainage Engng. 116: 50-66.

STOKWELL, J.; SMITH, L.; JAMBOR, J.L.; BECKIE, R., (2006). The relationship between fluid flow and mineral weathering in heterogeneous unsaturated porous media: Aphysical and geochemical characterization of waste-rock pile. Applied Geochemistry, 21, 1347-1361.

SUZUKI, M., (2006). Packing properties. In: powder technology handbook. Masuda, H.; Higashitani, K. and Yoshida, H. (Eds). Taylor and Francis group. Boca Raton

SWARTZENDRUBER, D. (1987). Rigorous derivation and interpretation of Green and Ampt equation. Proceedings int. Conf. on infiltration development and application, Y-K Fok, Ed. Water resources center, University of Hawai, Honolulu, 28-37

SWARTZENDRUBER, D.; HOGARTH, W.L. (1991). Water infiltration into soil response to ponded-water head. Soil Science Society of America Journal. 55, 6:1511-1515

TABUCHI, T. (1961) Infiltration and ensuing percolation in columns of layered glass particles packed in laboratory. Nogyo Dobugu kenkyn. Bessatsu (Trans. Agr. Engng. Soc., Jpn) 1:13-19 (In Japanese, with English abstract)

TALSMA, T. (1969) In situ measurement of sorptivity. Aust. J. Soil Res. 7, 269-276.

TALSMA, T.; PARLANGE, J.-Y. (1972). One-dimensional vertical infiltration. Aust. J. of Soil Res. 10:143-150

TRIPODI, D. (2003). Étude de caractérisation hydrogéochimique d'une halde à stérile. Mine Laronde, Québec. Rapport de stage. École polytechnique de Montréal (Québec, canada) et École polytechnique Fédérale de Lausanne (suisse).

UPADHYAY, O.; SHARMA, D. K.; SINGH, D.P. (1990). Factors affecting stability of waste dumps in mines. International Journal of Surface Mining and Reclamation. 4: 95-99.

VAN GENUCHTEN, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

VAN MULLAN, J.A. (1991). Runoff and peak discharge using Green –Ampt infiltration model. Journal of Hydraulic Engineering. 117,3: 354-370.

VANDERVAERE, J.P.; VAUCLIN, M.; ELRICK, D.E. (2000), Transient flow from tension infiltrometers: four methods to determine sorptivity and conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1272-1284

VEILLETTE, J.J.; PARADIS, S.J.; THIBAUDEAU, P. (2003). Les cartes de formations en surface de l'Abitibi. Commission géologique du canada. Dossier public 1523. 10 cartes, échelle 1 :100 000.

VEREECKEN, H.; KASTEEL, R.; VANDERBORGHT, J.; HARTER, T. 2007. Upscaling hydraulic properties and soil water flow processes in heterogeneous soils: a review. Vadose Zone Journal 6:1-28.

WARD, A.L.; ZHANG, Z.F. (2007). Effective hydraulic properties determined from transient unsaturated flow in anisotropic soils. Vadose Zone J. 6:913-924

WARRICK, A.W.; LOMEN, D.O.; YATES, S.R. (1985). A generalized solution to infiltration. Soil Science Society of America Journal. 49: 34-38

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. (1980). Spatial Variability of soil Physical Properties in the field. In Application of soil physics. Hillel, D. Academic press. New York.

WENZEL, R.N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. Ind. Eng. Chem. 28, 988-994

WHISTLER, F.D.; BOUWER, H. (1970). Comparisons of methods for calculating vertical drainage and infiltration in soils. J. of Hydrology. 101: 1-19

WILLIAMS, D.J. (2007) Mine Closure as a Driver for waste rock dump construction. Second International Seminar of Mine Closure. Santiago (16-19 October)

WILLIAMS, D.J.; ROHDE, T.K. (2007) Strategies for reducing seepage from surface waste rock piles during operation and post-closure. Second International Seminar of Mine Closure. Santiago (16-19 October).

WILSON, J.A.; WILSON, G.W.; FREDLUND, D.G. (2000). Numerical modeling of vertical and inclined waste rock layers. Proceedings of 5TH Interrnational Conference on Acid Rock Drainage, Denver , pp 257-266, SME

WISE, M.E. (1952). Dense random packing of unequal spheres. Philips Res. Rep. 7, 321-343

YATES, S.R.; WARRICK, A.W. (2002). Geostatistics. In Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods. Soil Science Society of America, inc.

YOTSOMOTO, H. (2006) Flotation. In: powder technology handbook. Masuda, H.; Higashitani, K. and Yoshida, H. (Eds). Taylor and Francis group. Boca Raton

YOUNGS, E.G. (1957). Moisture profiles during vertical infiltration. Soil Science. 4, 84: 283-290

ZHAN, G.; AUBERTIN, M.; MAYER, A.; BURKE, K.; MCMULLEN, J. (2001) Capillary cover design for leach pad closure. SME Transaction 310: 104-110.

ZHAN, T.L.T.; NG, W.W.; FREDLUND, D.G. (2007) Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope. Can. Geotech. J. 44:392-408.

ZHANG, D. (2002). Stochastic methods for flow in porous media. Academic Press. San Diego.

ZHANG, Z. F.; WARD, A. L.; GEE, G. W. (2004) A combined parameter scaling and inverse technique to upscale the unsaturated hydraulic parameters for heterogeneous soils, Water Resour. Res., 40, W08306, doi:10.1029/2003WR002925.

ANNEXES (sur CD-ROM)

Un cédérom accompagne cette thèse de doctorat.

Toute personne intéressée à se le procurer doit contacter :

An accompanying CD-ROM is included with the original Ph. D.

To obtain a copy of the CD-ROM, please contact :

École Polytechnique de Montréal

Service du prêt entre bibliothèques

B.P. 6079, Succursale Centre-Ville

Montréal, Québec H3C 3A7

Canada

Tél. : (514) 340-4846
Téléc./Fax : (514) 340-4026