

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UNE FOSSE REMBLAYÉE
PAR UNE APPROCHE DE FRACTURATION DISCRÈTE

VALÉRIE THÉRIAULT, ING
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL,
GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AVRIL 2004



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-91972-2

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-91972-2

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur 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 dissertation.

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

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

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

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UNE FOSSE REMBLAYÉE
PAR UNE APPROCHE DE FRACTURATION DISCRÈTE

présenté par : THÉRIAULT Valérie

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

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

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

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

M. SIMON Richard, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. TERRIEN René, Ph.D., membre externe

REMERCIEMENTS

Je remercie Michel Aubertin d'avoir accepté d'être le directeur de mes travaux de recherche ainsi que Richard Simon qui a agit à titre de codirecteur. Leur soutien a été inestimable à tous les niveaux et à toutes les étapes de ce projet de maîtrise. Plusieurs autres personnes m'ont également apporté une aide précieuse. Pour commencer, René Therrien et Andréanne Hamel, respectivement professeur et associée de recherche à l'Université Laval qui m'ont aidé lors de l'apprentissage du logiciel FRAC3DVS. De plus, René Therrien a été disponible pour le support technique du logiciel dont il est un des concepteurs. J'ai également pu compter sur mon collègue Dominic Tremblay pendant la période d'apprentissage de FRAC3DVS. Ensuite, Robert P. Chapuis et John Molson, respectivement professeur et associé de recherche à l'École Polytechnique de Montréal, ainsi que Michel Mailloux, de la firme de génie conseil HydroGéoplus, m'ont eux aussi apporté une aide fort utile au sujet de la modélisation numérique des écoulements souterrains. Je désire remercier plus particulièrement Robert P. Chapuis pour la qualité de son enseignement lors des nombreuses séances de cours d'hydrogéologie ainsi que pour sa patience lorsqu'il répondait si bien et en détail à toutes mes questions. Je remercie finalement la mine Agnico Eagle Ltée, Division Laronde, pour les informations fournies ainsi que mes parents et amis pour leur support et leurs encouragements. Encore une fois, merci à vous tous de m'avoir offert votre aide si amplement et de si bon cœur.

RÉSUMÉ

L'eau contenue dans les pores des rejets miniers peut être contaminée avec des métaux dissous et autres éléments solubles. Afin de prévenir ou de minimiser le transfert de ces contaminants vers l'environnement, il peut s'avérer bénéfique d'isoler de tels rejets de façon hydraulique. Cela est particulièrement le cas lorsque les rejets miniers sont entreposés dans les anciennes fosses à ciel ouvert. Dans le cas où la conductivité hydraulique des rejets est supérieure à celle du massif rocheux fracturé, l'écoulement régional de l'eau peut être dévié vers l'intérieur des rejets et ainsi favoriser la libération des contaminants. Dans ce cas, l'utilisation d'une couche d'un matériau très perméable, placée entre les parois de la fosse et les rejets, peut aider à réduire les gradients hydrauliques à l'intérieur de la fosse et, conséquemment, les débits qui circulent dans les rejets. Cette couche (ou enveloppe) perméable sert de chemin d'écoulement préférentiel. Elle reçoit une forte proportion de l'écoulement régional, ce qui réduit d'autant les débits dans les rejets.

L'objectif de ce projet de maîtrise était d'étudier l'écoulement de l'eau autour d'une fosse remblayée en utilisant un modèle numérique et une approche conceptuelle de fracturation discrète. En premier lieu, le logiciel FRAC3DVS a été choisi et des simulations de vérifications de ce modèle numérique ont été menées en 1D et en 2D, pour les conditions non saturées et le régime transitoire. Ensuite, une analyse paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable a été réalisée. La technique de l'enveloppe perméable est une technique d'entreposage en fosse des rejets miniers permettant de les isoler de façon hydraulique. La géométrie du cas de référence étudié est une fosse carrée de 100m x 100m, profonde de 73m et avec des pentes à 45 degrés. Les fractures du massif rocheux sont orthogonales et sont espacées de 10m horizontalement et verticalement. L'enveloppe perméable est d'une épaisseur constante de 5.6m et le gradient hydraulique régional imposé est de 2%. Les rejets contenus dans

la fosse ainsi que les blocs de roc situés entre les fractures sont modélisés comme des milieux poreux, tandis que les fractures sont incluses comme des éléments discrets dans le modèle. Le comportement de la technique de l'enveloppe perméable dans le cas de cette fosse 3D a été estimé par l'étude de deux modèles 2D. Premièrement un modèle horizontal représentant la vue en plan de la fosse située à l'élévation de surface et, deuxièmement, un modèle vertical représentant une vue en section de la fosse située au centre de celle-ci et parallèlement au gradient hydraulique régional. L'efficacité de l'enveloppe perméable est calculée à partir de la réduction du débit à travers les rejets en présence de l'enveloppe (par rapport au débit dans les rejets dans le cas sans enveloppe). Les résultats des analyses paramétriques effectuées montrent que les principaux facteurs affectant l'efficacité de l'enveloppe perméable sont : l'épaisseur de l'enveloppe, les dimensions de la fosse, le contraste de conductivité hydraulique entre le matériau de l'enveloppe et les rejets et le contraste de conductivité hydraulique entre le massif rocheux fracturé et les rejets.

Ce projet de maîtrise a permis d'utiliser une approche conceptuelle de fracturation discrète pour modéliser les fractures dans une analyse paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable. Cette façon de procéder est plus appropriée que l'utilisation de l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent lorsque le massif rocheux est peu densément fracturé à l'échelle considérée. De plus, il a été possible de montrer les conditions favorisant l'efficacité de la technique de l'enveloppe perméable pour réduire les débits à travers une fosse remblayée par des rejets miniers, lesquels sont susceptibles de libérer des contaminants.

ABSTRACT

Pore waters within mining waste materials can be contaminated with dissolved metals and other soluble components. Hydraulic isolation of these materials is therefore critical in order to prevent or to minimize environmental impacts. Contaminant discharge from these materials is often controlled by the rate of internal water flow. Long-term waste isolation sometimes involves disposal within ancient mine open pits. However, when the hydraulic conductivity of the mine waste is higher than that of surrounding fractured rocks, regional groundwater flow may become focussed within the waste material and contaminant discharge may increase. A pervious surround (or envelope) between the pit and waste material can help lower the hydraulic gradients within the waste material and can serve as a preferential conduit for regional flow, thus reducing contaminant migration outside the open pit domain.

The objective of this Master degree project is to study water flow around a backfilled pit using a numerical model and a discrete fracture conceptual approach. The software FRAC3DVS was used and 1D as well as 2D verification simulations of this numerical model were conducted under transient state and unsaturated conditions. Then, a parametric study of the pervious surround concept was performed in the case of an open pit disposal of mining waste materials. The reference case studied is a square open pit measuring 100m x 100m in plan view, 73m deep with 45 degrees internal slopes. The orthogonal rock fractures are spaced 10m horizontally as well as vertically. The pervious envelope has a constant thickness of 5.6m. The regional hydraulic gradient is 2%. The waste materials, the envelop material and the rock between fractures are assumed as porous materials while the fractures are included as discrete elements in the domain. The behavior of the pervious envelope concept in the case of this pit was estimated by studying two 2D models. The first one is an horizontal model representing a plane view of the pit at the surface elevation. The second one is a vertical model

representing a cross section view of the pit at its center and parallel to the regional hydraulic gradient. The envelope efficiency was calculated as the reduction of flow through the waste material due to its presence (as compared to the case without an envelope). The results of the parametric study indicated that the main factors affecting the efficiency of a pervious envelope are : its thickness, the dimension of the pit, the conductivity contrasts between the pervious envelope material and the waste material and the conductivity contrasts between the host fractured rocks and the waste material.

This projet made use of a discrete fracture conceptual approach to conduct a parametric study of the pervious envelope concept. A discrete conceptual approach was deemed more appropriate than the equivalent porous medium approach when the host rock fractures are scarce at the scale considered. The results have helped identify the main conditions which favor the efficiency of the pervious envelope concept in reducing water flow through a pit, considering that the latter can be backfilled with mining waste material prone to contaminants discharge.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SYMBOLES ET DES ACRONYMES.....	XVII
CHAPITRE I - INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en situation	1
1.2 Le projet de recherche	2
1.3 Le mémoire	4
CHAPITRE II - PROBLÉMATIQUE DES REJETS MINIER.....	5
2.1 Préambule.....	5
2.2 Rejets miniers.....	5
2.2.1 Rejets solides.....	6
2.2.2 Rejets liquides	8
2.3 Législation environnementale	10
2.4 Le drainage minier acide (DMA).....	11
2.4.1 Définition	11
2.4.2 État de la situation.....	12
2.4.3 Méthodes de contrôle du DMA.....	15
2.4.3.1 Recouvrement en eau	15
2.4.3.2 Nappe surélevée	16
2.4.3.3 Couverture avec effets de barrière capillaire	17
2.4.3.4 Neutralisation in-situ.....	19
2.4.3.5 Marais traitants.....	19
2.4.3.6 Technique de l'enveloppe perméable pour fosse remblayée	20

CHAPITRE III - COMPOSANTES D'UN MASSIF ROCHEUX	24
3.1 Généralités.....	24
3.2 La roche intacte	25
3.3 Fractures et discontinuités.....	27
3.3.1 Généralités	27
3.3.2 Géométrie des discontinuités	29
3.3.2.1 Dimensions.....	29
3.3.2.2 Variabilité de l'ouverture	31
3.3.3 Techniques de mesure de l'ouverture	39
3.4 Le système de fractures.....	44
3.4.1 Définitions.....	44
3.4.2 Connectivité	46
CHAPITRE IV – ÉCOULEMENT DE L'EAU EN MASSIFS ROCHEUX.....	50
4.1 Lois d'écoulement pour la roche intacte	50
4.1.1 Régime permanent et conditions saturées	50
4.1.2 Régime transitoire et conditions saturées.....	52
4.1.3 Régime transitoire et conditions non saturées.....	53
4.2 Lois d'écoulement dans les fractures	55
4.2.1 Régime permanent et conditions saturées	55
4.2.2 Régime transitoire et conditions non saturées.....	65
4.3 Approches conceptuelles applicables aux massifs fracturés.....	71
4.3.1 Effet de l'échelle du problème	71
4.3.2 Approche conceptuelle du milieu poreux équivalent.....	74
4.3.3 Approche conceptuelle avec fracturation discrète	77
4.3.4 Approches conceptuelles hybrides	80
CHAPITRE V – APPLICATIONS PRÉLIMINAIRES DE FRAC3DVS	82
5.1 Présentation du logiciel.....	82
5.1.1 Caractéristiques de base	82
5.1.2 Utilisation.....	84
5.2 Drainage 1D d'une CEBC.....	86

5.2.1 Description	86
5.2.2 Principaux résultats	91
5.3 Infiltration (2D) en fosse remblayée	96
5.3.1 Description	96
5.3.2 Principaux résultats	102
5.3.3 Vérification des résultats.....	112
5.4 Discussion	115
CHAPITRE VI – ÉTUDE NUMÉRIQUE	119
DE LA TECHNIQUE DE L'ENVELOPPE PERMÉABLE.....	119
6.1 Cas de base.....	119
6.1.1 Description des simulations	119
6.1.2 Résultats	124
6.2 Étude paramétrique des facteurs d'influence	135
6.2.1 Cas étudiés et principaux résultats	135
6.2.2 Analyse des résultats.....	147
6.3 Discussion	160
CHAPITRE 7 – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	167
RÉFÉRENCES.....	173

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Porosités totales et effectives comparées	26
Tableau 3.2 : Dimensions des fractures à différentes échelles.....	30
Tableau 3.3 : Qualification des ouvertures selon la taille	30
Tableau 5.1 : Paramètres utilisés dans simulation du drainage d'une CEBC	88
Tableau 5.2 : Bilan des débits moyens sur le domaine après 24 heures d'infiltration..	103
Tableau 6.1 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en plan et quelques résultats des simulations.....	137
Tableau 6.2 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en section et quelques résultats de simulations.....	142
Tableau 6.3 : Conductivités hydrauliques de l'enveloppe et des stériles pour les simulations 4, 9, 11 et 12.....	153

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Représentations de stériles miniers	7
Figure 2.2 : Interactions entre les composantes d'une mine et l'environnement.....	9
Figure 2.3 : Représentations d'impacts des eaux acides.....	14
Figure 2.4 : Profil typique d'une couverture de type CEBC.....	18
Figure 2.5 : Vue en section de l'enveloppe perméable utilisée au site Rabbit Lake.....	21
Figure 2.6 : Schémas illustrant le concept de l'enveloppe perméable	22
Figure 3.1 : Les trois modes principaux de formation d'une fracture.....	27
Figure 3.2 : Représentations de failles	28
Figure 3.3 : Fonctions de probabilité log-normale (1) et négative exponentielle (2)	31
Figure 3.4 : Schéma d'un plan de fracture (XY) d'ouverture variable (b_1 , b_2 , b_3 , b_4).....	32
Figure 3.5 : Profils standards de la méthode comparative de détermination du JRC	33
Figure 3.6 : Schémas de quatre configurations typiques de l'intérieur d'une fracture	37
Figure 3.7 : Paramètres affectant la géométrie de l'espace entre les parois d'une fracture	38
Figure 3.8 : Vue en coupe des composantes d'une cellule triaxiale	40
Figure 3.9 : Vue en coupe d'un essai d'injection avec obturateurs dans une fracture.....	41
Figure 3.10 : Systèmes de fractures aux configurations diverses	45
Figure 3.11 : Schémas illustrant le concept de connectivité.....	47
Figure 3.12 : Schéma d'un modèle conceptuel de l'écoulement par canaux	49
Figure 4.1 : Modèle conceptuel des plaques parallèles.....	55
Figure 4.2 : Les 5 types d'écoulement entre des surfaces parallèles rugueuses	60
Figure 4.3 : Graphiques ouverture en fonction du débit par unité de charge hydraulique	63
Figure 4.4 : Schéma de l'écoulement non saturé dans un milieu poreux fracturé	67
Figure 4.5 : Géométrie du front de mouillage en fonction du temps	70
dans une réplique de fracture naturelle en plexiglas	70

Figure 4.6 : Les quatre échelles de travail en massifs fracturés.....	72
Figure 4.7 : Illustration du concept de volume élémentaire représentatif.....	75
Figure 5.1 : Maillage et matériaux de la CEBC en colonne (FRAC3DVS).	87
Figure 5.2 : Courbes de rétention d'eau des matériaux de la CEBC.....	89
Figure 5.3 : Fonction de conductivité hydraulique du silt de la CEBC.	90
Figure 5.4 : Fonction de conductivité hydraulique du sable de la CEBC.	90
Figure 5.5 : Pressions dans la CEBC après 1 jour de drainage.	92
Figure 5.6 : Pressions dans la CEBC après 7 jours de drainage.	92
Figure 5.7 : Pressions dans la CEBC après 14 jours de drainage.	93
Figure 5.8 : Pressions dans la CEBC après 28 jour de drainage.	93
Figure 5.9 : Degrés de saturation dans la CEBC après 1 jour de drainage.	94
Figure 5.10 : Degrés de saturation dans la CEBC après 7 jours de drainage.....	94
Figure 5.11 : Degrés de saturation dans la CEBC après 14 jours de drainage.....	95
Figure 5.12 : Degrés de saturation dans la CEBC après 28 jours de drainage.....	95
Figure 5.13 : Domaine et matériaux, simulation d'infiltration 2D en fosse remblayée...98	
Figure 5.14 : Maillage du domaine de la fosse remblayée, partie centrale et supérieure.99	
Figure 5.15 : CRE des matériaux (simulation infiltration en fosse remblayée).....	101
Figure 5.16 : Conductivités hydrauliques (simulation infiltration en fosse remblayée).	101
Figure 5.17: a) Équipotentiellles et b) isocontours de S_r après 3 heures d'infiltration...	105
Figure 5.18 : a) Équipotentiellles et b) isocontours de S_r après 12 heures d'infiltration.	106
Figure 5.19 : Gros plan du talus.....	107
a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 12 heures d'infiltration.	107
Figure 5.20 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 24 heures d'infiltration. 108	
Figure 5.21 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 3 jours d'infiltration. ...	109
Figure 5.22 : Gros plan du talus.....	110
a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 3 jours d'infiltration.....	110
Figure 5.23 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 5 jours d'infiltration. ...	111

Figure 5.24 : Graphique de vérification de la CRE de la roche intacte.	113
Figure 5.25 : Graphique de vérification de la CRE des fractures.	113
Figure 5.26 : Graphique de vérification de la CRE du matériau drainant.....	114
Figure 5.27 : Graphique de vérification de la CRE des stériles.	114
Figure 6.1 : Domaine de la fosse vue en plan.	120
Figure 6.2 : Position des fractures dans le domaine de la fosse vue en plan.	121
Figure 6.3 : Domaine de la fosse vue en section.....	122
Figure 6.4 : Position des fractures dans le domaine de la fosse vue en section.	122
Figure 6.5 : Maillage du domaine de la fosse vue en section entre les lignes AA et BB.	123
Figure 6.6 : Équipotentiellles (m) de la fosse vue en plan, cas de base, avec enveloppe.	125
Figure 6.7 : Équipotentiellles (m) de la fosse vue en plan, cas de base, sans enveloppe.	126
Figure 6.8 : Équipotentiellles (m) de la fosse vue en section, cas de base, avec enveloppe.	127
Figure 6.9 : Équipotentiellles (m) de la fosse vue en section, cas de base, sans enveloppe.	127
Figure 6.10 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en plan avec enveloppe.	128
Figure 6.11 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle vue en plan sans enveloppe.	129
Figure 6.12 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en section avec enveloppe.	130
Figure 6.13 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en section sans enveloppe.	131
Figure 6.14 : Distribution des vitesses dans les stériles,.....	133
cas de la fosse vue en section avec enveloppe perméable.	133
Figure 6.15 : Distribution des vitesses dans les stériles,.....	133

cas de la fosse vue en section sans enveloppe perméable.	133
Figure 6.16 : Réseau de fractures utilisé pour la simulation numéro 23.	141
Figure 6.17 : Domaine et matériaux de la simulation numéro 26.	142
Figure 6.18 : Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur l'efficacité de l'enveloppe perméable.	148
Figure 6.19 : Équipotentiels (m) de la fosse vue en section avec enveloppe de 2.8m.	149
Figure 6.20 : Effet de la dimension de la fosse sur l'efficacité.	150
Figure 6.21 : Équipotentiels (m) de la fosse 2.4 fois plus petite, cas avec enveloppe.	151
Figure 6.22 : Équipotentiels (m) de la fosse 2.4 fois plus petite, cas sans enveloppe.	152
Figure 6.23 : Effet du quotient K stériles / K enveloppe sur l'efficacité.	154
Figure 6.24 : Équipotentiels (m) de la simulation 11a pour la fosse vue ne section...	155
Figure 6.25 : Équipotentiels (m) de la simulation 11b pour la fosse vue en section...	155
Figure 6.26 : Effet du quotient K massif fracturé / K stériles sur l'efficacité.	156
Figure 6.27 : Équipotentiels (m) de la simulation 14a pour la fosse vue en plan.	158
Figure 6.28 : Équipotentiels (m) de la simulation 14b pour la fosse vue en plan.	159
Figure 6.29 : Distribution des vitesses de Darcy dans l'enveloppe perméable de 5.6m d'épaisseur au centre de la fosse pour différents maillages (cas de base, vue en section).	165

LISTE DES SYMBOLES ET DES ACRONYMES

a	Hauteur moyenne des aspérités des faces d'une fracture, m
A_f	Aire de la surface d'une fracture, m ²
A_m	Aire moyenne des fractures
As	Arsenic
A_{sec}	Aire d'une section d'une fracture perpendiculairement à l'écoulement, m ²
A_x	Aire d'une section d'un milieu poreux perpendiculairement à l'axe des x, m ²
b	Ouverture d'une fracture (symbole générique), m
B	Ouverture mécanique d'une fracture, m
b_b	Ouverture d'une fracture mesurée par un essai au traceur (bilan de masse), m
b_h	Ouverture hydraulique d'une fracture, m
b_l	Ouverture d'une fracture mesurée par un essai au traceur (perte de charge), m
b_{max}	Dans une fracture d'ouverture variable, taille maximale de l'ouverture, m
b_s	Dans une fracture d'ouverture variable, ouverture au dessus de laquelle les ouvertures ne sont plus saturées à un certain niveau de succion, m
C	Coefficient de percolation
Cd	Cadmium
CEBC	Couverture avec effets de barrière capillaire
Co	Cobalt
CPU	«Central Processing Unit»
CRE	Courbe de rétention d'eau

CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
Cu	Cuivre
d	Densité de fracturation, nombre de fractures/ m^3
D	Diamètre caractéristique des pores, m
DMA	Drainage minier acide
EPM	“Equivalent porous medium”
ESSE	Études de suivi des effets sur l’environnement
f	Facteur de correction de la loi cubique
Fe	Fer
$f(b)$	Fonction de probabilité de la taille de l’ouverture
g	Accélération gravitationnelle (9.81 m/s^2)
h	Charge hydraulique totale, m
JRC	“Joint roughness coefficient”
k	Perméabilité intrinsèque d’un milieu poreux, m^2
k_r	Perméabilité intrinsèque relative (milieu poreux), valeur comprise entre 0 et 1
$K_{eq.}$	Conductivité hydraulique milieu poreux équivalent (m/s)
K_{roc}	Conductivité hydraulique de la roche intacte (m/s)
K_{xx}	Conductivité hydraulique principale dans la direction de l’axe des x (milieu poreux), m/s
K_{yy}	Conductivité hydraulique principale dans la direction de l’axe des y (milieu poreux), m/s
K_{zz}	Conductivité hydraulique principale dans la direction de l’axe des z (milieu poreux) , m/s
K_x	Conductivité hydraulique dans la direction de l’axe des x (milieu poreux), m/s
K_f	Conductivité hydraulique d’une fracture, m/s
L	Longueur d’une fracture (dimension parallèle à l’écoulement), m

LVDT	“linear variable differential transducer”
MEND	Mine environmental neutral drainage program
Mn	Manganèse
M(X)	Valeur la plus probable d’une fonction de probabilité
Ni	Nickel
P	Probabilité, valeur comprise entre 0 et 1
Pb	Plomb
P_m	Périmètre moyen des fractures
PIB	Produit intérieur brut
PRRI	Programme de réduction des rejets industriels
Q	Débit (milieu poreux), m ³ /s
Q_x	Débit moyen dans la direction de l’axe des x (milieu poreux), m ³ /s
$Q_{stériles_avec}$	Débit unitaire dans les stériles au centre de la fosse, cas avec enveloppe perméable, m ² /s
$Q_{stériles_sans}$	Débit unitaire dans les stériles au centre de la fosse, cas sans enveloppe perméable, m ² /s
Q_f	Débit dans une fracture, m ³ /s
r_b	Distance entre les centres des puits d’injection et d’observation, m
R_e	Nombre de Reynolds
REV	“Representative elementary volume”
R_r	Rugosité relative d’une fracture, m/m
r_w	Rayon du puits d’injection, m
S	Soufre et Coefficient d’emmagasinement du milieu poreux, m ³ / m ³
S_r	Degré de saturation
t	Temps, s
T	Transmissivité du milieu poreux, m ² /s
t_{50}	Dans un essai au traceur, temps d’arrivée du front d’advection, s

UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
V_f	Vitesse moyenne de l'eau dans une fracture, m/s
v_r	Vitesse réelle moyenne du fluide dans les interstices d'un milieu poreux, m/s
V_x	Composante dans la direction de l'axe des x du vecteur vitesse de Darcy, m/s
V_y	Composante dans la direction de l'axe des y du vecteur vitesse de Darcy, m/s
V_z	Composante dans la direction de l'axe des z du vecteur vitesse de Darcy, m/s
w	Largeur d'une fracture (dimension perpendiculaire à l'écoulement), m
X	Variable aléatoire d'une fonction de probabilité
x, y, z	Système de coordonnées cartésien, m
Zn	Zinc
α	Angle de contact au ménisque entre un liquide et un solide
γ	Tension de surface du fluide, N/m
$\frac{\partial h}{\partial x}$	Composante du vecteur gradient hydraulique dans la direction de l'axe des x
$\frac{\partial h}{\partial y}$	Composante du vecteur gradient hydraulique dans la direction de l'axe des y
$\frac{\partial h}{\partial z}$	Composante du vecteur gradient hydraulique dans la direction de l'axe des z
$\frac{\partial h}{\partial t}$	Dérivée de la charge hydraulique totale en fonction du temps, m/s

Δh	Différence de charge hydraulique, m
θ	Teneur en eau volumique (milieu poreux), m ³ / m ³
θ_f	Teneur en eau volumique d'une fracture, m ³ / m ³
λ	Espacement moyen entre les fractures (m)
μ	Viscosité dynamique (kg/ms)
ρ	Masse volumique, kg/m ³
σ_1	Contrainte principale majeure, MPa
σ_3	Contrainte principale mineure, MPa
τ	Facteur de tortuosité d'une fracture non saturée, aussi contrainte de cisaillement, MPa
Ψ	Charge de pression, m

CHAPITRE I - INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

L'industrie minière génère une activité économique très importante dans plusieurs pays dont le Canada. Elle soulève également des défis techniques très intéressants dans les domaines de l'exploration, de l'extraction des minerais et de l'entreposage des rejets miniers. L'intérêt de ce projet de maîtrise porte sur ce dernier point qui prend de plus en plus d'importance à mesure que le contexte législatif et la conscience environnementale des populations évoluent.

Dans certains cas, l'eau interstitielle qui circule dans les rejets miniers est très acide et contient plusieurs métaux dissous. De tels rejets doivent être contenus afin de prévenir ou de minimiser le transfert de ces contaminants vers l'environnement. Lors de l'exploitation ou lors de la fermeture d'une mine, une des alternatives pour l'entreposage à long terme des rejets miniers est de les mettre dans les fosses à ciel ouvert. Cependant, si la conductivité hydraulique des rejets est supérieure à celle du massif rocheux fracturé, il se peut que l'écoulement régional de l'eau soit dévié vers les rejets, ce qui favoriserait le lessivage des contaminants. Dans ce cas, une couche d'un matériau très perméable, placée entre les parois de la fosse et les rejets, peut aider à réduire les gradients hydrauliques à l'intérieur de la fosse et ainsi diminuer les débits à travers les rejets. Cette enveloppe perméable sert de passage préférentiel pour l'écoulement régional, ce qui permet une réduction des débits à l'intérieur des rejets miniers.

Puisque l'entreposage des rejets miniers peut s'effectuer dans des massifs rocheux fracturés, il est essentiel de bien comprendre comment se produisent les mouvements d'eau à travers les différentes composantes, soit la roche intacte, les fractures et les réseaux de fractures. C'est à travers ces structures que les contaminants contenus dans

les rejets peuvent se propager à l'environnement. Pour étudier ce genre de problème, il est utile d'avoir accès à des outils efficaces d'analyse et de prédiction du comportement hydrique des massifs rocheux fracturés.

1.2 Le projet de recherche

L'objectif de ce projet de maîtrise est d'étudier l'écoulement de l'eau dans les massifs rocheux fracturés en utilisant un modèle numérique et l'approche conceptuelle de la fracturation discrète. Cette approche conceptuelle a été retenue car elle est appropriée lorsque la fracturation des massifs rocheux est peu dense et irrégulière à l'échelle considérée. C'est en effet souvent ce type de fracturation qu'on retrouve sur les propriétés des mines de métaux, dans les régions d'exploitation en roches dures. Cette approche a été préférée à l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent, qui est l'approche traditionnelle utilisée pour modéliser l'écoulement dans les massifs rocheux fracturés. Cette dernière approche considère le massif rocheux fracturé comme une masse homogène aux propriétés équivalentes et elle n'est valable que dans les cas de massifs densément fracturés, qui sont étudiés à grande échelle, comme les aquifères rocheux par exemple.

Le logiciel FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1996) a été choisi pour réaliser les calculs numériques à la base de ce projet de maîtrise. Il s'agit d'un modèle numérique des écoulements souterrains et du transport de contaminants. Ce simulateur utilise la méthode des éléments finis et permet de modéliser l'écoulement dans les fractures de façon explicite. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées dans le cadre de ce projet. Tout d'abord, des simulations préliminaires de vérification de la validité du logiciel et de ses modes d'utilisation. Ces simulations ont été menées en 1D et en 2D pour le régime transitoire et les conditions non saturées. Il s'agit premièrement du cas du drainage 1D d'une couverture avec effet de barrière capillaire. Deuxièmement, une

simulation 2D d'infiltration et de drainage dans des stériles miniers placés dans une fosse en massif fracturé a été réalisée.

Ensuite, des simulations permettant de comprendre le comportement de la technique de l'enveloppe perméable au niveau du contrôle des débits ont été réalisées. La géométrie du cas de référence étudié est une fosse d'ouverture carrée de 100m x 100m avec des pentes à 45 degrés et profonde de 73m. La fosse est remplie à ras bord de rejets miniers et les fractures du massif sont orthogonales et espacées de 10m horizontalement et verticalement. L'enveloppe perméable est d'une épaisseur constante de 5.6m et le gradient hydraulique régional imposé est horizontal et de 2%. Ces simulations ont été menées en régime permanent et pour des conditions saturées. Deux maillages 2D ont été employés afin d'estimer les débits d'eau sur le domaine de roc fracturé et dans la fosse 3D. Le premier est un maillage horizontal de 500m x 500m représentant une vue en plan de la fosse 3D située à l'élévation de surface. Le deuxième maillage est vertical et est de 140m x 500m et il représente une vue en section de la fosse du cas 3D, située au centre de celle-ci et parallèlement à l'écoulement régional.

Une analyse paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable a été effectuée par une analyse d'écoulements 2D réalisée à l'aide des maillages précédemment mentionnés. L'influence de cinq paramètres sur l'efficacité de l'enveloppe perméable à réduire les débits à travers la fosse a été étudiée. Il s'agit de l'épaisseur de l'enveloppe perméable, de la dimension de la fosse, du contraste de conductivité hydraulique entre le matériau de l'enveloppe et celui des rejets, du contraste de conductivité hydraulique entre les rejets et le massif de rocheux fracturé et du gradient hydraulique régional. En tout, 35 cas différents ont été simulés pour la vue en section et 25 cas différents pour la vue en plan.

L'originalité de ce projet de recherche réside dans l'utilisation d'une approche conceptuelle de fracturation discrète pour réaliser une analyse paramétrique de la

technique de l'enveloppe perméable. Le logiciel FRAC3DVS, utilisé pour effectuer les simulations numériques de ce projet, est un nouvel outil d'analyse très bien adapté aux problèmes abordés dans le cadre des travaux de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement des rejets miniers.

1.3 Le mémoire

Ce mémoire présente l'ensemble des travaux effectués dans le contexte de ce projet de maîtrise. Il inclut successivement une revue de la problématique liée aux rejets miniers (Chapitre 2), les caractéristiques des massifs rocheux fracturés (Chapitre 3), les principales lois d'écoulement applicables à la roche intacte et aux fractures (Chapitre 4), les résultats des calculs préliminaires réalisés avec le logiciel FRAC3DVS (Chapitre 5), les résultats de l'analyse paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable (Chapitre 6) et finalement une conclusion et des recommandations (Chapitre 7).

CHAPITRE II - PROBLÉMATIQUE DES REJETS MINIERES

2.1 Préambule

L'exploitation minière est une activité essentielle aux sociétés modernes car, grâce à elle, le secteur secondaire de l'économie a accès à tous les métaux et minéraux industriels qui lui sont nécessaires. Au Canada, l'industrie minière est très présente à cause des importantes réserves du territoire. De plus, elle génère des retombées économiques importantes pour les populations ainsi que pour les exploitants. En 2001, la production minière canadienne (charbon inclus) s'élevait à 503 millions de tonnes pour une valeur de 17.8 milliards de dollars. Toujours en 2001, les activités d'extraction, de concentration, de fusion, d'affinage et de fabrication de produits semi-ouvrés ont totalisé 3.7% du PIB canadien (ces données excluent le gaz naturel et le pétrole). Les entreprises œuvrant dans ces secteurs d'activités employaient 2.6% des 15.1 millions de travailleurs canadiens. Les bénéfices nets des exploitants ont été de 2.3 milliards de dollars ce qui n'inclut pas les bénéfices générés par l'exploitation des combustibles fossiles (McMullen et Birchfield, 2001).

2.2 Rejets miniers

Bien que l'exploitation minière génère de nombreux impacts positifs, il faut aussi considérer les très importantes quantités de rejets miniers qui sont produites chaque année et qui doivent être gérées de façon acceptable pour l'environnement. La production de rejets miniers est l'impact négatif majeur lié à l'exploitation minière. En effet, dans certains cas, ces rejets peuvent contaminer sévèrement l'environnement si des mesures de contrôle ne sont pas mises en oeuvre. Par exemple, c'est le cas des rejets miniers contenant des sulfures car ils peuvent produire des eaux acides souvent appelées

drainage minier acide (DMA). C'est également le cas des rejets radioactifs produits par les mines d'uranium.

Les quantités de rejets produites annuellement varient grandement d'une exploitation minière à l'autre. Elles dépendent du taux de production et de la méthode de minage utilisée, mais aussi de la teneur de coupure à laquelle le gisement est exploité, c'est-à-dire la teneur au dessus de laquelle il est rentable d'extraire le minerai. Les rejets miniers se retrouvent sous la forme solide et sous la forme liquide car d'importants volumes d'eau sont utilisés dans les procédés de minage et de traitement des minerais (Aubertin et al., 2002).

2.2.1 Rejets solides

Les rejets miniers solides comprennent principalement les roches stériles, les rejets de concentrateur et les boues de traitement des eaux. Les roches stériles sont constituées des roches ne contenant pas ou très peu de minéraux à valeur économique mais qu'il est quand même nécessaire d'extraire afin d'avoir accès au gisement. La granulométrie des roches stériles est différente d'un site minier à l'autre mais elle est généralement très étalée. La taille des grains varie typiquement de quelques mètres à moins d'un millièmètre de millimètre. La figure 2.1a présente une halde (empilement) à stériles miniers localisée sur une propriété minière du Québec. La couleur ocre sur les pentes de la halde indique la présence de traces de drainage minier acide. Les eaux de ruissellement en provenance de cette halde sont traitées puis réutilisées dans les procédés de la mine. La figure 2.1b montre une petite tranchée sur le dessus de cette halde et donne une idée générale de la granulométrie des stériles.

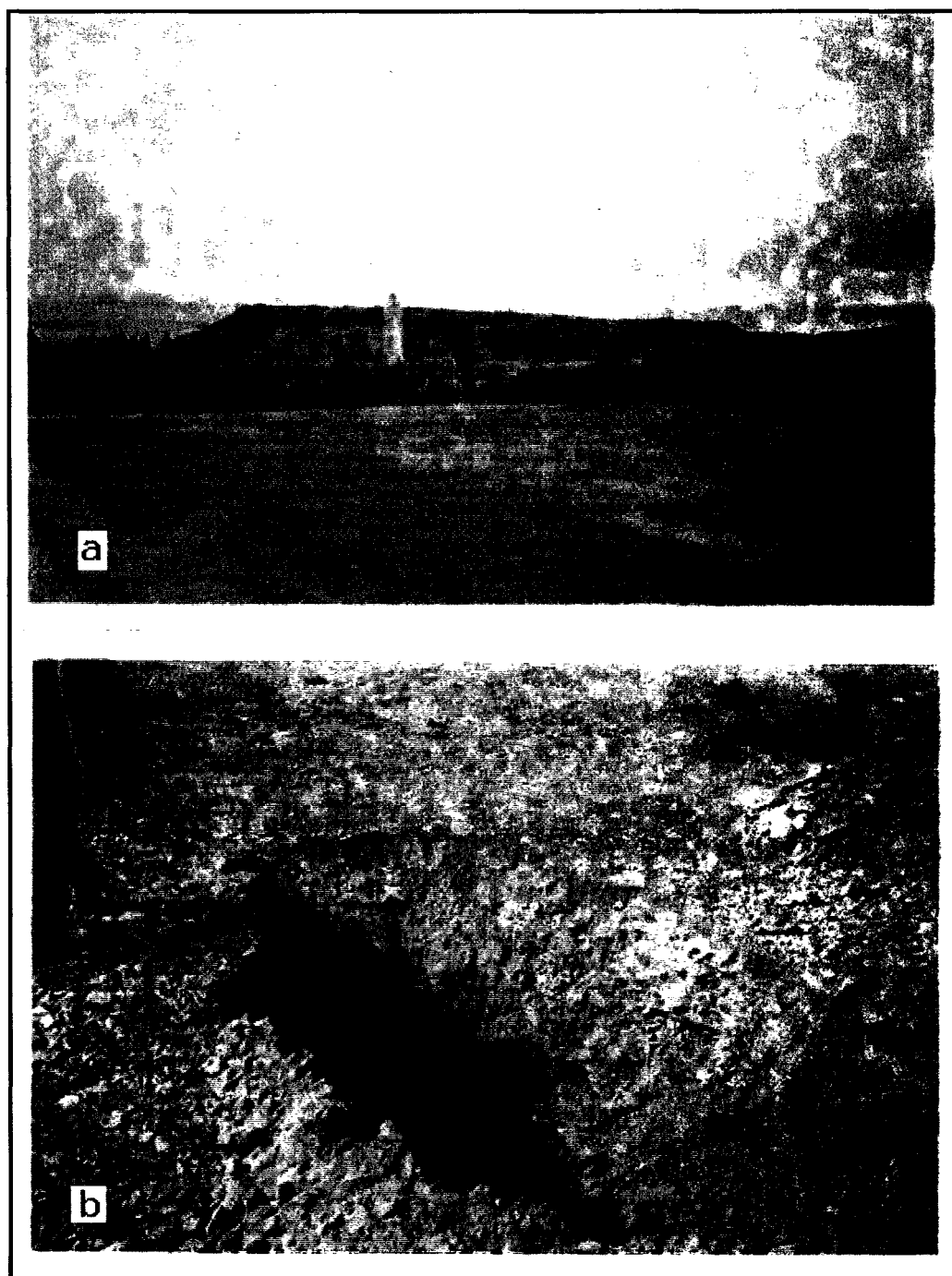


Figure 2.1 : Représentations de stériles miniers

a) Halde à stériles miniers génératrice de DMA,

b) Petite tranchée dans des stériles miniers.

Les rejets de concentrateur sont les rejets de l'usine du traitement des minerais. Cette usine est souvent construite sur le site même de la mine. Le concentrateur sert à transformer le minerai en provenance de la mine en un concentré riche en minéraux à valeur économique. Cela est accompli par plusieurs étapes de concassage et de broyage et par des procédés minéralurgiques qui permettent d'effectuer la séparation des minéraux. La flottation, par exemple, est une technique de séparation très utilisée. Elle nécessite le broyage du minerai en de très fines particules afin d'effectuer la séparation par des méthodes physico-chimiques qui modifient les propriétés de surface des minéraux. Les rejets de concentrateur sont d'une granulométrie très fine, typiquement inférieure à 80 microns, et sont composés des minéraux non économiques associés au minerai.

Les boues de traitement des eaux constituent la troisième catégorie de rejets solides que les exploitations minières doivent gérer de façon sécuritaire. Elles sont générées à l'usine de traitement des eaux acides (lorsqu'il y en a) et sont constituées de particules colloïdales potentiellement toxiques (Aubertin et al., 2002).

2.2.2 Rejets liquides

Les effluents liquides sont composés des eaux de ruissellement et des eaux usées des procédés de minage et de traitement des minerais. La plupart des exploitations minières traitent et réutilisent leurs effluents liquides afin de limiter les quantités d'eau rejetées à l'effluent final (endroit où l'eau est remise à l'environnement). Dans le cas d'un site générateur de drainage minier acide (voir section 2.4), le traitement de l'eau avant l'effluent final est beaucoup plus élaboré qu'à n'importe quelle autre étape de traitement afin de respecter les normes gouvernementales de qualité des eaux. La figure 2.2 présente sous la forme schématique les composantes d'une opération minière (la mine, l'usine de traitement des minerais, les empilements de stériles, les parcs à rejets de

2.3 Législation environnementale

Le contexte législatif canadien dans lequel évolue l'industrie minière s'est beaucoup modifié avec les années. Dans le passé, les lois visant la protection de l'environnement et ayant une portée réelle étaient presque inexistantes. Le concept du développement durable n'existait pas encore et les préoccupations des compagnies et de la société étaient simplement d'exploiter les ressources naturelles. Après avoir constaté l'ampleur des dommages causés à l'environnement par les sites miniers dans le passé, et aussi pour tenir compte des préoccupations environnementales grandissantes de la population, les gouvernements ont adopté des lois et règlements de plus en plus stricts en matière d'environnement. Au Québec, la Loi sur la qualité de l'environnement a été adoptée en 1972. Cette loi interdit de polluer et exige l'obtention d'un certificat d'autorisation pour effectuer toute activité susceptible de modifier la qualité de l'environnement. À l'heure actuelle, les compagnies minières sont très conscientes des enjeux environnementaux et elles travaillent non seulement à extraire les ressources minérales de façon profitable mais également à faire en sorte que leurs activités ne nuisent pas à l'environnement et aux générations futures. Plusieurs pratiques environnementales sont maintenant bien établies dans l'industrie et ces mesures préventives sont prises avant, pendant et après la phase d'exploitation (Aubertin et al., 2002).

Les modifications récentes à la législation environnementale et celles qui sont en cours visent l'adoption de pratiques environnementales toujours plus performantes et un contrôle accru de l'efficacité de ces pratiques. Parmi ces nouvelles législations, il y a le Programme de réduction des rejets industriels (PRRI) adopté par le Ministère de l'Environnement du Québec depuis mai 2002. Plus de détails au sujet de ce programme est donné dans Dartois (2002). Ensuite, il y a le nouveau Règlement fédéral sur les effluents des mines de métaux mettant en oeuvre le programme d'études de suivi des effets sur l'environnement (ESEE), adopté en juin 2002, dans le cadre de la Loi sur les pêches. Les mines assujetties à ce nouveau règlement devront réaliser des études de

suivi des effets de leurs effluents sur le poisson et l'habitat du poisson (algues, plantes, benthos) et ce en plus de continuer le suivi de la qualité de l'eau des effluents (Environnement Canada, 2002).

Finalement, une révision en profondeur de la Directive 019 devrait aboutir en 2004. Cette directive vise à supporter l'application de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement et elle décrit les exigences environnementales à respecter avant, pendant et après l'exploitation minière. Elle régit également l'exploitation des sites miniers et l'émission du certificat d'autorisation. Une des modifications principales qui sera vraisemblablement apportée à la Directive 019 porte sur la qualité de l'eau qui devra être contrôlée non seulement à l'effluent final du site minier (eaux de surface), mais aussi à des points de contrôle permettant un suivi de la qualité des eaux souterraines situées en aval de la propriété. Cette modification est apportée afin de répondre au nouveau Règlement sur le captage des eaux souterraines, en vigueur depuis juin 2002, et qui vise la protection de cette ressource (Perron 2002).

2.4 Le drainage minier acide (DMA)

2.4.1 Définition

Un des défis majeurs de l'industrie minière est le contrôle du drainage minier acide (DMA). Ce phénomène survient lorsque des rejets contenant des sulfures sont exposés à l'eau et à l'oxygène. C'est l'oxydation des composés de sulfures qui génère l'acidité. Si le DMA n'est pas contrôlé, avec le temps, le milieu où il se produit devient de plus en plus acide et cela est favorable à la dissolution de plusieurs métaux hautement toxiques. Lorsqu'il y a du DMA sur un site, la végétation ne peut généralement pas survivre dans des conditions aussi extrêmes (le pH peut devenir aussi faible que 2 dans certains cas). Le drainage minier acide affecte surtout les exploitations de métaux précieux, celles des

métaux de base, de charbon et d'uranium car ces gisements sont souvent associés à des composés de sulfures tel que la pyrite, la chalcopyrite, la pyrrhotite, etc. (Aubertin et al. 2002).

Les coûts de gestion des rejets potentiellement générateurs de DMA (ou générateurs de DMA) sont beaucoup plus élevés que ceux des autres rejets puisqu'ils doivent être traités différemment afin de prévenir (ou de contrôler) le drainage minier acide. Par exemple, les coûts de fermeture de sites miniers avec rejets neutres ou alcalins sont estimés entre 2 000 et 10 000 \$ par hectare alors que ceux des sites générateurs d'acides peuvent s'élever entre 100 000 et 300 000 \$ par hectare (Aubertin et al., 2002). Vu l'ampleur de la problématique du drainage minier pour l'environnement et pour la rentabilité des projets miniers, de nombreuses recherches ont été menées à ce sujet et plusieurs techniques de prévention et de contrôle du DMA ont été mises au point.

2.4.2 État de la situation

De nombreux écosystèmes à travers le monde ont été affectés par d'anciens sites miniers générateurs de DMA, sur des surfaces pouvant atteindre plusieurs kilomètres carrés. Le phénomène du drainage minier acide est connu depuis longtemps mais, dans le passé, les intervenants croyaient (à tort) qu'il allait s'atténuer de lui-même avec le temps. Nombre de ces anciens sites, toujours générateurs de DMA, sont orphelins, c'est-à-dire que les compagnies les ayant produits sont inconnues ou insolvables, et qu'il n'est donc pas possible qu'elles contribuent financièrement à la réparation des dommages (Tremblay et Hogan, 2002).

Au début des années 1990, il était estimé que 740 millions de tonnes de roches stériles potentiellement acidogènes étaient entreposées sur le territoire canadien ainsi que 1.9 milliards de tonnes de résidus de concentrateurs, également potentiellement acidogènes, couvrant une superficie de 12.5 millions d'hectares. Le fardeau financier de la société

en ce qui concerne la restauration de ces sites est difficile à évaluer. Il dépendra de l'évolution des technologies de restauration et des conditions propres à chaque site. Ce montant pourrait se situer entre 3 à 5 milliards de dollars (Aubertin et al., 2002). De plus, un rapport produit en 2002 par le Commissaire à l'environnement et au développement durable évaluait à 555 millions de dollars les coûts de restauration des sites miniers orphelins du Nord canadien dont le gouvernement fédéral a la responsabilité (Tremblay et Hogan, 2002). La figure 2.3a montre un cas de déversement d'eau acide causé par la rupture de digues. Cette photo a été prise à l'été 2002 sur l'ancien site minier Manitou, un site orphelin situé dans la région de Val d'Or au Québec. L'eau de couleur ocre contient plusieurs métaux en solution. La figure 2.3b illustre les effets dévastateurs de l'eau acide sur la végétation (photo également prise au site Manitou, été 2002).

À partir des années 1980, après avoir constaté l'ampleur des dégâts causés par le drainage minier acide, il a été entrepris de s'occuper plus systématiquement de ce problème tant du point de vue technique (pour sa prédiction, sa prévention et son contrôle) que du point de vue législatif. De nombreuses études ont été menées dans plusieurs pays et il existe maintenant une littérature abondante à ce sujet. Au Canada, le Programme fédéral de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier (NEDEM) a coordonné les efforts de recherche et de développement des gouvernements provinciaux ainsi que de l'industrie minière. Le programme NEDEM s'est échelonné de 1989 à 1997 et il a permis de réduire de 400 millions de dollars les frais reliés à la restauration des sites miniers générateurs de DMA et ce à partir d'un investissement de 17.5 millions de dollars. Ce programme a été prolongé de 1998 à 2000 sous l'appellation NEDEM 2000 (Tremblay et Weatherell, 2003). Les travaux de Steffen et al. (1991) et ceux de Morin et Hutt (1997) ont également grandement contribué à améliorer l'état des connaissances à ce sujet. Les mécanismes de production du DMA sont aujourd'hui bien compris et il existe différentes techniques de prédiction, de

prévention et de contrôle (voir les 6 volumes rapportant les travaux du programme MEND, Rapport 5.4.2, Senes Consultants Limited et al. 2001).

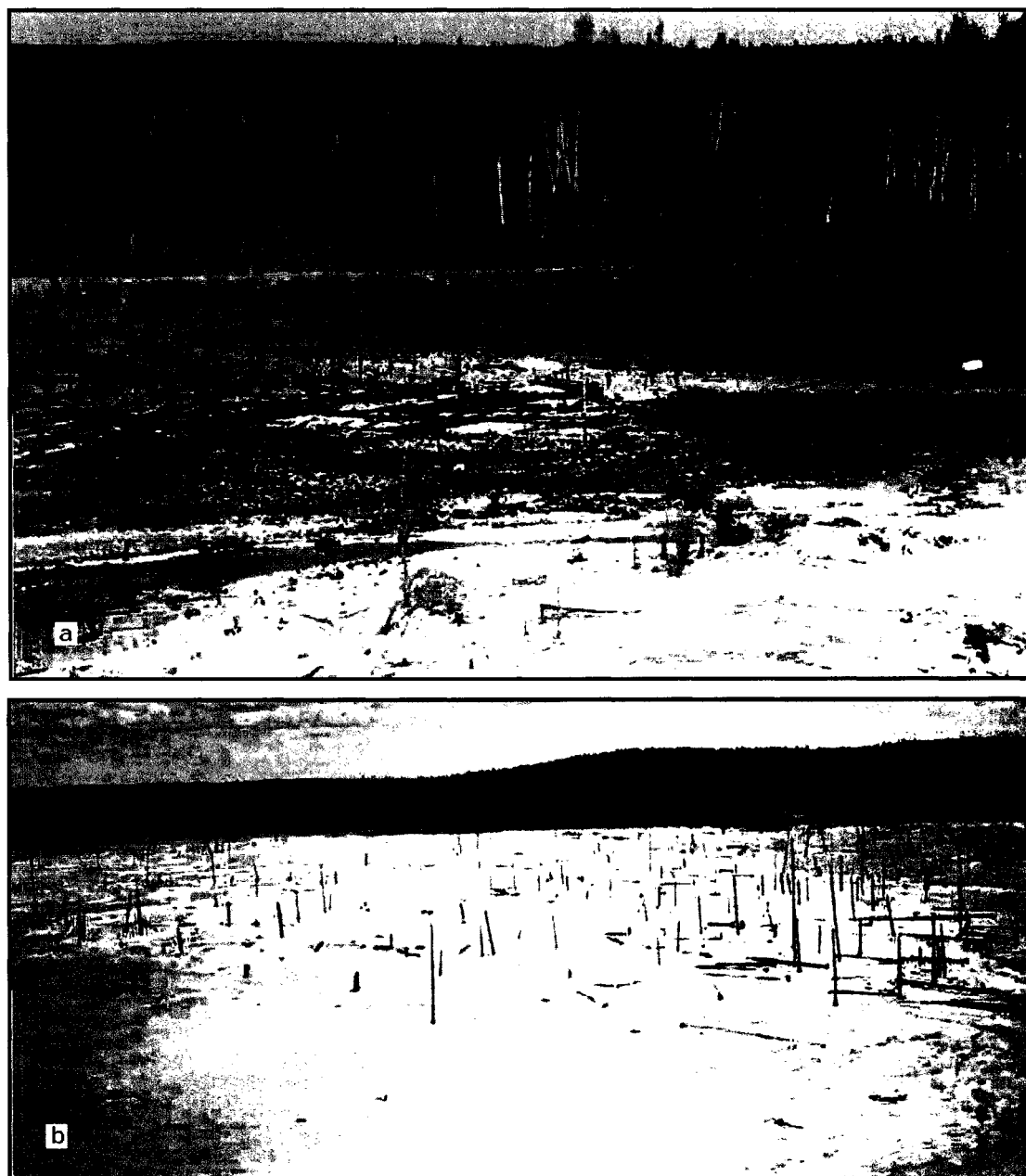


Figure 2.3 : Représentations d'impacts des eaux acides

a) Exemple de déversement d'eau acide (site minier Manitou),

b) Végétation dévastée par les rejets et de l'eau acide (site minier Manitou).

2.4.3 Méthodes de contrôle du DMA

Certaines méthodes de contrôle du drainage minier acide (DMA) sont préventives, c'est-à-dire qu'elles sont employées pour empêcher ou limiter l'oxydation des sulfures et ainsi contrer le problème à la source. Les techniques du recouvrement en eau, de la nappe perchée et de la couverture avec effets de barrière capillaire sont trois méthodes préventives de contrôle du DMA. C'est-à-dire qu'elles servent à limiter l'apport en oxygène vers les résidus puisque c'est cet élément, en présence d'humidité, qui déclenche le drainage minier acide. Les autres méthodes de contrôle consistent à traiter l'eau déjà contaminée par le DMA ou encore à en ralentir la propagation vers l'environnement comme dans le cas de la technique de l'enveloppe perméable (voir section 2.4.3.6). Les méthodes préventives et les autres méthodes de contrôle sont souvent utilisées en combinaison, ce qui permet de prévenir la formation de DMA additionnel et de contrôler celui qui est déjà présent. Ces différentes méthodes de contrôle du DMA sont discutées sommairement dans les sections suivantes (Aubertin et al., 2002 et MEND Report 2.17.1, 1996).

2.4.3.1 Recouvrement en eau

Dans les régions à climats humides, les méthodes préventives de contrôle du DMA visent essentiellement à limiter la migration de l'oxygène vers les rejets. La technique du recouvrement en eau consiste à entreposer les rejets de concentrateur sous une couverture aqueuse. Cela est généralement réalisé par la construction de digues autour d'un lieu d'entreposage en surface. Dans le passé, des rejets miniers ont été entreposés dans des lacs mais cette pratique n'est cependant plus permise au Québec. La couverture d'eau agit en limitant de façon efficace la quantité d'oxygène avec laquelle les rejets sont en contact. Le bilan des entrées et des sorties d'eau dans la couverture doit toujours être positif afin d'assurer, en tout temps, une hauteur minimale d'eau au dessus des rejets. L'épaisseur efficace de la couverture d'eau est déterminée en tenant

compte des mouvements d'eau anticipés. À cet égard, les gradients hydrauliques verticaux dans les rejets ainsi que la vitesse, la durée et la fréquence des vents sont les aspects les plus importants à prendre en considération. En effet, les mouvements de l'eau (vagues et tourbillons) facilitent le transport de l'oxygène et ils peuvent mettre en suspension les particules situées à l'interface eau/rejets, deux phénomènes qui favorisent l'augmentation du taux d'oxydation des rejets (Aubertin et al., 2002). Cette méthode de contrôle du DMA est utilisée avec succès sur divers sites comme celui de la mine Louvicourt et l'ancien parc à résidus Solbec-Cupra.

2.4.3.2 Nappe surélevée

La technique de la nappe phréatique surélevée est une autre méthode préventive de contrôle du DMA qui s'applique aux rejets à granulométrie fine comme les rejets de concentrateur. Elle consiste à modifier le bilan hydrique dans les rejets de façon à ce que ceux-ci soient maintenus en tout temps à un degré de saturation élevé. Le principe est le même que pour le recouvrement en eau, soit de ralentir les flux d'oxygène vers les rejets en utilisant l'eau comme barrière. Cette technique vise idéalement à maintenir le niveau de la nappe phréatique à une position telle que la partie supérieure de la frange capillaire coïncide avec la surface des résidus. La frange capillaire est la zone située immédiatement au dessus de la nappe phréatique et où l'eau est retenue par les forces capillaires. Les degrés de saturation de la frange capillaire sont compris entre le degré de saturation résiduel du sol jusqu'à 100% inclusivement (Todd, 1980). Plus un matériau est fin, plus la frange capillaire est importante car les petits pores forment des conduites qui permettent des suctions capillaires plus élevées que les gros pores. Par exemple, la frange capillaire d'une argile peut être de plusieurs mètres alors qu'elle est d'environ 30 cm pour un sable. La position de la nappe peut être rehaussée par des barrières étanches qui permettent de limiter les écoulements horizontaux (digues ou autres systèmes). De plus, pour que le système soit efficace, il faut limiter l'évaporation de l'eau hors des résidus. Cela peut être accompli par l'installation d'une couche de sol

grossier sur le dessus des résidus qui agit comme bris capillaire. Il faut également considérer le fait que la granulométrie des résidus peut varier sur le site selon la méthode de déposition utilisée et que cela peut faire varier la profondeur de la nappe. Cette méthode de contrôle du DMA est relativement nouvelle et il n'existe pas beaucoup de données permettant d'en préciser les conditions d'applications (MEND Report 2.17.1, 1996).

2.4.3.3 Couverture avec effets de barrière capillaire

Les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) constituent une autre catégorie de méthodes préventives de contrôle du drainage minier acide. Elles consistent en systèmes multicouches de sols aux granulométries contrastées. La fonction d'une CEBC est de maintenir une des couches, la couche de faible perméabilité, saturée ou près de la saturation en tout temps de façon à limiter les flux d'oxygène vers les rejets. La figure 2.4 présente une vue en section typique d'une CEBC. La couche superficielle sert de support à la végétation et elle contient nécessairement une proportion de matière organique. La couche de protection sert à protéger le cœur de la CEBC des intrusions biologiques comme les racines d'arbres et les animaux fouisseurs. Cette couche est habituellement composée de roches anguleuses peu accueillantes pour les animaux. La couche de sol possédant la granulométrie la plus fine (couche de faible perméabilité) est placée entre deux sols plus grossiers, les couches de drainage et de support. Pendant une période d'averses suffisante les couches supérieures se remplissent d'eau. Lorsque la pluie cesse, les couches se drainent, d'autant plus facilement que leur granulométrie est grossière. La couche de faible perméabilité est maintenue saturée ou près de la saturation sur de longues périodes. Non seulement parce que sa perméabilité saturée est la plus faible mais aussi parce que les sols grossiers qui l'encadrent deviennent très peu perméables (à faible degré de saturation) et qu'ils bloquent littéralement le passage de l'eau hors de cette couche. L'eau dans la couche de faible perméabilité demeure ainsi dans un état pseudo stationnaire. L'efficacité d'une CEBC est fonction du contraste

entre les propriétés hydriques des sols des différentes couches, c'est-à-dire du contraste entre les courbes de perméabilité et de rétention d'eau. L'épaisseur des couches, la position de la nappe phréatique par rapport à la couverture ainsi que la fréquence et l'abondance des averses sont également des facteurs à considérer lors du design d'une CEBC (Aubertin et al., 2002).

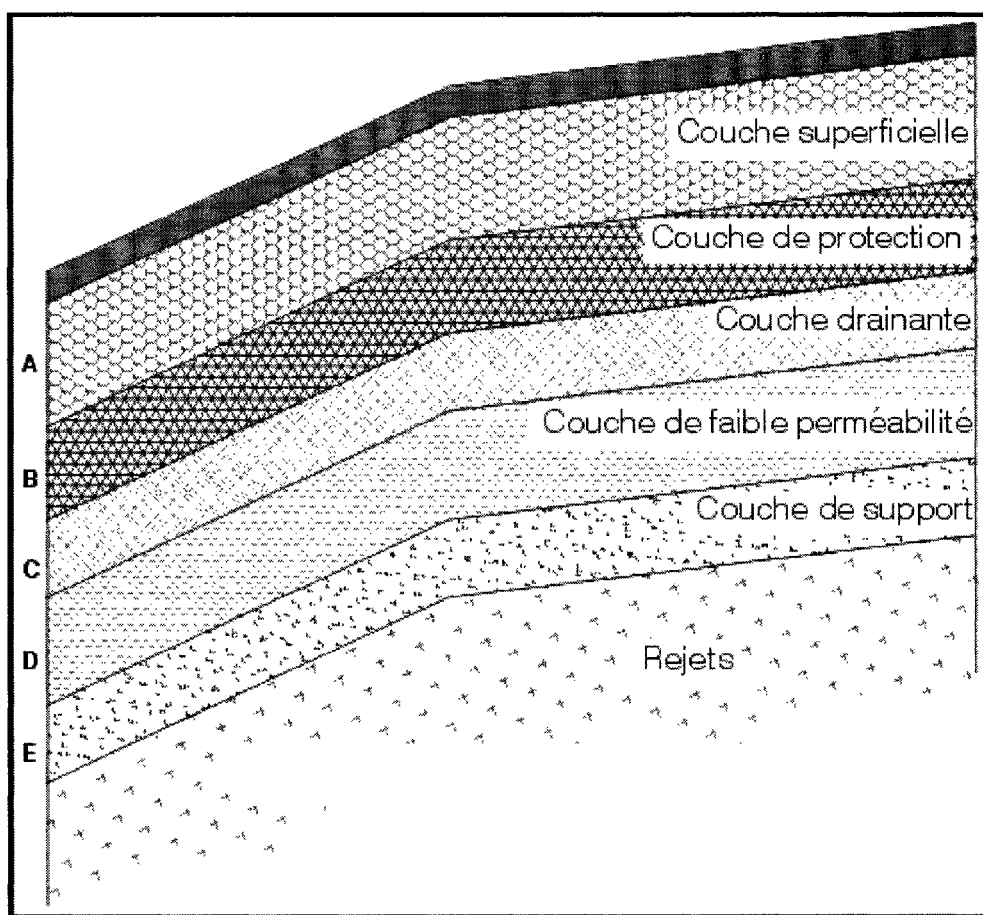


Figure 2.4 : Profil typique d'une couverture de type CEBC
(tirée de Aubertin et al, 2002).

2.4.3.4 Neutralisation in-situ

L'approche traditionnelle de neutralisation du drainage minier acide consiste à récupérer et à traiter l'eau contaminée en usine. Le traitement consiste à élever le pH pour que les métaux en solution repassent dans la phase solide. Dans cette phase, ils sont en effet moins toxiques car ils sont moins facilement assimilables par les organismes vivants. Le même principe peut être appliqué directement in situ (Aubertin et al., 2002). La neutralisation en place de l'acidité contenue dans l'eau interstitielle des rejets oxydés a été effectuée avec succès sur plusieurs sites. Elle peut être réalisée par incorporation de chaux ou de pierre calcaire aux rejets sur le site même. Les paramètres de conception de cette méthode incluent la concentration de substances neutralisantes à utiliser ainsi que la profondeur sur laquelle elles doivent être incorporées. La quantité de substances neutralisantes à ajouter dépend de l'acidité totale contenue dans les résidus et celle-ci peut être déterminée par des essais de neutralisation réalisés en laboratoire. La profondeur jusqu'où les rejets sont oxydés et donc générateurs de DMA dépend de leur temps d'exposition à l'humidité et à l'air. Employée correctement, la méthode de neutralisation in-situ est efficace pour rehausser le pH et stabiliser les métaux.

La neutralisation in situ a été utilisée avec succès sur plusieurs sites générateurs de DMA. Par exemple, une restauration du parc à résidus sulfurés Solbec (Québec) a été réalisée par cette méthode avant la mise en place de recouvrement en eau. À cet endroit, 118 tonnes par hectare de pierre de chaux ont été incorporées aux résidus sur une profondeur de 15 cm avant l'inondation du parc (Amyot et Vézina, 1999).

2.4.3.5 Marais traitants

Les marais traitants peuvent aussi être utilisés comme moyen de traitement in-situ des eaux contaminées par le drainage minier acide. Au Canada, il s'agit cependant d'une

avenue peu employée mais elle mériterait d'être explorée plus à fond. En effet, de nombreuses études ont démontré que les eaux riches en matières organiques ont la faculté d'abaisser de façon notable la concentration des ions métalliques en solution (Cd, Cu, Pb, Zn, Fe, Co, Ni, S, Mn) et celle des ions sulfates. Les ions métalliques passent en phase solide par adsorption sur la matière organique et forment des composés complexes avec celle-ci. Les eaux plus ou moins stagnantes des marais sont naturellement riches en matières organiques à cause de la végétation en décomposition et elles peuvent donc aider à traiter le DMA. De plus, certaines plantes des marais ont la propriété d'augmenter le pH de l'eau; c'est le cas des espèces *Eriophorum angustifolium* et *E. scheuchzeri* (Stoltz et Greger, 2001; Räisänen et al. 2001). D'autres plantes comme le blé tolérant à l'aluminium (*Triticum aestivum* Atlas-66) peuvent également faire augmenter le pH de l'eau. Dans une expérience en laboratoire, cette espèce de blé a fait passer le pH d'une solution de 4.5 à 7.0 en 21 jours (Taylor et Foy, 1985 cité par Stoltz et Greger, 2001). En fait, les marais semblent être un moyen naturel de traitement du drainage minier acide. En effet, lorsqu'un site est générateur de DMA, la végétation située sur le parcours de l'eau de ruissellement en provenance des rejets est détruite. Cela crée graduellement un espace riche en matière organique à travers lequel l'eau circule. Ceci qui permet de diminuer les concentrations de métaux lourds en solution. De plus, si des plantes ayant le potentiel d'augmenter le pH se trouvent sur le parcours de l'eau, cela est encore plus favorable. L'utilisation des marais traitants comme méthode de contrôle du DMA consiste à accélérer le processus naturel des marais en optimisant les variables clés. Par exemple, implanter des espèces de plantes qui élèvent le pH et fournir un apport supplémentaire en matière organique (les boues de traitement des eaux usées municipales pourraient être utilisées à cet effet).

2.4.3.6 Technique de l'enveloppe perméable pour fosse remblayée

La technique de l'enveloppe perméable est une méthode envisagée pour le contrôle du drainage minier acide lorsque les rejets submergés sont entreposés dans des massifs

rocheux fracturés. Cette technique a été développée au début des années 1980 pour le site Rabbit Lake, en Saskatchewan, où les rejets de concentrateur d'uranium sont entreposés dans des fosses de surface (Belfadhel, 2000). L'objectif de cette technique est de réduire la proportion des eaux de l'écoulement régional souterrain qui circule à travers les rejets afin de diminuer la propagation des contaminants par advection. La technique de l'enveloppe perméable est efficace dans les conditions saturées et lorsque la conductivité hydraulique des rejets est plus élevée que celle du massif fracturé. Dans le cas du site Rabbit Lake, l'enveloppe perméable est constituée d'une couche de pierre concassée épaisse de 3 pieds et d'une couche filtre de 7 pieds en sable. La figure 2.5 présente une vue en section de l'enveloppe perméable utilisée sur ce site.

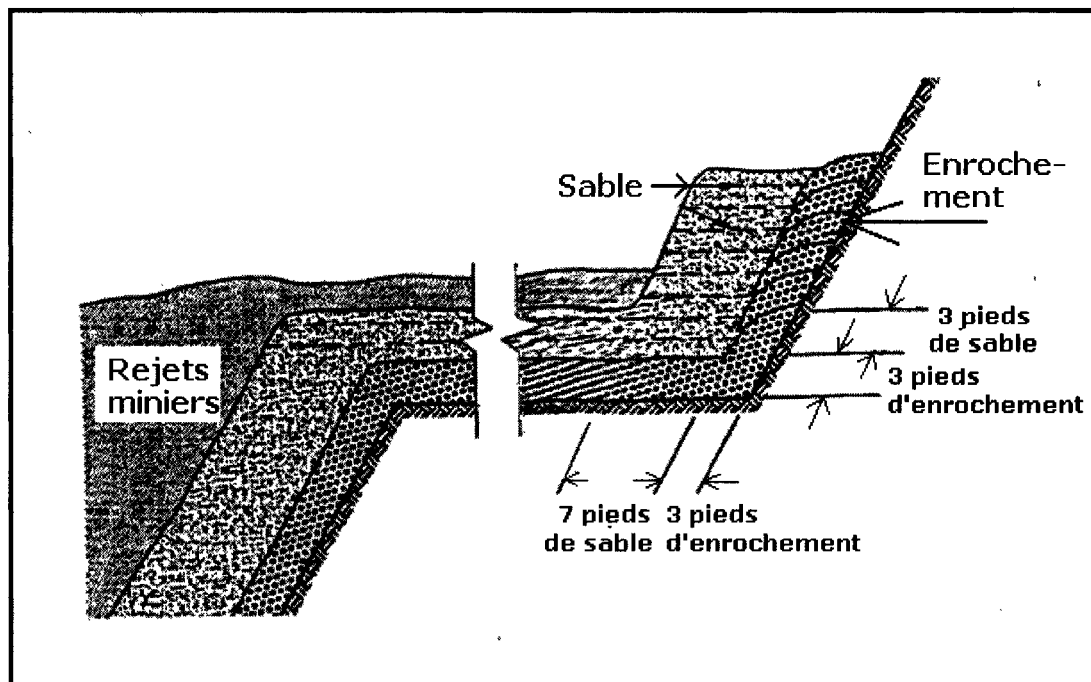


Figure 2.5 : Vue en section de l'enveloppe perméable utilisée au site Rabbit Lake (tirée de Belfadhel, 2000).

La conductivité hydraulique élevée à l'état saturée de la pierre concassée fait de cette couche un passage préférentiel pour l'eau de l'écoulement régional. La présence de l'enveloppe diminue donc les gradients hydrauliques et les débits à travers les rejets par

rapport au cas sans enveloppe. La figure 2.6 illustre le fonctionnement du concept de l'enveloppe perméable lorsque les rejets sont plus perméables que le massif rocheux. Elle montre que les lignes d'écoulement vues en plan passent préférentiellement à travers les rejets dans le cas sans enveloppe perméable alors qu'elles passent préférentiellement par l'enveloppe lorsqu'il y en a une.

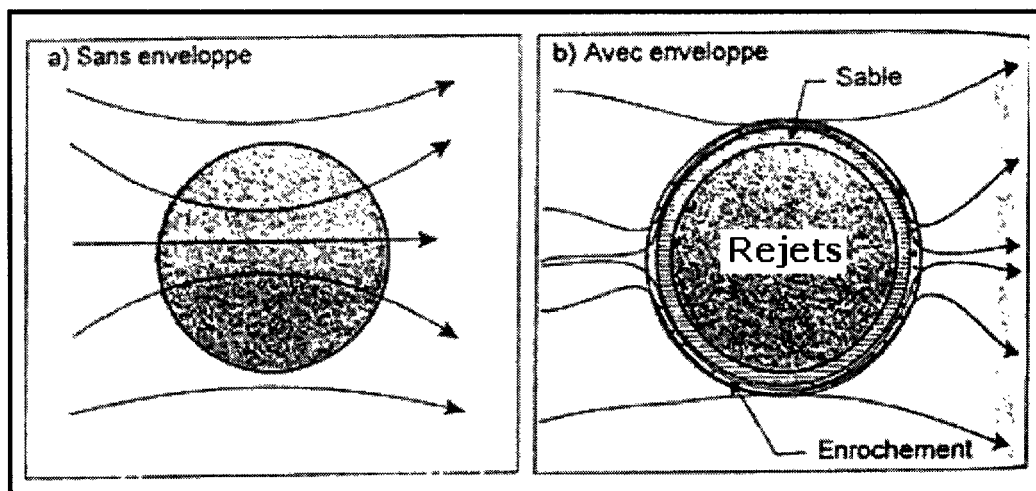


Figure 2.6 : Schémas illustrant le concept de l'enveloppe perméable

a) cas sans enveloppe et b) cas avec enveloppe

(tirée de Belfadhel, 2000).

La couche de sable employée comme filtre dans l'enveloppe perméable au site Rabbit Lake sert également à limiter le transport des contaminants par diffusion. En effet, sans cette couche de sable, les gradients de concentration en contaminants seraient maintenus élevés en permanence à cause de la circulation d'eau non contaminée dans la couche de pierre concassée (enrochement). La couche de sable diminue les gradients de concentration en allongeant le parcours des contaminants entre les rejets et la couche hautement perméable.

La technique de l'enveloppe naturelle est utilisée lorsque les rejets sont beaucoup moins perméables que le massif rocheux fracturé. Cette technique consiste à placer

directement les rejets dans la fosse sans installation d'enveloppe perméable. Dans ces conditions hydriques, l'écoulement régional contourne naturellement la fosse (et les rejets) et l'emploi d'une enveloppe perméable est inutile. La technique de l'enveloppe naturelle est utilisée au site McClean Lake, en Saskatchewan, pour l'entreposage de résidus de concentrateur d'uranium dans une fosse de grès hautement fracturée (Ednie, 2002) . Tout comme pour la technique de l'enveloppe perméable, cette technique est d'autant plus efficace que le contraste des conductivités hydrauliques est important entre les rejets et le massif fracturé. Dans le cas de McClean Lake, la conductivité hydraulique des résidus est donc minimisée en utilisant un mode de déposition des rejets qui en favorise la densification. Il s'agit d'un mode de déposition sub aquatique qui est effectué le plus près possible de la surface des résidus, ce qui minimise la ségrégation des particules. De plus, une couche de sable située sous les résidus au fond de la fosse est pompée en permanence ce qui en favorise le drainage et la consolidation.

L'entreposage en fosse de rejets miniers générateurs de DMA avec la technique de l'enveloppe perméable ou de l'enveloppe naturelle semble être une approche économique et efficace d'un point de vue environnemental. Une méthode préventive de contrôle du DMA pourrait être employée en association pour empêcher la formation de DMA additionnel (dans le cas où une portion des rejets miniers ne serait pas submergée). Évidemment, chaque cas doit être analysé en regard des caractéristiques du massif rocheux et des rejets miniers.

Lorsque des rejets miniers contaminés sont en contact avec un massif rocheux fracturé et qu'en plus ils sont en présence d'un gradient hydraulique, les contaminants qu'ils contiennent peuvent se propager dans les différentes composantes du massif. C'est-à-dire dans la roche intacte, dans les fractures et dans le réseau de fractures. Le chapitre suivant traite des différentes composantes d'un massif rocheux fracturé et de leurs caractéristiques affectant leurs propriétés hydriques.

CHAPITRE III - COMPOSANTES D'UN MASSIF ROCHEUX

3.1 Généralités

L'évaluation des propriétés hydriques d'un massif rocheux fracturé repose sur une bonne caractérisation de ses différentes composantes, soit la roche intacte, les fractures individuelles et le réseau de fractures. Cette opération n'est cependant pas facile à réaliser vu la nature de ce type d'environnement. De plus, les coûts élevés associés à l'acquisition d'information font en sorte que la quantité de données disponibles est souvent limitée. La variabilité propre aux données géologiques ainsi que le nombre limité d'observations (par rapport au domaine étudié) sont pris en compte par l'utilisation de techniques d'interpolation et par le traitement statistique des données.

Plusieurs méthodes d'investigation sont disponibles pour identifier et caractériser les composantes d'un massif fracturé. Les fractures peuvent être localisées en surface par l'observation des affleurements et des photos aériennes mais également en souterrain par l'observation des galeries de mine ainsi que par l'interprétation des carottes de forage. Le forage d'investigation est généralement planifié à différents endroits et à différents angles afin de déterminer la géologie du massif ainsi que la position et l'étendue des fractures. Les techniques d'investigation géophysiques telles les méthodes électrique, électromagnétique, sismiques et le radar sont également employées pour caractériser les massifs rocheux. Elles peuvent être utilisées à partir de la surface ou à l'intérieur des trous de forage. Finalement, les essais hydrauliques réalisés en laboratoire ou sur le terrain sont d'usage courant pour évaluer la conductivité hydraulique de la roche intacte, des fractures et des réseaux de fractures (Berkowitz, 2002).

Ce chapitre présente les caractéristiques des composantes d'un massif rocheux fracturé (roche intacte, fractures individuelles et réseau de fractures) en relation avec leurs propriétés hydriques.

3.2 La roche intacte

La roche intacte d'un massif rocheux est la roche comprise entre les fractures. Il y a énormément de diversité dans les âges et les types de roches ainsi que dans leurs propriétés physiques. Il en va de même pour les propriétés hydriques. Certaines roches intactes sont très peu perméables alors que d'autres le sont beaucoup et elles peuvent même constituer des aquifères. Les trois grandes familles de roches sont les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires. Les roches les plus perméables se trouvent dans la famille des roches sédimentaires, tels les grès et certains calcaires. Les roches ignées et métamorphiques sont en général très peu perméables.

La porosité de la roche intacte est appelée porosité primaire et celle associée aux fractures, porosité secondaire. La porosité de la roche intacte permet l'écoulement de l'eau seulement si les pores sont interconnectés. Le volume de l'ensemble des pores et interstices interconnectés divisé par le volume total est appelé porosité effective tandis que l'ensemble de tous les pores et interstices correspond à la porosité totale (Chapuis, 1999). La conductivité hydraulique saturée de la roche intacte dépend de la porosité effective ainsi que la dimension des pores.

La porosité primaire dépend du type de roche et de son historique. Les roches ignées et métamorphiques ont généralement de faibles porosités primaires. Par exemple, la porosité totale des roches cristallines est souvent de l'ordre de 0.01% à 1%. La porosité de ces roches est associée à des micro fissures faiblement interconnectées. Dans le cas des roches sédimentaires, la porosité totale peut être très élevée. Elle varie typiquement de moins de 1% à 50% (Lapcevic et al., 1999). En général, les roches sédimentaires à grains grossiers ont des porosités primaires et des conductivités hydrauliques élevées. Les roches sédimentaires à grains fins peuvent avoir des porosités primaires élevées mais les conductivités hydrauliques sont généralement beaucoup plus faibles (Berkowitz, 1994). De plus, selon l'historique de la roche, les pores ou interstices peuvent avoir subi plus ou moins d'altération ; ils peuvent être obstrués par la déposition

de fines particules ou par la précipitation de minéraux ou s'être agrandis par la dégradation chimique et/ou mécanique (érosion) des parois. C'est le cas notamment des roches de calcaire dans les zones de karst où les pores s'agrandissent à cause de l'acidité de l'eau .

Sur un même site, les propriétés hydriques de la roche intacte peuvent être très variables et il faut donc échantillonner à plusieurs endroits différents du massif afin d'effectuer une bonne caractérisation. Un exemple de cette variabilité est donné par les résultats de Flint et Selker (2002). Ces chercheurs ont testé la conductivité hydraulique d'environ 600 échantillons de roches intactes prélevés jusqu'à 1000 m de profondeur au site Yucca Mountain (Nevada, É.U.). Les conductivités hydrauliques saturées variaient de dix ordres de grandeur (de 10^{-4} m/s à 10^{-14} m/s) pour des porosités effectives variant de 2% à 60%. Le tableau 3.1 présente les plages types de porosité totale et effective de différentes roches.

Tableau 3.1 : Porosités totales et effectives de différentes roches
(tiré de Domenico and Schwartz, 1998).

Nom de la roche	Porosité totale (%)	Porosité effective (%)
Anhydrite	0.5-5	0.05-0.5
Craie	5-40	0.05-2
Calcaire et dolomite	0-40	0.1-5
Grès	5-15	0.5-10
Schiste	1-10	0.5-5
Sel	0.5	0.1
Granite	0.1	0.000 5

3.3 Fractures et discontinuités

3.3.1 Généralités

Les fractures sont des discontinuités planaires ou curviplanaires formées dans l'écorce terrestre suite à une rupture fragile de celle-ci (Lapcevic et al., 1999). C'est l'atteinte de la résistance ultime en tension, en compression ou en cisaillement de la roche intacte qui induit la fracturation. Lorsque que les fractures sont interconnectées, elles constituent les conduites principales pour l'eau dans la plupart des massifs rocheux. Il y a trois principaux modes de formation d'une fracture lesquels sont illustrés à la figure 3.1.

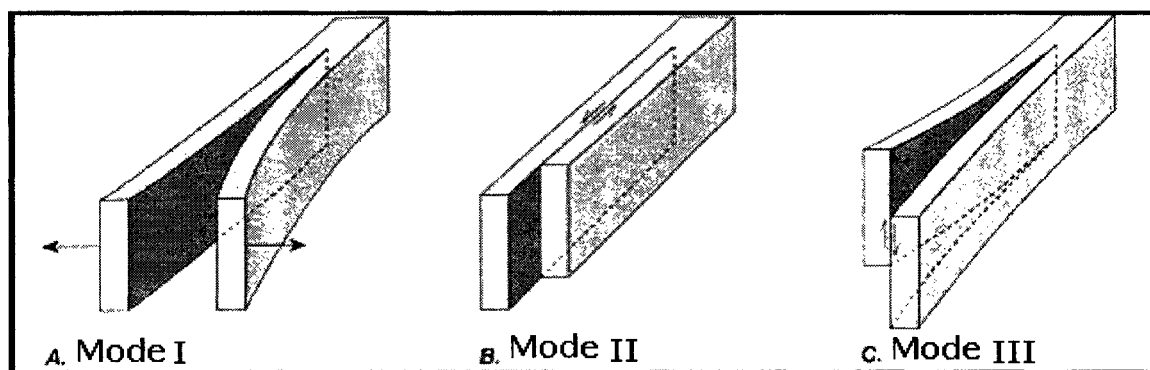


Figure 3.1 : Les trois modes principaux de formation d'une fracture
A.) mode I, B.) mode II et C.) mode III (tirée de Twiss and Morres, 1992).

Une fracture se formant par le mode I est le résultat d'une sollicitation de la roche en tension, le mouvement relatif des parois est perpendiculaire au plan de la fracture. Les fractures se formant par les modes II et III sont la conséquence d'une sollicitation de la roche en compression ou en cisaillement, le mouvement relatif des parois est parallèle au plan de la fracture (Twiss and Morres 1992).

Les mécanismes de formation des fractures sont multiples et ils constituent un champ d'étude très vaste. La plupart des fractures sont engendrées par des excès de contraintes

dans le massif rocheux, mais les origines de ces excès sont diverses. Il y a les excès de contraintes induits par des causes extérieures comme les travaux de construction et les mines, les cycles gel/dégel, le passage et retrait des glaciers, etc. et ceux d'origines géologiques tel que le mouvement des plaques tectoniques.

Les termes fracture et discontinuité géologique sont les appellations génériques des ouvertures planaires existant dans les massifs rocheux. En fait, il existe une terminologie très étendue pour décrire les fractures selon leurs origines et les structures dans lesquelles elles se forment (Twiss and Morres 1992). Deux catégories importantes de fractures sont les failles et les diaclases. Les failles sont des fractures formées selon les modes II ou III et auxquelles sont associées des mouvements relatifs très importants des parois. Les zones de failles sont des endroits où la roche a subi un cisaillement très important. Elles sont fréquemment associées aux roches métamorphiques et il y a souvent plusieurs failles à intervalles rapprochés dans une zone de faille (figure 3.2). Les failles et les zones de failles de grande envergure sont souvent des lieux hautement conducteurs de l'eau.

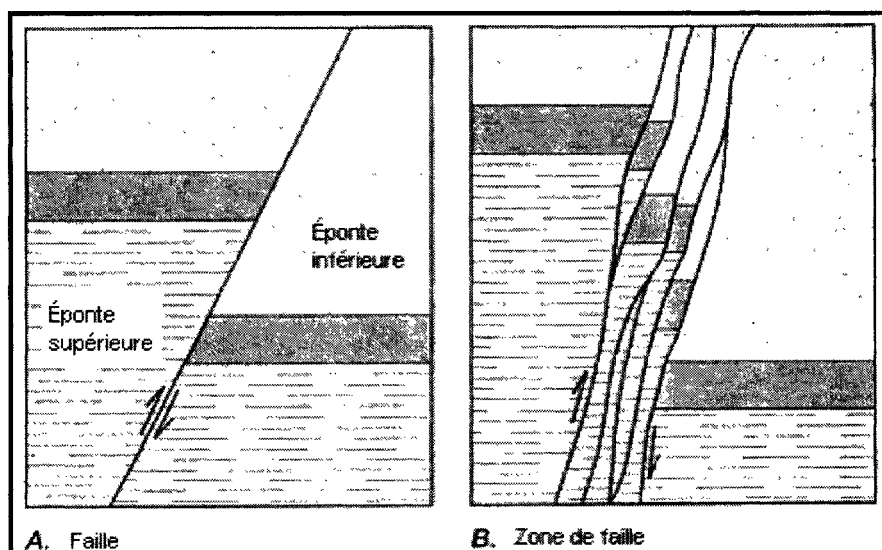


Figure 3.2 : Représentations de failles

A) Schéma d'une faille, B) Schéma d'une zone de faille

(adaptée de Twiss and Morres, 1992).

Les diaclases sont typiquement des fractures formées selon le mode I et ils constituent la structure géologique la plus commune des massifs rocheux. Les diaclases sont souvent regroupés en familles, c'est-à-dire en groupe de plusieurs diaclases ayant la même orientation, inclinaison et espacées à intervalles plus ou moins réguliers.

3.3.2 Géométrie des discontinuités

3.3.2.1 Dimensions

Les dimensions d'une fracture comprennent la longueur et la largeur du plan de la fracture ainsi que la taille de l'ouverture. Une fracture est définie à deux échelles très différentes puisque la longueur et la largeur du plan de fracture sont généralement passablement supérieures à l'ouverture. La conductivité hydraulique d'un massif rocheux est une fonction des dimensions des fractures qui le compose. Plus une fracture est longue et large, plus il est possible qu'elle soit connectée à d'autres et puisse transmettre l'eau. De plus, plus la taille de l'ouverture est importante, plus elle pourra laisser passer l'eau.

Il existe des fractures de toutes dimensions dans les massifs rocheux. À un extrême, on retrouve les micro fissures créées lors de la formation des roches et dont les dimensions sont de l'ordre du micron. À l'autre extrême, il y a les failles qui peuvent être longues de plusieurs kilomètres avec des ouvertures de l'ordre du mètre. Les tableaux 3.2 et 3.3 donnent respectivement les dimensions typiques des fractures en fonction de l'échelle et une classification des fractures en fonction de la taille de l'ouverture.

Tableau 3.2 : Dimensions des fractures à différentes échelles

(tiré de Lapcevic et al., 1999).

Échelle	Longueur et largeur	Ouverture
Microscopique	(100-1000) μm	(1-2) μm
Mésoscopique	(0.5-1000) m	(0.01-10) mm
Mégascopique	km	cm-m

Tableau 3.3 : Classification des fractures en fonction de la taille de l'ouverture, (tiré de Indraratna et Ranjith, 2001).

Ouverture (mm)	Classification
< 0.1	Très étroite
0.1 – 0.25	Étroite
0.25 – 0.50	Partiellement ouverte
0.50 – 2.5	Ouverte
2.5 – 10.0	Moyennement large
> 10.0	Large

Des fonctions de probabilité sont fréquemment utilisées pour représenter les dimensions de l'ensemble des fractures d'un massif et leurs valeurs probables associées. La fonction de probabilité de la longueur des fractures est souvent bien représentée par une fonction log-normale ou une fonction négative exponentielle (Berkowitz, 1994). La figure 3.3 présente l'allure générale de ces deux fonctions asymétriques où P est la probabilité, souvent exprimée en pourcentage, et X la variable aléatoire choisie, la longueur par exemple. Dans les deux cas, les valeurs les plus probables ($M(x)$) sont situées plus près de la borne inférieure que de la borne supérieure ce qui signifie qu'il y a en général plus de fractures courtes que de fractures longues dans les massifs. La forme de la fonction de probabilité dépend dans une certaine mesure de la méthode d'échantillonnage et d'interprétation des données. Par exemple, un relevé systématique

des micro fissures favorisera l'obtention d'une distribution exponentielle négative (ou décroissante) alors que si ces structures sont négligées l'obtention d'une distribution log-normale est plus probable (Berkowitz, 1994).

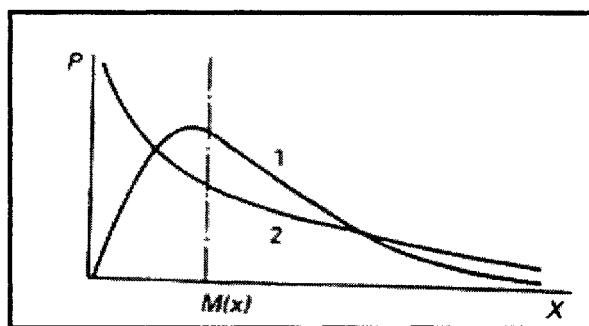


Figure 3.3 : Fonctions de probabilité log-normale (1) et négative exponentielle (2)
(tirée de Berkowitz, 1994).

3.3.2.2 Variabilité de l'ouverture

Le plan d'une fracture naturelle comporte des ouvertures de différentes tailles. Il y a des zones d'ouvertures maximales et des zones d'ouvertures nulles (zones de contact entre les faces). Entre ces deux extrêmes, toutes les tailles intermédiaires d'ouverture coexistent. La figure 3.4 illustre que la taille de l'ouverture est une fonction de la position dans le plan de fracture. Les différentes tailles d'ouvertures peuvent être disposées de façon isotrope ou anisotrope et avec plus ou moins de corrélation entre elles. La corrélation spatiale de l'ouverture est définie comme la longueur, mesurée parallèlement au plan de fracture, sur laquelle la taille de l'ouverture est approximativement constante (Olsson et Barton, 2000).

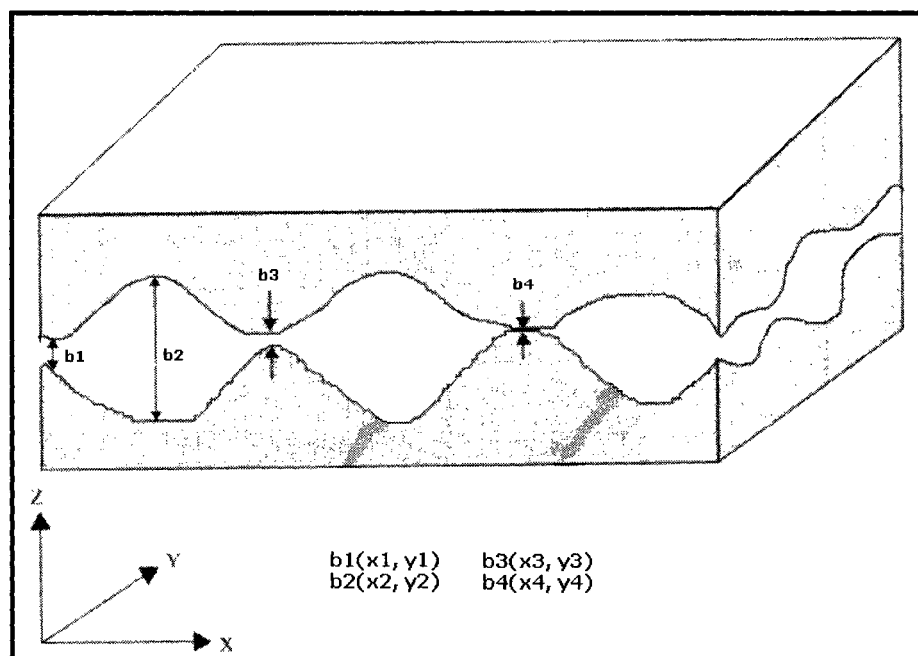


Figure 3.4 : Schéma d'un plan de fracture (XY) d'ouverture variable (b_1, b_2, b_3, b_4)
(adaptée de Indraratna et Ranjith, 2001).

C'est la rugosité des faces d'une fracture naturelle qui est à l'origine de la variabilité de l'ouverture. Une surface est rugueuse si elle comporte des irrégularités (aspérités) à petite et/ou à grande échelle. Priest (1993) considère une surface comme rugueuse si elle possède des aspérités qui se répètent au moins tous les 10 cm. L'effet de la rugosité sur l'écoulement intensifie les pertes de charges par frottement aux interfaces eau/parois.

Dans le domaine de la mécanique des roches, le coefficient JRC «Joint Roughness Coefficient» est couramment utilisé pour quantifier le degré de rugosité d'une fracture. Le JRC est une valeur comprise entre 0 et 20 : 0 pour une surface complètement lisse et 20 pour une surface très rugueuse. Plusieurs méthodes sont employées pour estimer le JRC. La plus utilisée est une méthode comparative. Le profil de la fracture est comparé avec les 10 profils standards publiées par Barton et Choubey en 1977 (Hoek et al. 1997). Ces profils standards sont reproduits à la figure 3.5.

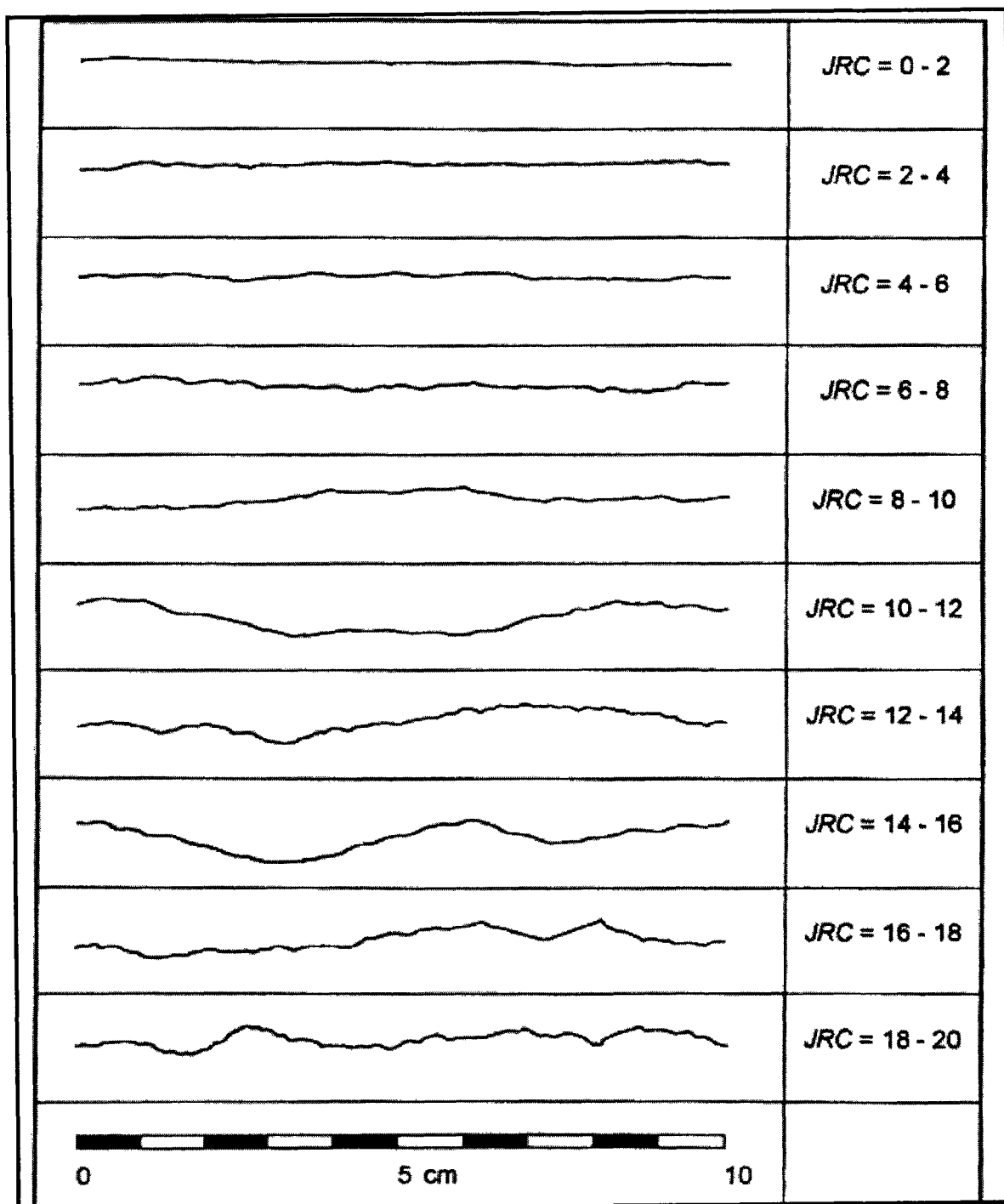


Figure 3.5 : Profils standards de la méthode comparative de détermination du JRC
(tirée de Hoek et al., 1997).

La rugosité des fractures à l'échelle du terrain peut être évaluée en traçant une droite, environ parallèle à la fracture, et en mesurant la distance perpendiculaire entre cette droite et la surface de la fracture à intervalles réguliers. Plus les intervalles seront petits, plus il sera possible de tracer le profil de la fracture avec exactitude. La dimension de l'intervalle peut être ajusté selon le degré de rugosité observé (Indraratna et Ranjith, 2001).

Plusieurs chercheurs tels que Brown et al. (1986), Gentier et Billiaux (1989) et Piggott (1990), cités dans Lapcevic et al. (1999), ont étudié la variation de l'ouverture dans un plan de fracture à l'échelle du laboratoire (fractures de 10 à 100 cm de long). Ils ont montré que les distributions de fréquence de l'ouverture (histogrammes) pouvaient être adéquatement représentés par les fonctions de probabilité log-normale, gamma ou normale. Les fonctions log-normale et gamma sont toutefois les plus souvent utilisées. Comme ces fonctions sont asymétriques avec la valeur la plus probable située du côté de la borne inférieure de la variable placée en abscisse (taille des ouvertures), cela indique qu'il y a en général beaucoup plus de petites ouvertures que de grandes dans le plan d'une fracture. Les fonctions qui représentent bien les résultats ont souvent des variances élevées car il y a beaucoup d'ouvertures de tailles très différentes dans le plan d'une fracture (Lapcevic et al., 1999). Toutefois, deux fractures aux fonctions de probabilité identiques pour les tailles d'ouverture n'ont pas nécessairement des conductivités hydrauliques identiques. En effet, la distribution spatiale des ouvertures n'est pas nécessairement la même dans chaque cas et celle-ci a une incidence sur la conductivité hydraulique (Tsang, 1984).

La variabilité de l'ouverture dans un plan de fracture engendre un phénomène appelé tortuosité et celui-ci affecte l'écoulement. La tortuosité est définie comme le changement de direction de l'écoulement causé par les variations de taille de l'ouverture (Olsson et Barton, 2000). Dans une fracture, l'eau emprunte préférentiellement les chemins de moindre résistance que sont les ouvertures de grandes tailles (en conditions

saturées). Puisque ces dernières ne sont pas nécessairement alignées, cela engendre un écoulement bidimensionnel tortueux. Le phénomène de tortuosité influence l'écoulement car il augmente la longueur du parcours moyen de l'eau, en plus de favoriser les pertes de charges. Cet effet est d'autant plus important que la fracture est étroite et que les tailles des aspérités sont grandes. Lorsque les points de contact entre les faces d'une fracture sont très nombreux et qu'ils occupent une forte proportion de l'aire du plan de fracture, certains auteurs parlent non plus d'un écoulement tortueux mais d'un écoulement par canaux. Dans ce cas, l'écoulement est localisé dans le plan de fracture et prend place dans une série de canaux interconnectés formés des ouvertures de grandes tailles. Lapcevic et al. (1999) mentionnent que si les parois sont peu rugueuses, les points de contact seront petits et très nombreux et que l'écoulement se fera à travers un système complexe formé de plusieurs petits canaux. Si les parois sont très rugueuses, les points de contact seront vraisemblablement gros et moins nombreux résultant en un écoulement moins complexe à travers un réseau de distribution formé de quelques gros canaux.

Tsang (1984) a étudié l'impact de la tortuosité sur l'écoulement à l'aide d'un modèle analogique électrique et il est arrivé aux conclusions suivantes : 1-Lorsque la proportion des faces d'une fracture qui sont en contact est plus grande que 30%, le débit à travers cette fracture peut être plus de deux ordres de grandeur inférieur au débit calculé en négligeant la tortuosité, 2- Si la rugosité est prise en compte en plus de la tortuosité, les débits peuvent être plus de trois ordres de grandeur inférieurs au débit calculé en négligeant ces deux paramètres. Cette étude démontre l'importance de ces deux paramètres (rugosité et tortuosité) sur l'écoulement dans une fracture.

L'évolution des contraintes dans le massif rocheux peut modifier la taille des ouvertures ainsi que leur distribution spatiale. L'impact dépend des propriétés mécaniques de la roche des faces des fractures (résistance en compression, module de rigidité, etc.). Les contraintes normales au plan de fracture tendent à fermer ou à ouvrir les fractures selon

le sens où elles agissent. La pression de l'eau contenue dans les fractures agit dans le même sens: si la pression est négative (suction) cela tend à fermer les fractures et si elle est positive cela tend à les ouvrir. Gale (1982) a réalisé des essais hydrauliques dans des fractures d'échantillons de granite (une seule fracture par échantillon). Il a par exemple mesuré que sous des variations de contraintes normales de 0.1 à 30 MPa, les conductivités hydrauliques des fractures diminuaient d'un peu moins de deux ordres de grandeur dans le cas des fractures naturelles et d'un peu plus de deux ordres de grandeur dans le cas des fractures artificiellement induites. De façon générale, l'ouverture moyenne des fractures diminue avec la profondeur dans les massifs à cause des pressions de terrain qui augmentent (Priest, 1993).

L'effet des contraintes de cisaillement sur l'ouverture et la conductivité hydraulique est plus difficile à évaluer car moins d'études existent à ce sujet. Olsson et Barton (2000) ont effectué des essais hydrauliques dans des fractures naturelles soumises à des contraintes de cisaillement (échantillons de granite). Les essais hydrauliques étaient réalisés entre chaque incrément de la contrainte de cisaillement. Les contraintes normales étaient de 2 MPa et 4 MPa et le déplacement maximal d'une face par rapport à l'autre était de 6 mm. Dans ces conditions, il ont mesuré une augmentation de la transmissivité des fractures de près de deux ordres de grandeur. La transmissivité d'une fracture peut être définie comme le débit d'eau qu'elle laisse couler par mètre de largeur de celle-ci perpendiculairement au gradient hydraulique ou encore comme le produit de sa conductivité hydraulique par la taille de l'ouverture (Bear, 1993). Ils ont également observé que les fractures se dilataient sous l'effet du cisaillement ce qui explique l'augmentation de la transmissivité. Cependant, à des régimes de contraintes normales plus élevés, il est possible que l'effet du cisaillement sur l'écoulement soit inversé. En effet, il est possible dans ce cas que les aspérités des faces des fractures soient complètement broyées sous l'effet du cisaillement et que, en conséquence, les particules très fines ainsi créées bloquent le passage de l'eau. Ce phénomène de blocage des fractures par des matériaux de remplissage est plus probable dans les roches tendres

comme les schistes par exemple. D'autres fractures peuvent être remplies de minéraux cristallisés comme le quartz et sont peu perméables.

La figure 3.13 présente quatre configurations typiques de l'intérieur d'une fracture. Il s'agit de fractures lisses avec ouverture approximativement constante, de fractures rugueuses sans points de contact entre les parois, de fractures rugueuses avec points de contact entre les parois et de fractures contenant des matériaux de remplissage.

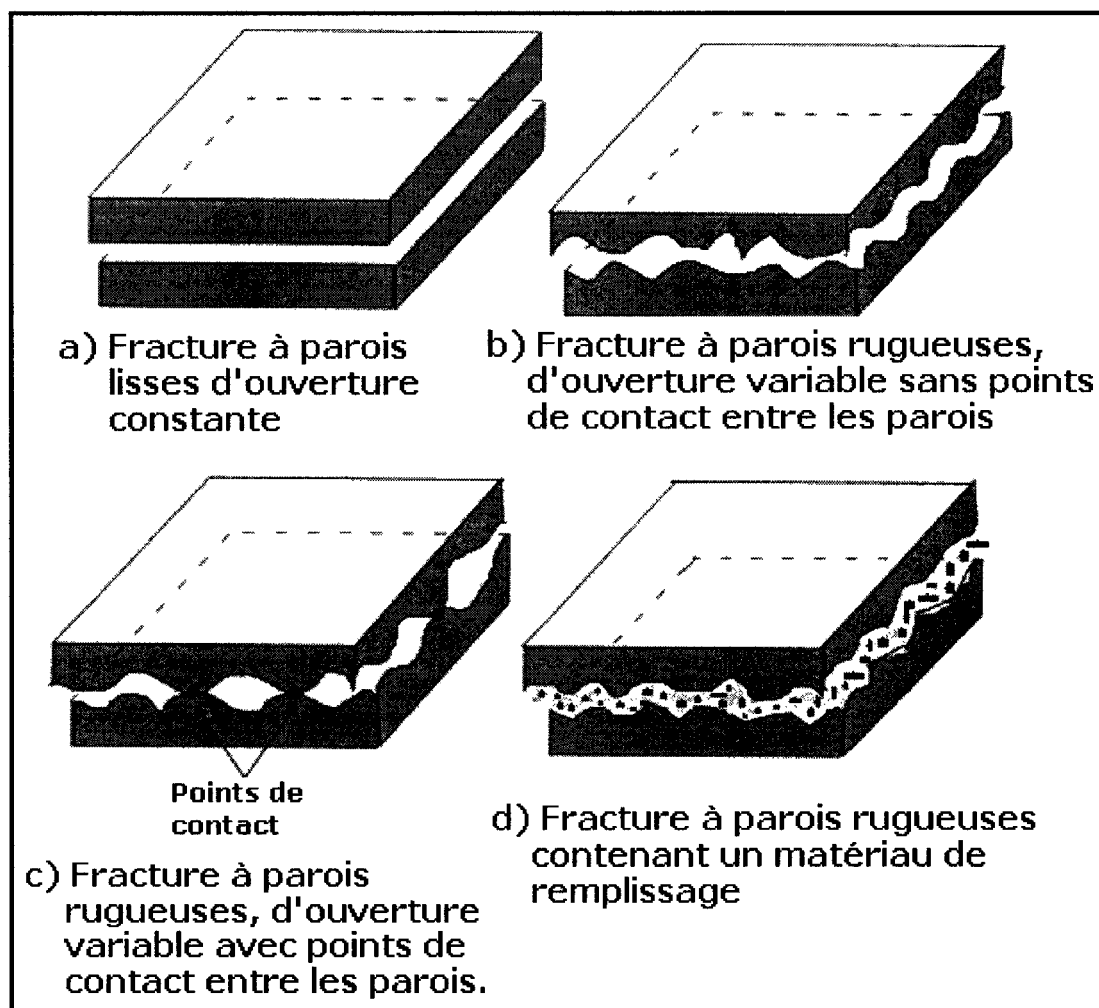


Figure 3.6 : Schémas de quatre configurations typiques de l'intérieur d'une fracture (adaptée de Indraratna et Ranjith 2001).

Les différents paramètres affectant la géométrie de l'espace entre les parois d'une fracture sont résumés sous la forme de schémas à la figure 3.7. Ces paramètres sont l'ouverture moyenne, la rugosité des parois, les aires de contact, les contraintes de cisaillement, la corrélation spatiale de l'ouverture, la tortuosité de l'écoulement, la formation de canaux d'écoulement et les contraintes normales.

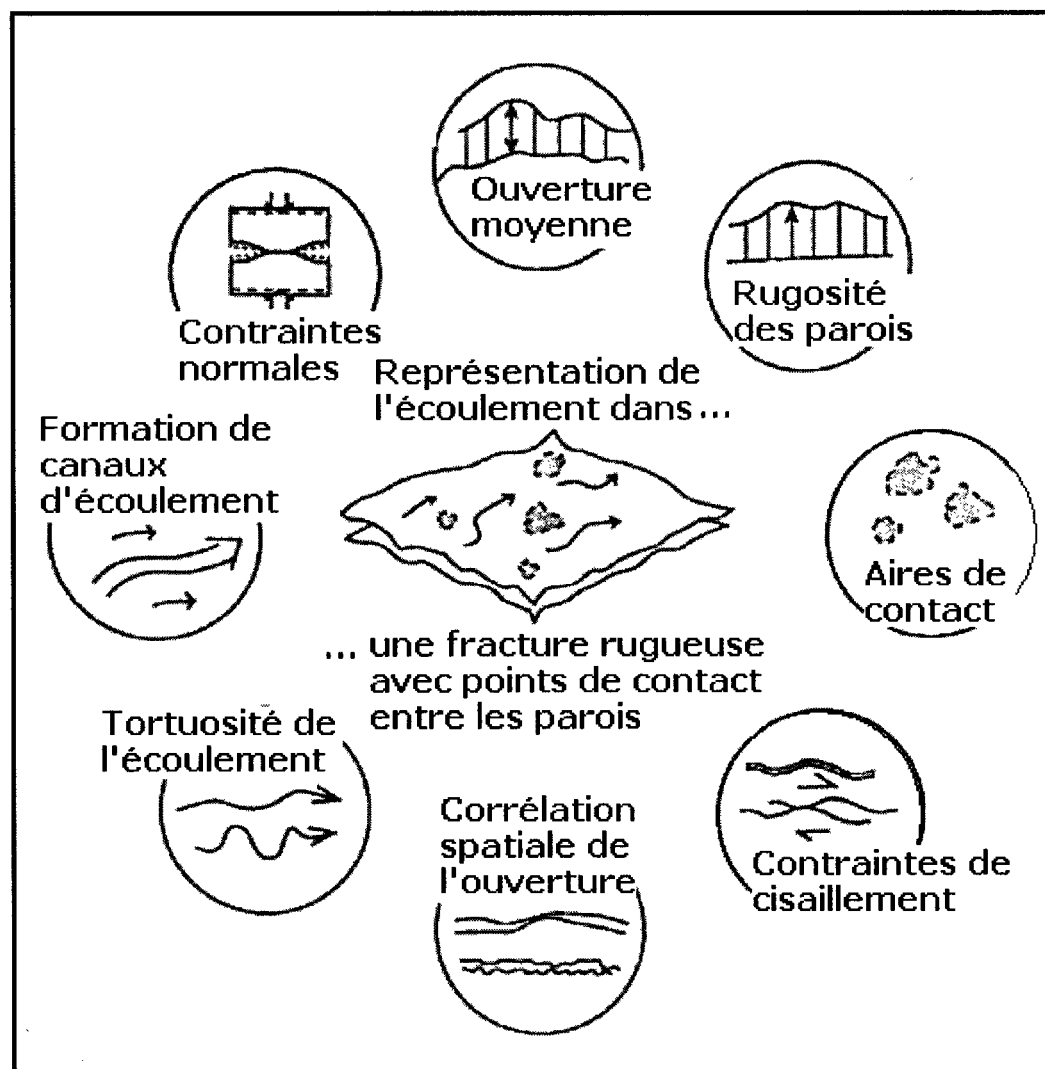


Figure 3.7 : Paramètres affectant la géométrie de l'espace entre les parois d'une fracture (adaptée de Olsson et Barton, 2000).

Bien que l'ouverture soit une variable dans le plan d'une fracture, il est utile dans la pratique de connaître une valeur représentative de toutes les ouvertures d'une fracture. La prochaine section traite brièvement des différentes approches qui sont utilisées dans la pratique pour mesurer l'ouverture d'une fracture.

3.3.3 Techniques de mesure de l'ouverture

Il existe différentes méthodes directes et indirectes de mesure de l'ouverture d'une fracture et, selon la méthode utilisée, la valeur obtenue peut varier. Ces méthodes et les appellations correspondantes de l'ouverture sont discutées sommairement ci après.

Ouverture mécanique

L'ouverture mécanique (B) d'une fracture est la distance moyenne entre les deux faces (Olsson et Barton, 2000). Indraratna et Ranjith (2001) donnent un aperçu des différentes techniques de mesure de l'ouverture mécanique. Elle est obtenue par des méthodes directes de mesure. La plus simple consiste à utiliser une série de lames de métal d'épaisseurs connues comme calibres. Les calibres sont insérés à tour de rôle dans la fracture jusqu'à ce que celui dont l'épaisseur correspond le mieux à la taille de l'ouverture soit identifié. Cette méthode peut devenir impraticable dans le cas de fractures très étroites. Indraratna et Ranjith (2001) ont utilisé cette méthode pour mesurer des fractures d'ouverture aussi petite que 0.05mm.

Ouverture hydraulique

L'ouverture hydraulique (b_h) d'une fracture est la plus couramment utilisée lorsqu'on s'intéresse aux écoulements de l'eau. Elle s'obtient par l'essai de perméabilité (à charge constante) réalisé en laboratoire ou in situ. En laboratoire, cet essai s'effectue typiquement dans une cellule triaxiale. La figure 3.8 présente une vue en coupe des

composantes de cet instrument qui permet de mesurer l'ouverture hydraulique d'une fracture à différents niveaux de contraintes.

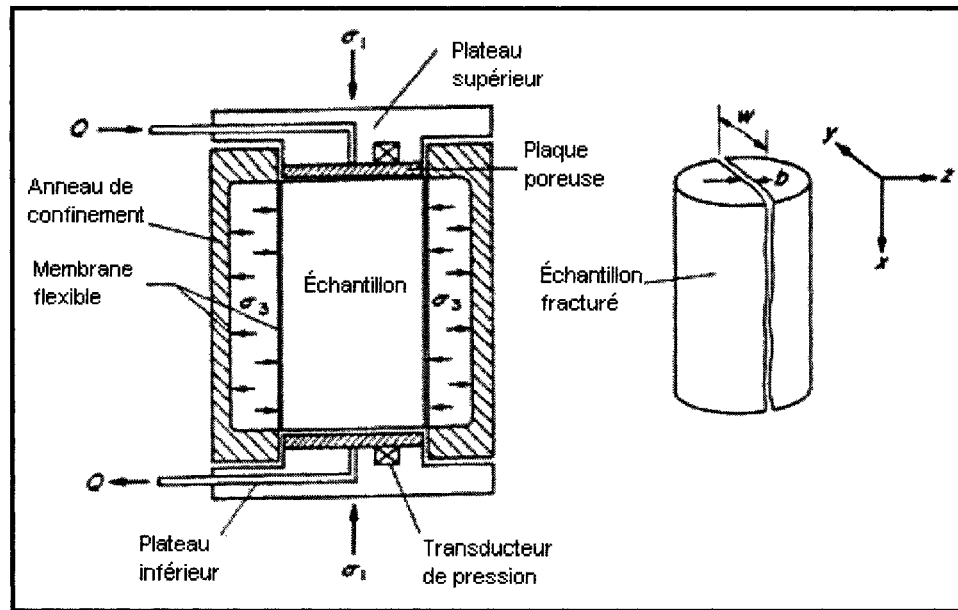


Figure 3.8 : Vue en coupe des composantes d'une cellule triaxiale
(adaptée de Elsworth et Mase, 1993).

La définition des différents symboles utilisés à la figure 3.8 est donnée ci-dessous :

Q = Débit, m^3/s

σ_1 = Contrainte principale majeure, MPa

σ_3 = Contrainte principale mineure, MPa

w = Largeur de la fracture (dimension perpendiculaire à l'écoulement), m

b = Ouverture de la fracture, m

In situ, l'essai de perméabilité à charge constante est typiquement réalisé par un essai d'injection à l'aide d'obturateurs, tel qu'illustré à la figure 3.9.

connus et contrôlés sauf l'espacement entre les plaques parallèle (ouverture de la fracture). La formule suivante permet d'obtenir l'ouverture hydraulique pour un écoulement axial (Priest, 1993) :

$$b_h = \left(\frac{12\mu QL}{\rho g w \Delta h} \right)^{1/3} \quad (3.1)$$

où

μ = Viscosité dynamique (kg/ms)

L = Longueur de la fracture, (dimension parallèle à l'écoulement), m

ρ = Masse volumique de l'eau, kg/m³

g = Accélération gravitationnelle, m²/s

Δh = Différence de charge hydraulique entre l'entrée et la sortie de la fracture, m

La formule suivante permet d'obtenir l'ouverture hydraulique d'une fracture pour un écoulement radial (Priest, 1993):

$$b_h = \left(\frac{6\mu Q}{\pi \rho g \Delta h} \ln \left(\frac{r_b}{r_w} \right) \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

où

r_b = Distance entre le centre du puits d'injection et celui du puits d'observation, m

r_w = Rayon du puits d'injection, m

L'ouverture hydraulique est toujours inférieure à l'ouverture mécanique car elle tient compte de la rugosité et de la tortuosité. Elle pourrait être décrite comme l'ouverture efficace d'une fracture alors que l'ouverture mécanique correspondrait à l'ouverture

nominale. Une relation entre les deux est donnée par la formule empirique suivante (Olsson et Barton 2000) :

$$b_h = \frac{B^2}{JRC^{2.5}} \quad (3.3)$$

Essais au traceur

L'ouverture d'une fracture peut également être déterminée indirectement par un essai au traceur. Tsang (1992) définit l'ouverture par bilan de masse (b_b) par la relation suivante :

$$b_b = \frac{Q_{t_{50}}}{A_f} \quad (3.4)$$

où

t_{50} = Temps où la concentration du traceur mesurée à la sortie de la fracture est la moitié de la concentration initiale injectée à l'entrée de celle-ci au début de l'essai
 A_f = Aire de la fracture d'où provient le débit, m²

Cette façon de calculer l'ouverture correspond à la moyenne arithmétique, dans le plan de fracture, de la taille de toutes les ouvertures par lesquelles le traceur est passé.

3.4 Le système de fractures

3.4.1 Définitions

L'ensemble des fractures d'un massif rocheux est appelé porosité secondaire (Indraratna et Ranjith, 2001). Les massifs comportent généralement un système de fractures qui est défini comme un regroupement d'au moins deux familles de fractures (Berkowitz, 1994). Une famille de fractures est un groupe de fractures qui partagent plus ou moins la même dimension, orientation et inclinaison; les fractures dont l'orientation est drastiquement différente de celles des fractures environnantes sont appelées fractures discordantes (Twiss et Morres. 1992). Les fractures et les familles de fractures d'un massif peuvent posséder des propriétés hydriques différentes en fonction des processus de formation et du niveau d'altération de chacune.

Les fractures d'un massif rocheux sont plus ou moins longues et plus ou moins espacées les unes des autres. Un système de fractures est dit persistant si ses fractures sont bien connectées les unes aux autres. Les systèmes persistants possèdent typiquement des fractures longues et une densité de fracturation élevée (Berkowitz, 1994). Il existe des systèmes de fractures aux configurations très variées. Ceci est la conséquence que de nombreux processus de fracturation sont en cause dans des roches aux propriétés très variées. La figure 3.10 donne une idée de la diversité des configurations des systèmes de fractures. Elle présente les configurations sphériques, polygonales, orthogonales, obliques et chaotiques dans des roches d'origines géologiques diverses.

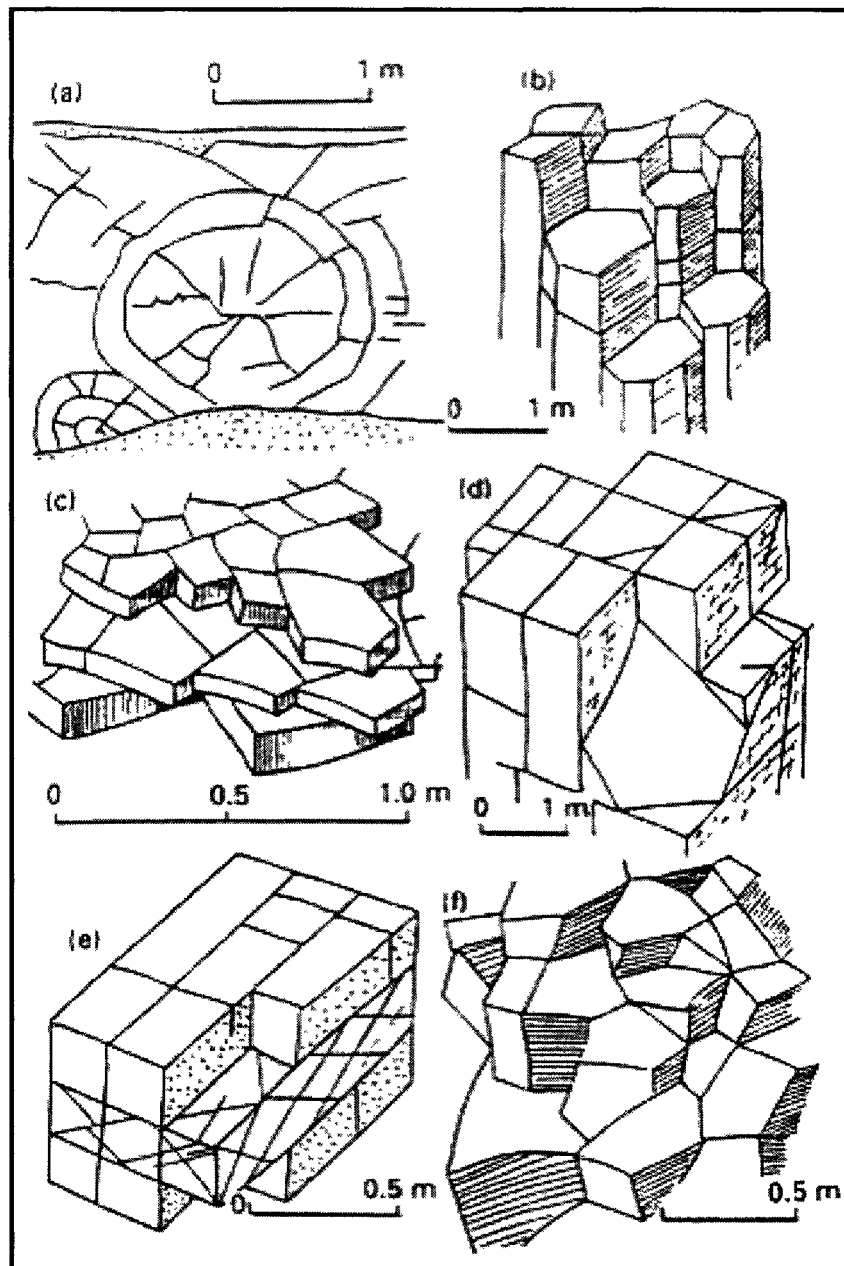


Figure 3.10 : Systèmes de fractures aux configurations diverses
 (a) sphérique dans l'andésite, (b) polygonal dans le basalte, (c) polygonal dans le calcaire, (d) orthogonal et oblique dans le granite, (e) orthogonal dans le grès, (f) chaotique dans la dolérite
 (adaptée de Berkowitz, 1994).

3.4.2 Connectivité

Sous l'effet d'un gradient hydraulique, toutes les fractures d'un système de fractures ne transmettent pas l'eau. Seules les fractures connectées entre elles et reliant les frontières du domaine d'intérêt ont la possibilité d'être conductrices mais cela n'est pas une condition suffisante. En effet, les fractures formant les branches cul-de sac du réseau ne sont pas conductrices. Berkowitz (1994) appelle épine dorsale l'ensemble des fractures conductrices d'un système de fractures. Chilès et Marsily (1993) mentionnent qu'en général moins de 20% des fractures d'un système sont conductrices. Il est donc fréquent que le pourcentage des fractures conductrices d'un massif soit faible. Par exemple, Berkowitz (1994) rapporte les résultats de chercheurs qui ont déterminé que seulement 0.1% des fractures d'un système sur un site en France étaient conductrices à grande échelle.

Le degré de connectivité des fractures d'un système est un bon indicateur de la conductivité hydraulique de l'ensemble. C'est la longueur des fractures et la densité de fracturation qui déterminent le degré de connectivité d'un système. Un système densément fracturé peut être faiblement interconnecté si les fractures ne sont pas assez longues. À l'inverse, les fractures peuvent être très longues mais tellement espacées qu'elles se croisent peu entre elles. Les figures 3.12 a) et b) illustrent le concept de connectivité en deux dimensions. Ces figures présentent deux systèmes de fractures possédant la même orientation et la même densité de fracturation. Le système présenté à la figure 3.12 a) est peu connecté et il ne permettrait pas l'écoulement entre les frontières droite et gauche. Les fractures du système de la figure 3.12 b) sont plus longues et assez connectées pour former un réseau qui permettrait l'écoulement entre les frontières droite et gauche.

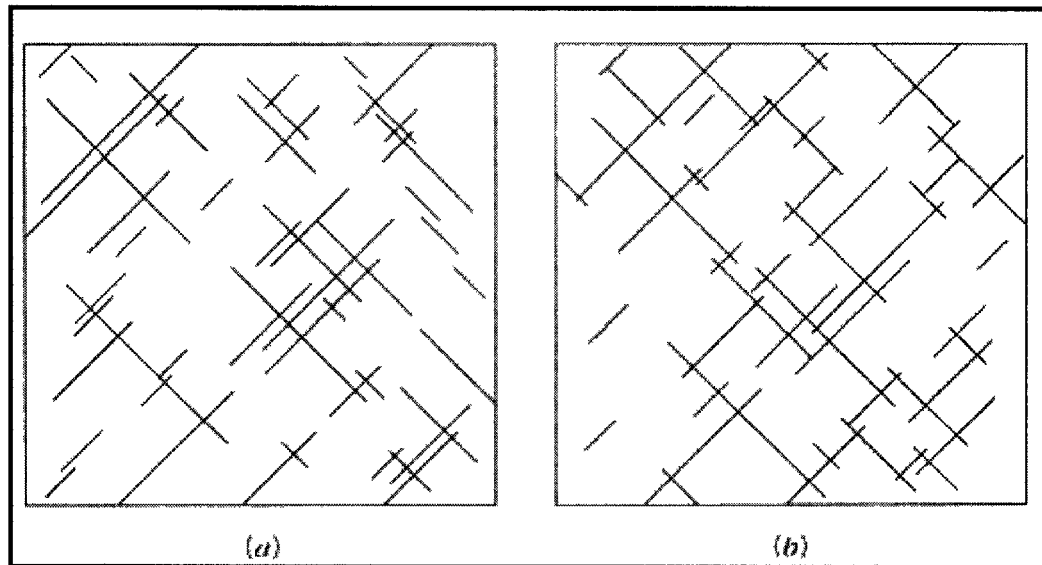


Figure 3.11 : Schémas illustrant le concept de connectivité.

(a) système de fractures peu connectées (b) système de fractures bien connectées
(tirée de Domenico et Schwartz, 1998).

Une façon d'évaluer le degré de connectivité d'un ensemble de fractures est d'en déterminer le coefficient de percolation et de comparer cette valeur au coefficient de percolation à la limite de percolation. Le coefficient de percolation (C) peut être défini par la relation suivante en trois dimensions (Chilès et Marsily, 1993) :

$$C = \frac{d}{2} \times A_m \times P_m \quad (3.7)$$

où

d : Densité de fracturation (nombre de fractures par unité de volume)

A_m : Aire moyenne des fractures

P_m : Périmètre moyen des fractures

La limite de percolation est définie comme la densité de fracturation au dessus de laquelle la connectivité des fractures est suffisante pour permettre l'écoulement à travers le domaine considéré (Berkowitz, 1994).

Des études analytiques et numériques au sujet de la connectivité d'ensembles de fractures d'orientation et de longueur complètement aléatoire ont démontré que le coefficient de percolation à la limite de percolation est situé entre 1.5 et 3 (ensembles de fractures en trois dimensions). Ces valeurs peuvent être comparées au coefficient de percolation du système de fractures dont le degré de connectivité est sous évaluation. Cependant, cette façon de procéder ne constitue qu'une approximation puisque, dans la réalité, les fractures sont souvent disposées de façon préférentielles (non aléatoire) et il en va de même pour les longueurs (Chilès et Marsily, 1993).

Un autre aspect important à considérer est que, dans certains cas, l'écoulement dans une fracture se produit seulement dans quelques canaux très conducteurs comparativement au reste du plan de fracture. C'est ce que Rasmuson et Neretnieks (1986) ont constaté lors d'essais au traceur réalisés dans une fracture à la mine Stripa en Suède. Ils ont mesuré que 90% l'écoulement se produisait dans seulement 5% à 20% de la surface du plan de fracture. Les canaux d'une même fracture peuvent se croiser ou pas dans le plan de fracture. De plus, il est possible que les canaux des fractures différentes se rencontrent ou non aux intersections entre les fractures. Il est généralement reconnu que l'écoulement par canaux est la norme dans les fractures rugueuses situées dans les roches profondes où les niveaux de contraintes sont souvent élevés (Rasmuson et Neretnieks, 1986; Tsang et Tsang, 1987; Berkowitz, 1994). Dans un tel cas, c'est le degré de connectivité des canaux entre eux et non la connectivité des fractures qui produit la connectivité du système de fractures. La figure 3.13 présente sous la forme d'un schéma le modèle conceptuel de l'écoulement par canaux dans une fracture.

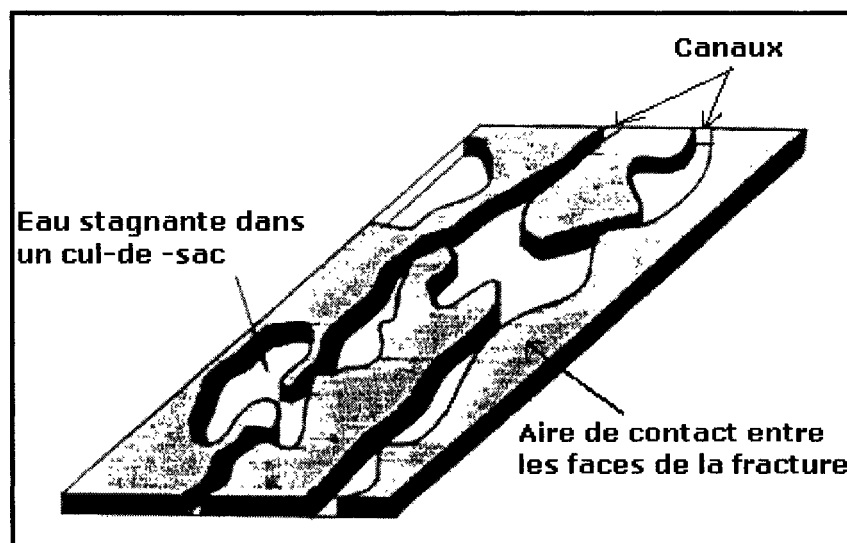


Figure 3.12 : Schéma d'un modèle conceptuel de l'écoulement par canaux
(adaptée de Berkowitz, 1994).

Le chapitre 3 a présenté les différentes composantes d'un massif rocheux fracturé, soit la roche intacte, les fractures individuelles et le réseau de fracture sous l'angle de leurs caractéristiques ayant un impact sur l'écoulement. Ce chapitre a permis de se faire une idée de la complexité de ces différentes structures et il permettra de mettre en perspective certaines des hypothèses simplificatrices présentées au chapitre suivant en ce qui concerne la géométrie des fractures. Le chapitre 4 présente certaines des lois d'écoulement disponibles pour la roche intacte et pour les fractures. Les différentes approches conceptuelles qu'il est possible d'utiliser lors d'une étude de l'écoulement en massifs fracturés sont également discutées.

CHAPITRE IV – ÉCOULEMENT DE L'EAU EN MASSIFS ROCHEUX

Ce chapitre traite en premier lieu des équations disponibles pour décrire le mouvement de l'eau dans les différentes composantes d'un massif de roc fracturé, pour les conditions saturées et non saturées, en régimes permanent et transitoire. Ensuite, une discussion sur les différentes approches conceptuelles employées pour modéliser l'écoulement de l'eau dans les massifs rocheux fracturés est présentée.

4.1 Lois d'écoulement pour la roche intacte

4.1.1 Régime permanent et conditions saturées

Bien que la roche intacte comporte localement des hétérogénéités, à une échelle suffisamment grande, elle peut généralement être considérée comme un milieu poreux homogène. Dans ce cas, les équations développées pour décrire l'écoulement de l'eau dans les sols (milieux poreux) sont utilisées. La loi de Darcy est l'équation de base en hydrogéologie. En conditions saturées, elle décrit l'écoulement laminaire et permanent d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux. Elle constitue une solution particulière des équations de Navier-Stokes qui décrivent le mouvement des fluides visqueux dans lesquels les forces de frottement internes dues à la viscosité ne peuvent être négligées. Les composantes du vecteur vitesse de Darcy pour un écoulement en milieu anisotrope peuvent s'énoncer sous la forme suivante dans le repère cartésien x , y et z , avec les axes parallèles aux directions principales de la conductivité hydraulique (Domenico et Schwartz, 1998) :

$$V_x = - K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$V_y = - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.2)$$

$$V_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.3)$$

où

V_x , V_y et V_z : Composantes du vecteur vitesse de Darcy (m/s)

K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} : Conductivités hydrauliques principales (m/s)

$\frac{\partial h}{\partial x}$, $\frac{\partial h}{\partial y}$ et $\frac{\partial h}{\partial z}$: Composantes du vecteur gradient hydraulique selon les trois axes (m/m)

avec

$$h = z + \Psi \quad (4.4)$$

où

h : Charge hydraulique totale (m)

z : Élévation (m)

Ψ : Charge de pression (m)

La charge hydraulique totale représente l'énergie mécanique disponible en un point. Dans l'équation 4.2, la charge cinématique (de vitesse) n'apparaît pas du côté droit car elle est négligeable pour les écoulements en milieux poreux.

La conductivité hydraulique (K) est une propriété à la fois du milieu poreux et du fluide qui y circule. C'est un coefficient de proportionnalité qui représente la facilité avec laquelle un certain milieu poreux permet l'écoulement d'un certain fluide. Elle est égale au produit de la perméabilité intrinsèque (k) du milieu poreux par les propriétés du fluide. La conductivité hydraulique (K) est donnée par la relation suivante :

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (4.5)$$

où

k : Perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2)

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3)

g : Accélération gravitationnelle (m/s^2)

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/ms)

La vitesse de Darcy (équations 4.1 à 4.3) représente un flux unitaire (ou débit spécifique), c'est-à-dire le volume de fluide s'écoulant par aire unitaire du milieu poreux par unité de temps. La vitesse moyenne de l'eau dans les pores est beaucoup plus élevée que la vitesse de Darcy et s'obtient en divisant la vitesse de Darcy par la porosité effective. La loi de Darcy peut également être exprimée en fonction du débit. En une dimension, elle s'énonce comme suit (en fonction du débit):

$$Q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} A_x \quad (4.6)$$

où

A_x : Aire de la section perpendiculaire à l'axe des x (m^2)

K_x : Conductivité hydraulique dans la direction de l'axe des x (m/s)

Q_x : Débit moyen à travers la section A_x (m^3/s)

4.1.2 Régime transitoire et conditions saturées

L'équation de l'écoulement en régime transitoire dans un milieu poreux est une équation empirique qui est utilisée depuis longtemps en hydrogéologie. Elle s'obtient en écrivant l'équation de conservation de la masse d'eau en fonction du temps et de la vitesse de Darcy (valable pour le régime permanent), pour un volume unitaire du milieu poreux.

Cette équation peut être écrite de la façon suivante pour un milieu isotrope (Domenico et Schwartz, 1998; Chapuis, 1999) :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{K} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.7)$$

où

θ : Teneur en eau volumique (m^3/m^3)

t : Temps (s)

S : Coefficient d'emménagement du milieu poreux (m^3/m^3)

T : Transmissivité du milieu poreux (m^2/s)

$\frac{\partial h}{\partial t}$: Dérivée de la charge hydraulique totale en fonction du temps (m/s)

Il est à noter que dans les roches dures (roches cristallines), le coefficient d'emménagement est typiquement très faible. La faible porosité et la rigidité très élevée de ces roches fait en sorte que le volume d'eau y varie très peu (en conditions saturées) même sous de fortes variations de la charge hydraulique.

4.1.3 Régime transitoire et conditions non saturées

L'équation la plus souvent utilisée pour décrire l'écoulement (permanent ou transitoire) dans les milieux poreux en conditions non saturées est celle proposée par Richards (1931). Cette équation est identique à l'équation 4.5, sauf que les conductivités hydrauliques et la teneur en eau varient en fonction de la pression. La forme usuelle de l'équation de Richards s'écrit comme suit (Hillel, 1998):

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx}(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy}(\Psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz}(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) = \frac{\partial \theta(\Psi)}{\partial t} \quad (4.8)$$

L'utilisation de l'équation 4.8 nécessite que les fonctions hydriques $K(\Psi)$ et $\theta(\Psi)$ soient connues. Ces fonctions peuvent être obtenues à partir d'essais en laboratoire ou sur le terrain. Il est également possible de déterminer $\theta(\Psi)$ et ensuite d'en déduire $K(\Psi)$ par différents modèles mathématiques. Aubertin et al. (1996) fait mention du modèle de Mualem (1976), une méthode prédictive de $K(\Psi)$ dont la solution a été donnée par van Genuchten et al. (1991). Dans ces fonctions hydriques, l'air est considéré comme étant stationnaire et à pression atmosphérique constante.

Les équations de Darcy et de Richards sont valides pour les écoulements laminaires. Dans les milieux poreux, un écoulement est considéré laminaire jusqu'à un nombre de Reynolds (Re) de 10 (Todd, 1980). Le nombre de Reynolds peut être évalué par la relation suivante (Todd, 1980) :

$$Re = \frac{\rho v_r D}{\mu} \quad (4.9)$$

où

v_r : Vitesse moyenne réelle du fluide dans les pores = vitesse de Darcy divisée par la porosité effective (m/s)

D : Diamètre caractéristique des pores (m)

Dans les roches, il est peu probable que l'écoulement naturel deviennent turbulent car les vitesses sont généralement très faibles puisque les pores sont de très petites dimensions. On peut donc postuler que l'équation de Darcy et celle de Richards peuvent y être appliquées.

4.2 Lois d'écoulement dans les fractures

4.2.1 Régime permanent et conditions saturées

Loi cubique

Comme dans le cas des milieux poreux, le débit dans une fracture est gouverné par la géométrie du lieu où l'eau circule, le gradient hydraulique et les propriétés du fluide. L'équation de base décrivant l'écoulement dans une fracture est la loi cubique. Il s'agit de la solution analytique des équations de Navier-Stokes pour l'écoulement laminaire permanent d'un fluide incompressible entre deux plaques parallèles et lisses (Lapcevic et al., 1999). La figure 4.1 illustre le modèle conceptuel des plaques parallèles.

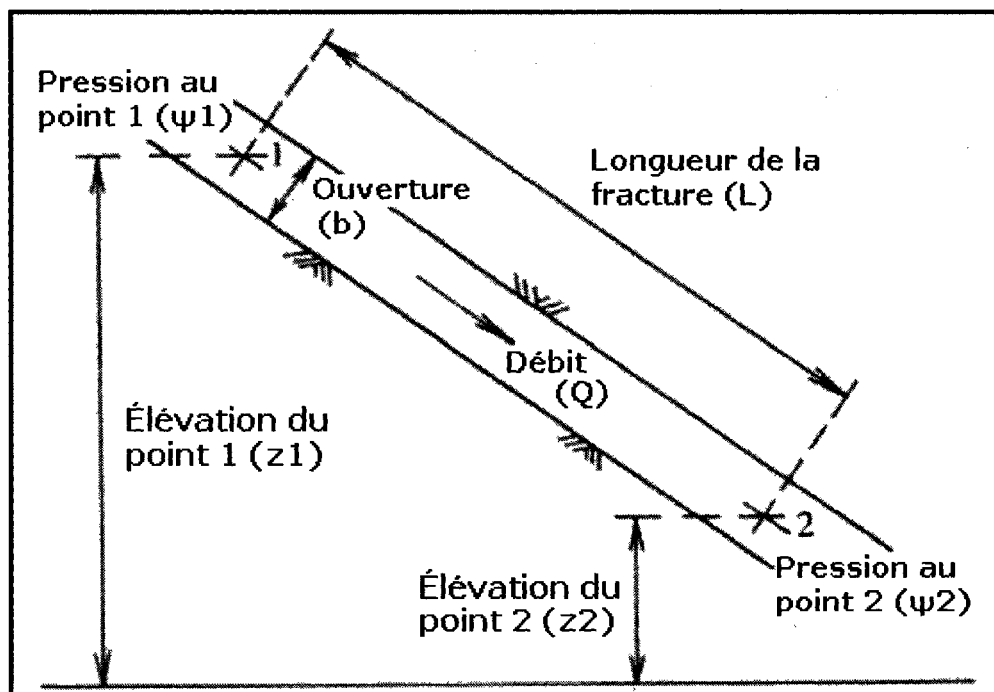


Figure 4.1 : Modèle conceptuel des plaques parallèles
(Adaptée de Priest, 1993)

La formulation de la loi cubique pour une fracture ainsi idéalisée est la suivante (Priest, 1993; Bear, 1993; Lapcevic et al., 1999; Olsson et Barton, 2000; Indraratna et Ranjith, 2001) :

$$Q_f = V_f A_{\text{sec}} = - \left(\frac{\rho g b^3 w \Delta h}{12 \mu L} \right) \quad (4.10)$$

avec

$$A_{\text{sec}} = b \times w \quad (4.11)$$

où

Q_f : Débit dans la fracture (m³/s)

V_f : Vitesse moyenne de l'eau dans la fracture (m/s)

A_{sec} : Aire d'une section de la fracture perpendiculaire à l'écoulement (m²)

b : Espacement entre les parois de la fracture (m)

w : Dimension de la fracture dans la direction perpendiculaire à l'écoulement (m)

L : Dimension de la fracture dans la direction parallèle à l'écoulement (m)

Δh : Différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval de la fracture (m)

L'appellation loi cubique provient du fait que le débit à entre les plaques parallèles est proportionnel au cube de l'espacement entre elles. L'équation de la conductivité hydraulique d'une fracture (K_f) s'extrait facilement de la loi cubique et a la forme suivante :

$$K_f = \frac{Q_f L}{\Delta h A} = \frac{\rho g b^2}{12 \mu} \quad (4.12)$$

Le nombre de Reynold dans une fracture peut être calculé comme suit (Witherspoon et al. 1980):

$$Re = \frac{2V_f \rho b}{\mu} \quad (4.13)$$

La valeur limite du nombre de Reynolds entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent entre deux plaques parallèles et lisses serait de 2300 ou 2400 selon les auteurs (Indraratna et Ranjith, 2001). Toutefois, lorsque les parois sont rugueuses comme dans le cas des fractures naturelles, l'écoulement peut devenir turbulent à des valeurs bien inférieures du nombre de Reynolds. Louis (1969, 1976, cité dans Indraratna et Ranjith, 2001) a réalisé des études pratiques et théoriques approfondies sur l'écoulement entre des plaques parallèles rugueuses et a trouvé que celui-ci pouvait devenir turbulent à des valeurs du nombre de Reynolds aussi faibles que 100.

Les travaux de Romm (1966), cités par Gale (1990) et par Witherspoon et al. (1980), ont démontré que la loi cubique est valide en pratique pour un écoulement laminaire entre des plaques parallèles lisses espacées d'aussi peu que 0.2 microns.

Lois cubiques modifiées

Bien qu'il y ait un écart entre le modèle conceptuel des plaques parallèles lisses et les fractures réelles qui sont rugueuses et d'ouvertures variables, il est tout de même possible d'utiliser la loi cubique, à quelques modifications près, pour décrire l'écoulement dans les fractures. Plusieurs chercheurs ont proposé des modifications à la loi cubique afin de tenir compte de l'écart entre le modèle conceptuel et la réalité (Neuzil et Tracy, 1981; Berkowitz, 1994; Lomize, 1951, et Louis, 1969, 1976, cités dans Witherspoon et al., 1980, Gale, 1990, Elsworth et Mase, 1993 et Indraratna et Ranjith, 2001; Barton et al., 1985, cités dans Elsworth et Mase, 1993). Certains de leur résultats sont discutés dans les paragraphes suivants.

La variabilité de l'ouverture peut être prise en compte dans la formulation de la loi cubique en utilisant une valeur pondérée de l'ouverture. C'est ce que Neuzil et Tracy (1981) et Berkowitz (1994) ont proposé. Cette loi cubique modifiée prend la formulation suivante :

$$Q = \frac{\rho g w \Delta h}{12\mu L} \int_0^\infty b^3 f(b) db \quad (4.14)$$

où

$f(b)$: fonction de probabilité de la taille de l'ouverture

L'équation 4.14 sous entend que la variation de l'ouverture n'a lieu que dans la direction perpendiculaire au gradient hydraulique et elle ne tient donc pas compte de la tortuosité de l'écoulement engendrée par les variations de l'ouverture dans le sens parallèle au gradient (Neuzil et Tracy, 1981; Tsang, 1984).

La rugosité des faces d'une fracture peut également être prise en compte dans l'expression de la loi cubique. Lomize (1951) et Louis (1968 et 1976) ont travaillé à quantifier l'effet de la rugosité sur l'écoulement laminaire entre des plaques parallèles. Les résultats de leurs travaux n'ont pas été consultés de façon spécifique par l'auteure mais ils sont cités abondamment dans la littérature comme Whitespoon et al. (1980), Gale (1990), Elsworth et Mase (1993) et Indraratna et Ranjith (2001). Lomize (1951) et Louis (1969 et 1976) sont arrivés sensiblement au même facteur de correction (f) de la loi cubique permettant de quantifier l'effet de la rugosité (Gale, 1990). Louis (1969 et 1976) a utilisé plusieurs surfaces en béton dont la rugosité variait en fonction du rapport sable/ciment. Chaque essai d'écoulement était réalisé en plaçant deux de ces surfaces l'une en face de l'autre. Les débits entre les surfaces parallèles rugueuses étaient mesurés et l'espacement entre les surfaces ainsi que les gradients hydrauliques contrôlés.

L'équation de la loi cubique modifiée par Louis (1969 et 1976), cité dans Indraratna et Ranjith, (2001), prend la forme suivante:

$$Q_f = - \left(\frac{\rho g b^3 w \Delta h}{12 \mu L} \right) \frac{1}{f} \quad (4.15)$$

avec

$$f = 1 + 8.8 R_r^{1.5} \quad (4.16)$$

et

$$R_r = \frac{a}{2b} \quad (4.17)$$

où

R_r : Rugosité relative de la surface d'une fracture (m/m)

a : Hauteur moyenne des aspérités (m)

b : Espacement entre les plaques parallèles ou entre les faces de la fracture (m)

L'équation 4.15 est valide pour un écoulement laminaire entre des surfaces rugueuses et parallèles. Louis (1969, 1976) a aussi proposé une équation décrivant l'écoulement turbulent entre des surfaces rugueuses et parallèles. Tout comme l'équation 4.15, il s'agit d'une équation phénoménologique (mi théorique, mi empirique) qui peut être formulée comme suit :

$$Q = 4 \sqrt{g} \left(\log \frac{3.8b}{a} \right) b^{1.5} \sqrt{\frac{\Delta h}{L}} \quad (4.18)$$

Louis (1969, 1976) a déterminé que le domaine de validité de la loi cubique classique se situe à une rugosité relative inférieure à 0.033 et à un nombre de Reynold inférieur à

2300. Les équations 4.15 et 4.18 sont valides pour une rugosité relative supérieure à 0.033. Pour déterminer si l'écoulement dans une fracture rugueuse est laminaire ou turbulent et pour savoir si l'équation 4.15 ou 4.18 doit être utilisée, on peut référer à la figure 4.2. Cette figure est basée sur les résultats expérimentaux de Louis (1969, 1976) et elle distingue cinq types d'écoulement entre des plaques parallèles en fonction de la rugosité relative et du nombre de Reynold. L'écoulement de type I correspond à la loi cubique classique (équation 4.10), l'écoulement de type IV à l'équation 4.15 et l'écoulement de type V à l'équation 4.18. Les équations pour les écoulements de type II et III sont disponibles dans la littérature (Indraratna et Ranjith, 2001) mais, comme elles ne sont pas utiles dans le cas des fractures rugueuses, elles ne sont pas présentées ici.

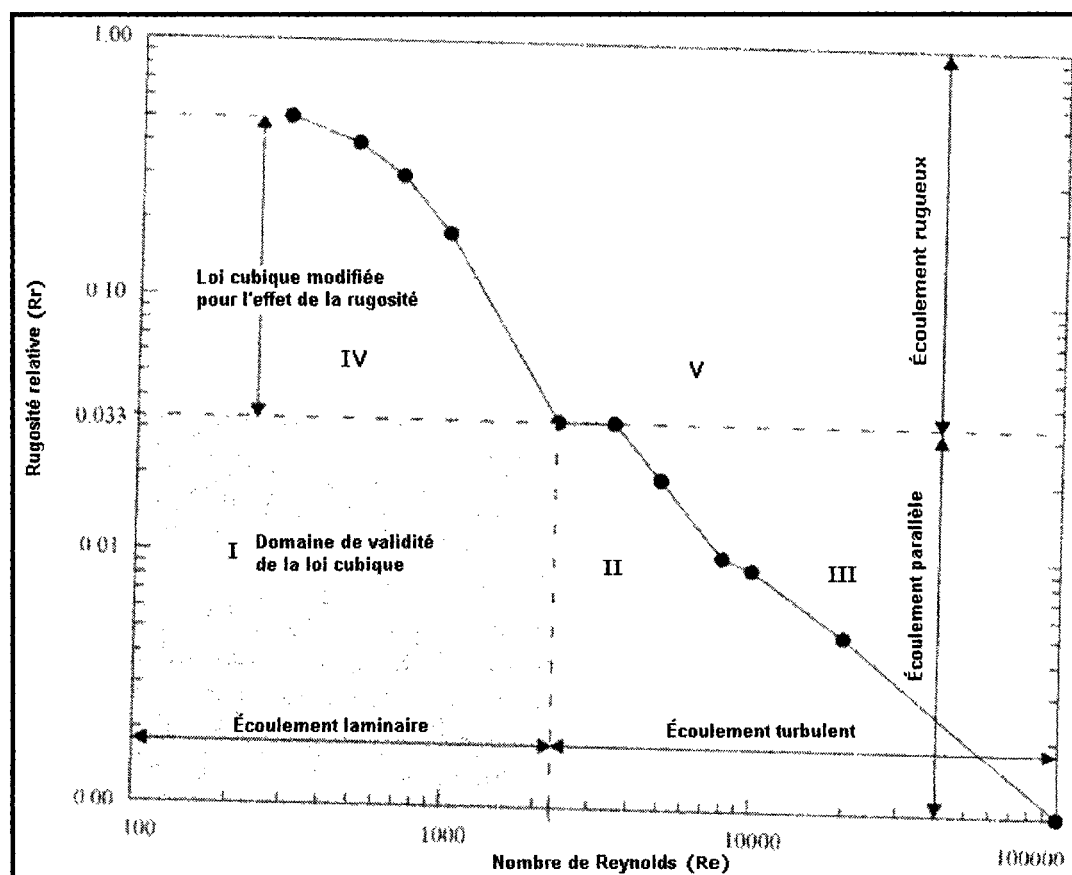


Figure 4.2 : Les 5 types d'écoulement entre des surfaces parallèles rugueuses (selon Louis, 1976 et adaptée de Indraratna et Ranjith, 2001).

Witherspoon et al. (1980) ont également travaillé à quantifier l'effet de la rugosité sur l'écoulement dans une fracture. Ils ont proposé d'utiliser l'équation 4.15 avec le facteur de correction (f) compris entre 1.04 et 1.65 selon leurs résultats expérimentaux. Leurs travaux ont porté sur des essais d'écoulement dans des fractures artificiellement induites dans des échantillons de granite, de marbre et de basalte. La contrainte normale au plan de fracture variaient entre 0 et 20 MPa d'un essai à l'autre.

Barton et al. (1985) ont eux aussi proposé un facteur de correction pour la loi cubique afin de tenir compte de l'effet de la rugosité sur l'écoulement. Ce facteur s'exprime en terme du coefficient de rugosité des faces d'une fracture (JRC) ainsi que de l'ouverture mécanique (B) et de l'ouverture hydraulique d'une fracture (b_h). La loi cubique modifiée de Barton et al. (1985) a la même forme que l'équation 4.15 sauf que le facteur de correction f est donné par la relation suivante (Barton et al., 1985) :

$$f = \frac{B^6}{b_h^4 JRC^5} \quad (4.19)$$

Les lois cubiques modifiées, basées sur le modèle conceptuel des plaques parallèles, sont valides pour décrire l'écoulement dans une fracture rugueuse à condition que la proportion de l'aire des parois qui est en contact ne soit pas trop élevée. Cela se produit lorsque les contraintes normales au plan de fracture ne sont pas trop grandes. Le débit dans une fracture serait alors proportionnel au cube de l'ouverture (Witherspoon et al., 1980 ; Gale, 1982). Par exemple, Witherspoon et al. (1980) ont réalisé des essais d'écoulement à charge constante dans des fractures artificiellement induites en vue de vérifier la validité de la loi cubique. Ils ont utilisé des échantillons de granite, de basalte et de marbre avec une fracture par échantillon. Dans cette étude, les contraintes normales au plan de fracture variaient entre 0 MPa et 20 MPa, avec un niveau de contrainte normale constant maintenu pour chaque essai d'écoulement. Des LVDT

(« linear variable differential transducer ») collés sur les côtés de la fracture permettaient de mesurer les variations d'ouverture entre chaque incrément ou décrément de charge. L'ouverture des fractures à charge maximale (à 20MPa) a été obtenue à l'aide de la loi cubique. L'ouverture aux niveaux de charge inférieurs est calculée comme l'ouverture hydraulique à 20 MPa plus la variation de l'ouverture, enregistrée par les LVDT, entre la position de la face supérieure de la fracture à 20 MPa et sa position au niveau de contrainte donné. Certains résultats de Witherspoon et al. (1980) sont présentés à la figure 4.3.

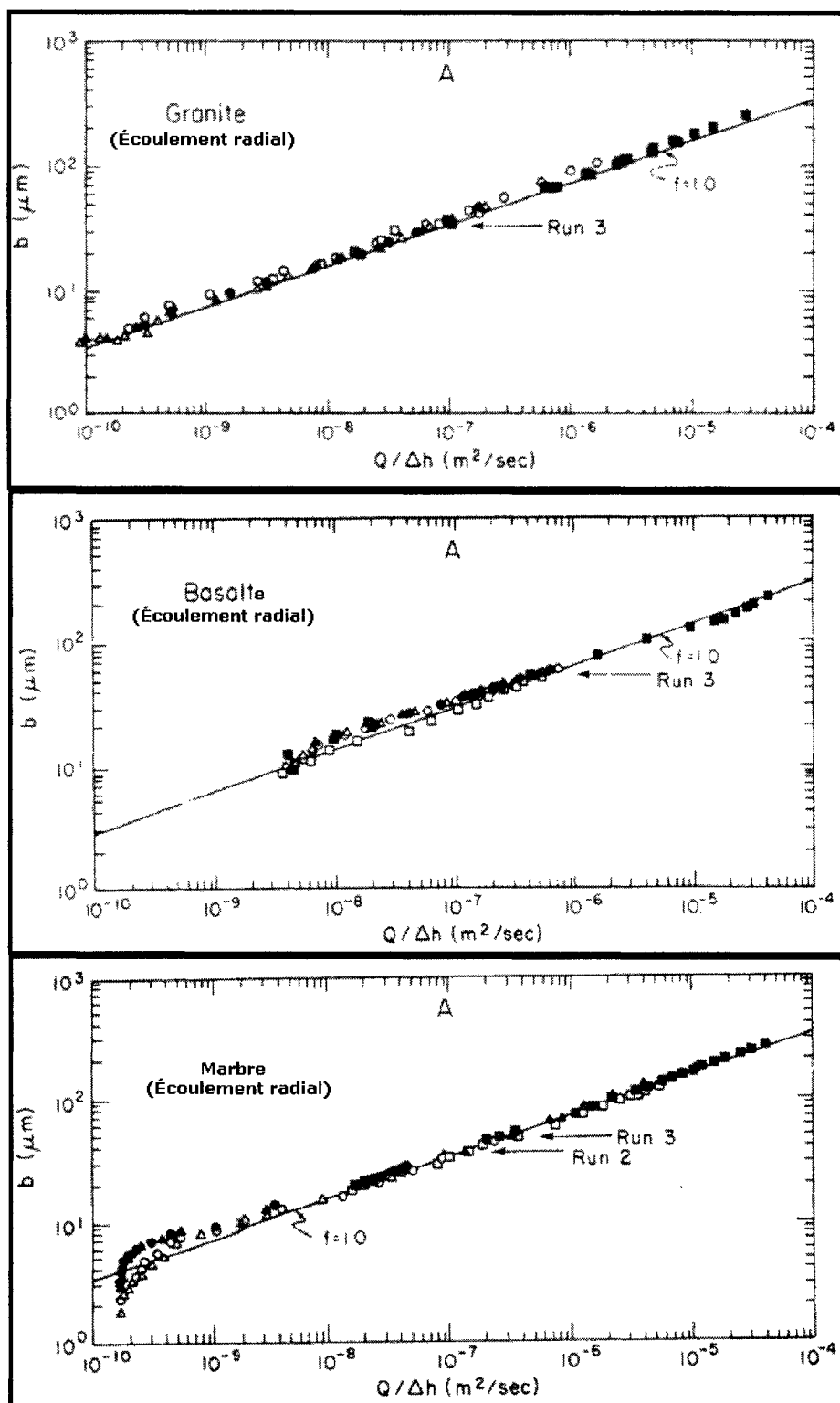


Figure 4.3 : Graphiques ouverture en fonction du débit par unité de charge hydraulique
a) granite, b) basalte, c) marbre (adaptée de Whitherspon et al., 1980).

Les mesures de l'ouverture en fonction du débit par unité de charge hydraulique (échelles logarithmiques) pour les échantillons de granite et de basalte sont alignés sur une droite de pente égale à 3 tel que prévu par la loi cubique. Dans le cas de l'échantillon de marbre, une déviation des résultats par rapport à ceux prévus par la loi cubique est apparue dans la région de faibles débits mesurés aux niveaux de contraintes élevés. À cet endroit, la pente du graphique augmente rapidement et tend vers l'infini ce qui indique qu'à partir d'un certain seuil de contraintes, les débits sont demeurés à peu près constants dans cette fracture même sous l'augmentation de la contrainte normale jusqu'à 20 MPa. Si les débits sont demeurés à peu près constants, c'est que l'ouverture est également demeurée à peu près constante. Cela peut s'expliquer par le fait que le marbre est une roche beaucoup moins rigide que le granite et le basalte. Il est donc probable que cette fracture se soit refermée plus facilement sous l'effet des contraintes et que l'ouverture résiduelle ait été atteinte. L'ouverture résiduelle d'une fracture est définie comme l'ouverture minimale pouvant laisser passer l'eau (Indraratna et Ranjith, 2001). À l'ouverture résiduelle, la surface de contact entre les parois d'une fracture est si élevée que toute augmentation des contraintes normales au plan de fracture sert, non plus à refermer la fracture, mais à déformer la roche intacte de façon élastique.

Gale (1982) a réalisé une étude très similaire à celle de Witherspoon et al., (1980) sur l'écoulement dans les fractures. Des échantillons de granite avec des fractures naturelles et artificielles (une fracture par échantillon) ont été utilisés. Gale (1982) a toutefois travaillé avec des contraintes normales allant jusqu'à 30 MPa, ce qui est plus élevé que dans l'expérience de Witherspoon et al., 1980. L'ouverture des fractures à charge maximale (à 30MPa) a été obtenue à l'aide de la loi cubique. L'ouverture aux niveaux de charge inférieurs est calculée comme l'ouverture hydraulique à 30 MPa plus la variation de l'ouverture, enregistrée par les LVDT, entre la position de la face supérieure de la fracture à 30 MPa et sa position au niveau de contrainte donné. Gale (1982) a observé que, sous l'augmentation des contraintes normales, la conductivité hydraulique

des fractures naturelles diminue moins rapidement que celle des fractures artificielles car elles sont plus rigides. Il a également observé, pour les niveaux de contraintes élevés, le même phénomène de déviation des résultats par rapport à ceux prévus par la loi cubique, soit un débit qui varie peu même si les contraintes normales augmentent. Ce résultat est intéressant car cette déviation par rapport à la loi cubique n'avait pas été observée dans le cas du granite sous une contrainte normale de 20MPa (Witherspoon et al., 1980). Les travaux de Pyrak-Nolte (1986), cités dans Witherspoon (1986), ont porté sur l'étude de l'écoulement dans une fracture naturelle de granite soumise à des contraintes normales allant jusqu'à 85MPa. Ces chercheurs ont également observé une déviation significative de leurs résultats par rapport à ceux prévus par la loi cubique dans la région des contraintes élevées.

Dans les massifs rocheux fracturés situés à faible profondeur, il est probable que les contraintes soient assez faibles, dans la plupart des cas, pour que la loi cubique soit valide. Pour l'étude de l'écoulement dans les massifs fracturés situés à grande profondeur, la loi cubique n'est probablement plus valide à moins que les fractures ne soient ouvertes par un relâchement des contraintes causé par la présence d'ouvertures souterraines par exemple. Chaque cas doit évidemment être étudié séparément afin d'évaluer si la loi cubique s'applique ou non, selon le niveau de contraintes présent. Plus les contraintes sont élevées, perpendiculairement aux plans des fractures, moins la loi cubique est susceptible d'être valide.

4.2.2 Régime transitoire et conditions non saturées

La loi cubique peut être utilisée de la même façon que la loi de Darcy ou la loi de Richards pour écrire l'équation de continuité des débits et ainsi obtenir l'équation de l'écoulement transitoire dans une fracture (Therrien et Sudicky, 1996) :

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{\rho g b^3}{12\mu}\right)k_{rx}(\Psi)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{\rho g b^3}{12\mu}\right)k_{ry}(\Psi)\frac{\partial h}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{\rho g b^3}{12\mu}\right)k_{rz}(\Psi)\frac{\partial h}{\partial z}\right]\right)=\frac{\partial\theta_f(\Psi)}{\partial t}\quad (4.20)$$

où

$k_r(\Psi)$: perméabilité intrinsèque relative en fonction de la succion (valeur comprise entre 0 et 1)

$\theta_f(\Psi)$: teneur en eau volumique de la fracture en fonction de la succion

La difficulté dans l'utilisation de cette l'équation réside dans la définition des fonctions $k_r(\Psi)$ et $\theta_f(\Psi)$. Il existe en effet très peu de données dans la littérature à ce sujet car c'est un domaine de recherche relativement récent. Les forces agissant sur l'eau dans une fracture non saturée sont les forces capillaires, les forces d'inertie (gravité) et les forces de frottement sur les parois dues à la viscosité de l'eau. Une fracture dont le degré de saturation est faible n'agit pas nécessairement comme une conduite pour l'eau. Elle peut plutôt agir comme une entrave car elle constitue une barrière capillaire. Le modèle présenté par Wang et Narasimhan (1993) considère que l'eau se trouvant dans les pores de la roche intacte peut traverser les fractures, sous l'effet des gradients hydrauliques, seulement dans les zones de contact entre les parois. Ces endroits étant d'ouvertures réduites, ils retiennent l'eau par capillarité et forment des ponts où l'eau de la roche intacte peut circuler. Ce modèle est illustré à la figure 4.4.

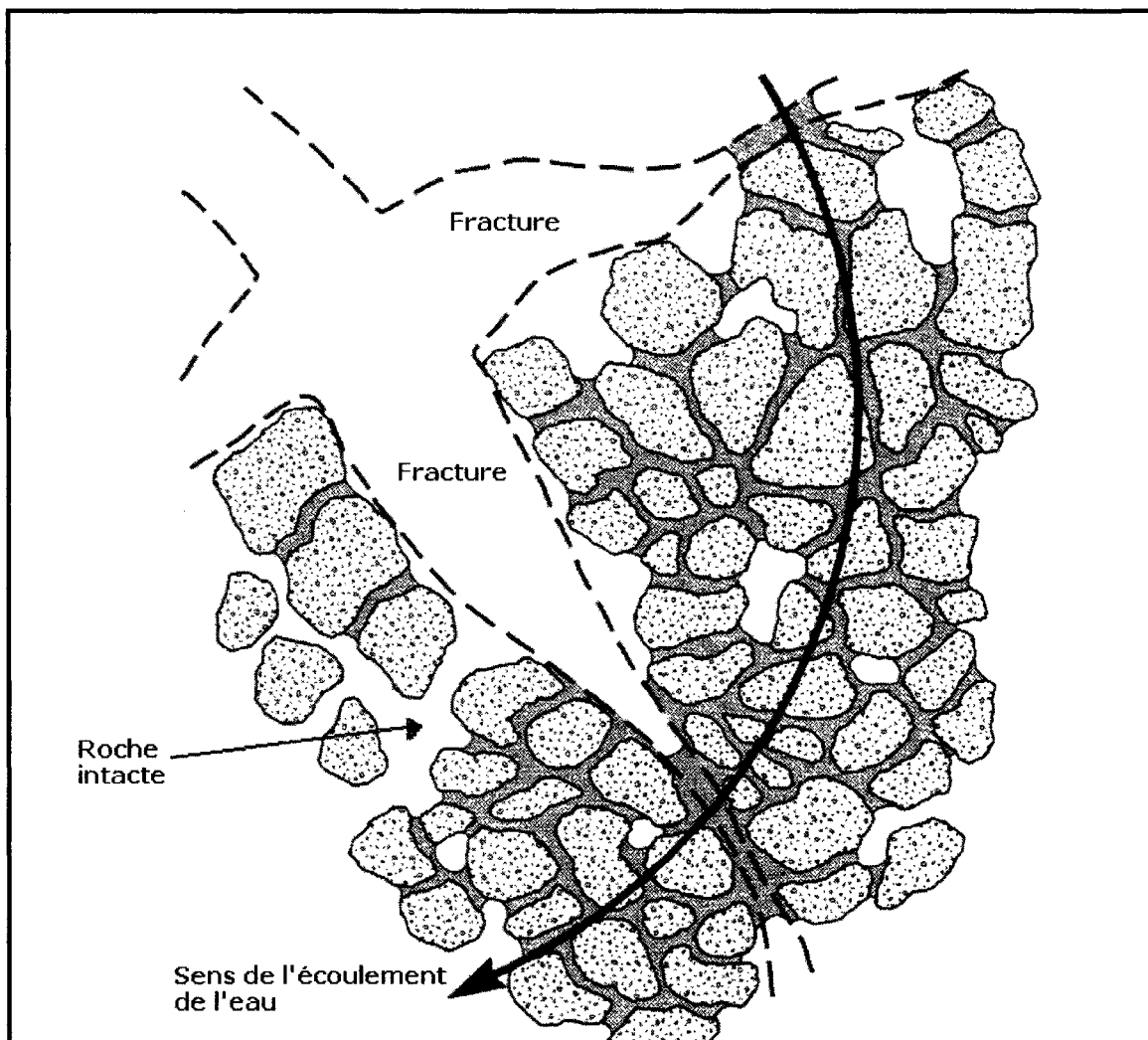


Figure 4.4 : Schéma de l'écoulement non saturé dans un milieu poreux fracturé
(adaptée de Wang et Narasimhan, 1993).

Des équations ont été proposées pour la fonction de rétention d'eau ainsi que pour la fonction de perméabilité relative dans une fracture. Par exemple, Pruess et Tsang (1990) et Wang et Narasimhan (1993) ont suggéré d'utiliser la relation suivante pour le degré de saturation en fonction de la pression qui tient compte de la fonction de probabilité de la taille de l'ouverture :

$$S_r(\Psi) = \frac{\int_0^{b_s} bf(b)db}{\int_0^{b_{\max}} bf(b)db} \quad (4.21)$$

avec

$$b_s = -\frac{2\gamma\cos\alpha}{\rho g\Psi} \quad (4.22)$$

où

Ψ : Charge de pression de l'eau (valeur négative en succion) m

S_r : Degré de saturation

$f(b)$: Fonction de probabilité de la taille de l'ouverture

b_s : Ouverture au dessus de laquelle les ouvertures ne sont plus saturées à la succion

Ψ (m)

$b_{\max}$: Taille maximale de l'ouverture (m)

γ : Tension de surface du fluide (N/m)

α : Angle de contact au ménisque entre le liquide et le solide

L'équation 4.22 a été obtenue en isolant l'ouverture de l'équation d'équilibre des forces sur l'eau capillaire entre 2 plaques parallèles. L'équation 4.21 assume que toutes les ouvertures de taille inférieures à b_s sont également disponibles à être remplies d'eau sous l'effet de la succion (Ψ). Ceci est plus ou moins réaliste car en réalité les ouvertures du plan de fracture n'ont pas toutes la même accessibilité. L'équation 4.21 a été résolue par Pruess et Tsang (1990) pour la fonction de probabilité lognormale.

Pour la fonction de perméabilité relative, Wang et Narasimhan (1993) suggèrent d'utiliser l'équation suivante :

$$k_r = \tau(\Psi) \frac{\int_0^{b_s} b^3 f(b) db}{\int_0^{b_{\max}} b^3 f(b) db} \quad (4.23)$$

où

$\tau(\Psi)$: facteur (compris entre 0 et 1) tenant compte de la tortuosité de l'écoulement causée par l'air; lorsque la phase liquide est complètement discontinue, ce facteur égal zéro.

Notons aussi que, dans l'équation 4.20 (l'équation décrivant l'écoulement transitoire et non saturé dans une fracture), l'ouverture de la fracture (b) n'est pas fonction de la pression de l'eau (Ψ). Ceci est plus ou moins réaliste puisqu'en réalité les fractures s'ouvrent et se ferment sous l'effet de la pression effective. Comme l'ouverture d'une fracture est déterminante sur la perméabilité, il serait préférable d'en tenir compte. Il existe cependant très peu de modèles mathématiques et numériques qui permettent de tenir compte de ce phénomène. Mentionnons celui de Bruel (1990) cité dans Chilès et Marsily (1993).

Mentionnons enfin que, certains chercheurs ont étudié l'écoulement non saturés dans des répliques de fractures naturelles en plexiglas (Persoff et Pruess, 1995, Su et al. 1999). Ils ont montré que l'écoulement dans une fracture initialement sèche se produit très lentement. L'eau s'accumule dans les zones formées des ouvertures de très petites tailles et qui retiennent bien l'eau par capillarité. Ces zones souvent assez étendues sont appelées îlots capillaires par Su et al. (1999). L'eau circule entre les îlots capillaires par de minces canaux constitués des ouvertures de grandes tailles. L'eau emprunte ces canaux pour circuler en raison des forces capillaires qui y sont moins élevées. Les débits mesurés à la sortie des fractures dans ces expériences étaient irréguliers car il a été observé que l'eau s'accumule par endroits dans le plan de fracture puis qu'elle est relâchée périodiquement. La figure 4.5 présente la géométrie du front de mouillage observée dans le temps pour une des expériences de Su et al. (1999). La fracture était

placée à un angle de 46 degrés avec l'horizontal et un débit constant de 4ml/h était fourni à l'entrée. Le temps (en seconde) sous chaque image représente le temps écoulé depuis le début de l'essai, soit depuis le début de l'introduction d'eau à l'entrée de la fracture. Cette figure illustre que l'écoulement de l'eau dans une fracture initialement sèche est un processus lent et irrégulier dans le temps et l'espace. C'est un processus encore mal compris qui nécessite encore de nombreuses études.

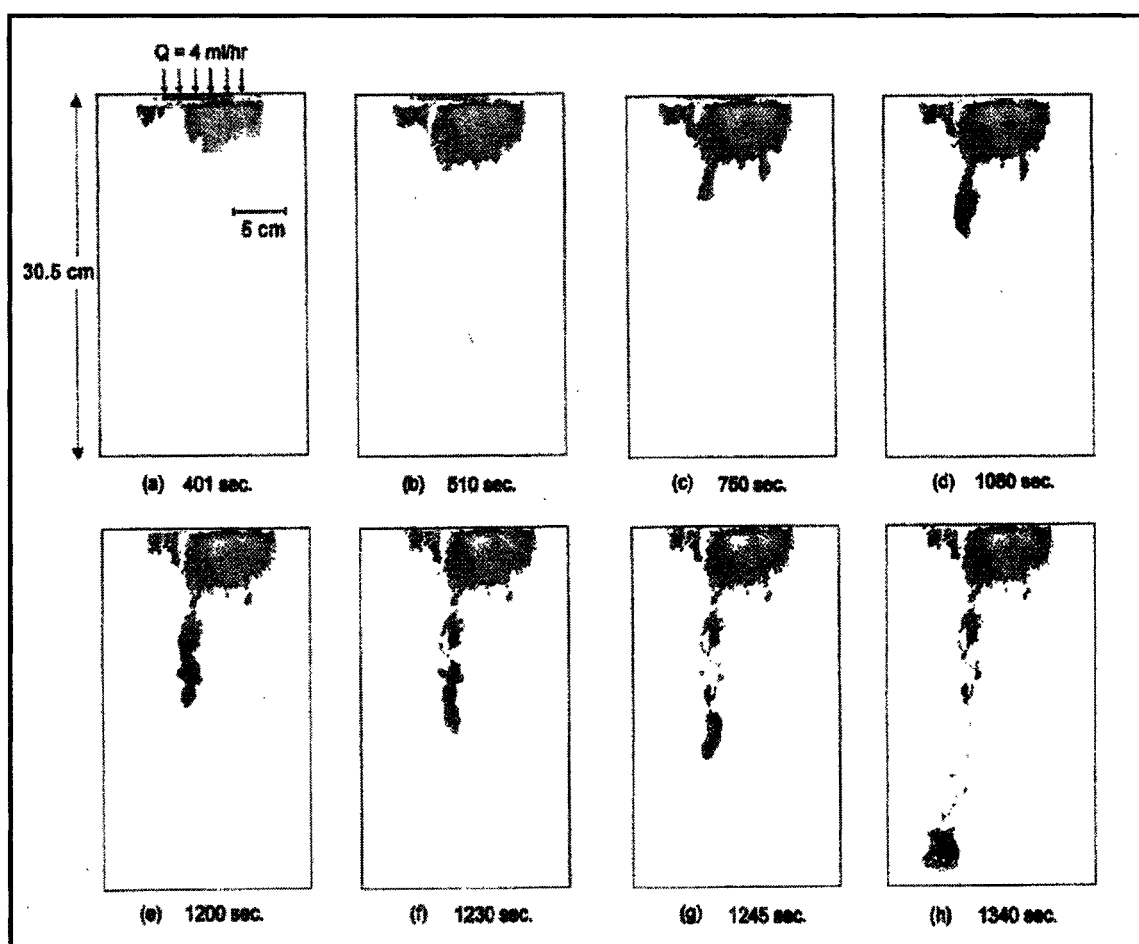


Figure 4.5 : Géométrie du front de mouillage en fonction du temps
dans une réplique de fracture naturelle en plexiglas
(tirée de Su et al. 1999).

4.3 Approches conceptuelles applicables aux massifs fracturés

Afin de solutionner un problème d'écoulement en massif fracturé, il faut tout d'abord élaborer une approche conceptuelle du phénomène physique et ensuite adopter un modèle pour représenter la situation spécifique. Les lois d'écoulement utilisées sont fonction de l'approche conceptuelle retenue et celle-ci dépend de l'échelle du problème considéré. Dans la pratique, trois approches conceptuelles sont utilisées pour résoudre les problèmes d'écoulement en milieux fracturés. Il s'agit des modèles du milieu poreux équivalent, des modèles avec fracturation discrète et des modèles hybrides. Ces derniers utilisent à la fois l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent et l'approche avec fracturation discrète.

4.3.1 Effet de l'échelle du problème

Bear (1993) définit quatre échelles de travail pour caractériser les massifs fracturés. Cette classification est utilisée par d'autres auteurs comme Berkowitz, (1994) et Lapcevic et al. (1999). Il s'agit de la très petite échelle (« very-near field »), de la petite échelle (« near field »), de la grande échelle (« far field ») et de la très grande échelle (« very-far field »). La figure 4.6 illustre ces différentes échelles de travail en massif fracturé. À chaque échelle est associée une approche conceptuelle qui est plus susceptible de s'appliquer. Toujours selon Bear (1993), l'approche avec fracturation discrète s'applique généralement à très petite échelle comme par exemple aux abords d'un puits de pompage ou d'un petit tunnel. À ces endroits, il n'y a possiblement qu'une seule fracture et celle-ci peut être considérée comme responsable de l'écoulement local. En effet, à cette échelle, le volume de roche intacte est petit et son apport à l'écoulement est négligeable comparativement à la contribution de la fracture.

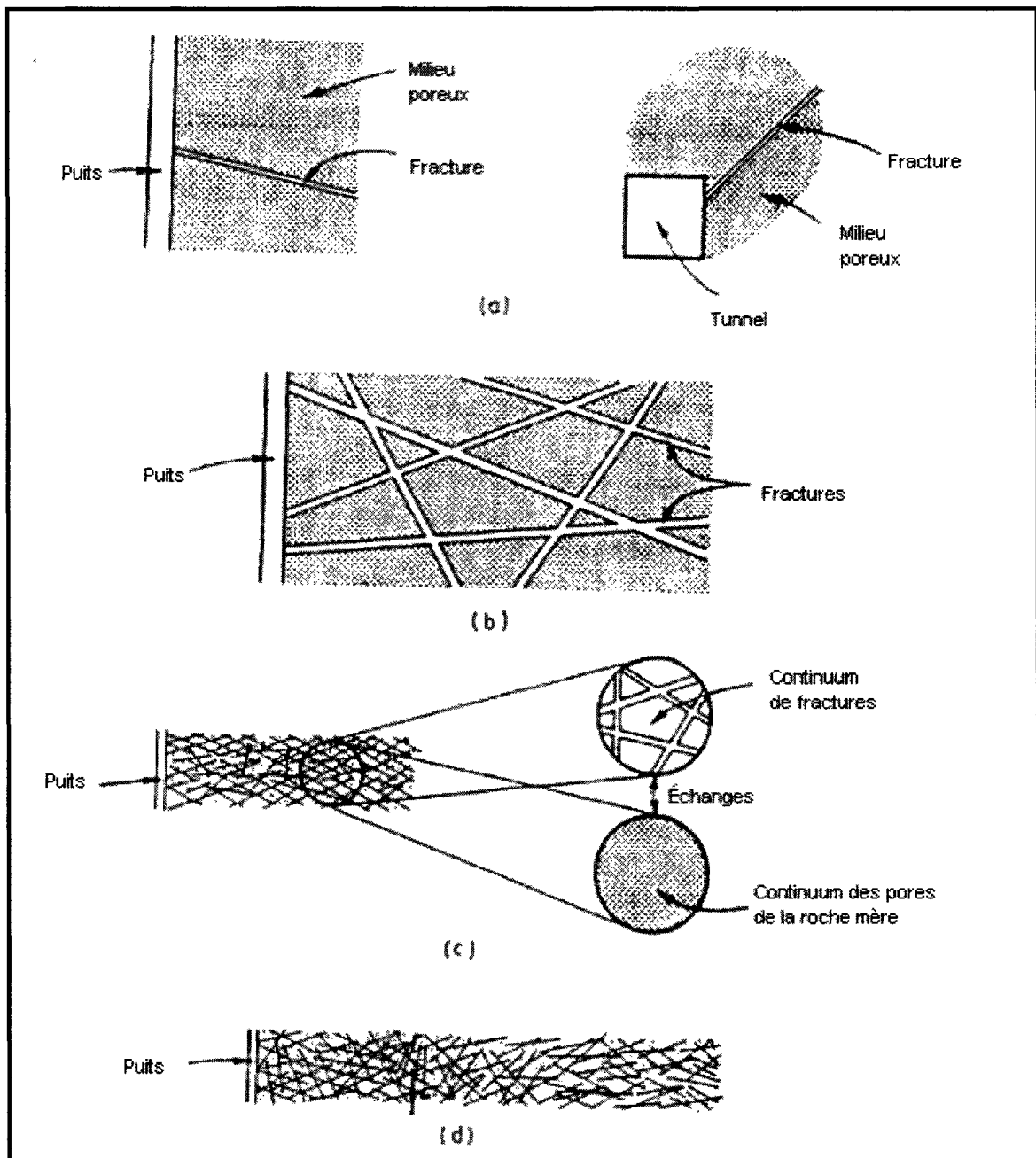


Figure 4.6 : Les quatre échelles de travail en massifs fracturés
 a) Très petite échelle, b) Petite échelle, c) Grande échelle, d) Très grande échelle
 (adaptée de Berkowitz, 1994).

À petite échelle, l'écoulement est dominé par un ensemble bien défini de fractures et la roche intacte peut jouer un rôle plus ou moins important selon sa conductivité hydraulique. À cette échelle, l'approche conceptuelle avec fracturation discrète est généralement employée lorsque la conductivité hydraulique de la roche intacte est faible. Dans le cas contraire, une approche conceptuelle hybride peut être utilisée, c'est-à-dire que les fractures sont modélisées de façon discrète et que la roche intacte est représentée comme un milieu poreux équivalent. À grande échelle, un certain niveau d'homogénéisation est atteint et l'écoulement provient à la fois de la roche intacte et d'un réseau de fractures complexe et difficilement défini. À cette échelle, l'approche conceptuelle double porosité est souvent employée, c'est-à-dire que le massif fracturé est représenté comme deux milieux poreux équivalents constitués de la porosité (effective) de la roche intacte et de celle du réseau de fractures. L'approche conceptuelle double porosité est une extension de l'approche milieu poreux équivalent. À très grande échelle, entre les zones de failles, le massif fracturé se comporte généralement comme une masse homogène dont les propriétés hydriques reflètent à la fois celles de la roche intacte et celles du réseau de fracture. L'approche conceptuelle milieu poreux équivalent est couramment utilisée à cette échelle.

Notons toutefois que des études récentes citées par Berkowitz (1994 et 2002) (il s'agit de Barton, 1993 et de Bonnet et al., 2001) ont semblé démontrer que les systèmes de fractures possèdent des règles de dimensionnement fractale, c'est-à-dire qu'il n'existerait pas d'échelle à partir de laquelle les propriétés d'un massif fracturé peuvent être considérées constantes. Cette conclusion découle de l'étude de la géométrie de plusieurs réseaux 2D de fractures cartographiés aux affleurements. Le système de fractures serait infiniment hétérogène, la taille des hétérogénéités augmentant de façon exponentielle à mesure que l'échelle augmente. Ces études remettraient donc en question la validité de l'approche conceptuelle milieu poreux équivalent pour modéliser l'écoulement dans les réseaux de fractures.

4.3.2 Approche conceptuelle du milieu poreux équivalent

L'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent ou, en anglais, «Equivalent Porous Medium approach» («EPM approach») a été la première à être utilisée pour modéliser l'écoulement en massifs rocheux fracturés et elle est encore très utilisée dans la pratique. Cette approche idéalise l'écoulement dans un massif fracturé comme semblable à l'écoulement dans un milieu granulaire. L'avantage de faire cette hypothèse est que les lois d'écoulement dans les milieux granulaires sont connues. Cette approche conceptuelle est généralement valide à très grande échelle pour les massifs fracturés dont la densité de la fracturation et la connectivité sont élevées (Bear, 1993).

Cette approche conceptuelle est basée sur la notion de volume élémentaire représentatif ou, en anglais, «Representative Elementary Volume» («REV»). Sur un domaine de massif rocheux fracturé, le «REV» est défini comme le volume minimal et indépendant de la position pour lequel toutes les structures du massif sont représentées dans des proportions similaires à celles de l'ensemble (Elsworth et Mase, 1993). Les dimensions du «REV» correspondent à l'échelle à partir de laquelle un massif rocheux, localement très hétérogène, peut être considéré comme homogène. La figure 4.7 illustre que la variabilité des propriétés d'un massif fracturé (la conductivité hydraulique par exemple) diminue avec l'augmentation de l'échelle jusqu'à l'atteinte du « REV ».

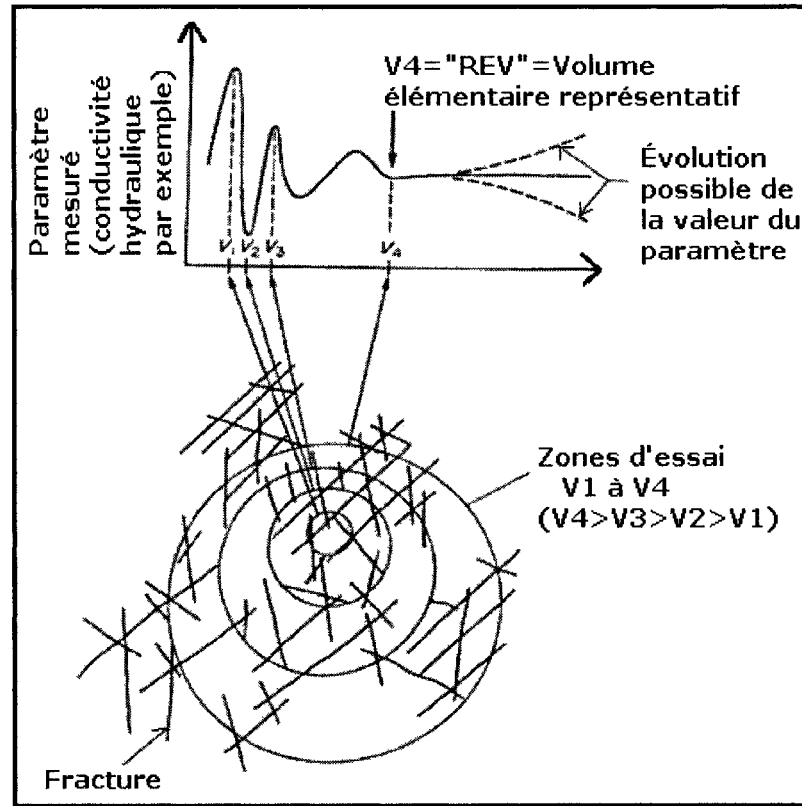


Figure 4.7 : Illustration du concept de volume élémentaire représentatif
(adaptée de Elsworth et Mase, 1993).

Des essais hydrauliques in situ, réalisés sur des volumes d'au moins la taille du «REV», permettent de déterminer la conductivité hydraulique milieu poreux équivalent (Priest, 1993). Celle-ci peut également être estimée par l'interprétation des données structurales. Par exemple, le modèle de Snow (1969) permet de calculer le tenseur des conductivités hydrauliques d'un massif dont les fractures ne sont pas nécessairement orthogonales. Une version simplifiée de ce modèle permet de déterminer la conductivité hydraulique milieu poreux équivalent d'un système constitué de roches intactes et de fractures parallèles d'ouvertures constantes par la relation suivante (Elsworth et Mase, 1993) :

$$K_{eq.} = \frac{\rho g b^3}{12 \mu \lambda} + K_{roc} \left(1 - \frac{b}{\lambda}\right) \quad (4.24)$$

où

K_{eq} : Conductivité hydraulique milieu poreux équivalent dans la direction des fractures (m/s)

K_{roc} : Conductivité hydraulique de la roche intacte située entre les fractures (m/s)

λ : Espacement moyen entre les fractures d'ouverture (b) constante (m)

Les hypothèses sous jacentes à l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent sont les suivantes. Premièrement, il est possible d'estimer un «REV» sur le domaine de massif rocheux considéré. Deuxièmement, les dimensions du «REV» sont très inférieures à celles du domaine complet. Troisièmement, les dimensions du «REV» sont très supérieures à l'espacement moyen entre les fractures (Bear, 1993). Ces hypothèses sont généralement vérifiées à très grande échelle dans les massifs dont la densité de fracturation et la connectivité sont élevées. L'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent est toutefois beaucoup plus appropriée à l'étude de l'écoulement dans les milieux granulaires qu'à celle dans les massifs fracturés (à moins que ceux-ci ne soient extrêmement fracturés). En effet, les massifs fracturés sont la plupart du temps tellement hétérogènes que les «REV» sont de tailles comparables à l'échelle du domaine considéré (Braester, 1988). La difficulté principale dans l'utilisation de cette approche conceptuelle pour le cas des massifs fracturés est l'estimation de la taille du «REV». Celle-ci sera d'autant plus précise que la connaissance du massif est élaborée (Braester, 1988).

Les modèles utilisant l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent ne tiennent pas compte spécifiquement de la conductivité hydraulique de la roche intacte (ou ils la négligent). Lorsque celle-ci est importante, l'approche conceptuelle double porosité est souvent utilisée. Cette approche est une extension de l'approche du milieu poreux équivalent. Le massif fracturé y est représenté comme une superposition de deux milieux poreux homogènes reliés entre eux par une variable de transfert. Un de ces

milieux poreux est la roche intacte et l'autre est celui associé à la porosité secondaire (Anderson et Woessner, 1992). Cette approche conceptuelle est surtout utilisée dans l'industrie de l'exploitation des réservoirs d'hydrocarbures (Chapuis, 1999; Berkowitz, 2002). Il est possible de déterminer si un massif fracturé se comporte comme un système double porosité par l'interprétation des essais de pompage en régime transitoire. Ces essais permettent également de déterminer les propriétés hydriques des deux continuums (Anderson et Woessner, 1992).

4.3.3 Approche conceptuelle avec fracturation discrète

L'approche conceptuelle avec fracturation discrète s'utilise lorsque les hypothèses permettant d'utiliser l'approche du milieu poreux équivalent ne sont pas applicables et lorsque la roche intacte est peu perméable. Dans les modèles utilisant cette approche conceptuelle, les fractures sont représentées explicitement sur le domaine. Le débit dans chaque fracture est calculé et les débits globaux sur le domaine tiennent compte des interactions entre les fractures (Berkowitz, 2002).

On retrouve deux variantes de cette approche conceptuelle, soit l'approche avec fracturation discrète déterministe et l'approche avec fracturation discrète probabiliste (Gale, 1990; Chilès et Marsily, 1993). Dans le premier cas, les fractures conductrices sont modélisées telles qu'elles apparaissent en réalité sur le domaine (position, orientation, dimensions). La plupart du temps, une représentation déterministe n'est pas possible car les réseaux de fractures sont des systèmes très complexes et l'information est difficilement accessible. De plus, il est également difficile de connaître la proportion de fractures conductrices. Dans ce cas, une approche avec fracturation discrète probabiliste est utilisée à partir d'un traitement statistique approfondi des données structurales. Cette approche ne représente pas la position et la géométrie exacte des fractures sur le domaine mais elle utilise à la place des systèmes de fractures équivalents statistiquement. Des fonctions de probabilité sont d'abord définies pour les paramètres

géométriques des fractures (orientation, longueur, espacement et ouverture). À partir de ces fonctions, plusieurs systèmes de fractures probables (2D ou 3D) sont générés avec des méthodes géostatistiques ou la méthode Monte Carlo. Des logiciels de génération de fractures existent et ils permettent d'étudier différents scénarios dans le cadre de logiciels de simulation de l'écoulement utilisant la méthode des éléments finis. Par exemple, Rouleau et Gale (1987) ont utilisé de tels logiciels (NETWRK et NETFLOW) pour leur étude hydrique d'un système de fractures à la mine Stripa en Suède. De façon générale, pour chaque système de fractures probable (un scénario), un certain pourcentage des fractures est éliminé aléatoirement pour tenir compte du fait que toutes les fractures ne sont pas conductrices. Berkowitz (1994) rapporte qu'entre 50% et 80% des fractures sont usuellement retirées. S'il existe des tranchées ou des affleurements sur le domaine étudié, la proportion des fractures conductrices peut être estimée en dénombrant les fractures mouillées versus le nombre total de fractures à ces endroits. Dans les modèles utilisant l'approche conceptuelle avec fracturation discrète probabiliste, le débit sur un domaine de massif rocheux fracturé est la valeur moyenne des débits obtenus pour tous les scénarios probables tandis que l'écart-type donne une idée de sa variabilité (Chilès et Marsily, 1993).

On a vu plus tôt dans ce chapitre que plusieurs approches conceptuelles existent pour modéliser l'écoulement dans les fractures. L'approche la plus courante est d'idéaliser les parois des fractures comme des plaques parallèles ce qui permet d'utiliser la loi cubique, ou une loi cubique modifiée, comme loi d'écoulement dans les fractures (Priest, 1993; Lapcevic et al., (1999). L'espace entre les parois des fractures peut également être idéalisé comme un milieu poreux (très perméable) et les lois d'écoulement en milieux poreux sont alors employées pour modéliser l'écoulement dans les fractures. D'autres modèles utilisent l'approche conceptuelle de l'écoulement par canaux dans les fractures. Citons en exemple celui de Cacas (1989) et Cacas et al. (1990) présenté dans Chilès et Marsily (1993) et Lapcevic et al. (1999). Dans ce modèle, le centre de chaque fracture est relié par un canal de section circulaire ou rectangulaire à chaque intersection avec les

autres fractures faisant en sorte que l'écoulement s'effectue dans un système de structures unidimensionnelles (canaux) au lieu de bidimensionnelles (plaques parallèles). Cette façon de procéder à l'avantage de réduire énormément les temps de calcul des modèles numériques. Des méthodes ont été mises au point pour calibrer ces modèles à partir des résultats des essais de terrain (essais hydrauliques et relevés des niveaux piézométriques; Chilès et Marsily, 1993).

Notons enfin que l'approche conceptuelle avec fracturation discrète est d'utilisation beaucoup plus récente que celle du milieu poreux équivalent pour la résolution des problèmes d'écoulement en massifs rocheux fracturés. L'arrivée sur le marché d'ordinateurs de plus en plus performants a permis d'envisager des modèles numériques utilisant cette approche conceptuelle car celle-ci demande considérablement plus de calculs que l'approche du milieu poreux équivalent. Il reste que la taille des problèmes pouvant être traités numériquement par cette approche conceptuelle est souvent limitée par l'efficacité des ordinateurs (Berkowitz, 2002).

En terminant cette section, il est intéressant de mentionner les travaux de Selroos et al. (2002) qui ont réalisé une étude comparative de trois approches conceptuelles, soit l'approche du milieu poreux équivalent, l'approche avec fracturation discrète sous la forme de plaques parallèles et l'approche avec fracturation discrète sous la forme de canaux. Le problème était d'étudier l'écoulement de l'eau et le transport des contaminants en massif rocheux fracturé sur un domaine de 2000m x 2000m x 1000m situé autour d'un site d'entreposage des rejets nucléaires. Trois équipes de travail distinctes devaient analyser ce problème d'écoulement en utilisant des approches conceptuelles différentes. Chaque équipe avait accès aux mêmes données et devait utiliser les mêmes conditions aux frontières. Les résultats de l'étude montrent que les valeurs moyennes de débit sur le domaine et de temps de transport des contaminants sont sensiblement les mêmes peu importe l'approche conceptuelle utilisée. On

retrouvait toutefois plus de variabilité dans les résultats (débits et temps de transport) obtenus par l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent.

4.3.4 Approches conceptuelles hybrides

Les modèles hybrides utilisent à la fois l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent et celle avec fracturation discrète. Certains modèles représentent les fractures explicitement alors que la roche intacte est modélisée comme un milieu poreux équivalent (Berkowitz, 1994). De tels modèles sont utiles lorsque la conductivité hydraulique de la roche intacte n'est pas négligeable et que la configuration des fractures sur le domaine ne permet pas de vérifier les hypothèses de l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent. Une autre approche conceptuelle hybride consiste à analyser les propriétés hydriques d'un massif rocheux fracturé à l'échelle du «REV», en utilisant l'approche de la fracturation discrète, et ensuite d'utiliser ces résultats pour étudier le comportement du massif à grande échelle par l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent (Chilès et Marsily, 1993).

Ce chapitre a fait la revue de certaines des équations disponibles pour étudier l'écoulement en massifs rocheux fracturés ainsi qu'une revue des principales approches conceptuelles applicables. Le logiciel utilisé pour réaliser les simulations numériques présentées dans ce mémoire (FRAC3DVS) est présenté au chapitre suivant. FRAC3DVS permet l'utilisation d'une approche conceptuelle hybride, soit d'utiliser l'approche du milieu poreux équivalent et une approche de fracturation discrète sur un même domaine. Dans le cas où l'approche de la fracturation discrète est utilisée, FRAC3DVS modélise les fractures comme des plaques parallèles. Les équations incluses dans ce modèle numérique, sous la forme matricielle, sont les équations 4.6 (milieu poreux équivalent) et 4.18 (fracturation discrète). Le prochain chapitre présente également les simulations préliminaires réalisées avec FRAC3DVS. Celles-ci avaient

pour but de se familiariser avec son mode de fonctionnement et aussi d'effectuer certaines vérifications de la validité du logiciel.

CHAPITRE V – APPLICATIONS PRÉLIMINAIRES DE FRAC3DVS

5.1 Présentation du logiciel

FRAC3DVS est un logiciel de modélisation numérique de l'écoulement souterrain et du transport de contaminants. Il permet d'utiliser les approches conceptuelles milieu poreux équivalent, double porosité et fracturation discrète, seules ou en association, pour simuler l'écoulement sur des domaines 3D en régime permanent ou transitoire et en conditions saturées ou non saturées. L'avantage d'un modèle tridimensionnel comparativement à un modèle bidimensionnel, lorsque l'approche conceptuelle avec fracturation discrète est employée, est de pouvoir représenter plus adéquatement la connectivité entre les fractures. FRAC3DVS est le fruit du travail de R. Therrien, de l'université Laval, ainsi que de E.A. Sudicky et de R.G. McLaren, tout deux de l'université de Waterloo (Therrien et Sudicky, 1996 ; Therrien et al. 2001). Ce logiciel est le prédécesseur de HydroSphere qui en plus de toutes les fonctions de FRAC3DVS peut simuler l'écoulement à surface libre ou ruissellement (Therrien et al. 2003).

5.1.1 Caractéristiques de base

FRAC3DVS utilise la méthode numérique des éléments finis. Cette méthode fonctionne en discrétisant l'espace du domaine où l'écoulement est étudié en unités appelés éléments. Pour le régime transitoire, la période de modélisation est discrétisée en unités appelés pas de temps. Dans le modèle 3D de FRAC3DVS, les éléments ont la forme de prismes rectangulaires ou de prismes triangulaires. Les sommets des éléments sont appelés nœuds et l'ensemble des nœuds et des éléments d'un domaine est appelé maillage. À chaque élément du maillage est attribué un matériau et des propriétés hydriques associées (fonction de rétention d'eau, fonction des conductivités hydrauliques relatives, coefficient d'emmagasinement, porosité et dispersivité). Une

solution numérique ne peut être obtenue qu'à partir de conditions initiales et en présence de conditions imposées aux frontières du maillage. Les conditions initiales sont les charges hydrauliques de départ imposées à chacun des nœuds du domaine. Les conditions aux frontières sont de type Dirichlet (charges imposées aux nœuds) ou Neumann (vitesses imposées aux éléments).

Un logiciel d'éléments finis résout un système matriciel formé des équations d'écoulement pour tous les nœuds du maillage. Cette résolution se fait par calculs itératifs, à partir d'une solution initiale (les conditions initiales), afin de trouver une solution finale qui respecte les conditions aux frontières. La solution finale comprend la valeur de la charge hydraulique à chacun des nœuds du maillage ainsi que les composantes du vecteur vitesse moyen au centre de chaque élément. En conditions non saturées, le degré de saturation moyen de chaque élément fait également partie de la solution finale. Les méthodes numériques offrent des solutions dites approchées de la solution exacte et les critères de convergence imposés déterminent le niveau de précision de la solution (Anderson et Woessner, 1992).

En conditions non saturées, les calculs d'écoulement sont difficiles à résoudre numériquement à cause de la non linéarité des équations différentielles (équations 4.6 et 4.18) et ce, surtout lorsqu'il y a de forts contrastes de propriétés entre les matériaux poreux. Dans ce cas, un équilibre doit être obtenu entre la taille des éléments, celle des pas de temps et les critères de convergence afin de faire converger ces problèmes et obtenir des solutions réalistes. Pour les conditions non saturées, FRAC3DVS utilise deux niveaux d'itérations imbriqués l'un dans l'autre afin de résoudre l'équation d'écoulement : l'algorithme de Galerkin et celui de Newton-Raphson qui est spécifique aux conditions non saturées. L'algorithme de Newton-Raphson demande un peu plus de calculs à chaque itération que d'autres, comme par exemple ceux de Galerkin ou de Picard, mais il a l'avantage d'être plus robuste et de converger plus rapidement (Therrien et Sudicky, 1996).

FRAC3DVS représente les fractures par des éléments 2D tandis que le milieu poreux est représenté par des éléments 3D. Une fracture est formée d'une série d'éléments 2D placée entre deux rangées d'éléments 3D. Les nœuds des éléments de fracture coïncident avec ceux des éléments 3D situés de part et d'autre de la fracture. Cette façon de procéder fait en sorte qu'il y a continuité des charges hydrauliques entre la roche intacte et les fractures, et cela implique l'hypothèse qu'il y a un équilibre instantané des charges entre ces deux structures du massif. Les fractures dans FRAC3DVS sont non déformables, c'est-à-dire que la taille de l'ouverture ou leur conductivité hydraulique ne varie pas en fonction de la charge (Therrien et al. 2003).

Les équations d'écoulement utilisées dans FRAC3DVS ont été présentées au chapitre 4; il s'agit des équations 4.6 (milieu poreux) et 4.18 (fractures). Elles sont résolues dans des systèmes matriciels indépendants (nœuds du milieu poreux et nœuds des fractures) et le couplage entre elles s'effectue par leur résolution simultanée. L'interaction entre une fracture et la roche intacte située de part et d'autre est calculée en ajoutant ou en soustrayant au débit circulant dans un élément de fracture les normes des composantes des vecteurs vitesse (dans la direction de la fracture) des éléments de roche intacte (Therrien et al. 2003).

5.1.2 Utilisation

FRAC3DVS s'utilise dans l'environnement DOS avec quatre fichiers exécutables : les fichiers *np5.exe*, *f3d5.exe*, *f3d2tec5.exe* et *f3d2gms.exe*. Le premier est un pré-processeur qui appelle un fichier en format texte contenant toutes les informations relatives à une simulation, et les transforme en format binaire pouvant être utilisé par le fichier *f3d5.exe*. Ce dernier effectue tous les calculs et génère les fichiers de résultats. Le fichier *f3d2tec5.exe* sert à générer un fichier de résultats en format texte lisible par le logiciel Tecplot de la compagnie AMTEC ENGINEERING INC. Ce logiciel permet de

visualiser le maillage, les vecteurs vitesses et les résultats sous la forme d'iso contours (charges hydrauliques, vitesses et degré de saturation). Il permet également d'extraire des données à des endroits spécifique sur le domaine ce qui en facilite l'analyse. La version 9.2 de Tecplot a été utilisée dans le cadre de ce projet de maîtrise. Le fichier *f3d2gms.exe* sert à générer un fichier de résultats en format texte lisible par le logiciel GMS de la compagnie BOSS International INC. La version 2.1 de GMS a été utilisée dans le cadre de ce projet de maîtrise. Ce logiciel est utile pour visualiser les maillages mais il l'est beaucoup moins pour l'analyse des résultats car il ne permet pas l'extraction de données à des endroits spécifiques du domaine. Cependant, si un maillage aux contours irréguliers doit être créé, GMS est essentiel car il s'utilise conjointement avec la fonction «*generate layer from slice*» en permettant la génération de certains fichiers.

Toutes les informations relatives à une simulation, sauf les propriétés des matériaux, sont écrites dans un fichier texte selon une syntaxe donnée dans le manuel de l'utilisateur (Therrien et al. 2001). Ce fichier doit porter l'extension *.np*. Les propriétés des matériaux et celles des fractures sont écrites dans des fichiers textes portant respectivement les extensions *.mprops* et *.fprops*. Le nom de ces fichiers est mentionné dans le fichier *.np* et c'est ainsi que l'exécutable *np5.exe* peut y faire référence. Les fonctions hydriques sont entrées soit en mentionnant les paramètres d'ajustement de la fonction de van Genuchten (voir à ce sujet Aubertin et al., 1996) ou encore en donnant des points pour les courbes sous la forme de tableaux.

5.2 Drainage 1D d'une CEBC

Cette vérification a permis d'évaluer la capacité de FRAC3DVS à simuler correctement l'écoulement transitoire en conditions non saturées dans les milieux poreux. Le cas du drainage vertical d'une couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC) a été étudié. Les forts contrastes de propriétés entre les matériaux d'une CEBC, surtout en conditions non saturées, font en sorte que les calculs sont difficiles à gérer numériquement. La même simulation a été réalisée à la fois avec FRAC3DVS et avec un logiciel déjà validé par des résultats expérimentaux pour ce type d'écoulement (Aubertin et al.1996). Ce logiciel est SEEP/W de la compagnie GEOSLOPE International. Tout comme FRAC3DVS, c'est un logiciel d'éléments finis de simulation numérique des écoulements souterrains. Les résultats obtenus avec SEEP/W ont servi de base de référence pour vérifier la validité des résultats obtenus avec FRAC3DVS.

5.2.1 Description

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont les suivants. Il s'agit d'une colonne contenant quatre couches de deux matériaux aux propriétés hydriques très différentes, soit un sable et un silt. En commençant par la base, la colonne contient 1.5m de silt, 0.5m de sable, 0.6m de silt et 0.3m de sable. Le silt est d'une granulométrie similaire à celle de rejets de concentrateur et les couches sable-silt-sable constituent la couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC). La figure 5.1 présente le maillage utilisé pour la simulation réalisée avec FRAC3DVS et la position des différents matériaux. L'écoulement 1D étudié dans cette colonne est dans la direction décroissante de l'axe des z . Il s'agit d'un drainage d'une période de 28 jours à partir de l'état complètement saturé. Au temps zéro de la simulation, le niveau de la nappe phréatique (pression relative de l'eau égale à zéro) est à 2.9m dans la colonne, soit à la même élévation que le dessus. Le niveau de la nappe est abaissé graduellement en 24 heures à 0.0m, soit au bas de la colonne. Ensuite, le niveau de la nappe demeure constant (à l'élévation 0.0m) pour

le reste de la simulation qui consiste en 27 jours d'un écoulement gravitaire non saturé dans la colonne.

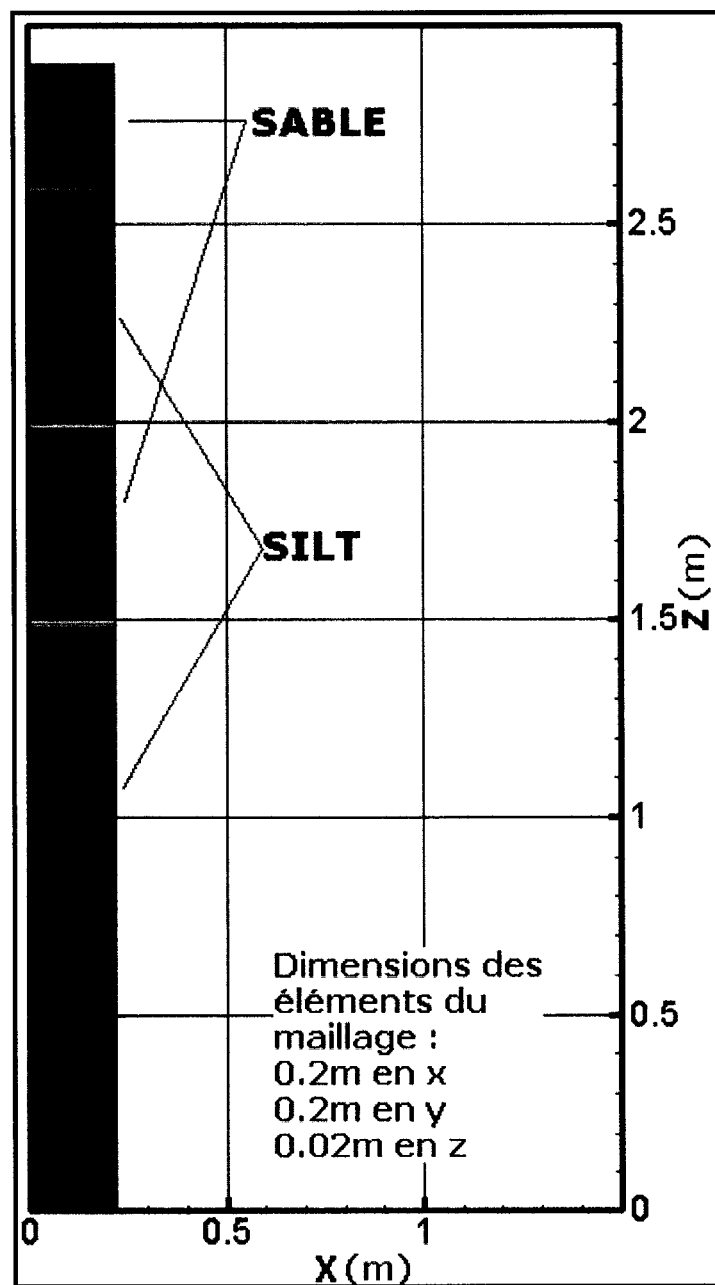


Figure 5.1 : Maillage et matériaux de la CEBC en colonne (FRAC3DVS).

La même formulation du problème a été employée avec chaque logiciel : même taille des éléments et des pas de temps ainsi que mêmes conditions initiales et conditions au frontières. Pour ce qui est des critères de convergence, ceux utilisés dans SEEP/W étaient plus sévères. De plus, la colonne était de section circulaire dans SEEP/W et de section carrée dans FRAC3DVS mais elles étaient de même surface. Cependant, comme l'écoulement est en une dimension, perpendiculairement à la section, la forme de celle-ci importe peu. Le tableau 5.1 résume la formulation du problème pour les deux logiciels.

Tableau 5.1 : Paramètres utilisés dans la simulation drainage d'une CEBC.

Paramètre	FRAC3DVS	SEEP/W
Taille des éléments parallèlement à l'écoulement	0.02m	0.02m
Pas de temps	$t_0 = 1\text{s}$ avec un facteur d'expansion de 1.05 jusqu'à $t_{\max} = 7200\text{s}$	$t_0 = 1\text{s}$ avec un facteur d'expansion de 1.05 jusqu'à $t_{\max} = 7200\text{s}$
Critère de convergence	Nombre maximum d'itérations de Newton = 25 ou une différence de 0.01m sur le calcul des charges entre deux itérations.	100 itérations ou un écart de 0.0001% sur les charges entre deux itérations
Conditions initiales	Charge totale de 2.9m à tous les nœuds	Charge totale de 2.9m à tous les nœuds

où

t_0 : durée du pas de temps initial, s

$t_{\max}$: durée du pas de temps maximum, s

Les figures 5.2 à 5.4 présentent les fonctions hydriques des matériaux de la CEBC. Dans les deux logiciels, ces fonctions sont entrées dans la formulation du problème sous la forme de points sur la courbe de la fonction. Dans le cas de SEEP/W, ces points sont la teneur en eau volumique versus la pression de l'eau et la conductivité hydraulique relative versus la pression de l'eau. Dans le cas de FRA3DVS, ces points sont le degré de saturation (S_r) versus la pression de l'eau et la conductivité hydraulique relative versus le degré de saturation. Certains ajustements ont été nécessaires afin de s'assurer d'utiliser les mêmes courbes dans les deux logiciels.

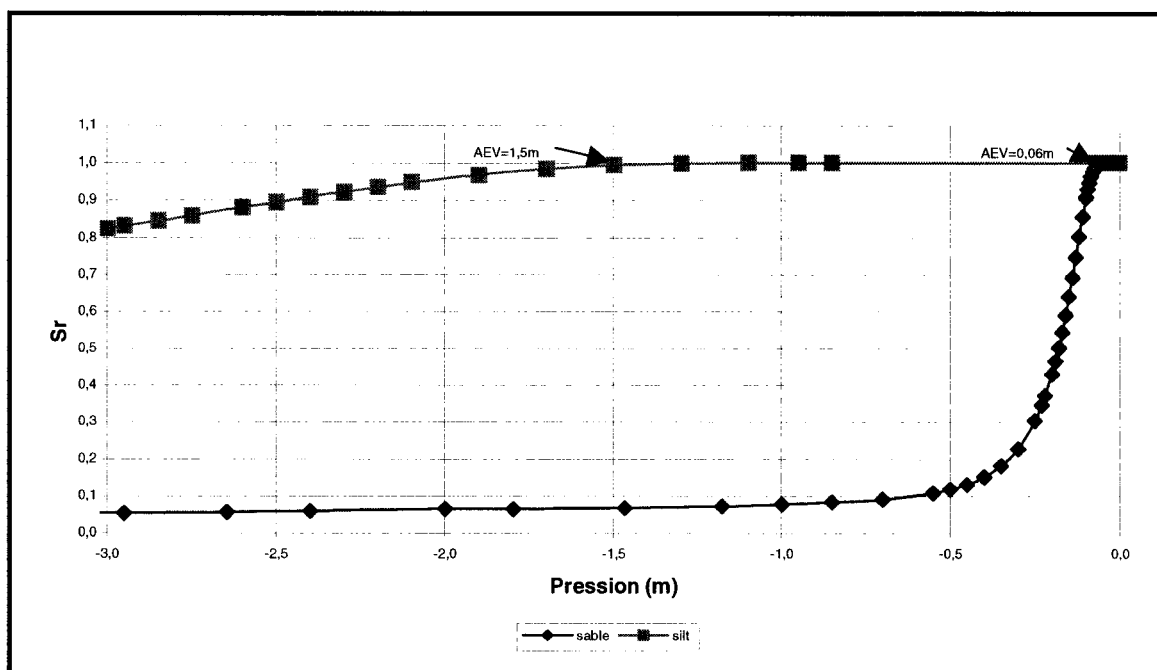


Figure 5.2 : Courbes de rétention d'eau des matériaux de la CEBC.

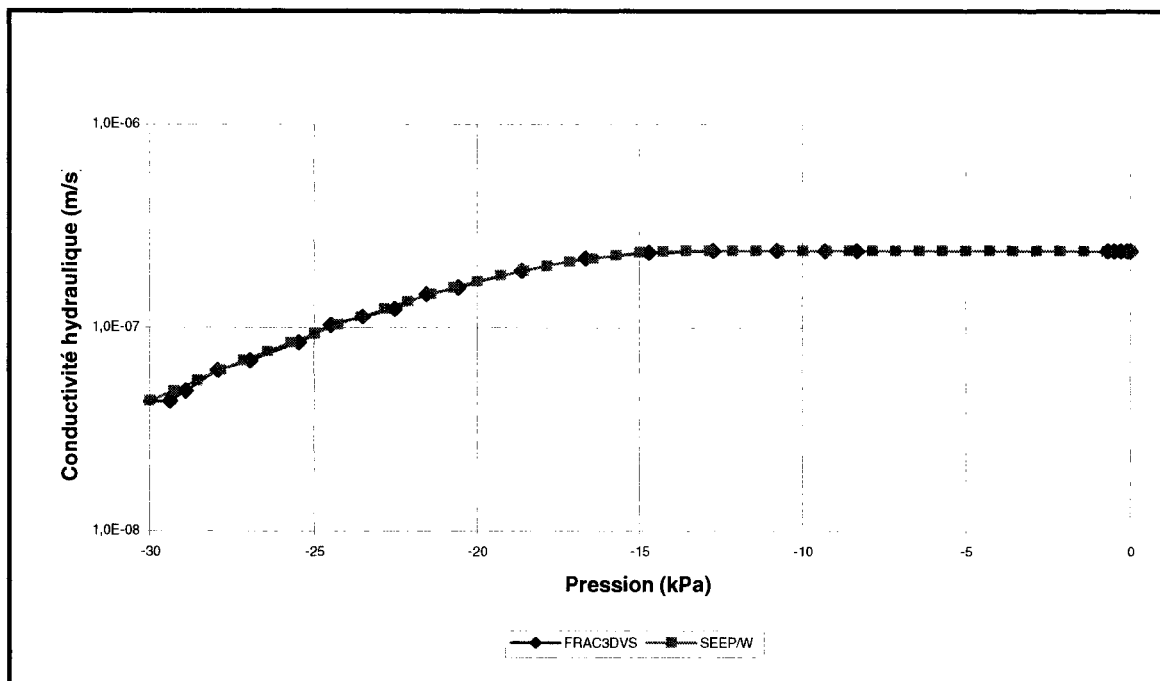


Figure 5.3 : Fonction de conductivité hydraulique du silt de la CEBC.

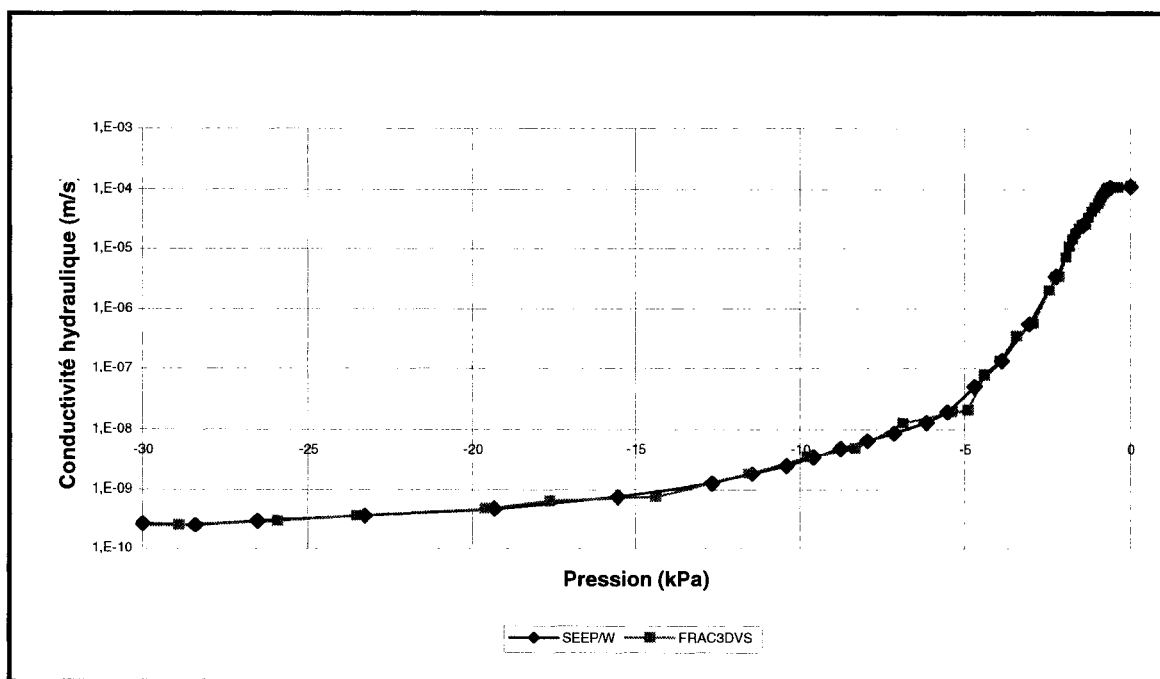


Figure 5.4 : Fonction de conductivité hydraulique du sable de la CEBC.

5.2.2 Principaux résultats

Les valeurs de pression et du degré de saturation en fonction de l'élévation dans la colonne ont été retenues pour les mêmes pas de temps avec les deux logiciels (une seconde, dix minutes, une heure, 1 jour, 7 jours, 14 jours, 21 jours et 28 jours). Ces résultats, portés en graphiques comparatifs de FRAC3DVS et de SEEP/W, sont présentés aux figures 5.5 à 5.12 pour les pas de temps 1, 7, 14 et 28 jours. Les valeurs de pressions et de degré de saturation calculées par les deux logiciels concordent presque parfaitement. Cela démontre l'efficacité de FRAC3DVS à simuler correctement les écoulements transitoires en conditions non saturées. L'écart maximum entre les valeurs est de 6% et il a été observé après 14 jours de drainage dans la couche centrale de sable sur le graphique pression en fonction de l'élévation (voir figure 5.7). Ce petit écart peut être attribuable aux légères différences entre les fonctions de conductivité hydraulique utilisées ou encore aux critères de convergence qui différaient également. Il est intéressant de noter que cette simulation prenait 1 minute avec FRAC3DVS et 12 minutes avec SEEP/W sur le même ordinateur. Cette différence peut être attribuée à au moins trois facteurs. Premièrement, le critère de convergence plus sévère assigné à SEEP/W fait en sorte que les calculs sont plus longs à chaque itération. Deuxièmement, la fonction «*finite difference mode*» a été utilisée pour la simulation dans FRAC3DVS et celle-ci fait en sorte que les calculs prennent 4 fois moins d'espace mémoire (Therrien et al. 2003). Troisièmement, il est possible que les algorithmes de FRAC3DVS soient plus efficaces et donc plus rapides.

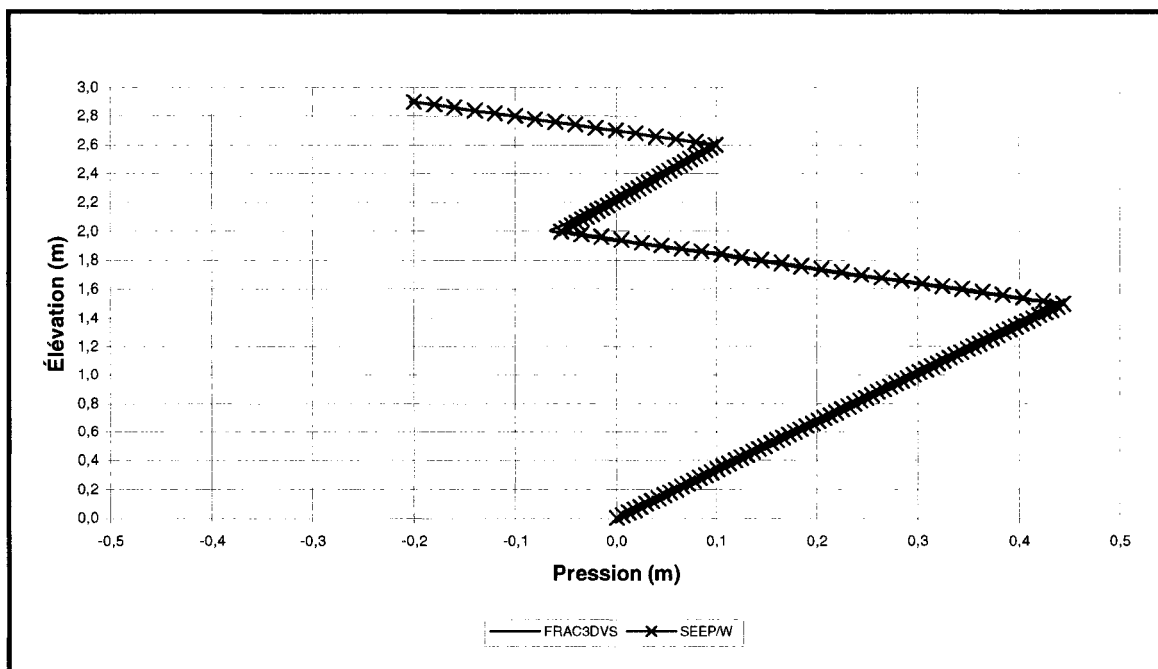


Figure 5.5 : Pressions dans la CEBC après 1 jour de drainage.

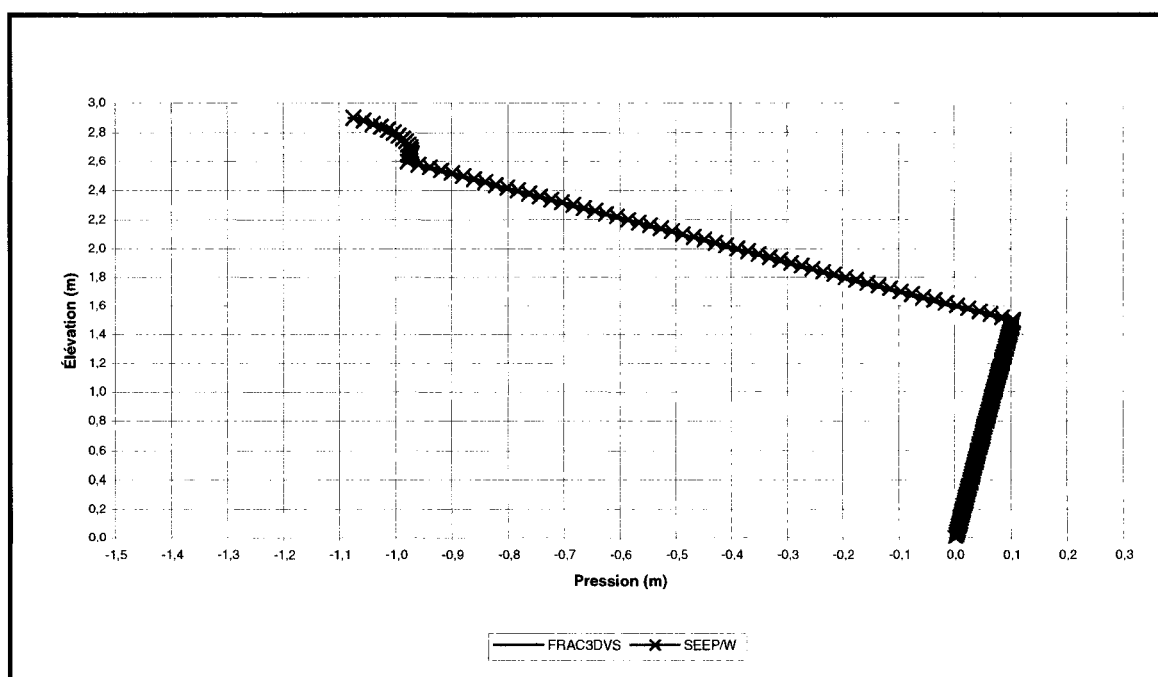


Figure 5.6 : Pressions dans la CEBC après 7 jours de drainage.

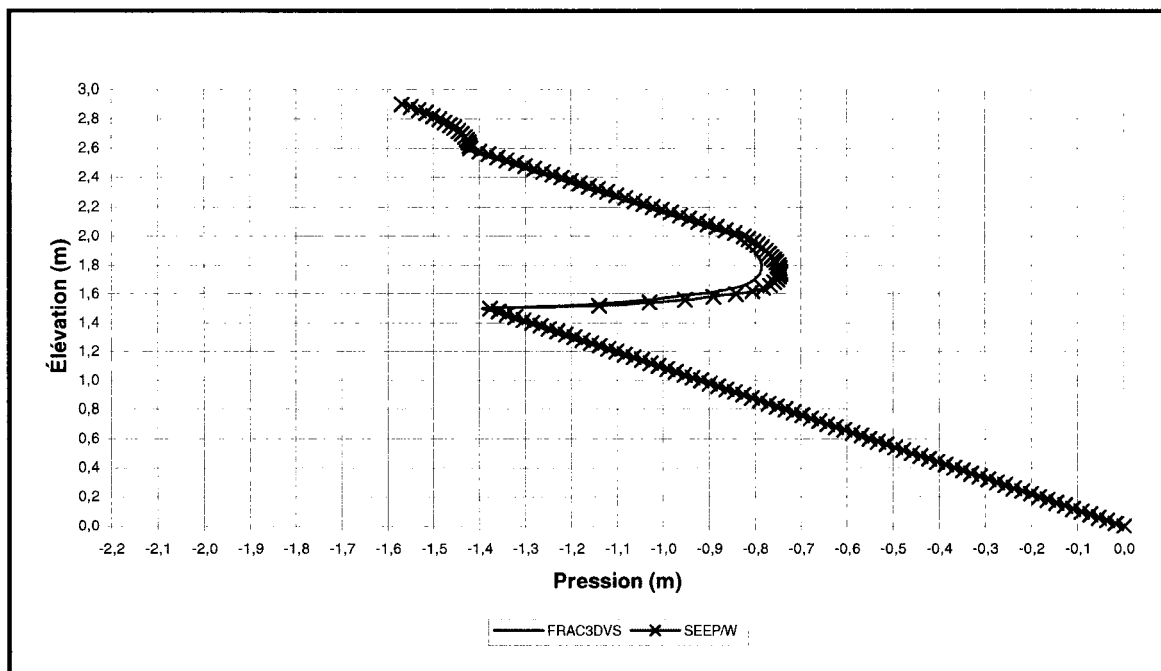


Figure 5.7 : Pressions dans la CEBC après 14 jours de drainage.

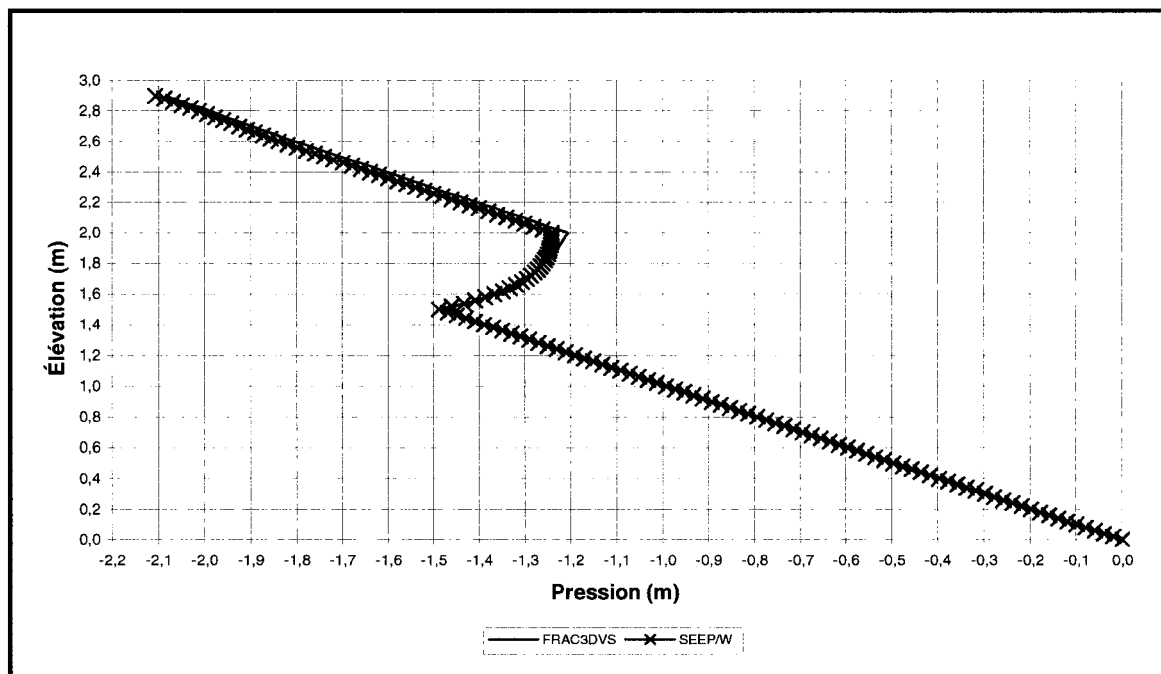


Figure 5.8 : Pressions dans la CEBC après 28 jour de drainage.

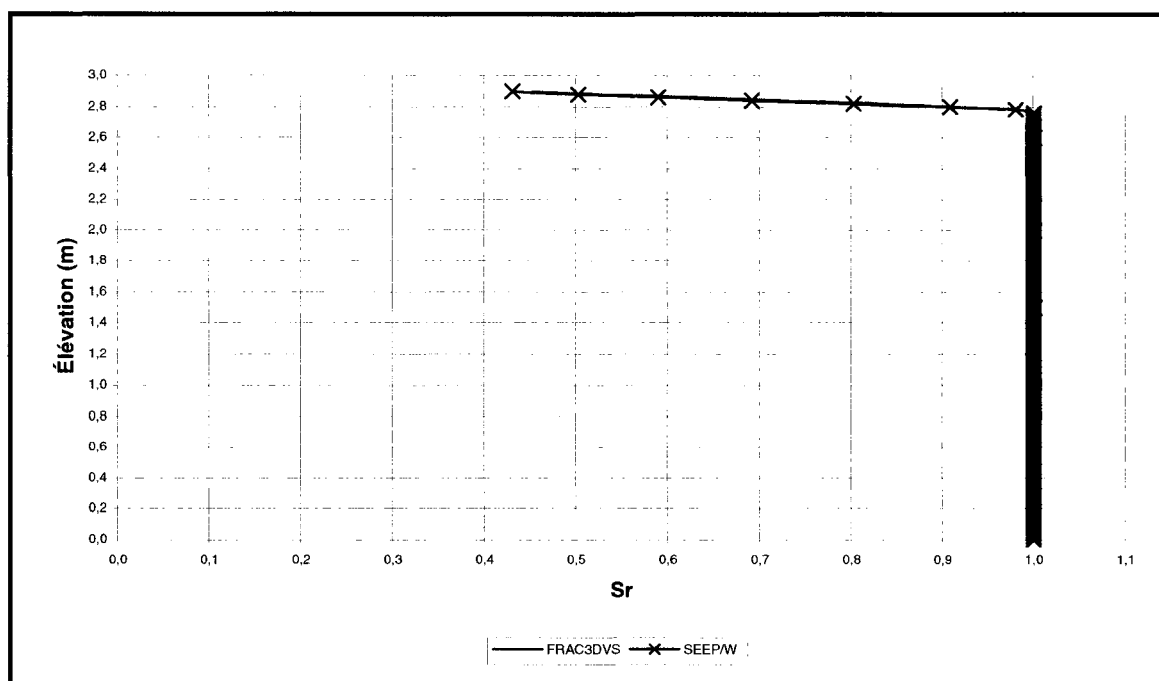


Figure 5.9 : Degrés de saturation dans la CEBC après 1 jour de drainage.

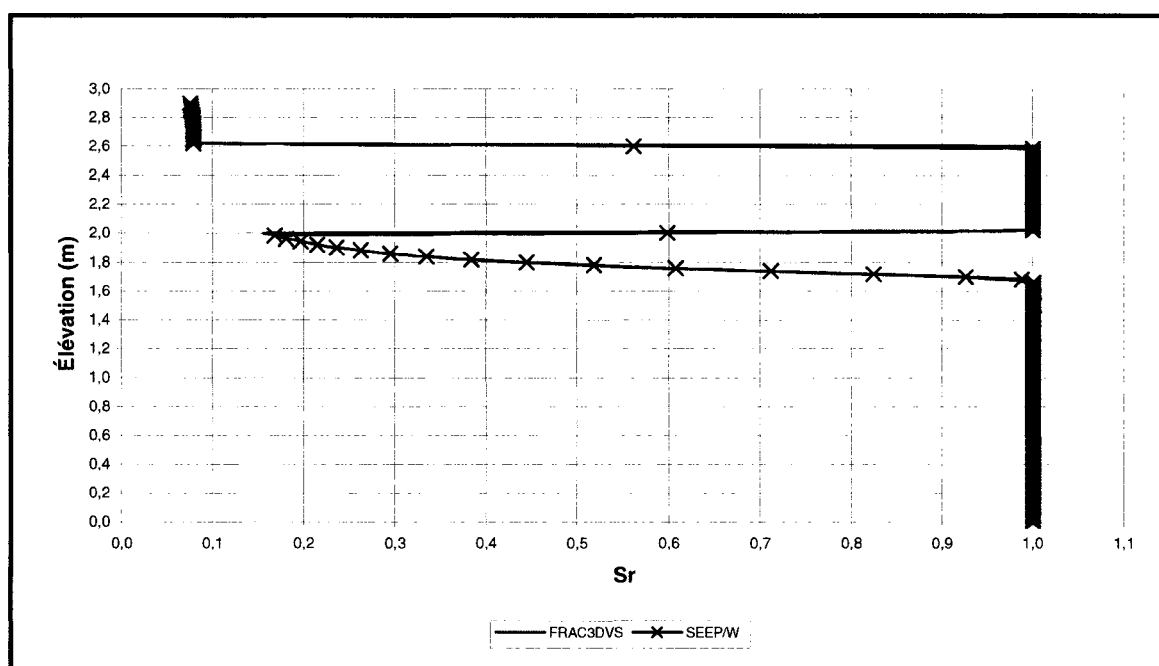


Figure 5.10 : Degrés de saturation dans la CEBC après 7 jours de drainage.

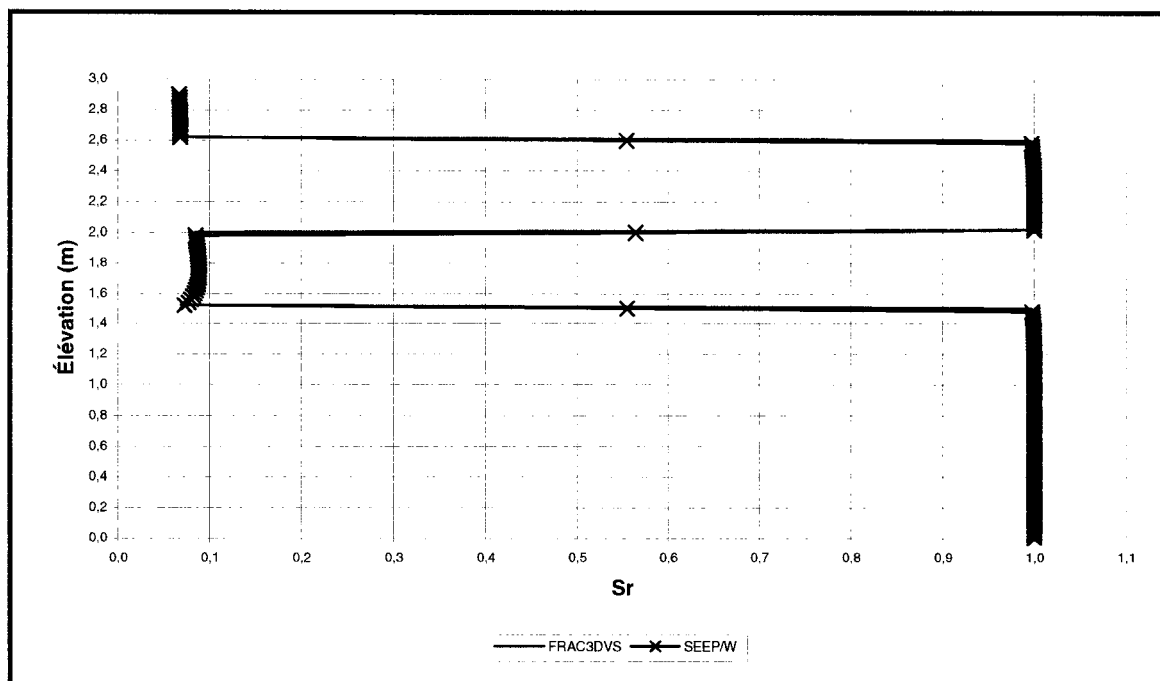


Figure 5.11 : Degrés de saturation dans la CEBC après 14 jours de drainage.

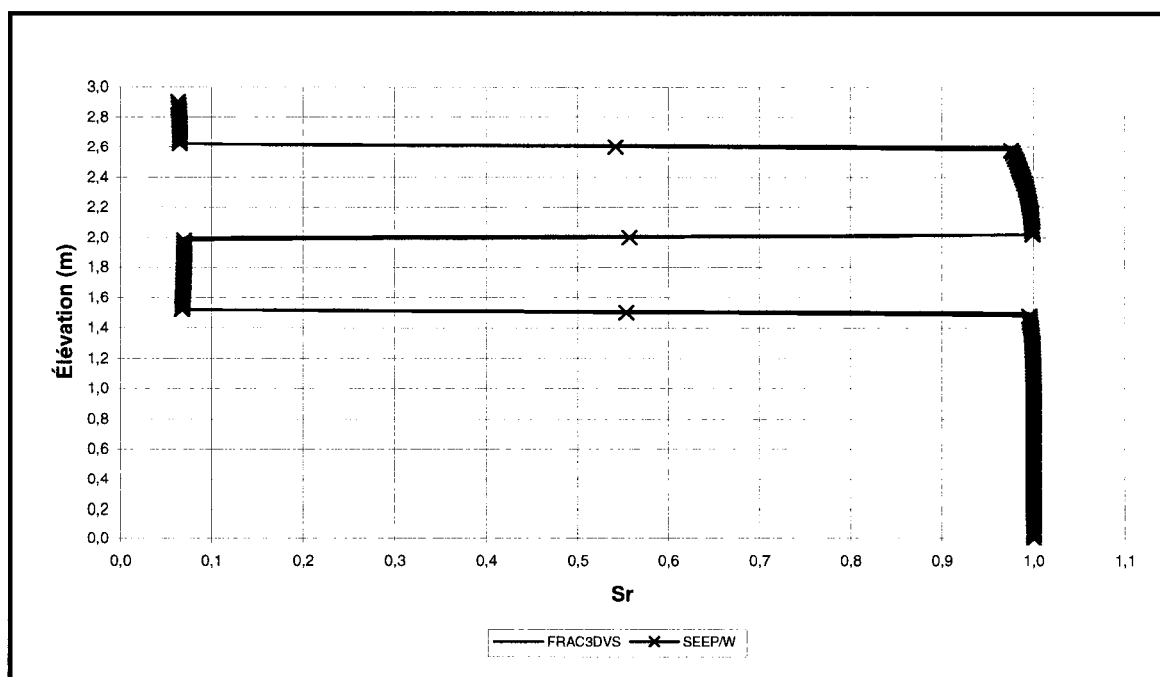


Figure 5.12 : Degrés de saturation dans la CEBC après 28 jours de drainage.

Dans les climats humides, le principe de fonctionnement d'une couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC) est de maintenir un degré de saturation élevé dans la couche centrale de matériau fin (silt). On peut ainsi limiter le transport de l'oxygène vers les rejets placés sous la couverture, comme des rejets potentiellement générateurs d'acide par exemple. Ce phénomène peut être observé aux figures 5.5 à 5.12 où le degré de saturation de la couche de silt de la CEBC demeure très élevé en tout temps, même après 28 jours de drainage. Lorsque les pressions dans la colonne sont à l'état quasi stationnaire, le degré de saturation minimal y est de plus de 95% (voir figure 5.12). Dans une CEBC, l'eau de la couche centrale de matériau fin n'est presque pas mobile en raison de la faible conductivité hydraulique de la couche sous jacente de matériau grossier faiblement saturé.

5.3 Infiltration (2D) en fosse remblayée

Le but de cette simulation était d'utiliser FRAC3DVS pour simuler un écoulement sur une géométrie plus complexe que celle utilisée dans la simulation précédente, avec en plus l'ajout de fractures. Cette simulation a permis de se familiariser avec plusieurs fonctions de FRAC3DVS et la validité de la solution numérique a bien sûr été vérifiée.

5.3.1 Description

La simulation présentée dans cette section modélise l'infiltration et le drainage d'eau de pluie dans des stériles miniers et un massif rocheux fracturé. Les stériles sont contenus dans une fosse située dans le massif fracturé et ils débordent de celle-ci en formant une halde d'une hauteur de 10m au dessus de la surface du massif. L'angle du talus de stériles est fixé à 45 degrés de même que les pentes de la fosse. Une couche d'un matériau drainant, servant de couche de ruissellement, couvre la partie supérieure du domaine (couche de 1.3m d'épaisseur). Cette méthode permettant de simuler le ruissellement a été proposée dans Apithy (2002). Le matériau drainant, les stériles et la

roche intacte sont traités comme des milieux poreux tandis que les fractures, d'ouvertures constantes égales à 0.1mm, sont modélisées de façon discrète. Les fractures sont espacées de 10m horizontalement et de 5 m verticalement à la seule exception d'une fracture horizontale plus rapprochée des autres dans la partie supérieure du massif rocheux. On simule ainsi la caractéristique que les fractures d'un massif sont généralement plus rapprochées à la surface qu'en profondeur.

Afin de simuler un écoulement en conditions non saturées, la position initiale de la nappe phréatique est fixée à 10m sous la surface du massif rocheux et à 20m sous le dessus de la halde de stériles. La simulation est effectuée en régime transitoire et porte sur une période de cinq jours. Une pluie de 5.0×10^{-6} m/s est imposée sur toute la surface supérieure du domaine à partir du début de la simulation, pour une durée de 24 heures, avant de cesser complètement. La figure 5.13 présente la géométrie du domaine de cette simulation, la position des matériaux poreux et celle de la nappe phréatique initiale. Les fractures n'y sont toutefois pas représentées.

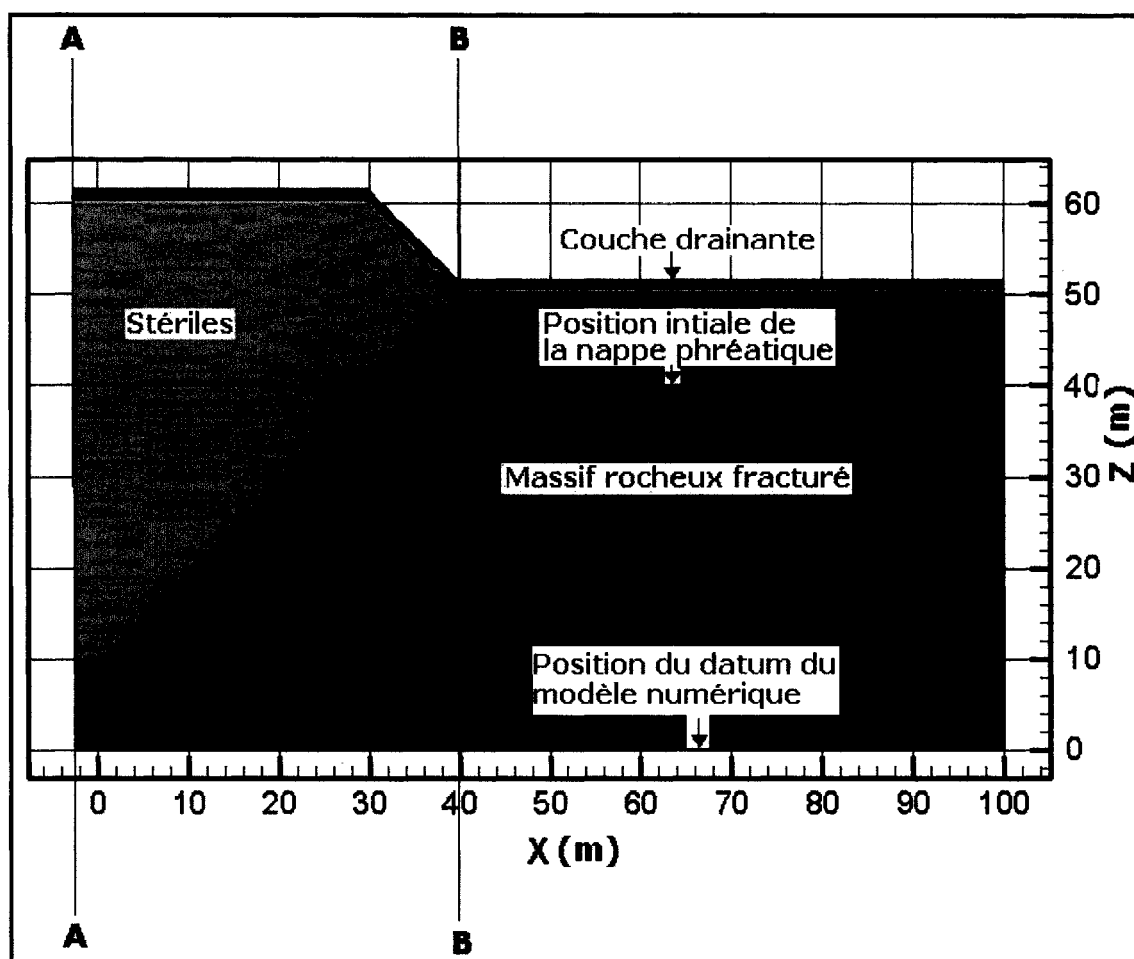


Figure 5.13 : Domaine et matériaux, simulation d'infiltration 2D en fosse remblayée.

Les dimensions de la fosse et du domaine ont été choisies pour être représentatives des géométries pouvant être rencontrées dans la pratique. Cependant, seule une moitié de la fosse est modélisée afin de réduire le nombre d'éléments impliqué et les temps de calculs en conditions non saturées (axe de symétrie AA). La frontière du domaine située le long de l'axe AA est imperméable de même que la frontière horizontale inférieure. L'eau qui s'infiltré dans la partie supérieure du domaine peut être évacuée par la frontière verticale située à $x=100\text{m}$. Les charges hydrauliques aux nœuds de cette frontière sont fixées à 40m pour toute la durée de la simulation.

Le maillage utilisé compte un total de 129 499 éléments. Ce nombre comprend les éléments des milieux poreux (éléments 3D en forme de prismes rectangulaires) et les éléments des fractures (élément 2D en forme de rectangles). Comme FRAC3DVS utilise des éléments 3D, le maillage utilisé est en trois dimensions même si l'écoulement étudié est en deux dimensions. Il n'y a qu'une seule couche d'éléments dans la direction y du maillage (perpendiculairement à la figure 5.13) et il n'y a pas d'écoulement dans cette direction. Dans le plan XZ montré à la figure 5.13, les dimensions des éléments sont de 0.2m x 0.8m sous la nappe phréatique initiale. Au dessus de cette position, les éléments sont plus petits afin de simuler l'écoulement en conditions non saturées sans problèmes de convergence. La figure 5.14 présente le maillage dans la zone supérieure du domaine située autour de l'axe BB (plan XZ) et les fractures y sont représentées.

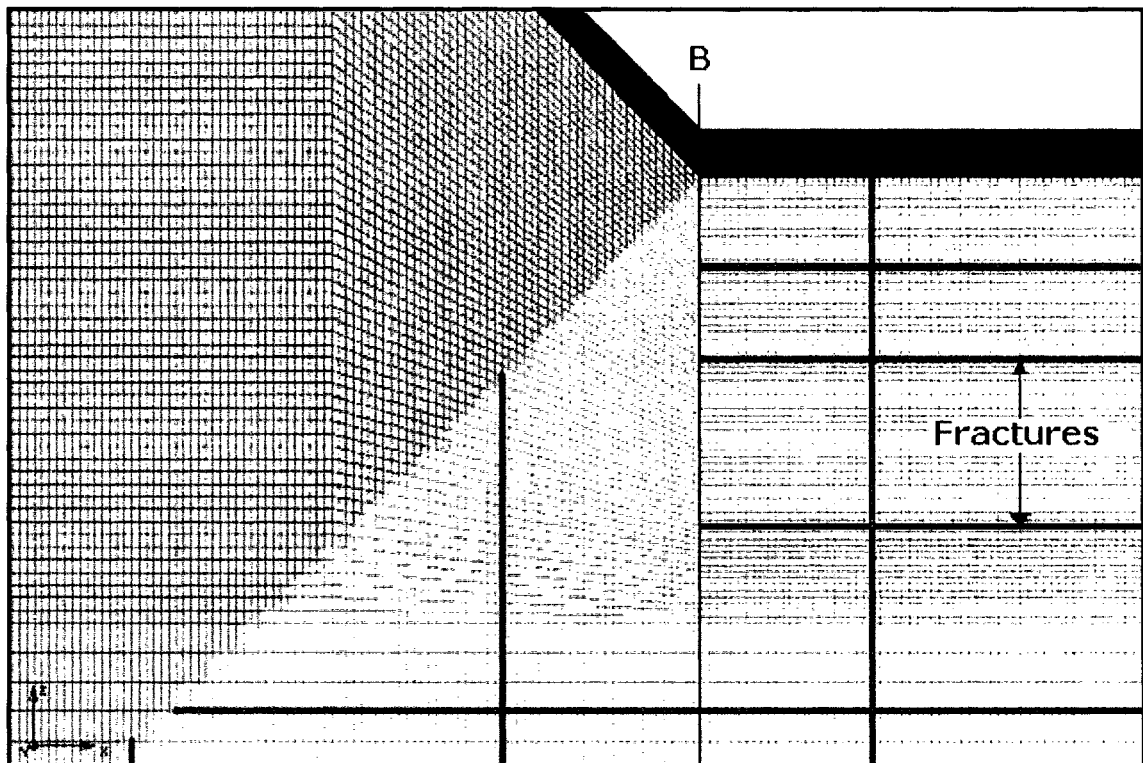


Figure 5.14 : Maillage du domaine de la fosse remblayée, partie centrale et supérieure.

Il n'est pas possible de distinguer les éléments de la couche de ruissellement à la figure 5.14 car ils sont très minces, soit 0.2m dans la direction de l'axe des x et 0.01m dans la direction de l'axe des z. Ces éléments doivent en effet être assez petits afin d'éviter les problèmes de convergence car la courbe de rétention d'eau de ce matériau est très abrupte (Apithy, 2002).

Les courbes de rétentions d'eau (CRE) et de conductivité hydraulique des matériaux de cette simulation sont présentées aux figures 5.15 et 5.16. Les trois matériaux poreux utilisés sont les roches stériles, la roche intacte et le matériau drainant formant la couche de ruissellement. Les porosités effectives de ces matériaux sont respectivement de 0.4, 0.02 et 0.3. Les propriétés hydriques attribuées aux stériles sont similaires à celles d'un silt et elles sont représentatives des valeurs pouvant être rencontrées sur le terrain (Martin, 2003). Les propriétés hydriques du matériau drainant, par contre, ne sont similaires à aucun matériau réel (Apithy, 2002). Il s'agit d'un matériau hypothétique servant à simuler le ruissellement puisque FRAC3DVS ne permet pas de tenir compte de ce phénomène physique. La couche de ruissellement permet d'accumuler les charges hydrauliques pour permettre à l'eau de s'infiltrer dans les roches stériles et le massif fracturé. La courbe de rétention d'eau du matériau drainant est comparable à celle d'un sable mais sa conductivité hydraulique demeure élevée même à faible degré de saturation. La conductivité hydraulique saturée d'un matériau servant à simuler le ruissellement ne doit pas être trop élevée par rapport à celle du matériau sous jacent. Deux ordres de grandeur de différence entre les deux permet à l'eau à la fois de s'infiltrer et d'être évacuée horizontalement. Une telle couche d'un matériau servant à simuler le ruissellement à été utilisée dans Apithy (2002). Pour la roche intacte et les fractures, n'ayant pas accès à des données réelles pour les propriétés hydriques non saturées, celles-ci ont été estimées. Les conductivités hydrauliques saturées de la roche intacte et des fractures sont toutefois réalistes. Pour la roche intacte, une conductivité hydraulique de 2.0×10^{-8} m/s correspond à une roche assez perméable et l'ouverture des fractures de 0.1mm correspond à des fractures très étroites (chapitre 3).

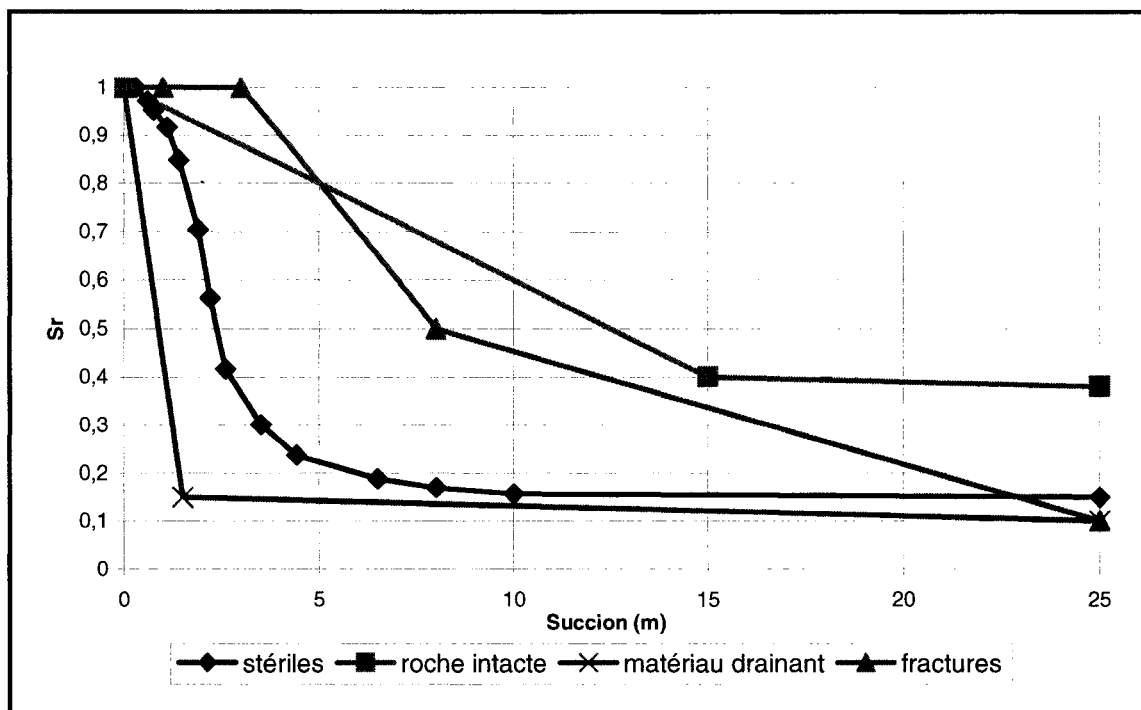


Figure 5.15 : CRE des matériaux (simulation infiltration en fosse remblayée).

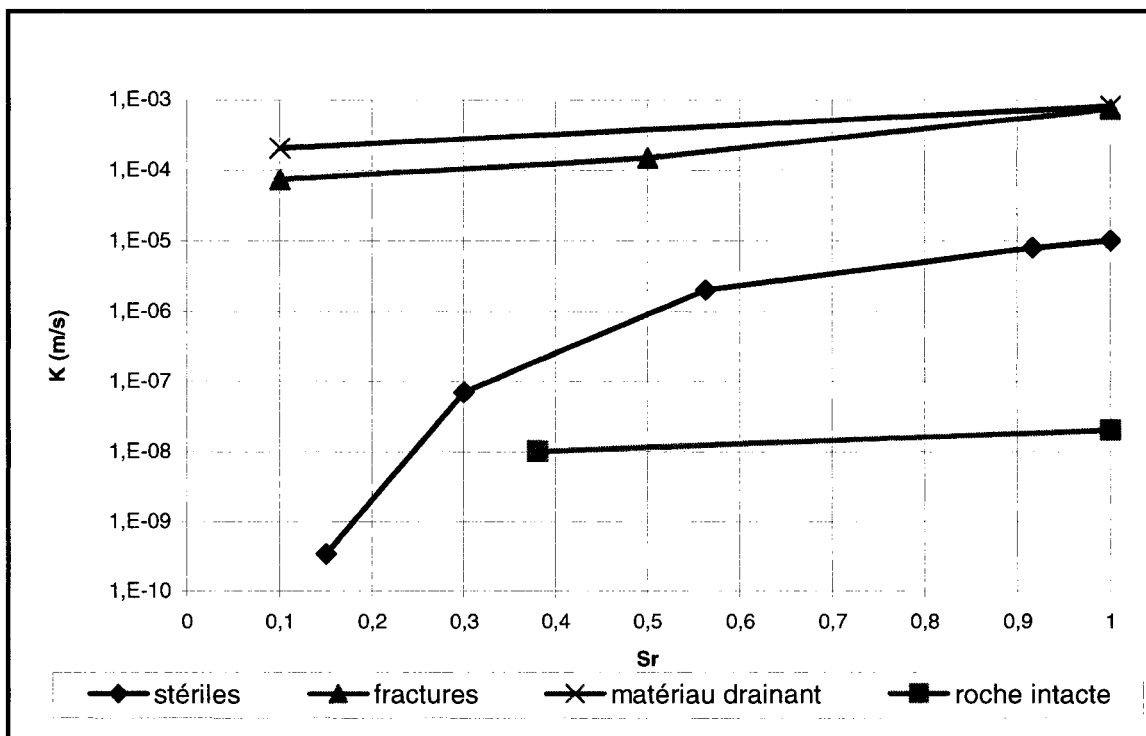


Figure 5.16 : Conductivités hydrauliques (simulation infiltration en fosse remblayée).

5.3.2 Principaux résultats

Au début de cette simulation d'infiltration en 2D, la charge hydraulique à tous les nœuds du domaine était de 40m. Cela se traduit en une nappe phréatique horizontale située à l'élévation $z=40\text{m}$ (voir figure 5.13). En conséquence, il y a au dessus de la nappe 20m de roche stériles et 10m de massif rocheux fracturé à l'état non saturé. La simulation dure un total de 5 jours. Initialement, 24 heures de précipitations sont imposées sur la frontière supérieure du domaine. Les figures 5.17 à 5.23 présentent les équipotentiels et les isocontours de degré de saturation sur le domaine après 3, 12 et 24 heures d'infiltration ainsi qu'après 3 et 5 jours d'infiltration. Ces figures montrent que l'eau des précipitations circule dans la couche de ruissellement en direction de la frontière située à $x=100\text{m}$ et qu'elle s'infiltre dans les stériles et dans le massif fracturé (l'eau circule perpendiculairement aux équipotentiels). On peut remarquer que pendant la période des précipitations, les charges hydrauliques augmentent dans la zone supérieure du domaine. Quand la pluie cesse, les pressions se dissipent à mesure que l'infiltration se poursuit. Les figures 5.17b, 5.18b, 5.19b et 5.20b permettent de constater que l'eau s'infiltre dans les stériles préférentiellement par la base du talus car c'est l'endroit où les degrés de saturation sont le plus élevés. Il en est ainsi car les succions sont toujours moins élevées à cet endroit que partout ailleurs à l'interface entre les stériles et la couche de ruissellement. Initialement, comme les charges aux nœuds du domaine sont de 40m, la succion dans les stériles en haut du talus est de 20 m et, à la base du talus, de 10m ce qui correspond à la pression d'entrée d'eau de ce matériau (voir la CRE des stériles à la figure 5.15).

Pour donner une idée de la distribution de l'eau sur le domaine après 24 heures d'infiltration, les débits par mètre d'épaisseur du domaine ont été obtenus : 60% du débit qui entre par la frontière supérieure se dirige vers les stériles et y est accumulé alors que 40% réussit à sortir par la couche de ruissellement et le massif fracturé à la frontière située à $x=100\text{m}$. Comme vérification, les débits moyens à l'intérieur des stériles (qui

ne sortent pas du domaine) ont été calculés pour s'assurer qu'ils correspondaient à la différence entre le débit entrant et le débit sortant du domaine. Les débits moyens dans les stériles (par mètre d'épaisseur du domaine) ont été calculés à l'aide des normes des vecteurs vitesses de Darcy sur des sections perpendiculaires à l'écoulement. Le bilan des débits par mètre d'épaisseur du domaine après 24 heures d'infiltration est présenté au Tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Bilan des débits moyens sur le domaine après 24 heures d'infiltration.

Zone du domaine	Débit moyen par mètre d'épaisseur, m ³ /ms	Pourcentage du débit par mètre d'épaisseur entrant
Frontière supérieure	1.066×10^{-4}	100
Zone supérieure des stériles	5.24×10^{-5}	49
Stériles base du talus	1.15×10^{-5}	11
Couche de ruissellement	3.06×10^{-5}	29
Roche intacte et fractures	1.21×10^{-5}	11

Les figures 5.17a, 5.18a, 5.19a et à 5.20a montrent que les gradients hydrauliques dans la couche de ruissellement, qui sont inversement proportionnel à l'espacement entre les équipotentiels, varient en fonction des débits (ou vitesses) qui y circulent. De façon générale, ils augmentent dans cette couche dans la direction de la frontière située à $x=100\text{m}$ sous l'effet de l'apport cumulatif en eau en provenance des précipitations. Toutefois, quand la proportion d'eau qui s'infiltre verticalement est importante, cela fait diminuer les débits (ou vitesses) dans la couche de ruissellement et, par conséquent, les gradients hydrauliques dans cette couche. Par exemple, après 3 heures de précipitations (figure 5.17a), les gradients hydrauliques diminuent dans la couche de ruissellement au dessus du massif rocheux car l'eau a déjà commencé à s'infiltrer dans les fractures. De

la même façon, après 12 et 24 heures d'averse (figures 5.18a, 5.19a et 5.20a), les gradients hydrauliques dans la couche de ruissellement diminuent à la base du talus car l'eau s'infiltre à ce moment dans les stériles de façon assez importante. Les discontinuités observées dans les équipotentiels au niveau des fractures sur ces figures indiquent que les excès de charges causés par la pluie sont dissipés préférentiellement dans les fractures.

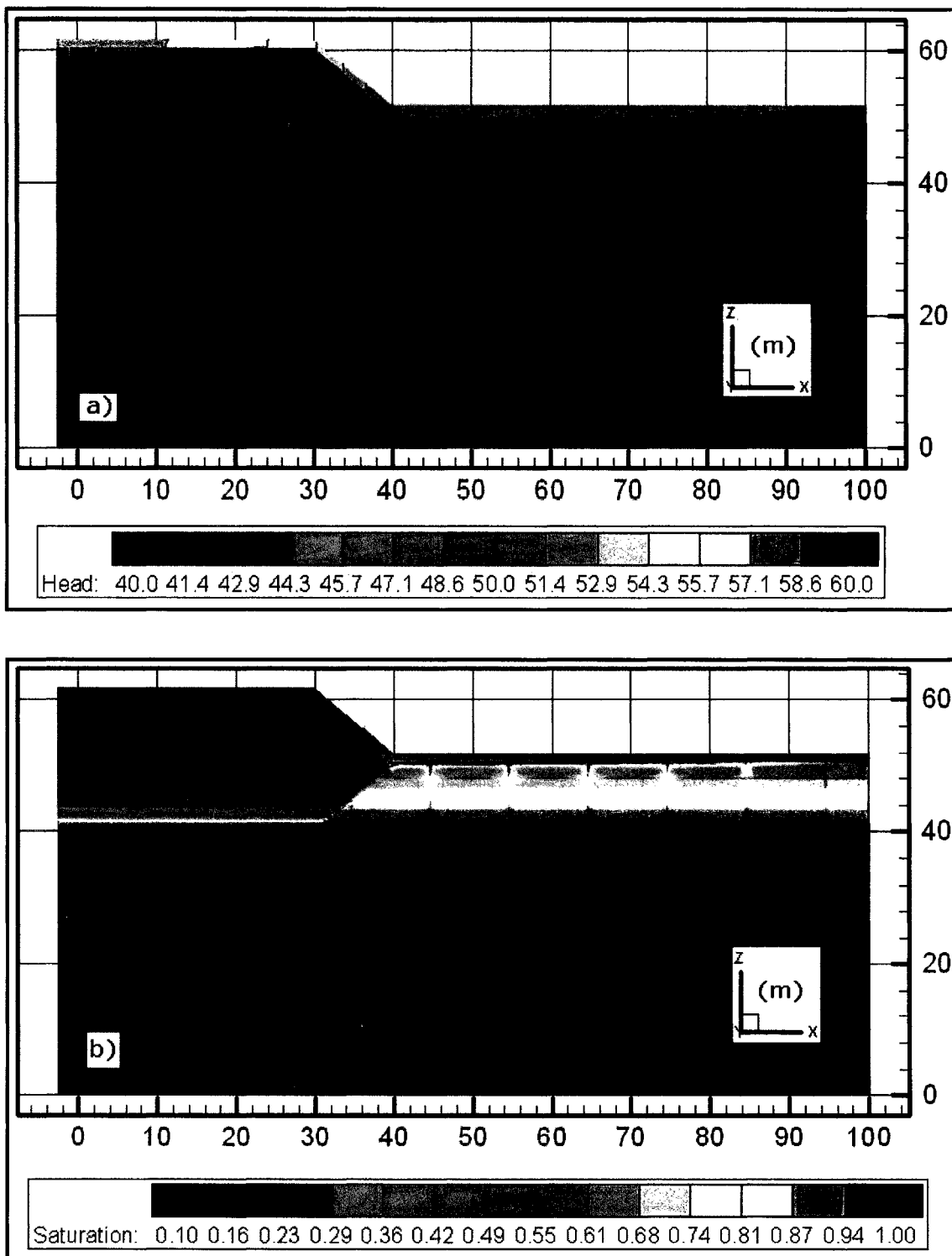


Figure 5.17: a) Équipotentiellles et b) isocontours de Sr après 3 heures d'infiltration.

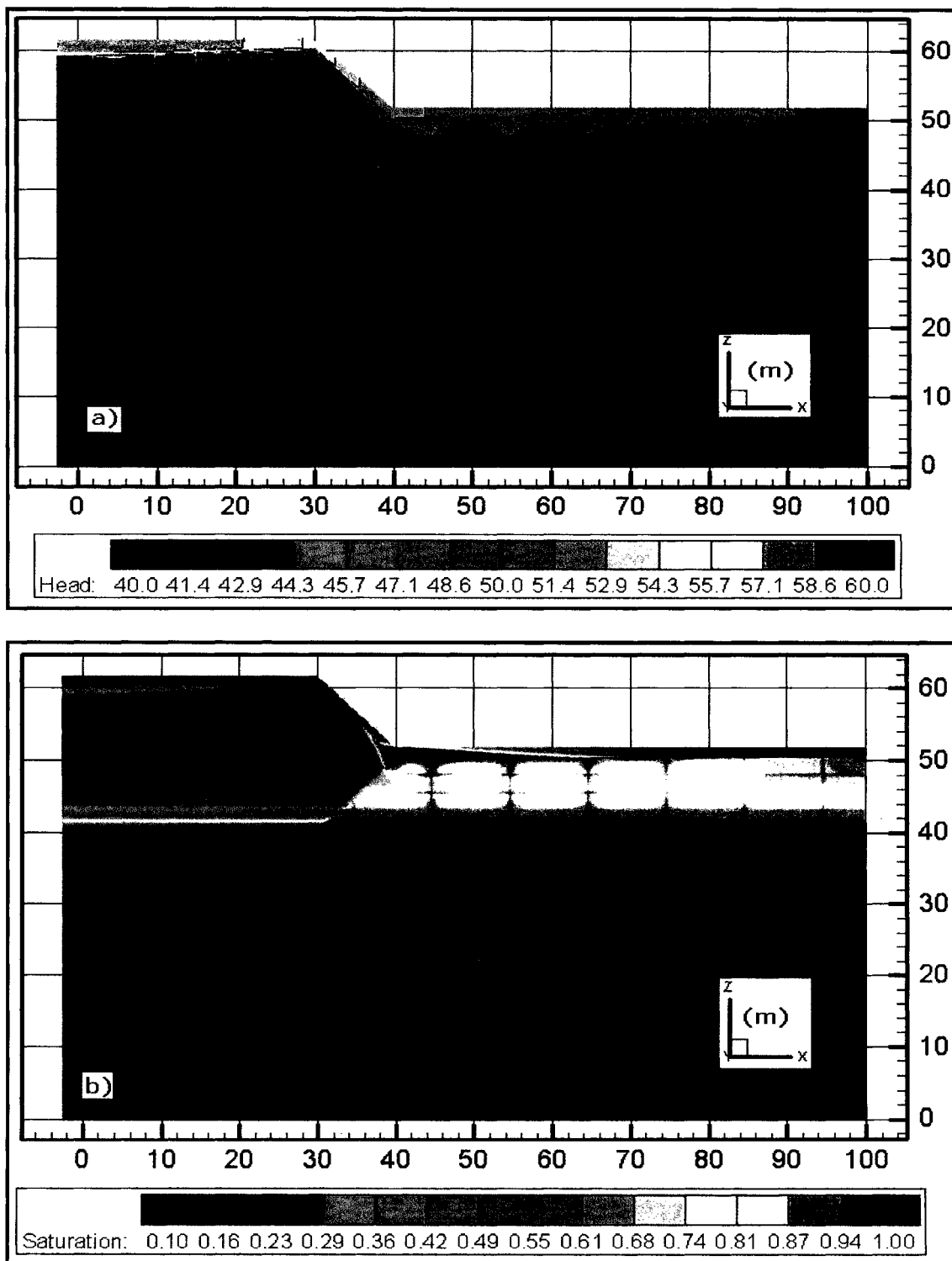


Figure 5.18 : a) Équipotentiellles et b) isocontours de S_r après 12 heures d'infiltration.

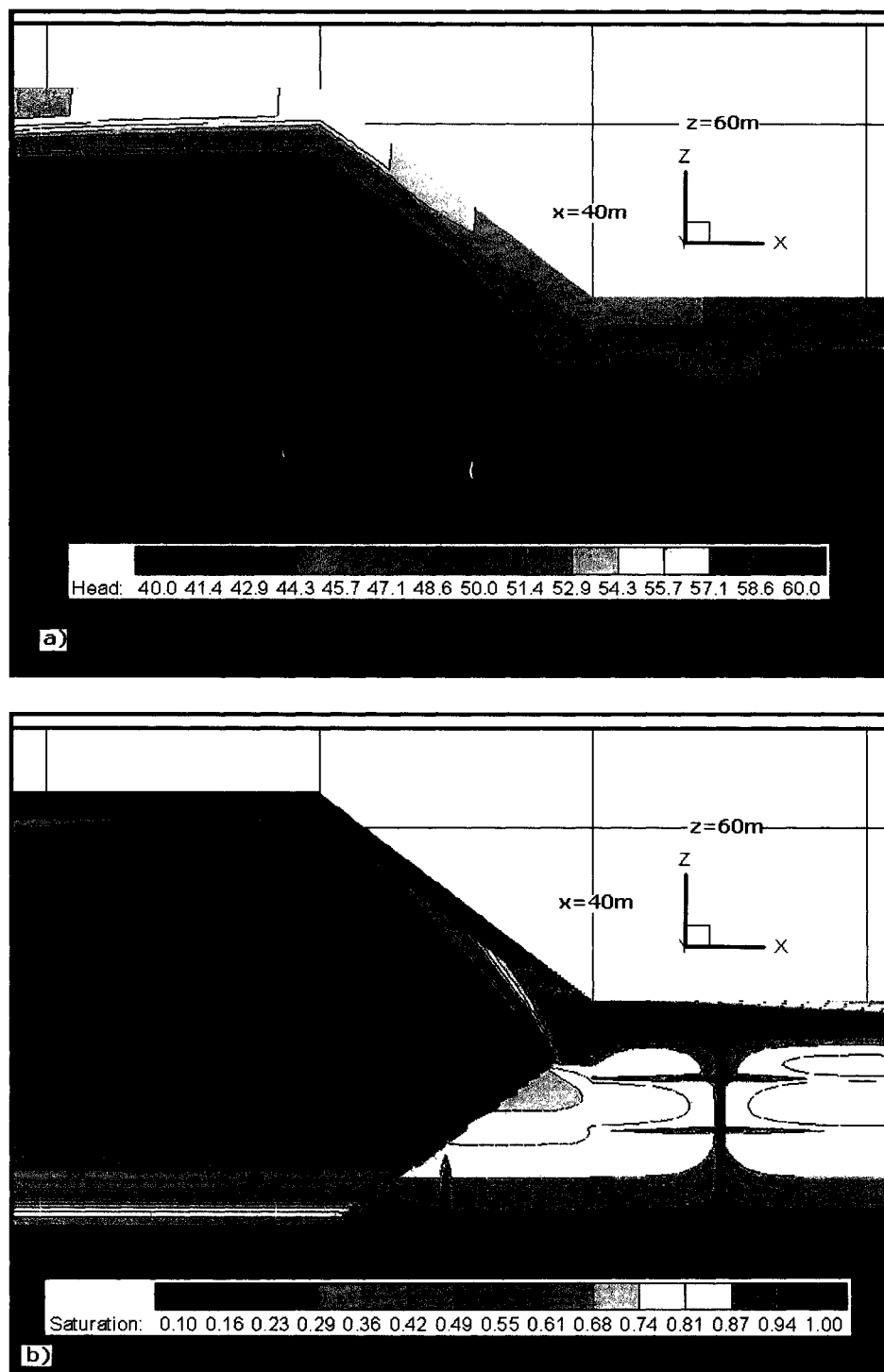


Figure 5.19 : Gros plan du talus

a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 12 heures d'infiltration.

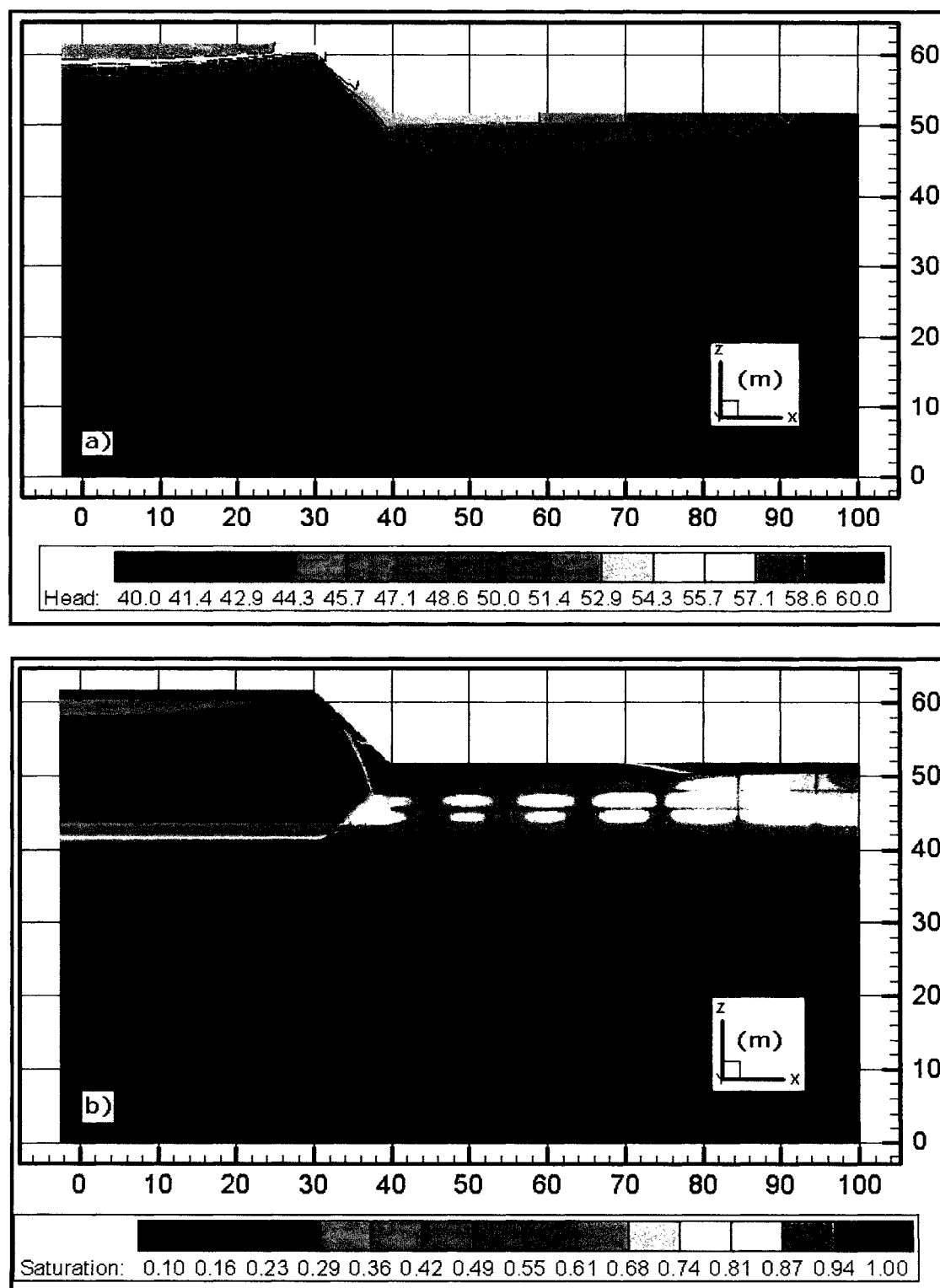


Figure 5.20 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de Sr après 24 heures d'infiltration.

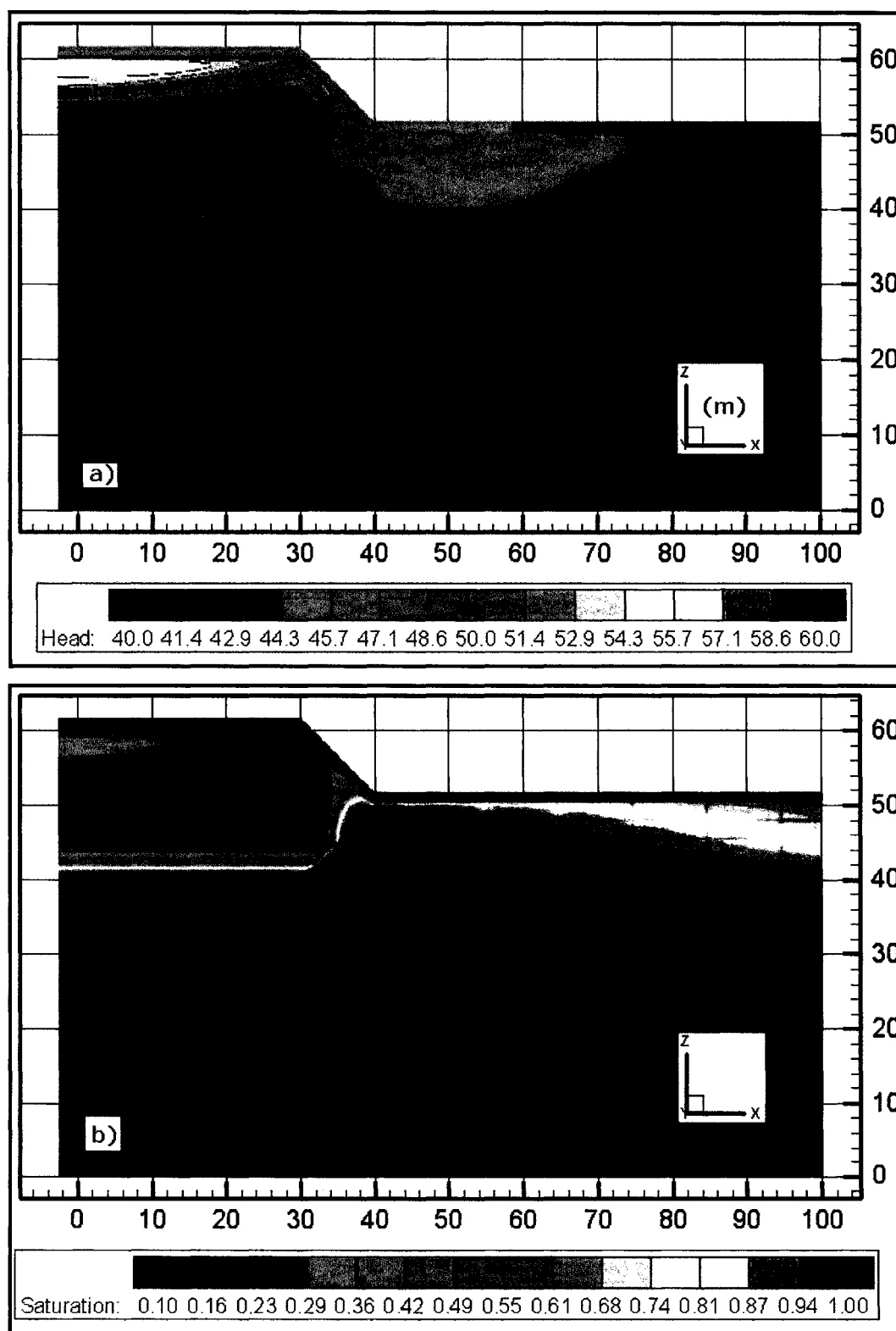


Figure 5.21 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de Sr après 3 jours d'infiltration.

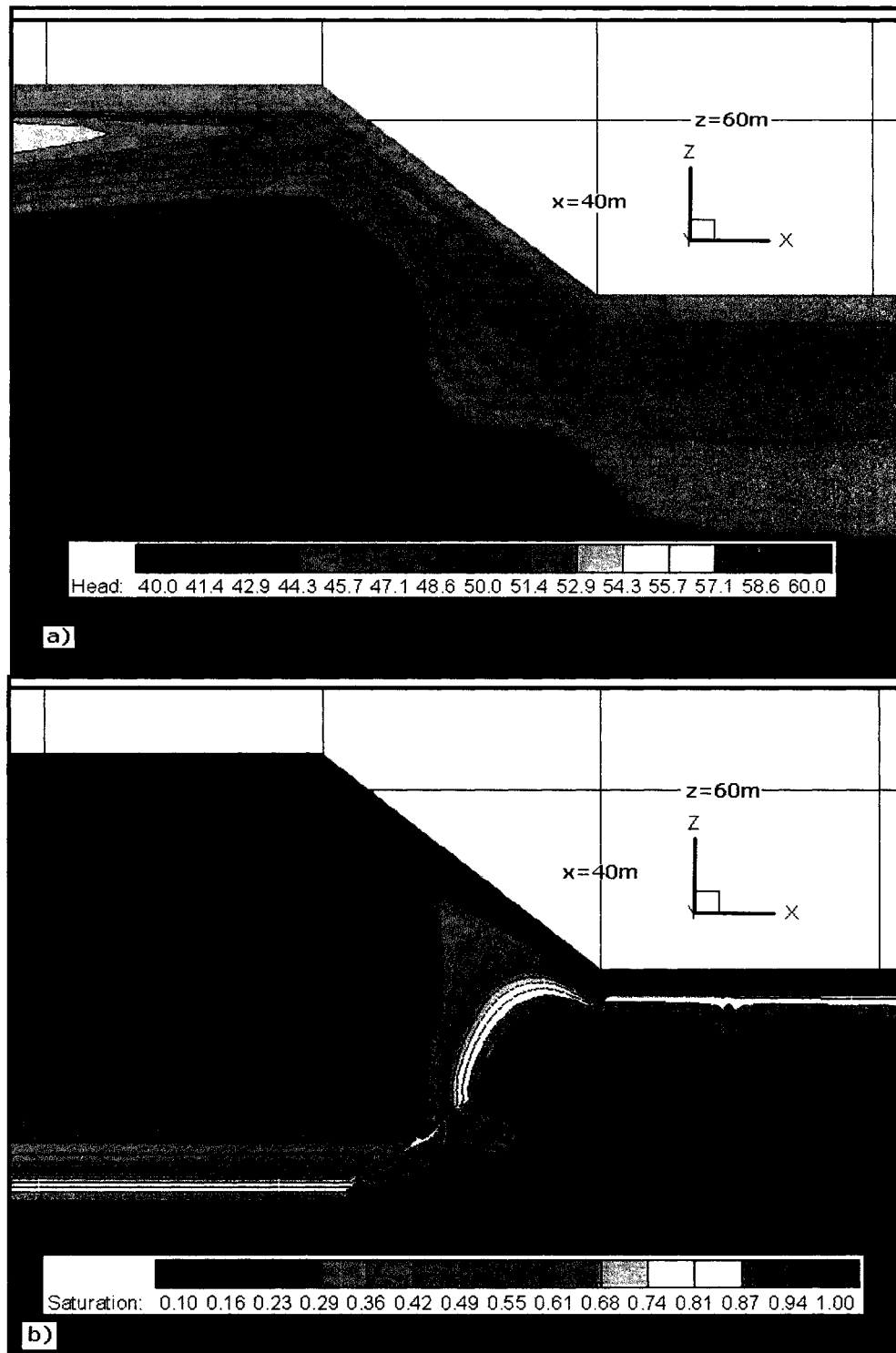


Figure 5.22 : Gros plan du talus

a) Équipotentiellles et b) Isocontours de S_r après 3 jours d'infiltration.

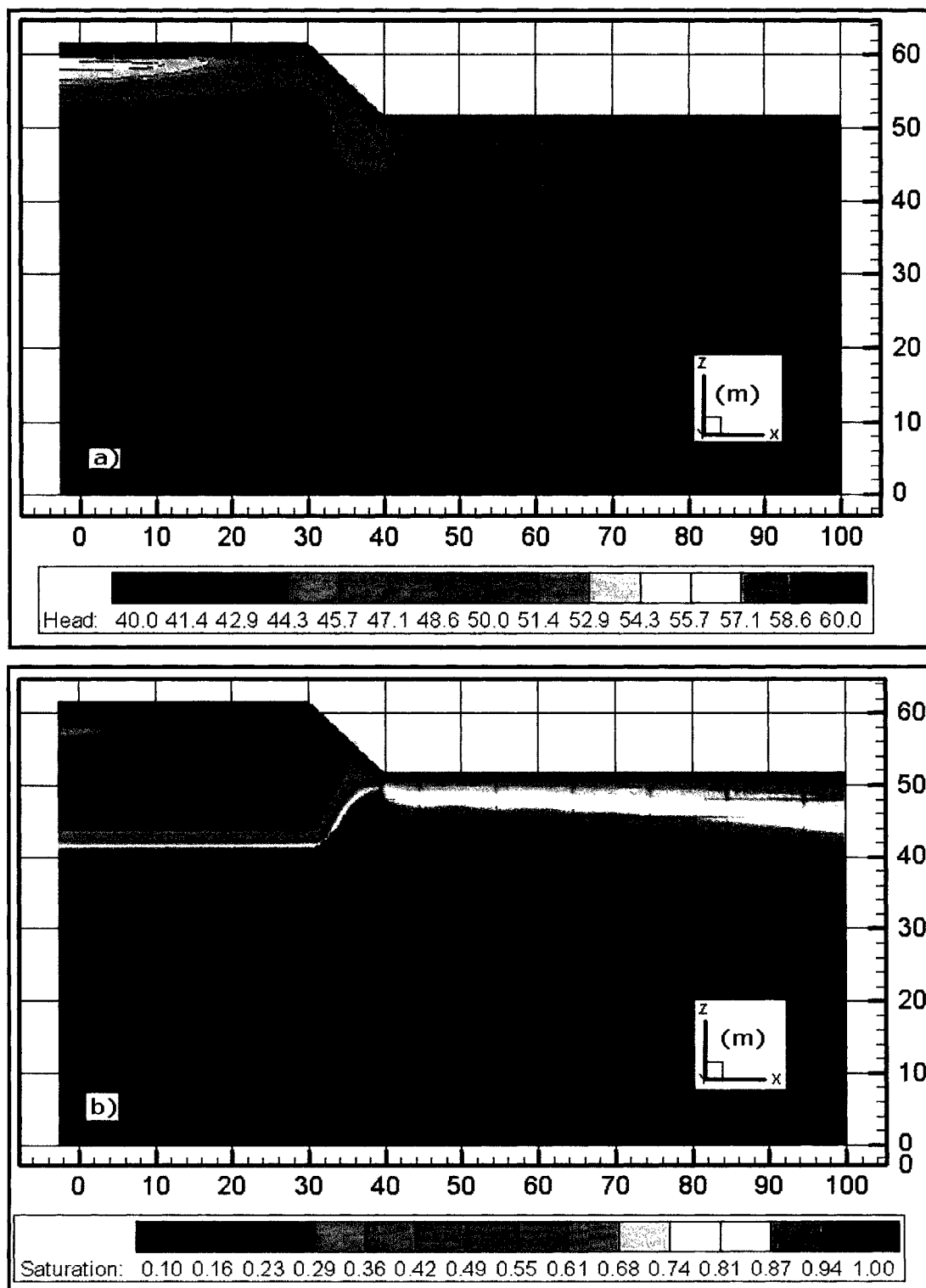


Figure 5.23 : a) Équipotentiellles et b) Isocontours de Sr après 5 jours d'infiltration.

5.3.3 Vérification des résultats

La stabilité de la solution numérique a été vérifiée par le test de convergence suggéré par Chapuis et al. (2001). Ce test vérifie que les courbes des fonctions hydriques définies dans la formulation du problème (courbe pression versus saturation et courbe saturation versus conductivité hydraulique relative) peuvent être retracées à partir des données de pression/saturation et de saturation/conductivité hydraulique relative prélevées à plusieurs points sur le domaine de la solution. Pour qu'une simulation converge vers la bonne solution, il faut que les courbes hydriques définies dans la formulation du problème et les courbes correspondantes obtenues par les données de la solution soient superposées. Toutefois, comme la conductivité hydraulique ne fait pas partie de l'ensemble des données de sortie de FRAC3DVS, le test n'a été réalisé qu'à moitié, soit par la vérification de la superposition des courbes de rétention d'eau seulement. Cette omission a été jugée acceptable puisque FRAC3DVS détermine la perméabilité relative de façon explicite à chaque itération, c'est-à-dire qu'il retourne à la fonction de perméabilité relative introduite dans la définition du problème à chaque itération et qu'il a donc peu de chances d'en dévier.

Les figures 5.24 à 5.27 présentent les graphiques où sont comparées les valeurs sources de la courbe de rétention d'eau et les données du domaine pour les quatre matériaux de cette simulation d'infiltration 2D en fosse. La corrélation est presque parfaite entre les données sources et les données du domaine pour la roche intacte, les fractures et le matériau drainant (figures 5.24 à 5.26) et est très bonne pour les stériles (figure 5.27). Dans le cas des stériles, l'écart maximal est de 12% sur la valeur du degré de saturation. Cet écart a été observé après un jour de pluie dans la zone sous la pente du talus.

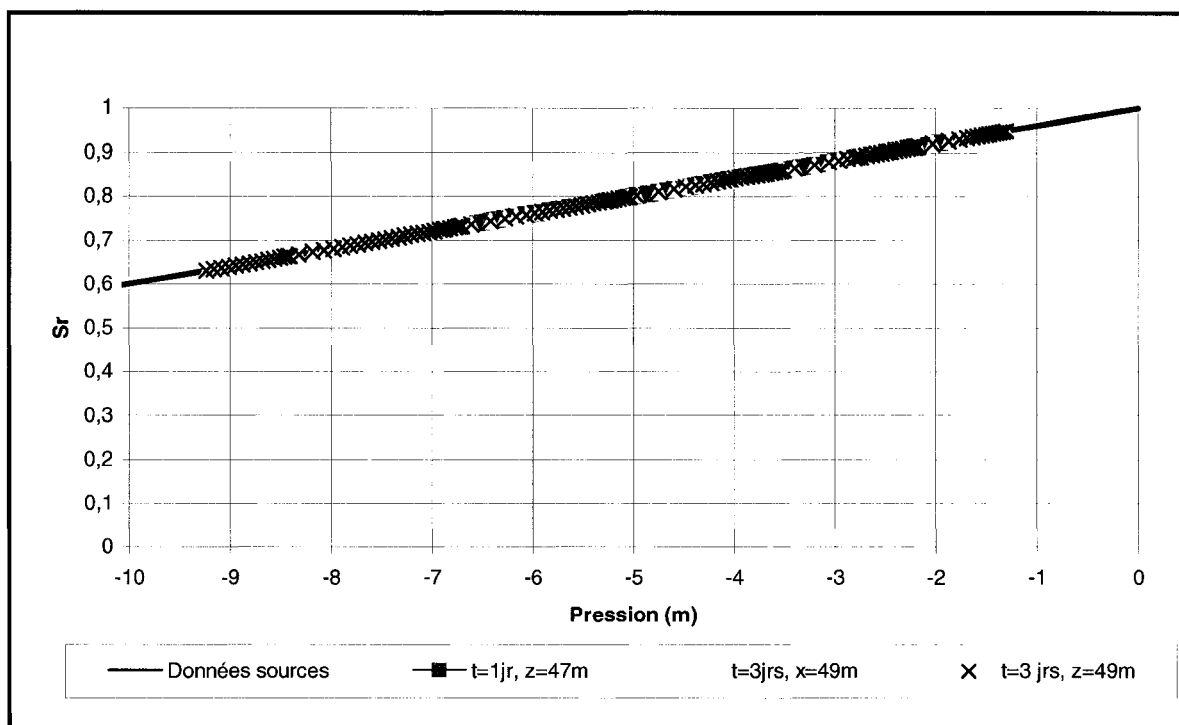


Figure 5.24 : Graphique de vérification de la CRE de la roche intacte.

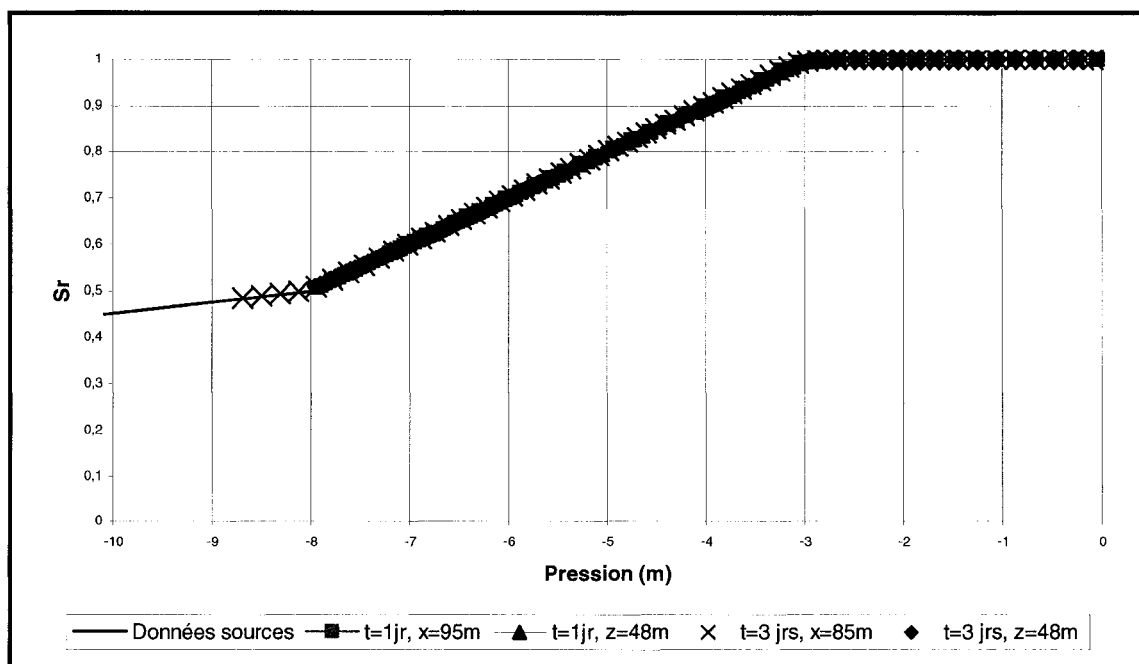


Figure 5.25 : Graphique de vérification de la CRE des fractures.

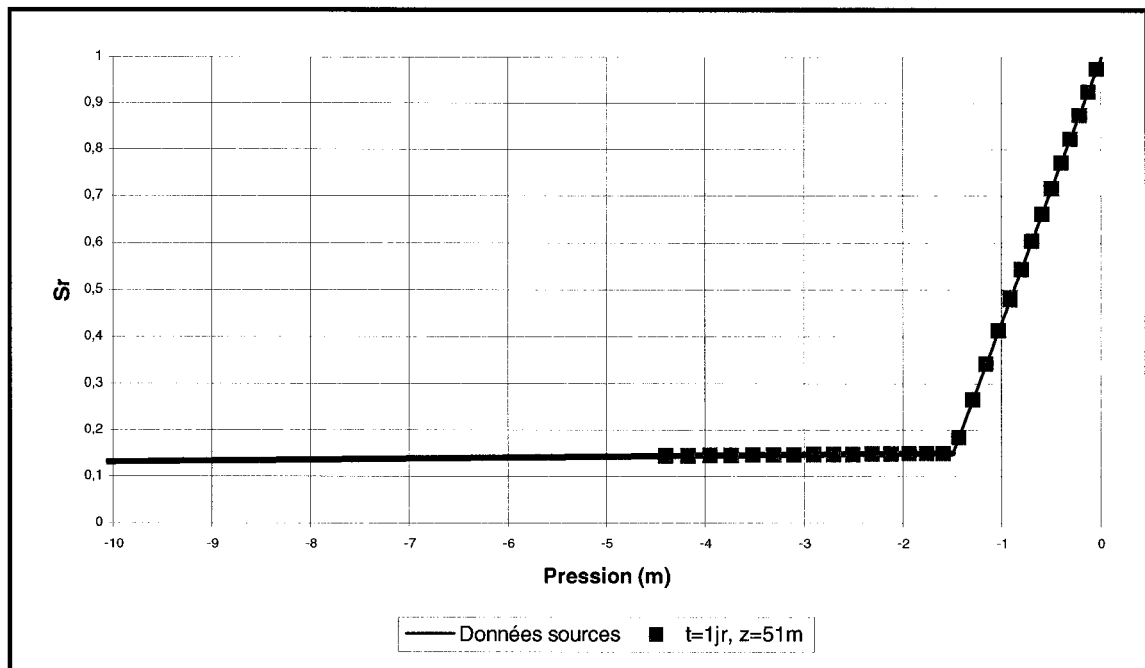


Figure 5.26 : Graphique de vérification de la CRE du matériau drainant.

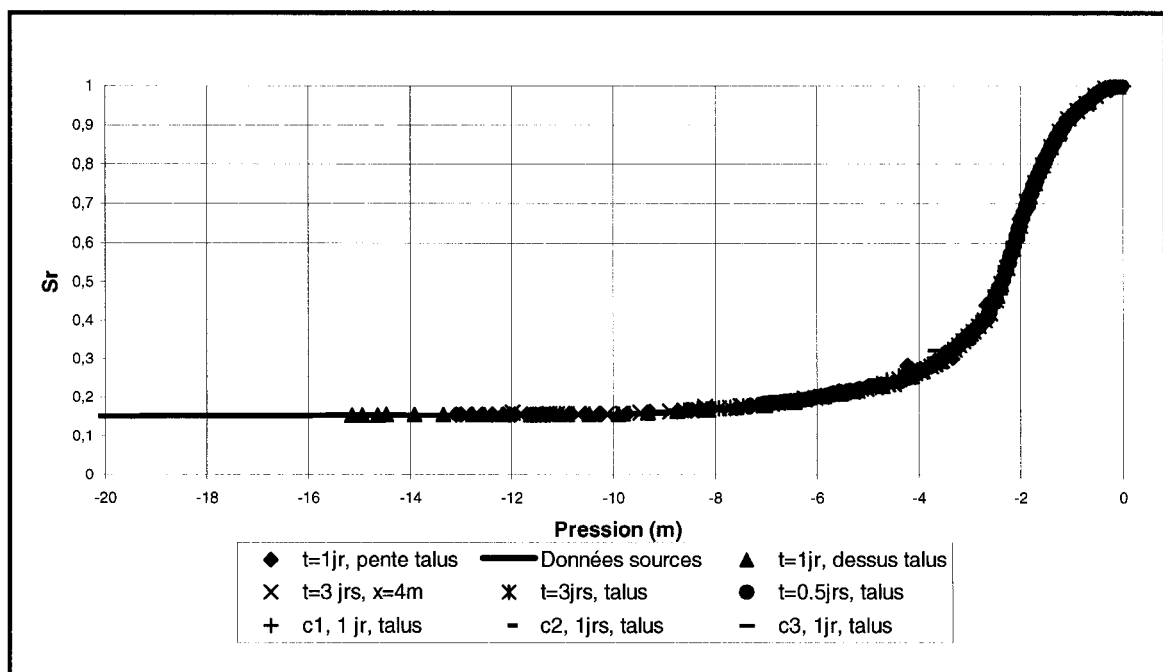


Figure 5.27 : Graphique de vérification de la CRE des stériles.

5.4 Discussion

Préalablement aux applications et vérifications présentés dans ce chapitre, les concepteurs de FRAC3DVS avaient également effectué des vérifications du logiciel afin de démontrer qu'il donnait des résultats satisfaisants. Deux de ces vérifications sont présentées dans Therrien et Sudicky (1996). La première consiste en une simulation 2D d'écoulement et de transport en conditions saturées. Le domaine comprend un réseau complexe de fracture représentées discrètement dans une matrice d'argile. La deuxième vérification consiste en un drainage vertical d'un domaine de tuf fracturé (représentation discrète des fractures). Ces cas ont été étudiés afin d'apprendre les caractéristiques du logiciel.

La simulation du drainage 1D d'une CEBC ainsi que la vérification des résultats ont été réalisées assez facilement (section 5.2). Néanmoins, certaines difficultés ont été rencontrées avec la simulation d'infiltration 2D en fosse remblayée (section 5.3). Il n'a pas été facile de faire converger cette simulation ni d'en interpréter les résultats. Plusieurs tentatives ont dûes être réalisées avant que cela ne donne des résultats jugés satisfaisants. La taille des éléments, celle des pas de temps et la forme des fonctions hydriques ont dûes être ajustées à plusieurs reprises avant de faire converger la simulation. De plus, les temps de calcul qui étaient très longs n'ont pas facilité les opérations. Le temps de calcul d'une simulation dépend de la mémoire vive et du CPU de l'ordinateur mais également du nombre d'éléments du maillage, des critères de convergence et des pas de temps utilisés dans la définition du problème. Pour cette simulation, le temps de calcul a été de 4.8 heures avec un ordinateur ayant 512Mo de mémoire vive et un CPU Pentium 4 de 2.4 GHz. Le critère de convergence était une différence maximale de 0.01m sur les charges hydrauliques aux nœuds entre deux itérations successives. La taille des pas de temps était variable d'une itération à l'autre et s'ajustait en fonction des variations du degré de saturation aux nœuds par l'emploi de la fonction «*adaptive timesteps*» de FRAC3DVS. L'écart maximum sur le degré de saturation aux nœuds entre deux itérations a été fixé à 0.1%; à une itération donnée, si le

degré de saturation d'un seul élément du domaine est différent de plus de 0.1% par rapport à celui calculé au pas de temps précédent, le pas de temps est réduit d'un facteur de deux, sinon il est augmenté d'un facteur de deux.

Il y a aussi eu une certaine confusion lors de l'analyse des résultats de cette simulation en raison d'une difficulté d'utilisation de FRAC3DVS. Il semble qu'il y ait une inversion au niveau des valeurs des vitesses en x et en y lorsque le maillage est généré par la fonction «*generate layer from slice*», fonction utilisée pour générer le maillage de cette simulation. Dans le cas des simulations présentées au chapitre suivant (chapitre 6), les maillages ont été construits par la fonction «*generate blocks interactive*» et cette inversion des valeurs des vitesses en x et en y n'a pas été observée. Pour la simulation d'infiltration 2D en fosse du chapitre 5, lorsque les vecteurs vitesses étaient visualisés dans Tecplot en même temps que les équipotentiels, les résultats n'étaient pas cohérents. Par exemple, dans la couche de ruissellement, les composantes en y des vecteurs vitesse étaient de plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles en x. Cela était incompatible avec les conditions aux frontières qui imposaient un écoulement 2D dans le plan xz. De plus, les vecteurs vitesse étaient parallèles aux équipotentiels dans la couche de ruissellement. Dans Tecplot, en sélectionnant V_y , V_x et V_z pour visualiser les composantes en x, y et z des vecteurs vitesse (inversion des vitesses en x et en y), ces problèmes d'orientation et d'ordre de grandeur disparaissent. Comme vérification additionnelle, la vitesse en x dans la couche de ruissellement a été calculée à quelques endroits à partir des gradients fournis par FRAC3DVS et de la conductivité hydraulique. Ces valeurs calculées manuellement correspondaient exactement aux résultats des composantes en y des vitesses donnés par FRAC3DVS et c'est ainsi que l'hypothèse de l'inversion des vitesses en x et en y a été émise.

Une autre difficulté d'utilisation de FRAC3DVS, rencontrée lors de la simulation d'infiltration 2D en fosse remblayée, a fait en sorte qu'il n'a pas été possible de prolonger jusqu'aux stériles les trois fractures horizontales situées immédiatement sous

le matériau drainant dans la région où le maillage est incliné (à gauche de l'axe B sur la figure 5.14). Il a été tenté de créer des fractures parallèles à l'inclinaison du maillage à cet endroit mais sans succès. Dans ce cas, la fonction permettant de sélectionner les faces des éléments (*«choose faces block by layer»*) avant de créer des fractures ne semblait pas fonctionner. Toutefois, lorsque les côtés des éléments du maillage étaient orthogonaux cette fonction s'utilisait très bien.

Il est possible de créer des fractures obliques avec FRAC3DVS. Il faut que le maillage soit régulier (éléments de mêmes dimensions) et que les côtés des éléments soient orthogonaux. Dans ce cas, les fractures passent à travers les nœuds des éléments (prismes rectangulaires) et il y a six possibilités d'orientation pour les fractures. Les quotients longueur sur largeur, longueur sur hauteur et hauteur sur largeur des éléments déterminent l'inclinaison des fractures qu'il est possible de créer. Cet aspect doit être pris en compte lors de la création du maillage si des fractures obliques sont incluses dans le modèle d'écoulement.

Toujours au sujet des fractures, celles-ci ont été considérées d'ouverture constantes dans la simulation d'infiltration 2D en fosse remblayée bien qu'il eut été possible, avec FRAC3DVS, de représenter des fractures d'ouvertures différentes. Par exemple, il aurait été possible de simuler une diminution progressive de l'ouverture avec la profondeur. En ce qui concerne les propriétés hydriques des fractures en conditions non saturées, il existe très peu d'outils pour les mesurer et très peu d'informations à ce sujet car c'est un domaine très récent de recherche. Cet aspect n'a donc pas été considéré ici.

Finalement, cette analyse (infiltration 2D en fosse remblayée) a été réalisée pour des conditions de contraintes constantes dans le massif rocheux. En effet, le modèle inclus dans FRAC3DVS ne tient pas compte du couplage hydromécanique existant dans la réalité. C'est-à-dire qu'il ne tient pas compte du lien existant entre les propriétés hydriques des fractures et le niveau de contraintes effectives. De plus, dans la zone non

saturée, le modèle inclus dans FRAC3DVS considère l'air comme à la pression atmosphérique constante.

Le chapitre 5 a permis de présenter les applications préliminaires et les vérifications faites des résultats de FRAC3DVS pour deux modèles d'écoulement en conditions non saturées et en régime transitoire. Il s'agit du cas du drainage 1D d'une CEBC et du cas de l'infiltration 2D dans fosse remblayée par des stériles miniers. Les résultats présentés ont démontré que FRAC3DVS permet de simuler adéquatement ces situations particulières. Suite à ces applications préliminaires de FRAC3DVS, le logiciel a été utilisé pour réaliser une étude paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable. Les résultats de cette analyse sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE VI – ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA TECHNIQUE DE L'ENVELOPPE PERMÉABLE

La technique de l'enveloppe perméable est d'une méthode environnementale d'entreposage en fosse des rejets miniers. Son mode de fonctionnement a été décrit au chapitre 2. Ce chapitre présente les résultats de plusieurs simulations numériques visant à étudier l'efficacité de cette technique pour réduire les débits à l'intérieur d'une fosse. Toutes les simulations ont été réalisées pour un écoulement 2D, en régime permanent et en conditions saturées. La première partie du chapitre présente les résultats des simulations du cas de base (cas de référence) tandis que la deuxième partie présente les résultats d'une analyse paramétrique.

6.1 Cas de base

6.1.1 Description des simulations

Le cas de base étudié est une fosse 3D possédant la géométrie suivante : l'ouverture est carrée et de 100m de côté, la profondeur est de 73m et les pentes sont à 45 degrés. L'enveloppe perméable de gravier est d'une épaisseur constante de 5.6m, sur les parois de la fosse, et sa conductivité hydraulique est de 1.0×10^{-3} m/s. Des stériles miniers sont entreposés dans la fosse et ont une conductivité hydraulique de 1.0×10^{-5} m/s. Les fractures du massif ont une ouverture de 0.1mm et sont espacées de 10m horizontalement et verticalement. La conductivité hydraulique de la roche intacte, située entre les fractures, est de 2.0×10^{-8} m/s. L'écoulement à travers cette fosse remblayée tridimensionnelle a été estimé par l'analyse de deux modèles bidimensionnels. Le premier est un modèle horizontal qui constitue une vue en plan de la fosse 3D à l'élévation de surface. Le deuxième modèle est vertical et représente une vue en section de la fosse située au centre de celle-ci parallèlement au gradient hydraulique

régional. Les fractures du massif rocheux sont représentées discrètement et modélisées comme des plaques parallèles, tandis que la roche intacte, les stériles et le matériau de l'enveloppe perméable sont modélisés comme des milieux poreux isotropes. La figure 6.1 présente la position des matériaux poreux dans le domaine de la fosse vue en plan et, la figure 6.2, la position des fractures. Le domaine de la fosse vue en section et les fractures y étant associées sont présentés respectivement aux figures 6.3 et 6.4.

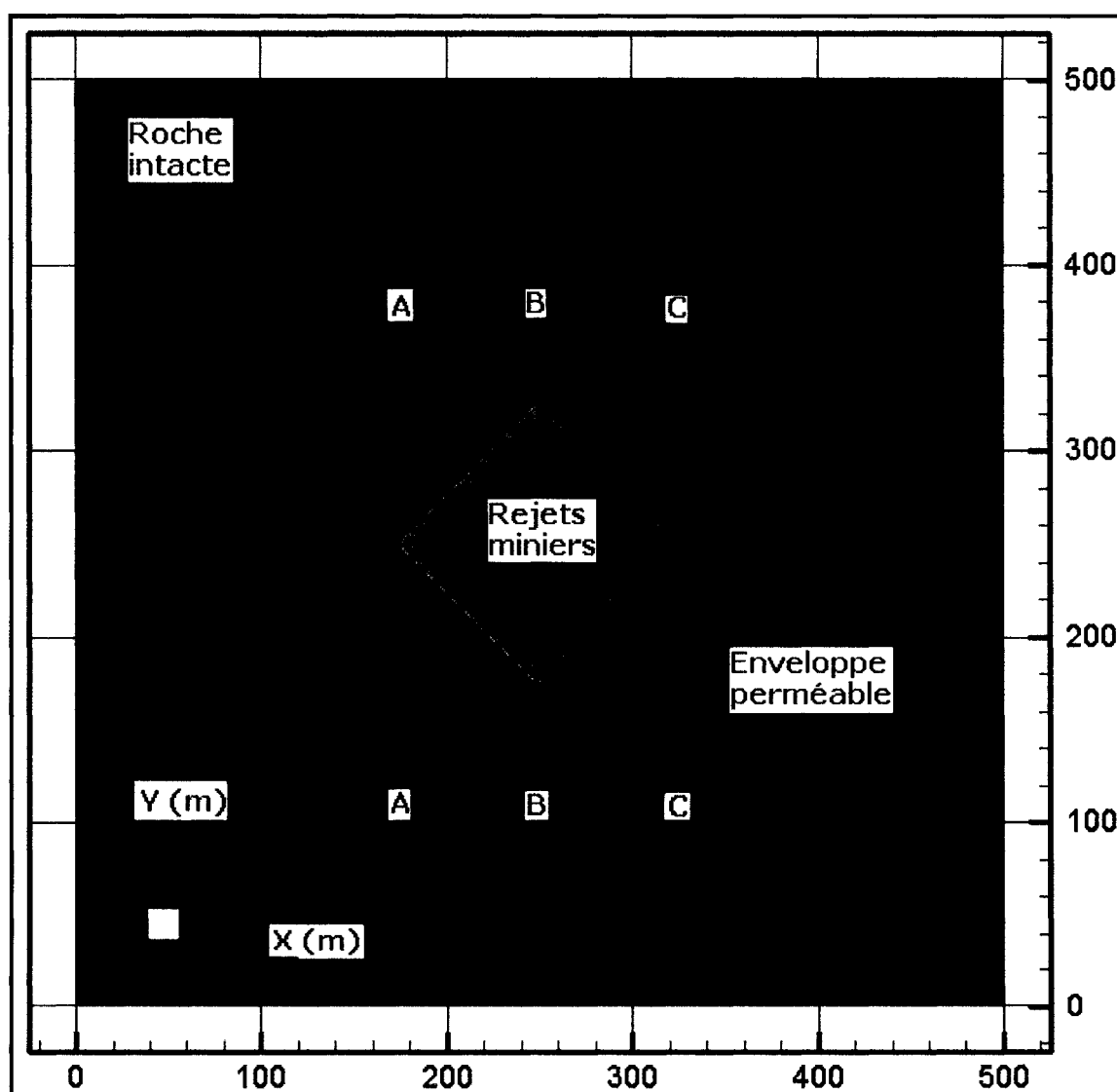


Figure 6.1 : Domaine de la fosse vue en plan.

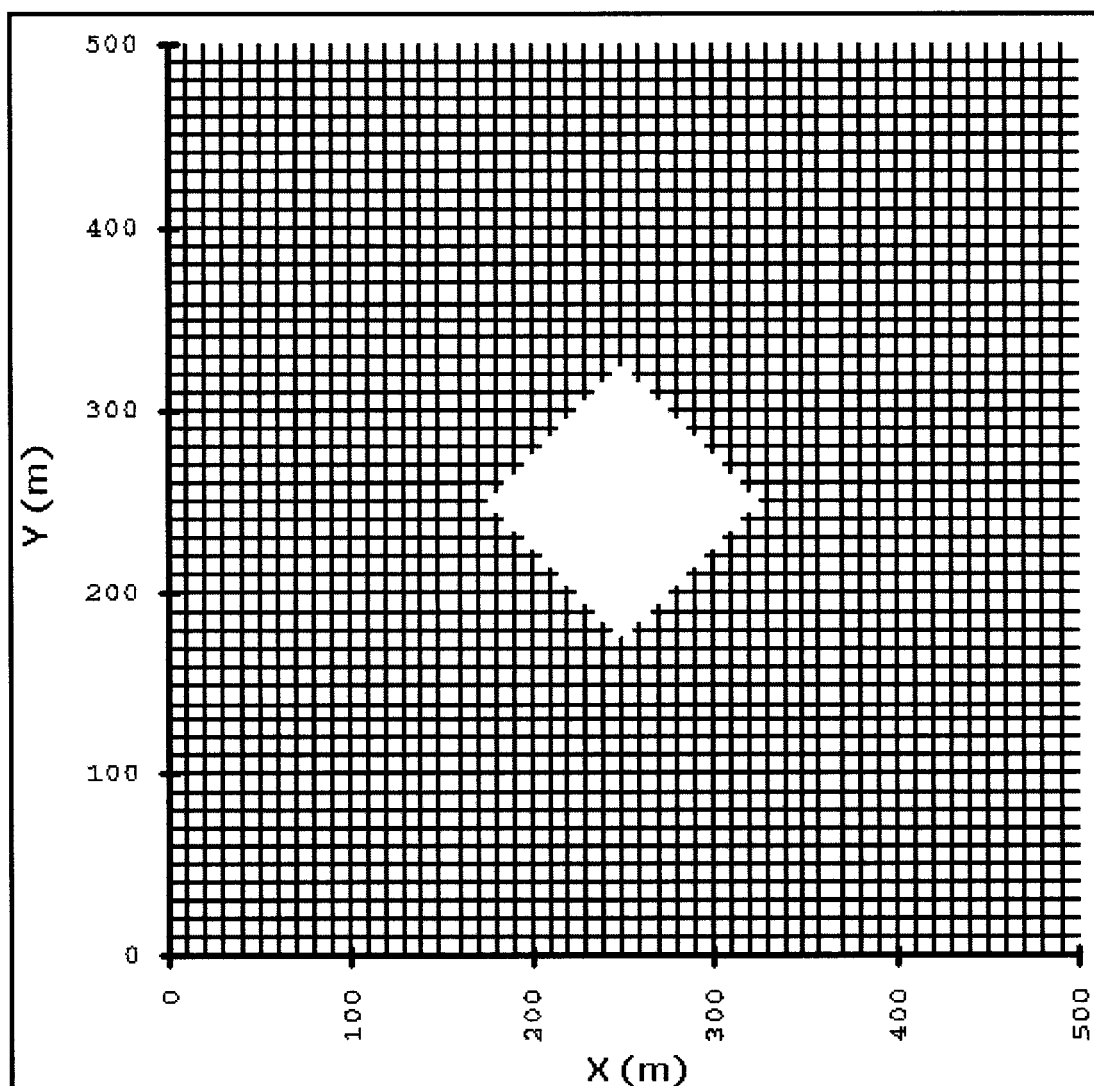


Figure 6.2 : Position des fractures dans le domaine de la fosse vue en plan.

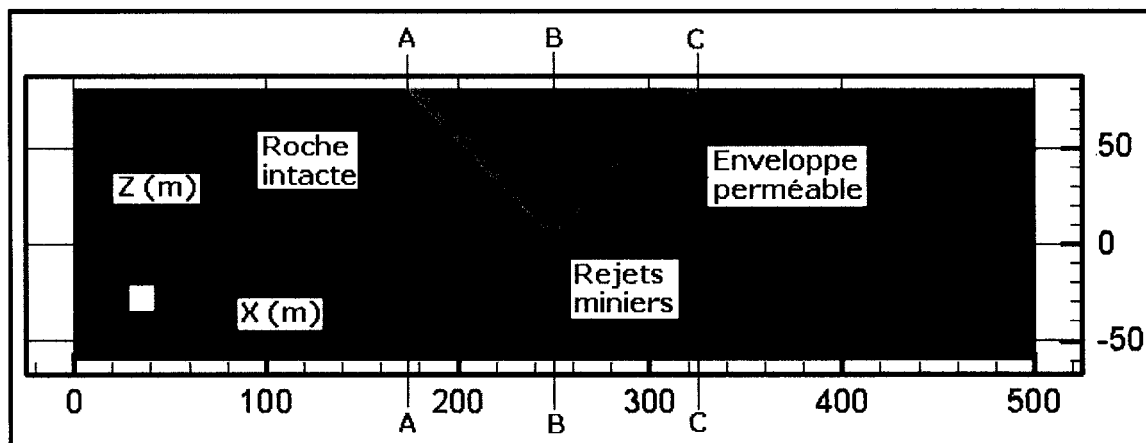


Figure 6.3 : Domaine de la fosse vue en section.

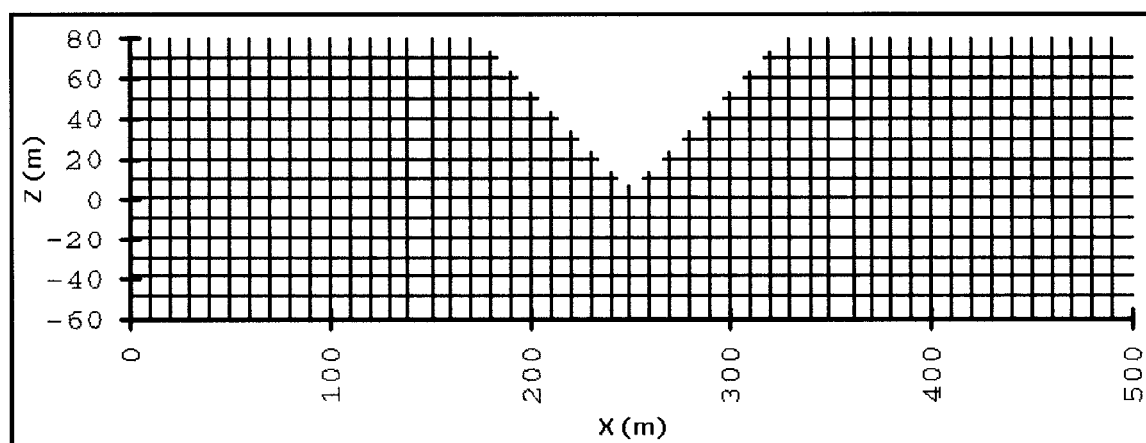


Figure 6.4 : Position des fractures dans le domaine de la fosse vue en section.

Les conditions aux frontières des domaines étudiés imposent un gradient hydraulique régional de 2% dans le sens de l'axe des x (direction décroissante). Les maillages utilisés comportent des éléments de dimensions variables dans le plan de l'écoulement. Dans le cas de la fosse vue en plan, les éléments sont des carrés de 5.0m de côté près des frontières et leur dimension diminue graduellement à 0.5m de côté au centre du domaine, dans la région de la fosse. Dans le cas de la fosse vue en section, la taille des éléments est de 0.5m dans la direction de l'élévation et celle-ci varie progressivement de 5.0m à 0.5m, vers la fosse, dans la direction de l'axe des x . Le maillage de la vue en plan comporte 198 176 éléments (fractures incluses) et celui de la vue en section 259

804 éléments avec les fractures. Bien que le domaine de la vue en section soit plus petit que celui de la vue en plan, son maillage comporte plus d'éléments car il y a deux rangées d'éléments dans la direction perpendiculaire à l'écoulement alors que dans le maillage de la vue en plan il n'y en a qu'une seule (éléments de 0.5m). La figure 6.5 montre une partie du maillage utilisé pour les simulations de la fosse vue en section située entre les lignes AA et BB de la figure 6.3.

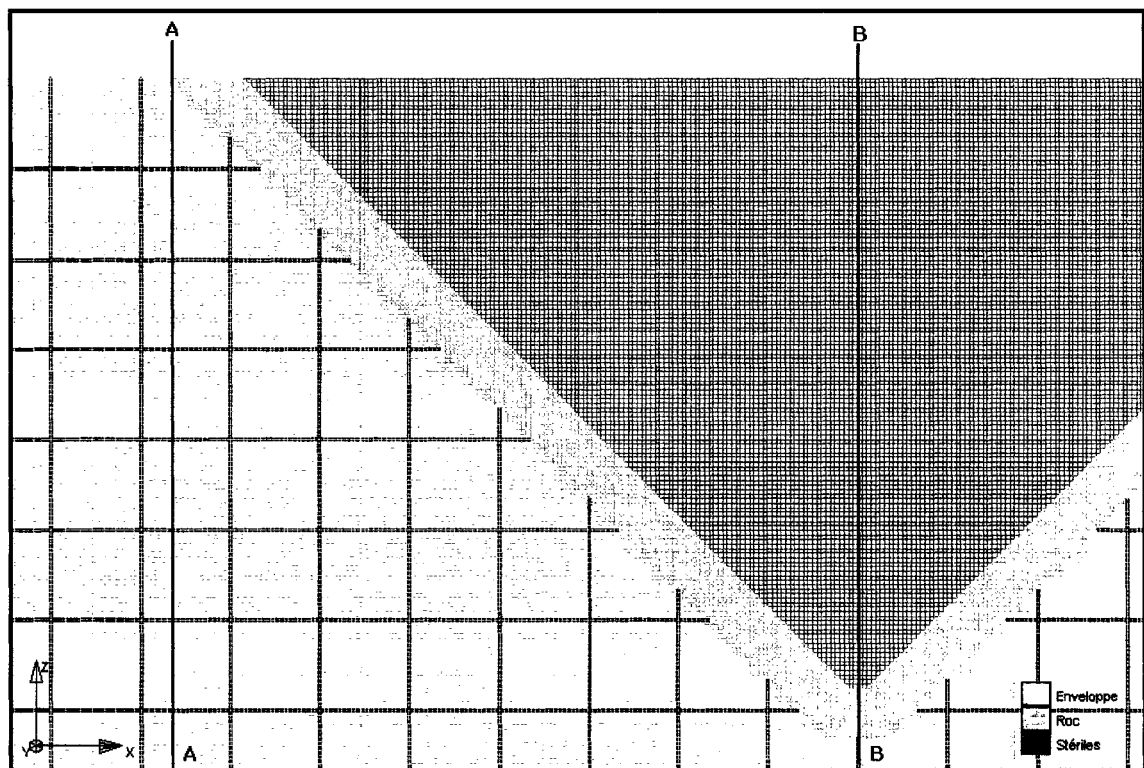


Figure 6.5 : Maillage du domaine de la fosse vue en section entre les lignes AA et BB.

Pour les simulations du cas de base de la technique de l'enveloppe perméable ainsi que pour celles de l'analyse paramétrique, la stabilité des solutions numériques a été vérifiée de deux façons. Premièrement, en s'assurant que les débits entrants sur le domaine étaient égaux ou presque aux débits sortants. Deuxièmement, en s'assurant de la perpendicularité entre les vecteurs vitesse et les équipotentiels.

6.1.2 Résultats

Quatre simulations de base ont été réalisées afin de d'évaluer l'effet d'une enveloppe perméable sur les débits à travers une fosse. Il s'agit de deux simulations pour la fosse vue en plan (cas avec enveloppe et cas sans enveloppe) et de deux simulations pour la fosse vue en section (cas avec enveloppe et cas sans enveloppe). Pour les simulations réalisées sans enveloppe perméable, le matériau de l'enveloppe était remplacé par les stériles. Cette façon de procéder faisait en sorte que le domaine de roc fracturé était exactement le même pour les simulations avec ou sans enveloppe perméable.

Les figures 6.6 et 6.7 présentent les équipotentiels obtenues pour les simulations de la fosse vue en plan (domaine horizontal). Les figures 6.8 et 6.9 présentent les résultats pour les simulations de la fosse vue en section (domaine vertical). Les lignes d'écoulement ne sont pas représentées sur ces figures mais il est facilement possible de les visualiser car elles sont perpendiculaires aux équipotentiels (puisque les matériaux sont de conductivité hydraulique isotrope et le régime permanent). L'écoulement se fait dans la direction croissante de l'axe des x . Dans tous les cas (avec ou sans enveloppe perméable), l'écoulement circule préférentiellement à travers la fosse plutôt que dans le massif fracturé (les lignes d'écoulement convergent vers la fosse en amont et divergent de la fosse en aval). Cela est attribuable au fait que la fosse constitue un passage de moindre résistance pour l'eau car elle contient des matériaux de conductivités hydrauliques supérieures à celle du massif fracturé. La distribution des équipotentiels est semblable pour les simulations des deux sections car les géométries de leurs domaines sont similaires. Pour les simulations avec une enveloppe perméable (figures 6.6 et 6.8), les équipotentiels sont discontinues à l'intérieur de la fosse à cause de la présence de l'enveloppe. La conductivité hydraulique de l'enveloppe de gravier étant deux ordres de grandeur supérieure à celle des stériles, celle-ci agit comme une zone conductrice (non étanche) pour l'eau.

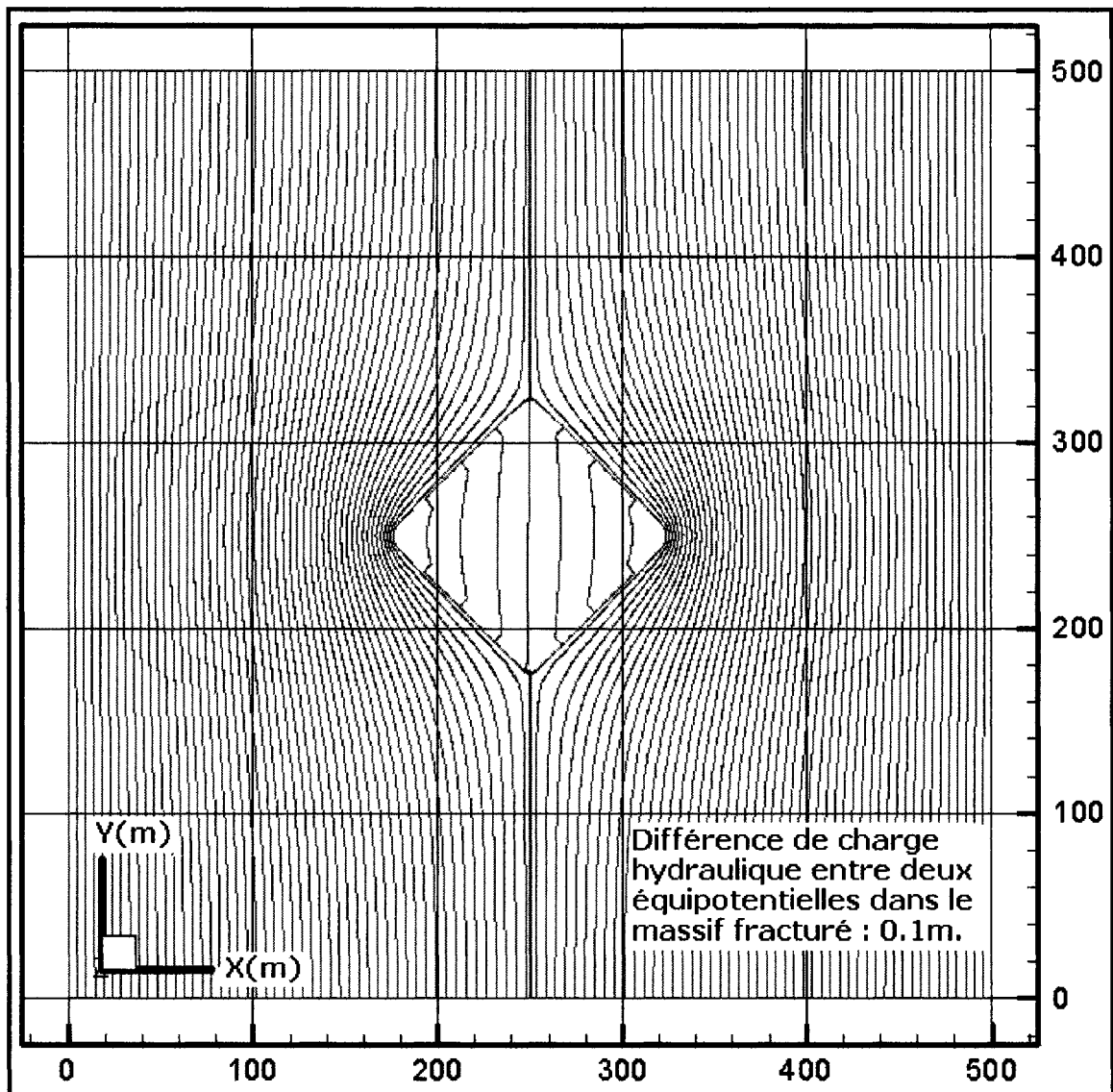


Figure 6.6 : Équipotentiels (m) de la fosse vue en plan, cas de base, avec enveloppe.

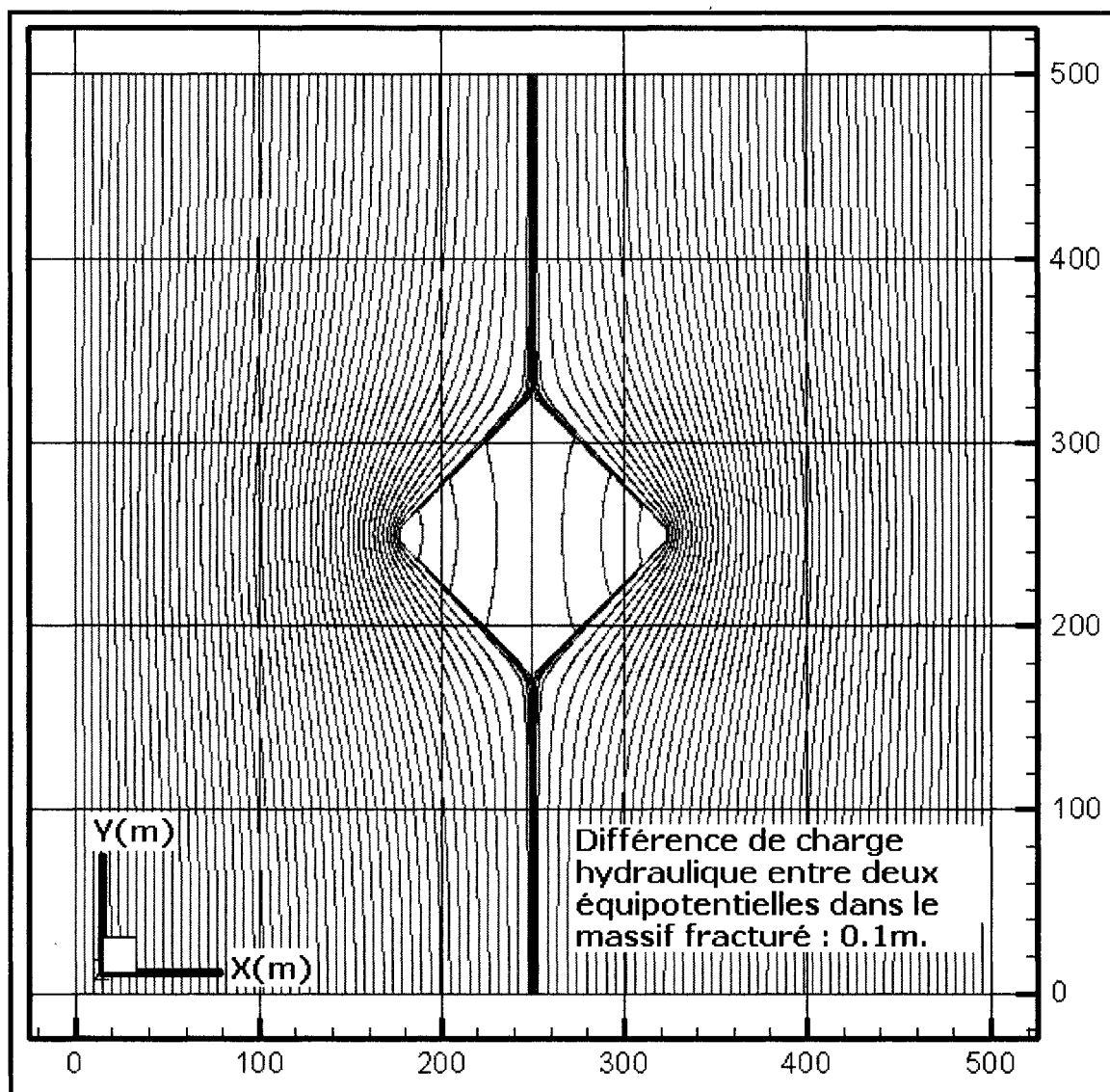


Figure 6.7 : Équipotentiels (m) de la fosse vue en plan, cas de base, sans enveloppe.

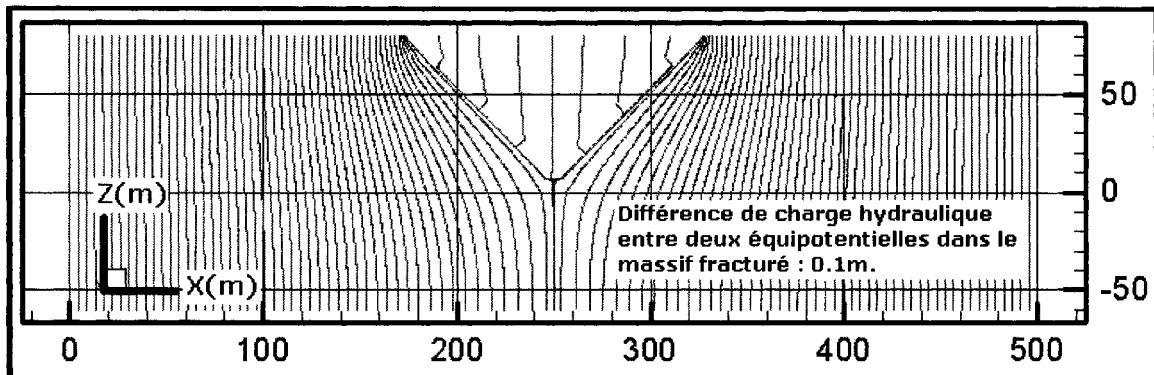


Figure 6.8 : Équipotentiels (m) de la fosse vue en section, cas de base, avec enveloppe.

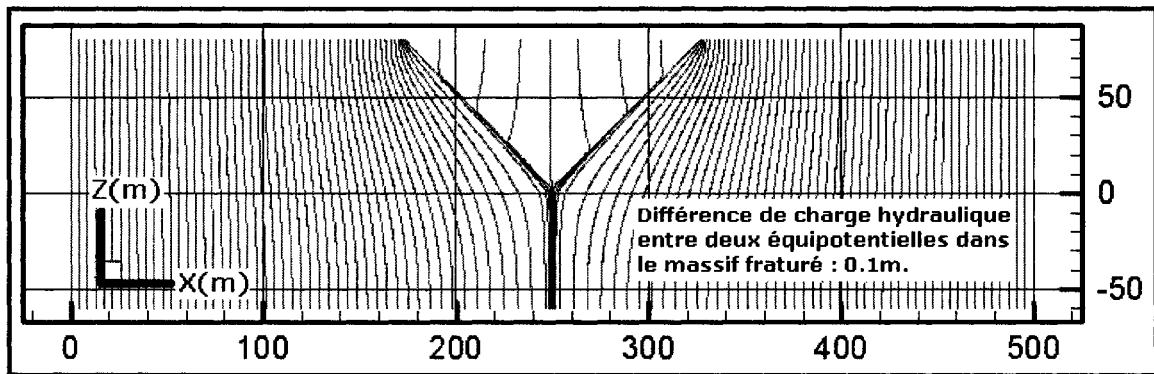


Figure 6.9 : Équipotentiels (m) de la fosse vue en section, cas de base, sans enveloppe.

Il a été calculé, à partir des figures 6.6 à 6.9, que le gradient hydraulique dans les stériles au centre de la fosse et près de la surface ($x=250\text{m}$ et $z=80\text{m}$) est dix fois inférieur dans les cas avec enveloppe perméable que dans les cas sans enveloppe. Pour la fosse vue en plan, le gradient hydraulique est de 0.005% au centre de la fosse dans le cas avec enveloppe et de 0.05% dans le cas sans enveloppe. Pour la fosse vue en section, il est de 0.004% au centre de la fosse dans le cas avec enveloppe et de 0.04% dans le cas sans enveloppe. Ces résultats suggèrent que la technique de l'enveloppe perméable pourrait être utile afin de réduire les débits à l'intérieur d'une fosse puisque les gradients hydrauliques sont directement proportionnels aux débits.

Les figures 6.10 et 6.11 présentent les équipotentiellles et les vecteurs vitesse réelle dans une petite zone du domaine pour les simulations de la fosse vue en plan (cas avec et sans enveloppe perméable). Cette petite zone est située aux alentours de la position $X=200\text{m}$ et $Y=250\text{m}$ et seuls les vecteurs vitesses dans les matériaux poreux sont représentés, soit les vecteurs vitesse dans la roche intacte, dans l'enveloppe perméable et dans les stériles. Ces figures permettent de constater que les vecteurs vitesse sont bien perpendiculaires aux équipotentiellles comme cela doit être le cas en régime permanent pour un écoulement dans des matériaux de conductivités hydrauliques isotropes.

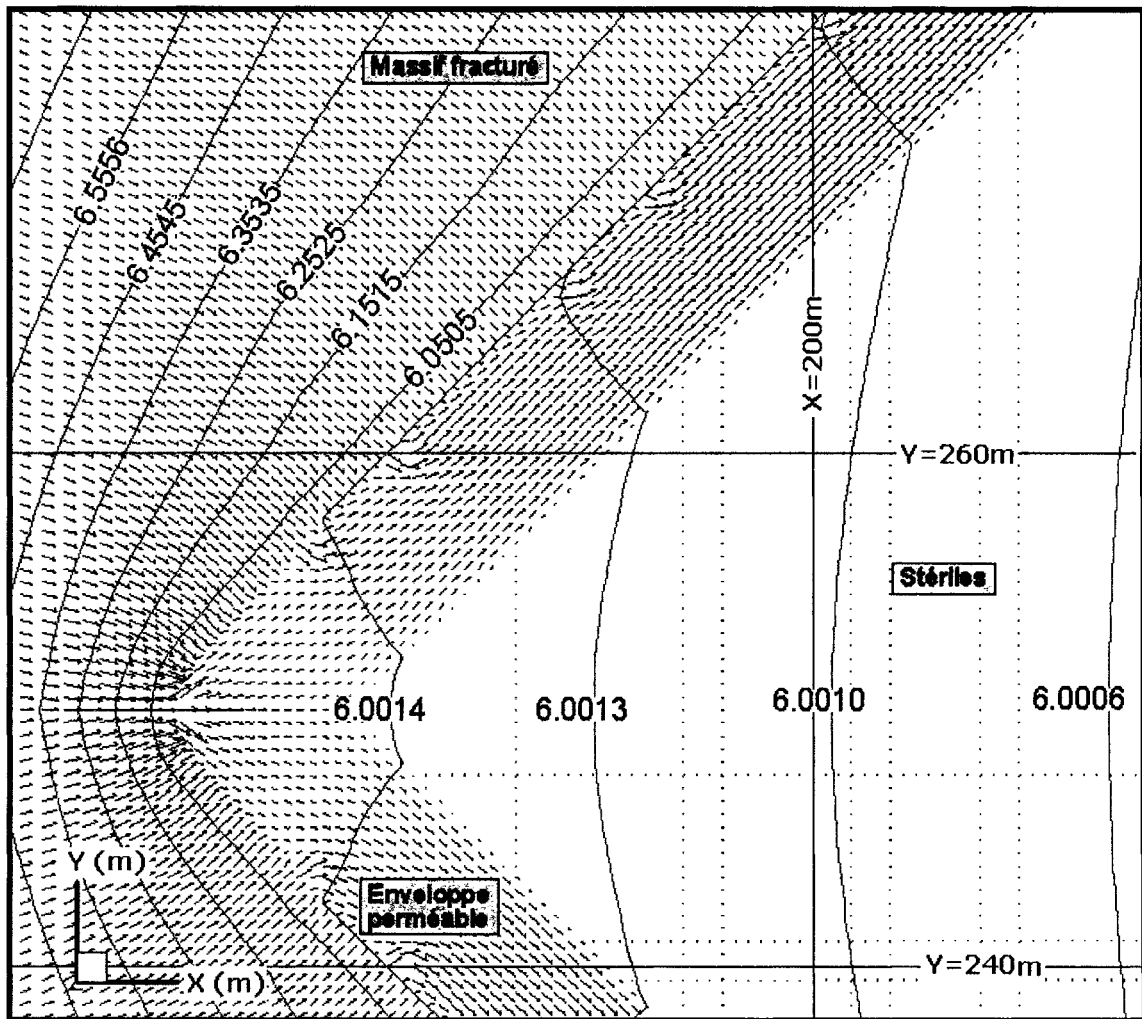


Figure 6.10 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en plan avec enveloppe.

Sur la figure 6.10, les normes des vecteurs vitesse sont de dimensions comparables dans la roche intacte et dans l'enveloppe perméable. Ceci est normal puisqu'il s'agit des vecteurs vitesse réelle (vitesse de Darcy / porosité effective). Toutefois, les vitesses de Darcy sont beaucoup plus élevées dans l'enveloppe perméable que dans la roche intacte car la porosité effective y est quinze fois plus élevée. La porosité effective du gravier de l'enveloppe est de 0.3 et celle de la roche intacte 0.02. Les figures 6.10 et 6.11 permettent également de visualiser l'efficacité de la technique de l'enveloppe perméable puisque les normes des vecteurs vitesse dans les stériles sont beaucoup plus petites dans le cas avec enveloppe que dans le cas sans enveloppe.

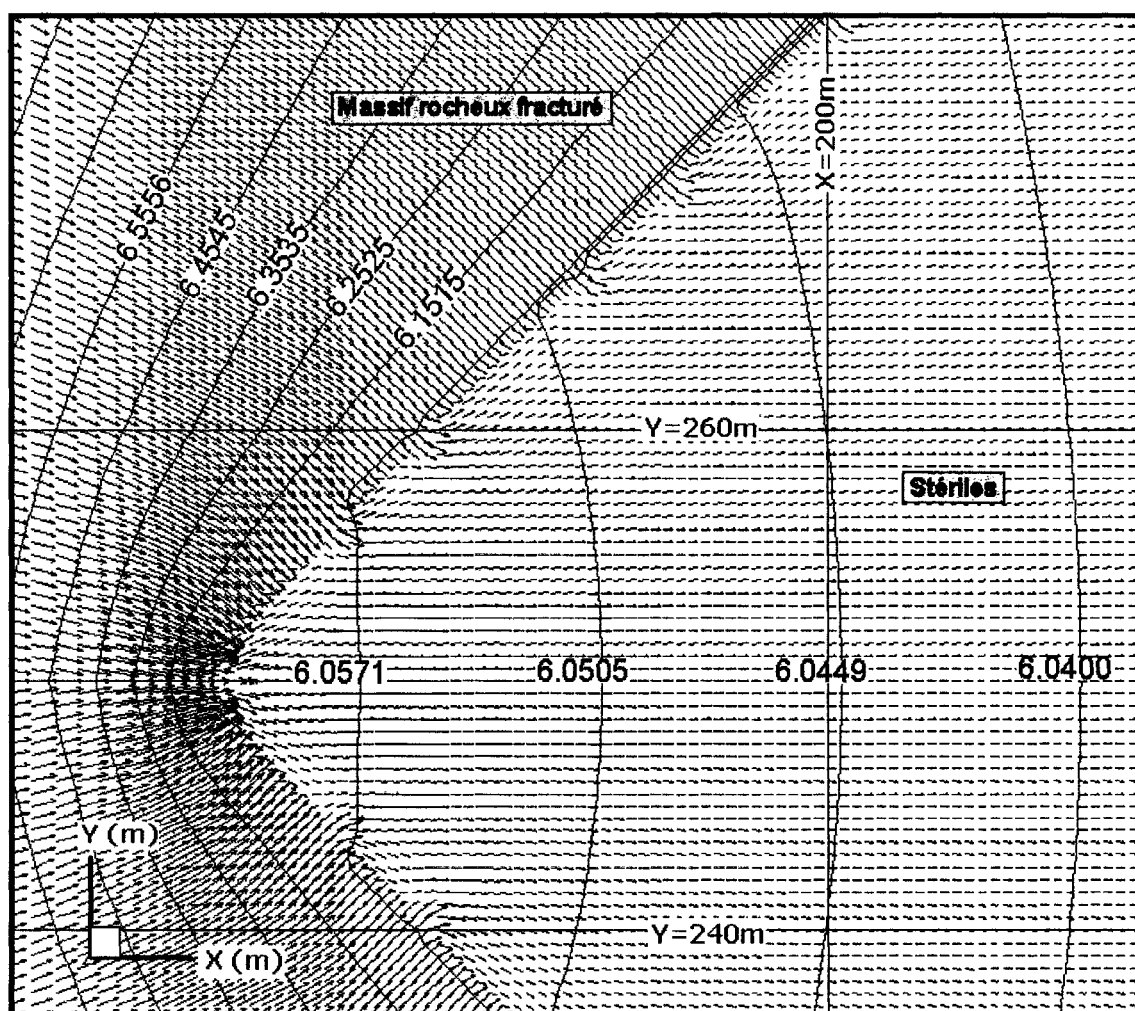


Figure 6.11 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle vue en plan sans enveloppe.

Les figures 6.12 et 6.13 présentent les mêmes informations que les figures 6.10 et 6.11 mais pour le cas des simulations de la vue en section. Sur ces figures, les vecteurs vitesse réelle sont également perpendiculaires aux équipotentielles. En ce qui concerne les vitesses dans l'enveloppe perméable, les figures 6.10 et 6.12 permettent de constater qu'elles sont de plus en plus élevées dans la direction de l'écoulement. En effet, la norme des vecteur vitesses est de plus en plus élevée dans cette direction. Cela peut s'expliquer par le fait de l'apport cumulatif en eau en provenance des fractures.

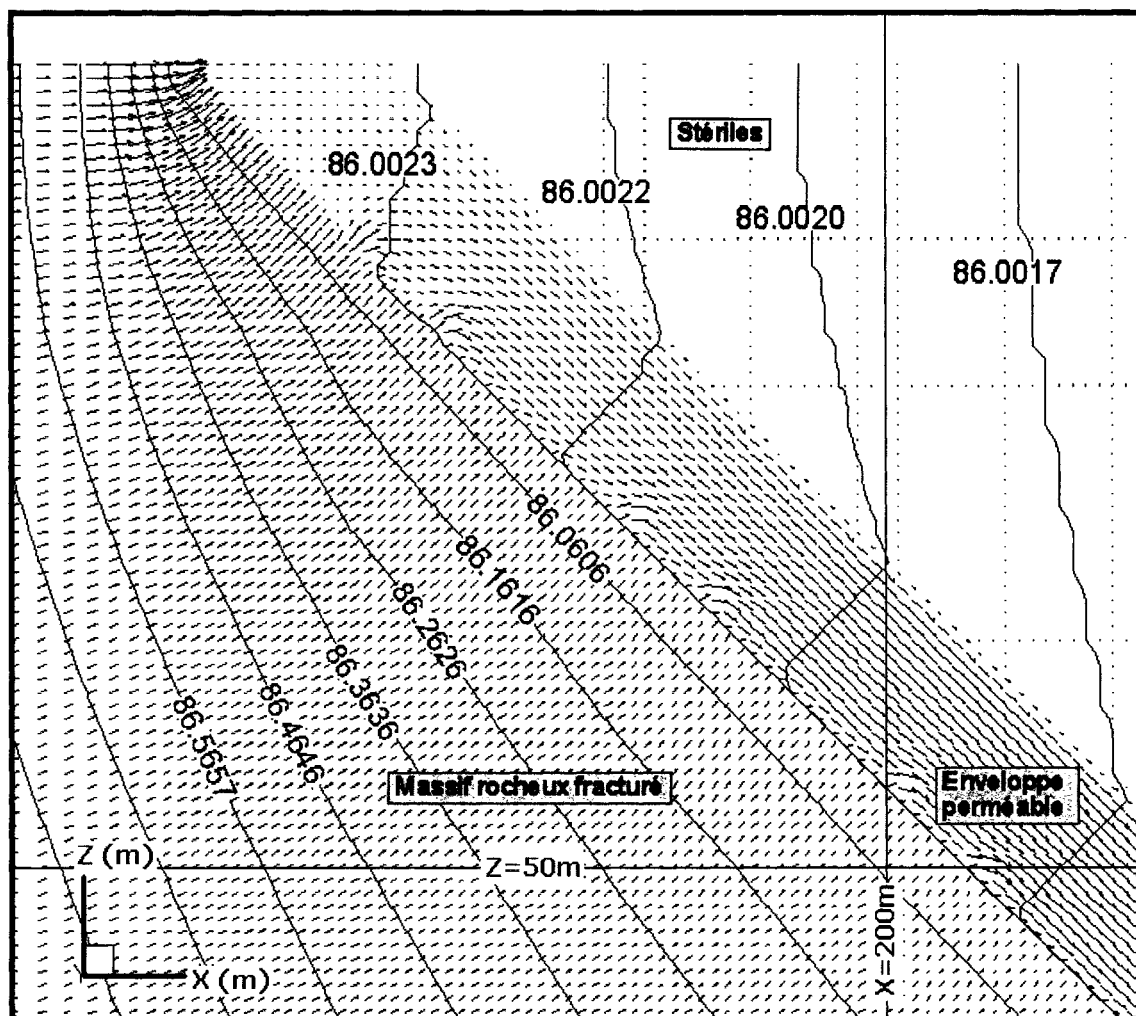


Figure 6.12 : Équipotentiels (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en section avec enveloppe.

C'est-à-dire que la partie supérieure de l'enveloppe reçoit de l'eau en provenance d'un nombre moins élevé de fractures que la partie inférieure.

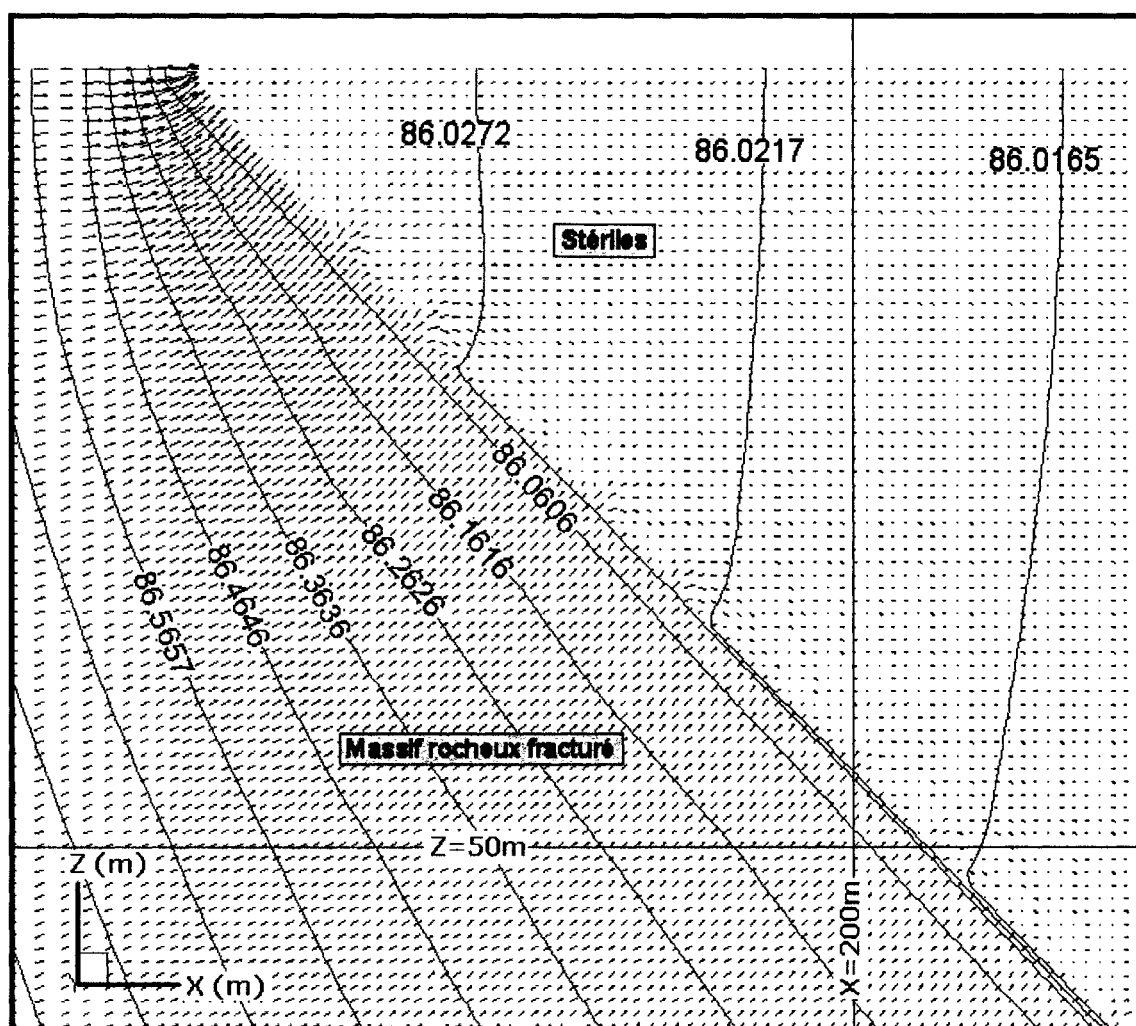


Figure 6.13 : Équipotentiellles (m) et vecteurs vitesse réelle, vue en section sans enveloppe.

L'efficacité de l'enveloppe perméable à réduire les débits à travers les stériles peut être évaluée par la relation suivante :

$$\text{Efficacité enveloppe (\%)} = \left(1 - \frac{Q_{\text{stériles_avec}}}{Q_{\text{stériles_sans}}} \right) \times 100 \quad (6.1)$$

où

$Q_{\text{stériles_avec}}$ = Débit unitaire dans les stériles sur l'axe BB (cas avec enveloppe perméable) (m²/s)

$Q_{\text{stériles_sans}}$ = Débit unitaire dans les stériles sur l'axe BB (cas sans enveloppe perméable) (m²/s)

Le débit unitaire est le débit par mètre d'épaisseur perpendiculairement au plan de l'écoulement (simulations 2D). Le débit unitaire dans les stériles sur l'axe BB correspond au débit unitaire au centre de la fosse et c'est une valeur moyenne calculée à partir des vitesses en x dans ce matériau sur l'axe BB. Cet axe est illustré aux figures 6.1 (fosse vue en plan) et 6.3 (fosse vue en section). Pour la simulation du cas de base, l'efficacité de l'enveloppe perméable calculée de cette façon est de 86% pour la vue en section et de 85% pour la vue en plan. Elle reflète la réduction du débit à travers les stériles attribuée à la présence de l'enveloppe perméable, exprimée de façon relative sous la forme d'un pourcentage. Ces premiers résultats indiquent que la technique de l'enveloppe perméable pourrait permettre une réduction significative des débits circulant à travers une fosse.

La figure 6.14 présente la distribution des vitesses de Darcy (en x) dans les stériles le long de la ligne BB pour la simulation de la fosse vue en section avec enveloppe perméable. La figure 6.15 présente les mêmes résultats mais pour le cas sans enveloppe.

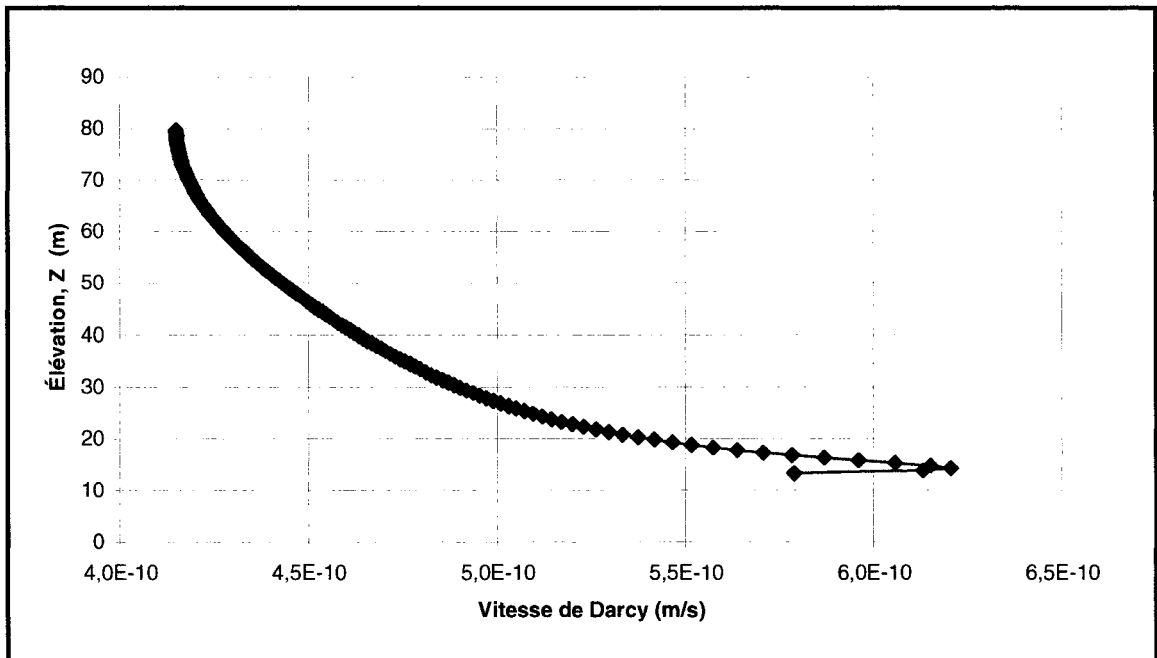


Figure 6.14 : Distribution des vitesses dans les stériles, cas de la fosse vue en section avec enveloppe perméable.

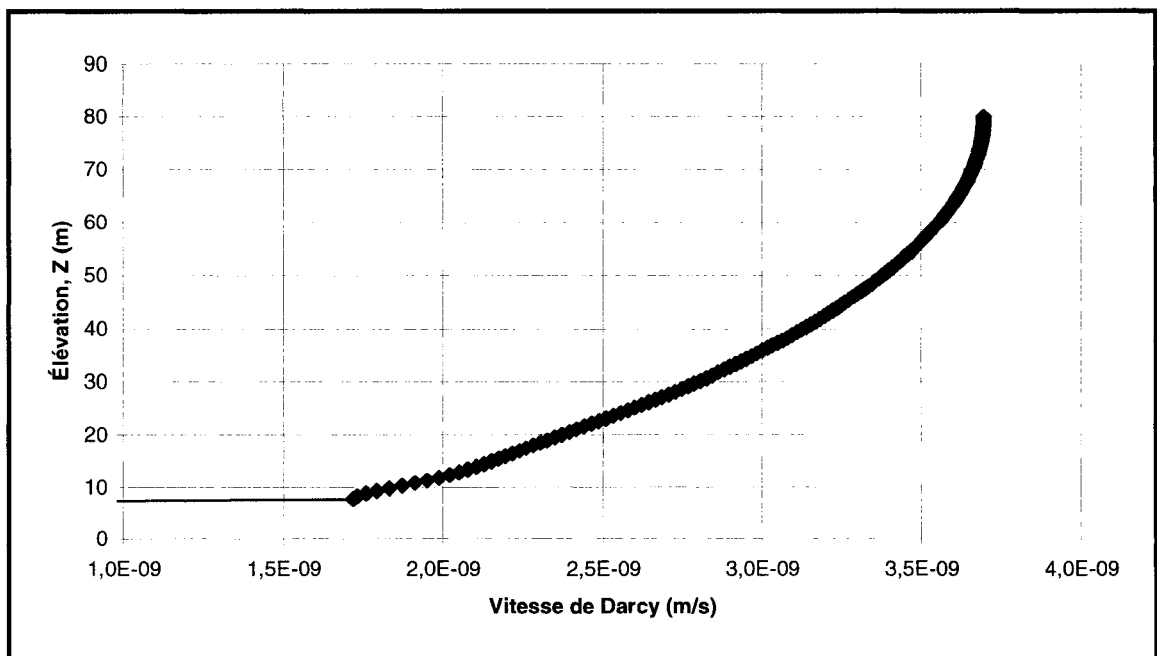


Figure 6.15 : Distribution des vitesses dans les stériles, cas de la fosse vue en section sans enveloppe perméable.

Pour le cas de la fosse vue en plan, la distribution des vitesses en x le long de la ligne BB est similaire en raison de la similitude des géométries. Dans tous les cas, sur la ligne BB, les composantes en z des vecteurs vitesse sont plusieurs ordres de grandeur inférieures aux composantes en x car l'écoulement est essentiellement dans le sens de l'axe des x . Le débit unitaire dans les stériles le long de l'axe central de la fosse (axe BB) est calculé de la façon suivante. Comme les distributions des vitesses ne sont pas linéaires le long des lignes BB (figures 6.10 et 6.11), le débit unitaire dans les stériles est calculé comme la somme des débits unitaires moyens évalués sur des segments assez petits pour que les variations de vitesses soient considérées comme linéaires (typiquement, des segments de 5 à 10m sur la ligne BB). La vitesse moyenne sur un segment est calculée comme la moyenne des vitesses aux nœuds des éléments situés sur ce segment. Le débit unitaire moyen à travers chacun de ces segments est calculé comme la vitesse moyenne du segment multipliée par la longueur du segment.

La distribution des vitesses le long de l'axe central de la fosse (axe BB) pour les cas avec et sans enveloppe perméable est pratiquement inversée. Dans le cas de la vue en section avec enveloppe, les vitesses sont maximales au fond de la fosse (figure 6.10) alors que dans le cas sans enveloppe elles sont maximales à la surface (figure 6.11). Dans le cas avec enveloppe, la distribution des vitesses en fonction de l'élévation dépend principalement de la distribution des gradients hydrauliques dans l'enveloppe perméable située du côté amont de la fosse. Ceux-ci augmentent dans le sens de l'écoulement sous l'effet de l'apport en eau cumulatif en provenance des fractures et de la roche intacte. Dans le cas sans enveloppe, la distribution des vitesses en fonction de l'élévation dépend surtout de la distribution des gradients hydrauliques dans le massif fracturé situé autour de la fosse du côté amont. La figure 6.9 permet de constater que ceux-ci sont maximaux près de la surface puis qu'ils diminuent avec la profondeur.

La validité des solutions numériques a été vérifiée en comparant premièrement les débits entrant et sortant sur le domaine. En régime permanent, ceux-ci doivent être égaux ou

presque et cette condition était respectée pour les quatre simulations du cas de base ainsi que pour celles présentées à la section suivante. Deuxièmement, la validité des solutions numériques a été vérifiée en s'assurant de la perpendicularité entre les lignes équipotentielles et les vecteurs vitesses. Cette condition était respectée pour toutes les simulations.

6.2 Étude paramétrique des facteurs d'influence

6.2.1 Cas étudiés et principaux résultats

L'étude a servi à évaluer l'impact de cinq paramètres sur l'efficacité de l'enveloppe perméable pour diminuer les débits à travers la fosse remblayée. Ces paramètres sont l'épaisseur de l'enveloppe, la dimension de la fosse, le contraste entre la conductivité hydraulique du matériau de l'enveloppe et celle des stériles, le contraste entre la conductivité hydraulique du massif rocheux fracturé et celle des stériles et, finalement, le gradient hydraulique régional. Plusieurs simulations ont été réalisées à partir de géométries similaires à celles des cas de base, soit la fosse vue en plan et la vue en section. Pour chaque nouvelle simulation, un seul paramètre était modifié par rapport à l'analyse du cas de base présentée à la section 6.1.

Le tableau 6.1 présente les résultats des simulations de l'étude paramétrique réalisées pour la fosse vue en plan. Vingt-cinq différents cas ont été étudiés. Chacun comprend une simulation avec enveloppe perméable et une simulation sans enveloppe afin de déterminer l'efficacité de l'enveloppe par l'équation 6.1. Les simulations réalisées avec enveloppe portent le numéro du cas étudié suivi de la lettre a et les simulations réalisées sans enveloppe portent le numéro du cas étudié suivi de la lettre b. Les différents cas étudiés peuvent être présentés sommairement comme suit.

Les simulations numéros 1 à 10 ont servi à évaluer l'impact de l'épaisseur d'une enveloppe perméable sur son efficacité. Les cas d'une enveloppe de gravier ($K=1.0 \times 10^{-3}$ m/s) et d'une enveloppe de sable ($K=1.0 \times 10^{-4}$ m/s) ont été étudiés pour des épaisseurs variant de 1.4m à 8.5m.

Les simulations 11 et 12 ont permis d'évaluer l'effet du contraste entre la conductivité hydraulique des stériles et celle du matériau de l'enveloppe sur l'efficacité d'une enveloppe perméable.

Les simulations 13 à 17 ont été utilisées dans l'analyse de l'impact du contraste entre la conductivité hydraulique du massif rocheux fracturé et celle des stériles sur l'efficacité d'une enveloppe perméable. Ces analyses, tout comme celles du cas de base, ont été réalisées par une modélisation discrète des fractures d'ouvertures constantes (b). La conductivité hydraulique d'un milieu poreux équivalent (K_{eq} . EPM, calculée par l'équation 4.21) est donnée entre parenthèses.

Les simulations 18 à 21 ont permis d'évaluer l'effet de la dimension de la fosse sur l'efficacité d'une enveloppe perméable. La simulation 18 porte sur une fosse identique à celle du cas de base, sauf que ses dimensions ainsi que celles du domaine sont multipliées par 1.9 (l'épaisseur de l'enveloppe demeure constante à 5.6m). Il en va de même pour la simulation 19 mais avec les dimensions qui ont été divisées par 2.4. La simulation 20 représente une fosse carrée dont le centre coïncide avec le centre du domaine (tout comme pour le cas de base) et avec des côtés parallèles aux frontières (au lieu de former un angle de 45 degrés avec elles). La fosse de la simulation 20 est cependant légèrement plus petite que celle du cas de base ; elle mesure 78mx78m d'ouverture comparativement à 100mx100m pour le cas de base. La fosse de la simulation 21 est de forme rectangulaire et les quatre côtés sont également placés parallèlement aux frontières. Les côtés perpendiculaires à l'écoulement (perpendiculaires à l'axe des x) mesurent 146m et les autres mesurent 111m.

Les simulations 22 à 24 ont servi à évaluer l'effet du gradient hydraulique régional sur l'efficacité d'une enveloppe perméable. Le gradient a été varié de 2% (cas de base) à 10% (simulation 24).

Finalement, la simulation 25 a été réalisée afin de vérifier que les deux maillages utilisés donnaient des résultats comparables et c'était effectivement le cas. Pour les simulations no 2, 4, 7 et 9, le même maillage que celui du cas de base a été utilisé, alors que pour les autres simulations, ce maillage a été affiné dans les zones où étaient extraites les valeurs de vitesse pour le calcul des débits unitaires. Ce maillage plus fin comportait des éléments cinq fois plus petits dans ces zones (0.1m x 0.1m versus 0.5m x 0.5m).

Dans le tableau 6.1, la quatrième colonne intitulée $Q_{in/out}$ domaine, représente le débit unitaire total entrant et sortant aux frontières du domaine (situées aux positions $x = 0m$ et $x = 500m$). La cinquième colonne, intitulée Q_{fosse} , est la somme des sixième et septième colonnes ($Q_{stériles}$ et $Q_{enveloppe}$). Elle représente le débit unitaire moyen circulant dans la fosse à travers la ligne BB (située à la position $x = 250m$). La sixième colonne ($Q_{stériles}$) représente le débit unitaire moyen circulant dans les stériles à travers la ligne BB. La septième colonne ($Q_{enveloppe}$) représente le débit unitaire moyen circulant dans l'enveloppe à travers la ligne BB. L'avant dernière colonne est le pourcentage de l'eau circulant sur le domaine qui entre dans la fosse et la dernière colonne est l'efficacité de l'enveloppe perméable calculée par l'équation 6.1.

Tableau 6.1 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en plan et quelques résultats des simulations.

Paramètre étudié	No.	Paramètre modifié par rapport au cas de base (voir explications supplémentaires ci bas)	Q in/out domaine, m ³ /s	Q fosse m ³ /s	Q stériles m ³ /s	Q enveloppe m ³ /s	Q fosse / Q domaine (%)	Efficacité enveloppe (%)
Épaisseur enveloppe (cas d'une enveloppe de gravier)	1	épaisseur enveloppe = 1,4m	1,0E-06	4,9E-07	2,2E-07	2,7E-07	48	56
	2	épaisseur enveloppe = 2,8m	1,0E-06	4,8E-07	1,3E-07	3,5E-07	47	73
	3	épaisseur enveloppe = 4,2m	1,0E-06	4,9E-07	8,7E-08	4,1E-07	49	82
	4a	Cas de base : enveloppe de 5,6m (K _{eq} EPM = 9,2x10 ⁻⁸ m/s)	1,0E-06	4,9E-07	7,2E-08	4,2E-07	49	85
	5	épaisseur enveloppe = 8,5m	1,0E-06	4,8E-07	5,1E-08	4,3E-07	47	90
Épaisseur enveloppe (cas d'une enveloppe de sable)	6	enveloppe sable, épaisseur= 1,4m	1,0E-06	4,9E-07	4,4E-07	4,5E-08	48	10
	7	enveloppe sable, épaisseur= 2,8m	1,0E-06	4,9E-07	4,1E-07	8,1E-08	48	17
	8	enveloppe sable, épaisseur= 4,2m	1,0E-06	4,9E-07	3,5E-07	1,4E-07	48	29
	9	enveloppe sable, épaisseur= 5,6m	1,0E-06	4,9E-07	3,3E-07	1,6E-07	49	33
	10	enveloppe sable, épaisseur= 8,5m	1,0E-06	4,8E-07	2,8E-07	2,1E-07	48	43
4b		Cas de base : simulation sans enveloppe perméable	1,0E-06	4,9E-07	4,9E-07		48	
Contraste de conductivité hydraulique (K) entre stériles et enveloppe	11a	Kstériles= 10-4 m/s, cas avec enveloppe	1,0E-06	5,0E-07	3,3E-07	1,7E-07	49	33
	11b	Kstériles= 10-4 m/s, cas sans enveloppe	1,0E-06	4,9E-07	4,9E-07		49	
	12a	Kstériles= 10-6 m/s, cas avec enveloppe	1,0E-06	4,9E-07	7,8E-09	4,8E-07	48	98
	12b	Kstériles= 10-6 m/s, cas sans enveloppe	9,9E-07	4,5E-07	4,5E-07		45	

Tableau 6.1 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en plan et quelques résultats des simulations (suite).

Paramètre étudié	No.	Paramètre modifié par rapport au cas de base (voir explications supplémentaires ci bas)	Q in/out domaine, m³/s	Q fosse m³/s	Q stériles m³/s	Q enveloppe m³/s	Q fosse / Q domaine (%)	Efficacité enveloppe (%)
Contraste de conductivité hydraulique (K) entre massif fracturé et stériles	13a	b = 1mm (K _{eq} EPM = 7,3x10-5 m/s), cas avec enveloppe	7,2E-04	2,4E-04	3,1E-05	2,1E-04	33	45
	13b	b=1mm, cas sans enveloppe	6,6E-04	5,6E-05	5,6E-05		9	
	14a	b=3mm (K _{eq} EPM = 2,0x10-3 m/s), cas avec enveloppe	1,7E-02	7,2E-04	8,0E-05	6,4E-04	4	-20
	14b	b=3mm, cas sans enveloppe	1,7E-02	6,7E-05	6,7E-05		0	
	15a	K _{roc} = 2x10-11 m/s (K _{eq} EPM = 7,2x10-8 m/s), cas avec env.	7,9E-07	3,9E-07	5,4E-08	3,3E-07	49	86
	15b	K _{roc} = 2x10-11 m/s, cas sans enveloppe	7,9E-07	3,8E-07	3,8E-07		48	
	16a	K _{roc} = 2x10-6 m/s (K _{eq} EPM = 2,1x10-6 m/s), cas avec env.	2,3E-05	1,1E-05	1,5E-06	9,3E-06	48	84
	16b	K _{roc} = 2x10-6 m/s, cas sans enveloppe	2,2E-05	9,3E-06	9,3E-06		42	
	17a	2X - de fractures (K _{eq} EPM = 5,5x10-8 m/s), cas avec env.	6,1E-07	3,0E-07	4,2E-08	2,6E-07	50	86
	17b	2 fois moins de fractures, cas sans enveloppe	6,1E-07	3,0E-07	3,0E-07		50	
Dimensions de la fosse	18a	Dimensions fosse 1,9 fois plus grande, cas avec env.	2,0E-06	9,2E-07	2,3E-07	6,9E-07	46	74
	18b	Dimensions fosse 1,9 fois plus grande, cas sans env.	2,0E-06	9,0E-07	9,0E-07		45	
	19a	Dimensions fosse 2,4 fois plus petite, cas avec env.	5,0E-07	2,1E-07	1,2E-08	2,0E-07	42	94
	19b	Dimensions fosse 2,4 fois plus petite, cas sans env.	5,0E-07	2,1E-07	2,1E-07		42	
	20a	fosse de 78mx78m, côtés parallèles aux frontières, avec env.	1,0E-06	5,1E-07	4,6E-08	4,6E-07	50	91
	20b	fosse de 78mx78m, côtés parallèles aux frontières, sans env.	1,0E-06	5,0E-07	5,0E-07		49	
	21a	fosse 146mx111m, côtés parallèles aux frontières, avec env.	1,0E-06	5,9E-07	7,5E-08	5,2E-07	57	87
	21b	fosse 146mx111m, côtés parallèles aux frontières, sans env.	1,0E-06	5,9E-07	5,9E-07		57	
	22a	gradient hydraulique régional 4%, cas avec enveloppe	2,0E-06	9,9E-07	1,4E-07	8,5E-07	49	86
	22b	gradient hydraulique régional 4%, cas sans enveloppe	2,0E-06	9,7E-07	9,7E-07		48	
Gradient hydraulique régional	23a	gradient hydraulique régional 6%, cas avec enveloppe	3,0E-06	1,5E-06	2,1E-07	1,3E-06	48	86
	23b	gradient hydraulique régional 6%, cas sans enveloppe	3,0E-06	1,5E-06	1,5E-06		48	
	24a	gradient hydraulique régional 10%, cas avec enveloppe	5,1E-06	2,4E-06	3,4E-07	2,1E-06	48	86
	24b	gradient hydraulique régional 10%, cas sans enveloppe	5,0E-06	2,4E-06	2,4E-06		48	
Vérification	25a	maillage plus fin, cas avec enveloppe	1,0E-06	4,9E-07	6,9E-08	4,2E-07	48	86
	25b	maillage plus fin, cas sans enveloppe	1,0E-06	4,9E-07	4,9E-07		48	

Les caractéristiques de l'étude paramétrique réalisée pour le cas de la fosse vue en section sont présentées au tableau 6.2. Trente-cinq cas différents ont été analysés permettant d'évaluer l'impact des mêmes cinq paramètres sur l'efficacité d'une enveloppe perméable visant à faire diminuer les débits à travers la fosse remblayée. Tout comme pour l'analyse de la vue en plan, les différents cas étudiés pour la vue en section comportaient une modification à un seul paramètre par rapport à ceux du cas de base présenté à la section 6.1. Ces simulations peuvent être décrites comme suit.

Les simulations numéros 1 à 10 ont servi à évaluer l'impact de l'épaisseur d'une enveloppe perméable sur son efficacité. Les cas d'une enveloppe de gravier ($K=1.0 \times 10^{-3}$ m/s) et d'une enveloppe de sable ($K=1.0 \times 10^{-4}$ m/s) ont été étudiés pour des épaisseurs variant de 1.4m à 8.5m.

Les simulations 11 et 12 ont permis d'évaluer l'effet du contraste entre la conductivité hydraulique des stériles et celle du matériau de l'enveloppe sur l'efficacité d'une enveloppe perméable.

Les simulations 13 à 23 ont été utilisées dans l'analyse de l'impact du contraste entre la conductivité hydraulique du massif rocheux fracturé et celle des stériles sur l'efficacité d'une enveloppe perméable. Toutes les simulations ont été réalisées avec une représentation discrète des fractures sauf les simulations 19, 20 où tout le massif rocheux fracturé est modélisé comme un milieu poreux. La conductivité hydraulique d'un milieu poreux équivalent (K_{eq} , EPM, calculée par l'équation 4.21) est donnée entre parenthèses. La simulation 22 comporte deux fois plus de fractures que la simulation du cas de base. Deux familles de fractures ont été ajoutées; elles sont orthogonales entre elles et inclinées à 45 degrés par rapport à l'horizontal (axe des x). L'espacement entre les fractures des deux nouvelles familles est le même que celui du cas de base(10m).

Dans la simulation 23, les fractures du cas de base ont été interrompues à intervalles réguliers de façon à former un réseau de fractures discontinues sur le domaine. Les fractures horizontales ont 50m de long et elles sont espacées de 10m horizontalement. Les fractures verticales ont 25m de long et elles sont espacées de 10m verticalement. La figure 6.12 présente le réseau de fractures utilisé pour la simulation 23.

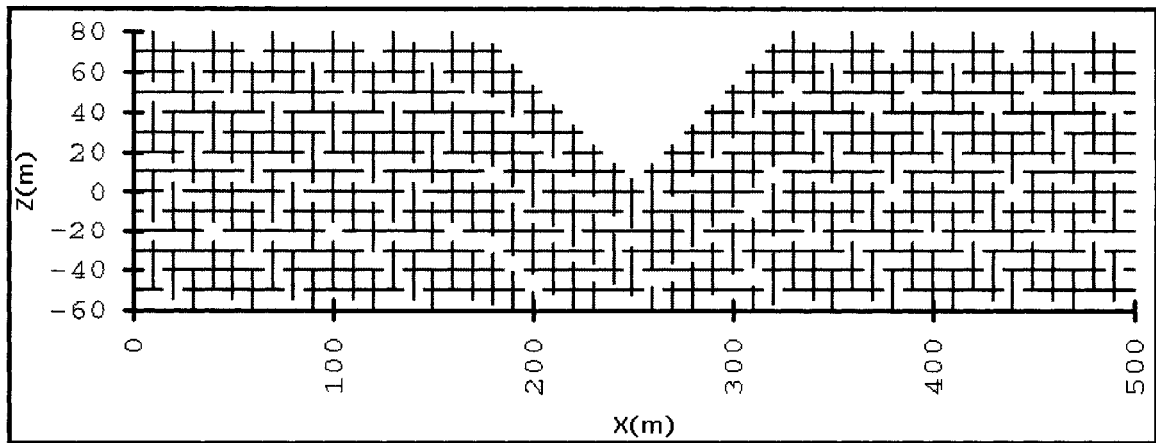


Figure 6.16 : Réseau de fractures utilisé pour la simulation numéro 23.

Les simulations 24 à 26 ont permis d'évaluer l'effet de la dimension de la fosse sur l'efficacité de l'enveloppe perméable (d'épaisseur constante). Dans la simulation 24, la géométrie de la fosse utilisée était la même que pour celle du cas de base présenté à la figure 6.3 (dimension de l'ouverture et angles des pentes) sauf que le fond a été placé plus près de la surface, soit à l'élévation $z=20\text{m}$ (au lieu de l'élévation $z = 7\text{m}$). Il en va de même pour les simulations 25 et 26 où les fosses étaient de moins en moins profondes, avec le plancher de la fosse placé respectivement à 30m et à 40m. La figure 6.17 présente le domaine et la position des matériaux pour le cas de la simulation 26.

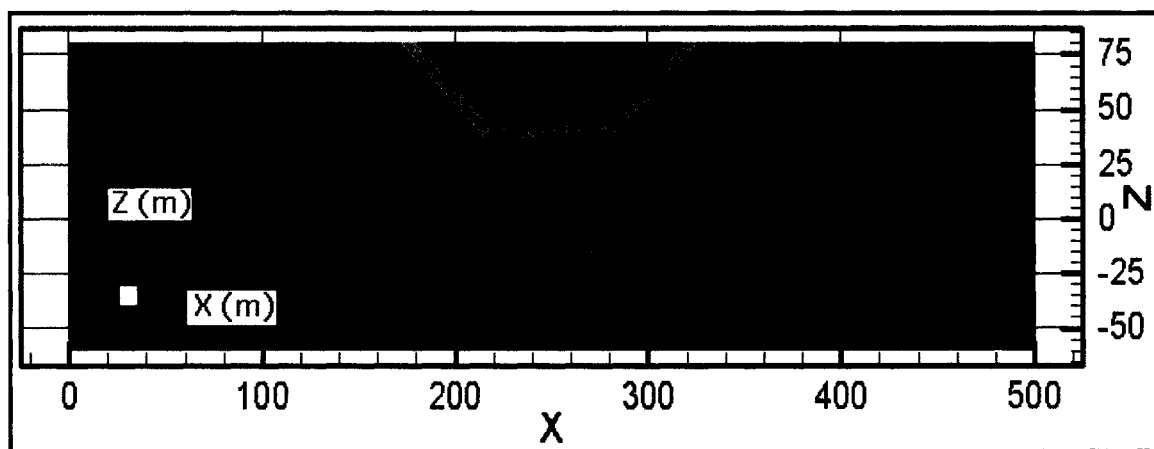


Figure 6.17 : Domaine et matériaux de la simulation numéro 26.

L'effet du gradient hydraulique régional a été étudié dans le cas de la vue en section par les simulations 27 à 31. Celui-ci a été augmenté jusqu'à 50% dans le cas de la simulation 29 comparativement à 2% pour celui du cas de base.

Enfin, les simulations 32 à 35 ont servi à faire certaines vérifications. La simulation 32 a été réalisée afin de vérifier que les deux maillages utilisés donnaient des résultats comparables et c'était effectivement le cas. Pour les simulations no 2, 4, 7 et 9, le même maillage que celui du cas de base a été utilisé, alors que pour les autres simulations, ce maillage a été affiné dans les zones où étaient extraites les valeurs de vitesse pour le calcul des débits unitaires. Ce maillage plus fin comportait des éléments cinq fois plus petits dans ces zones (0.1m x 0.1m versus 0.5m x 0.5m). La simulation 33 a permis de vérifier l'effet d'utiliser l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent comparativement à celle de la fracturation discrète. La simulation 34 a été réalisée en l'absence des fractures verticales afin de vérifier pour cette situation les valeurs des débits unitaires à différents endroits sur le domaine et l'efficacité de l'enveloppe

Finalement, la simulation 35 a servi à vérifier si la frontière inférieure du domaine utilisé pour le cas de base (située à l'élévation $z = -60\text{m}$) était à l'intérieur ou à l'extérieur de la

zone d'influence de la fosse. Pour cette simulation, cette frontière a été placée 60m plus bas, soit à l'élévation $z = -120\text{m}$. On observe alors qu'il y a 4.5% plus d'eau qui entre dans cette fosse que pour celle du cas de base (simulations 4 et 32). Cela indique que la frontière inférieure, dans le cas de base de la fosse vue en section, n'est pas tout à fait à l'extérieur de la zone d'influence de la fosse; si cela avait été le cas, les débits entrant dans la fosse auraient été les mêmes pour les simulations 4 et 35. Ceci est confirmé aux figures 6.8 et 6.9, alors qu'on voit que le gradient hydraulique sous la fosse est plus faible que 2%, le gradient hydraulique régional à l'extérieur des perturbations causées par la présence de la fosse. Dans le cas de la fosse vue en plan, il semble que les frontières du domaine soient à l'extérieur de la zone d'influence de la fosse car le gradient hydraulique régional de 2% peut être observé près de chaque frontière (voir les figures 6.6 et 6.7).

Tableau 6.2 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en section et quelques résultats des simulations.

Paramètre étudié	No.	Modification par rapport au cas de base	Q in/out domaine, m³/s	Q fosse m³/s	Q stériles m³/s	Q enveloppe m³/s	Q fosse / Q domaine (%)	Efficacité enveloppe (%)
Épaisseur enveloppe (cas d'une enveloppe de gravier)	1	épaisseur enveloppe = 1,4m	2,9E-07	2,2E-07	8,5E-08	1,4E-07	78	62
	2	épaisseur enveloppe = 2,8m	2,9E-07	2,2E-07	5,4E-08	1,7E-07	78	76
	3	épaisseur enveloppe = 4,2m	2,9E-07	2,2E-07	3,8E-08	1,9E-07	78	83
	4a	Cas de base : enveloppe de 5,6m (K _{eq} EPM = 9,2x10 ⁻⁸ m/s)	2,9E-07	2,2E-07	3,1E-08	1,9E-07	76	86
	5	épaisseur enveloppe = 8,5m	2,9E-07	2,2E-07	2,3E-08	2,0E-07	77	90
	6	enveloppe sable, épaisseur= 1,4m	2,9E-07	2,2E-07	2,0E-07	2,6E-08	77	11
	7	enveloppe sable, épaisseur= 2,8m	2,9E-07	2,2E-07	1,8E-07	4,7E-08	77	21
	8	enveloppe sable, épaisseur= 4,2m	2,9E-07	2,2E-07	1,6E-07	6,7E-08	77	30
	9	enveloppe sable, épaisseur= 5,6m	2,9E-07	2,2E-07	1,5E-07	7,4E-08	76	35
	10	enveloppe sable, épaisseur= 8,5m	2,9E-07	2,2E-07	1,2E-07	1,0E-07	77	44
Contraste de conductivité hydraulique (K) entre stériles et enveloppe	4b	Cas de base : simulation sans enveloppe perméable	2,9E-07	2,2E-07	2,2E-07		77	
	11a	K stériles=10-4 m/s, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	1,5E-07	7,7E-08	77	35
	11b	K stériles=10-4 m/s, cas sans enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	2,2E-07		78	
	12a	K stériles=10-6 m/s, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	3,5E-09	2,2E-07	77	98
	12b	K stériles=10-6 m/s, cas sans enveloppe	2,8E-07	2,1E-07	2,1E-07		74	

Tableau 6.2 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en section et quelques résultats des simulations (suite).

Paramètre étudié	No.	Modification par rapport au cas de base	Q intout domaine, m ² /s	Q fosse m ² /s	Q stériles m ² /s	Q enveloppe m ² /s	Q fosse / Q domaine (%)	Efficacité enveloppe (%)
Contraste de conductivité hydraulique (K) entre massif fracturé et stériles	13a	b = 1mm (Kéq. EPM = 7,3x10 ⁻⁵ m/s), cas avec enveloppe	2,0E-04	1,1E-04	1,5E-05	1,0E-04	58	49
	13b	b = 1mm, cas sans enveloppe	1,6E-04	2,9E-05	2,9E-05		18	
	14a	b = 2mm (Kéq. EPM = 1,0x10 ⁻⁴ m/s), cas avec enveloppe	1,3E-03	3,4E-04	3,4E-05	3,0E-04	25	1
	14b	b = 2mm, cas sans enveloppe	1,2E-03	3,4E-05	3,4E-05		3	
	15a	b = 3mm (Kéq. EPM = 2,0x10 ⁻³ m/s), cas avec enveloppe	4,3E-03	4,6E-04	4,2E-05	4,2E-04	11	-19
	15b	b = 3mm, cas sans enveloppe	4,2E-03	3,5E-05	3,5E-05		1	
(b signifie ouverture des fractures)	16a	b = 10mm (Kéq. EPM = 7,3x10 ⁻² m/s), cas avec enveloppe	1,5E-01	5,8E-04	4,7E-05	5,3E-04	0	-32
	16b	b = 10mm, cas sans enveloppe	1,5E-01	3,5E-05	3,5E-05		0	
(roc signifie roche intacte)	17a	Kroc = 2x10 ⁻¹¹ m/s (Kéq. EPM = 7,2x10 ⁻⁸ m/s), cas avec env.	2,2E-07	1,7E-07	2,4E-08	1,5E-07	79	86
	17b	Kroc = 2x10 ⁻¹¹ m/s, cas sans enveloppe	2,2E-07	1,7E-07	1,7E-07		77	
	18a	Kroc = 2x10 ⁻⁶ m/s (Kéq. EPM = 2,1x10 ⁻⁶ m/s), cas avec env.	6,8E-06	4,7E-06	7,4E-07	4,0E-06	69	84
	18b	Kroc = 2x10 ⁻⁶ m/s, cas sans enveloppe	6,5E-06	4,5E-06	4,5E-06		70	
	19a	Kmassif fracturé = 10 ⁻⁵ m/s, cas avec enveloppe	3,2E-05	2,4E-05	3,3E-06	2,0E-05	73	75
	19b	Kmassif fracturé = 10 ⁻⁵ m/s, cas sans enveloppe	2,8E-05	1,3E-05	1,3E-05		48	
	20a	Kmassif fracturé = 10 ⁻¹⁰ m/s, cas avec enveloppe	3,3E-10	2,5E-10	3,6E-11	2,1E-10	75	86
	20b	Kmassif fracturé = 10 ⁻¹⁰ m/s, cas sans enveloppe	3,3E-10	2,6E-10	2,6E-10		77	
	21a	2X - de fractures (Kéq. EPM = 5,5x10 ⁻⁸ m/s), cas avec env.	1,7E-07	1,3E-07	1,8E-08	1,1E-07	77	86
	21b	2 fois moins de fractures, cas sans enveloppe	1,7E-07	1,3E-07	1,3E-07		78	
	22a	2 fois plus de fractures, cas avec enveloppe	6,3E-07	4,9E-07	6,8E-08	4,2E-07	78	86
	22b	2 fois plus de fractures, cas sans enveloppe	6,3E-07	4,8E-07	4,8E-07		77	
	23a	fractures discontinues sur le domaine, cas avec enveloppe	2,0E-07	1,6E-07	2,2E-08	1,4E-07	78	86
	23b	fractures discontinues sur le domaine, cas sans enveloppe	2,0E-07	1,6E-07	1,6E-07		78	

Tableau 6.2 : Description des cas étudiés pour la fosse vue en section et quelques résultats des simulations (suite).

Paramètre étudié	No.	Modification par rapport au cas de base	Q in/out domaine, m ³ /s	Q fosse m ³ /s	Q sténies m ³ /s	Q enveloppe m ³ /s	Q fosse / Q domaine (%)	Efficacité enveloppe (%)
Dimensions de la fosse	24a	fosse tronquée, fond à z=20m, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	2,3E-08	2,0E-07	76	89
	24b	fosse tronquée, fond à z=20m, cas sans enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	2,2E-07		75	
	25a	fosse tronquée, fond à z=30m, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,0E-07	1,7E-08	1,9E-07	71	92
	25b	fosse tronquée, fond à z=30m, cas sans enveloppe	2,9E-07	2,1E-07	2,1E-07		72	
	26a	fosse tronquée, fond à z=40m, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,0E-07	1,3E-08	1,8E-07	68	94
	26b	fosse tronquée, fond à z=40m, cas sans enveloppe	2,9E-07	2,0E-07	2,0E-07		69	
Gradient hydraulique régional	27a	gradient hydraulique régional 4%, cas avec enveloppe	5,8E-07	4,4E-07	6,3E-08	3,7E-07	76	86
	27b	gradient hydraulique régional 4%, cas sans enveloppe	5,8E-07	4,5E-07	4,5E-07		77	
	28a	gradient hydraulique régional 6%, cas avec enveloppe	8,7E-07	6,7E-07	9,5E-08	5,8E-07	77	86
	28b	gradient hydraulique régional 6%, cas sans enveloppe	8,6E-07	6,7E-07	6,7E-07		77	
	29a	gradient hydraulique régional 50%, cas avec enveloppe	7,2E-06	5,6E-06	7,8E-07	4,8E-06	78	86
	29b	gradient hydraulique régional 50%, cas sans enveloppe	7,2E-06	5,5E-06	5,5E-06		77	
	30a	épaisseur enveloppe = 2,8m et gradient 6%, cas avec env.	8,7E-07	6,7E-07	1,6E-07	5,1E-07	78	76
	30b	épaisseur enveloppe = 2,8m et gradient 6%, cas sans env.	8,6E-07	6,7E-07	6,7E-07		77	
	31a	Kroche intacte = 10-6 m/s et gradient 6%, cas avec env.	2,0E-05	1,6E-05	2,2E-06	1,4E-05	77	84
	31b	Kroche intacte = 10-6 m/s et gradient 6%, cas sans env.	1,9E-05	1,4E-05	1,4E-05		70	
Vérifications (z est l'élévation)	32a	maillage plus fin, cas avec enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	3,2E-08	1,9E-07	78	86
	32b	maillage plus fin, cas sans enveloppe	2,9E-07	2,2E-07	2,2E-07		77	
	33a	Kéivalent EPM (cas de base), cas avec enveloppe	3,0E-07	2,3E-07	3,3E-08	2,0E-07	77	86
	33b	Kéivalent EPM (cas de base), cas sans enveloppe	3,0E-07	2,3E-07	2,3E-07		77	
	34a	pas de fractures verticales, cas avec enveloppe	2,8E-07	1,6E-07	2,4E-08	1,4E-07	60	86
	34b	pas de fractures verticales, cas sans enveloppe	2,8E-07	1,7E-07	1,7E-07		60	
	35a	frontière inf. à z = -120m, cas avec enveloppe	4,2E-07	2,3E-07	3,3E-08	2,0E-07	56	86
	35b	frontière inf. à z = -120m, cas sans enveloppe	4,2E-07	2,3E-07	2,3E-07		56	

6.2.2 Analyse des résultats

Les résultats des simulations avec la variation des différents paramètres étudiés (épaisseur de l'enveloppe, dimensions de la fosse, contraste de conductivité hydraulique entre le matériau de l'enveloppe et les stériles, contraste de conductivité hydraulique entre le massif fracturé et les stériles et le gradient hydraulique régional) sur la réponse de l'enveloppe perméable qui vise à diminuer les débits à travers une fosse sont présentés dans cette section. Les valeurs d'efficacité sont portées en graphique en fonction du paramètre modifié de façon à visualiser et à quantifier son influence. De plus, les équipotentielles de certains cas typiques sont également présentés.

Épaisseur de l'enveloppe

Pour les cas de la fosse vue en plan et vue en section, des simulations avec des enveloppes de gravier ($K=1.0 \times 10^{-3}$ m/s) de 1.4m, 2.8m, 4.2m, 5.6m et 8.5m ont été réalisées (simulations 1 à 5 des tableaux 6.1 et 6.2). Des simulations similaires ont été effectuées mais avec des enveloppes de sable ($K=1.0 \times 10^{-4}$ m/s) de mêmes dimensions (simulations 5 à 10 des tableaux 6.1 et 6.2). Tel qu'anticipé, plus l'enveloppe est large, plus cela en augmente l'efficacité. L'augmentation de l'épaisseur de l'enveloppe augmente directement la transmissivité de celle-ci, d'où les débits supérieurs qui peuvent y circuler. La conséquence d'une augmentation des débits dans l'enveloppe est une réduction relative des débits dans les stériles et donc une augmentation de l'efficacité. La figure 6.18 présente le graphique de la relation entre l'efficacité de l'enveloppe en fonction de l'épaisseur de l'enveloppe. Sur cette figure, les points représentent les valeurs calculées à partir des résultats de FRAC3DVS et les lignes sont des fonctions de régression obtenues avec le logiciel MS EXCEL. On voit que les enveloppes de gravier sont beaucoup plus efficaces que celles de sable (en moyenne 75% versus 25%), car le contraste de conductivité hydraulique entre le gravier et les stériles est plus élevé que celui entre le sable et les stériles (deux ordres de grandeur

versus un ordre de grandeur). Lorsque l'épaisseur de l'enveloppe est nulle, l'efficacité est également nulle et cette valeur a été portée au graphique de la figure 6.18.

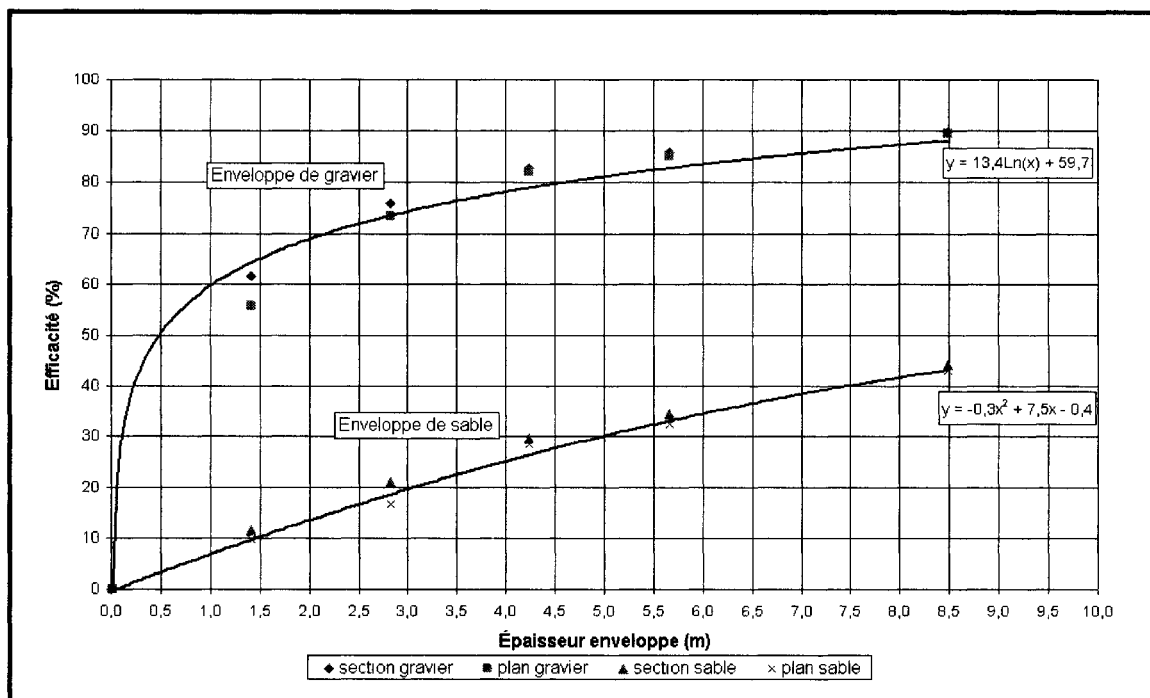


Figure 6.18 : Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur l'efficacité de l'enveloppe perméable.

À titre d'exemple, la figure 6.19 présente les équipotentielles pour le cas de la fosse vue en section avec une enveloppe perméable de 2.8m en gravier. Les gradients hydrauliques au centre de la fosse sont de 0.007% comparativement à 0.004% pour le cas de base (figure 6.8).

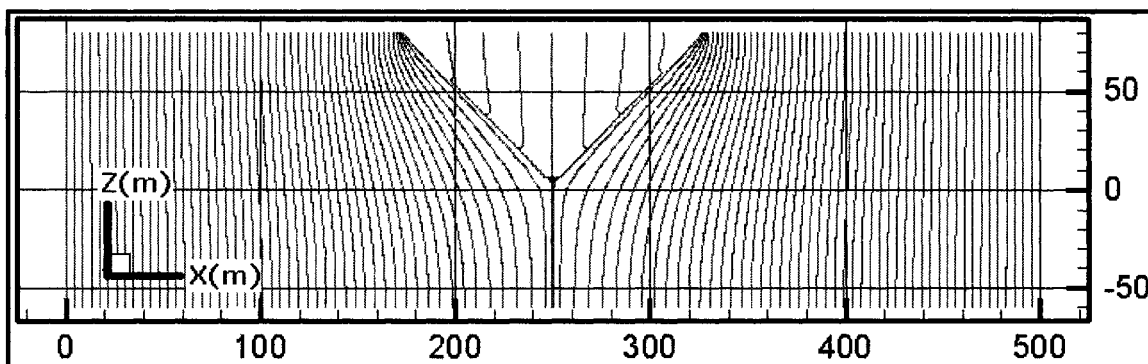


Figure 6.19 : Équipotentiellles (m) de la fosse vue en section avec enveloppe de 2.8m.

Dimensions de la fosse

Les simulations du cas de base ainsi que les simulations 18 à 21 (tableau 6.1) et 24 à 26 (tableau 6.2) ont été utilisées pour analyser l'effet des dimensions de la fosse sur la réduction des débits à travers une fosse. La figure 6.20 présente les valeurs de l'efficacité calculée en fonction de la dimension de la fosse perpendiculaire à l'axe du gradient hydraulique régional. Pour la fosse vue en plan, cette dimension correspond généralement la diagonale de l'ouverture carrée. Toutefois, dans le cas des fosses avec les côtés parallèles aux frontières (simulations 20 et 21 du tableau 6.1), cette dimension est la longueur du côté perpendiculaire l'écoulement régional. Pour la fosse vue en section, la dimension de la fosse perpendiculaire au gradient est la profondeur.

Sur la figure 6.20, les points représentent les valeurs calculées à partir des résultats de FRAC3DVS, et les lignes sont des régressions linéaires obtenues avec le logiciel MS EXCEL. Cette figure indique que l'efficacité d'une enveloppe perméable est inversement proportionnelle à la dimension de la fosse perpendiculaire au gradient hydraulique régional (pour une épaisseur d'enveloppe constante).

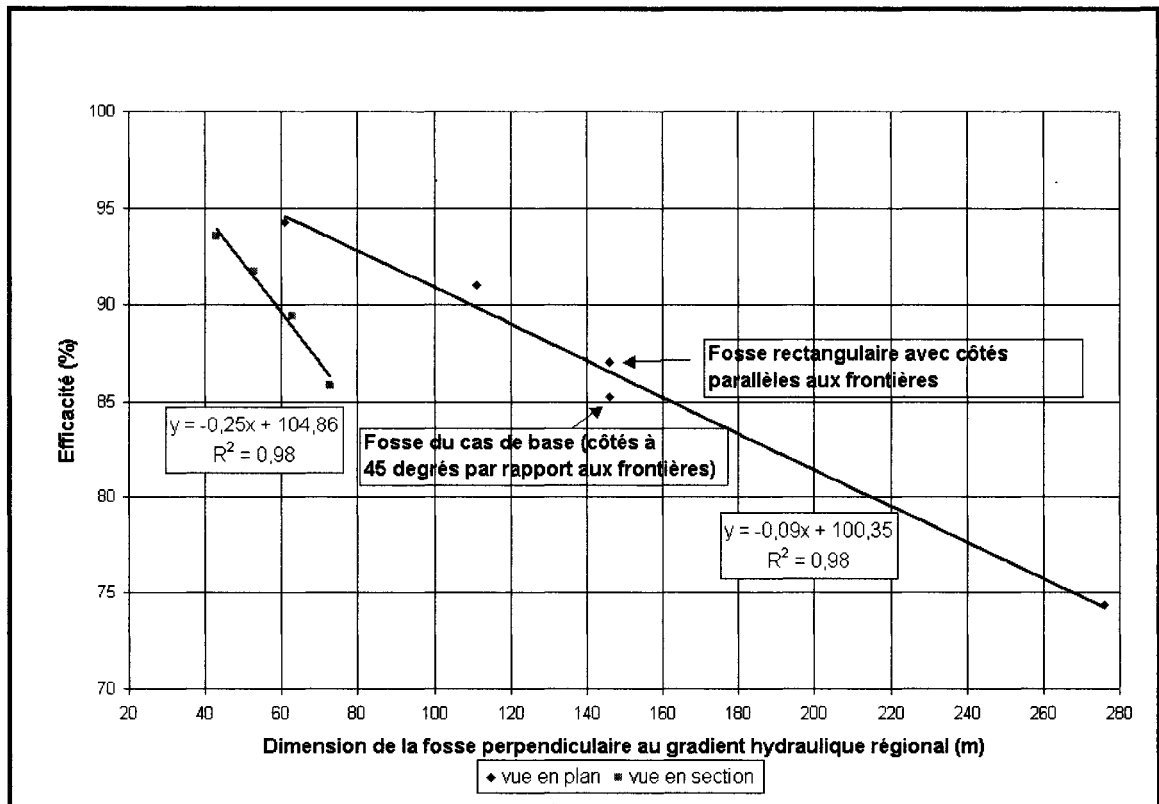


Figure 6.20 : Effet de la dimension de la fosse sur l'efficacité.

Les figures 6.21 et 6.22 présentent les équipotentiellles des simulations de la fosse vue en plan mais 2.4 fois plus petite que celle du cas de base (simulations 19a et 19b du tableau 6.1). Dans le cas avec enveloppe (figure 6.21), les gradients hydrauliques au centre de la fosse sont de 0.002% comparativement à 0.005% pour le cas de base (figure 6.6). Dans le cas sans enveloppe (figure 6.22), les gradients hydrauliques au centre de la fosse sont de 0.05%. Sur ces figures, l'espacement entre les équipotentiellles dans le massif fracturé est de 0.1m

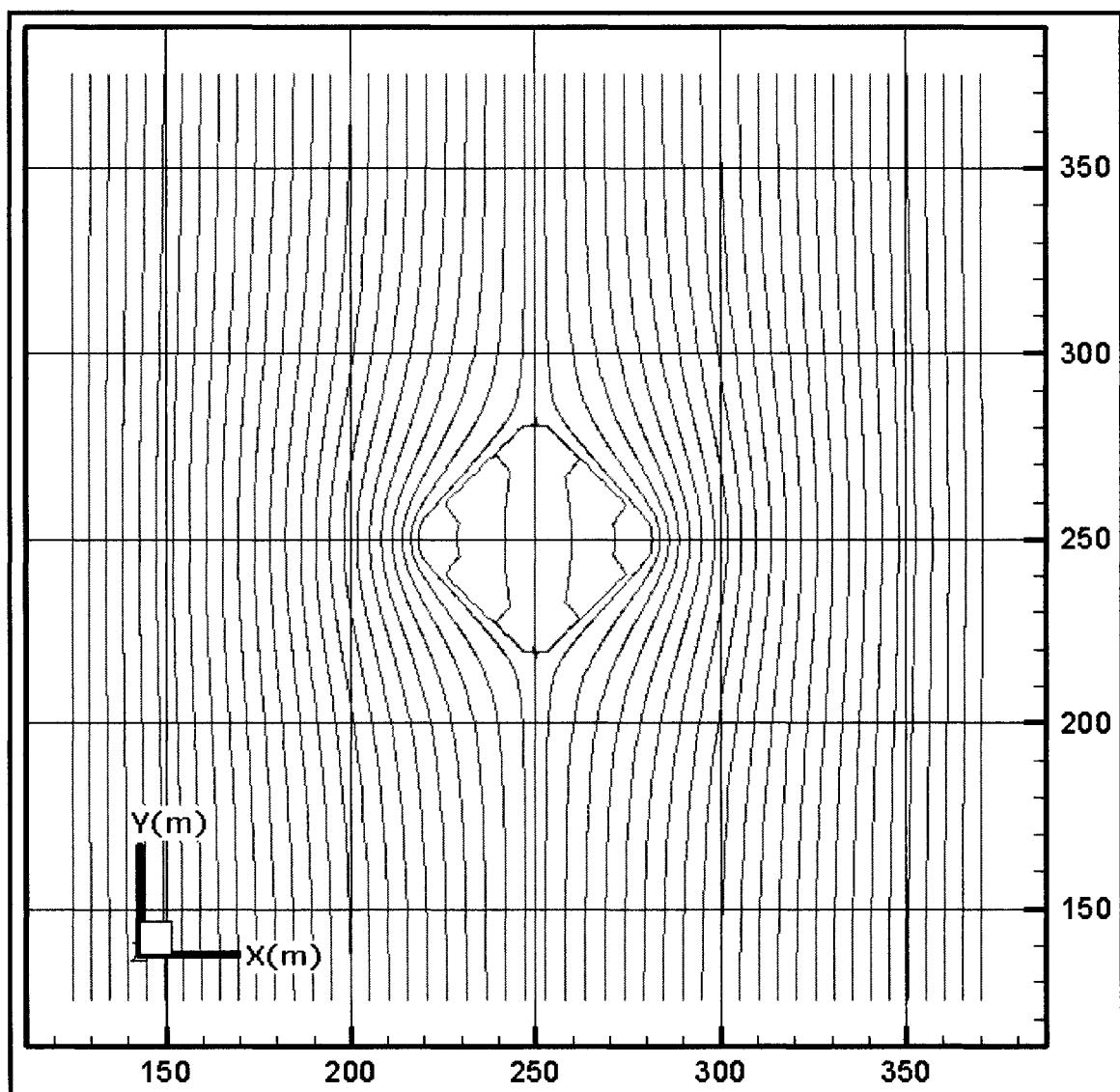


Figure 6.21 : Équipotentiellles (m) de la fosse 2.4 fois plus petite, cas avec enveloppe.

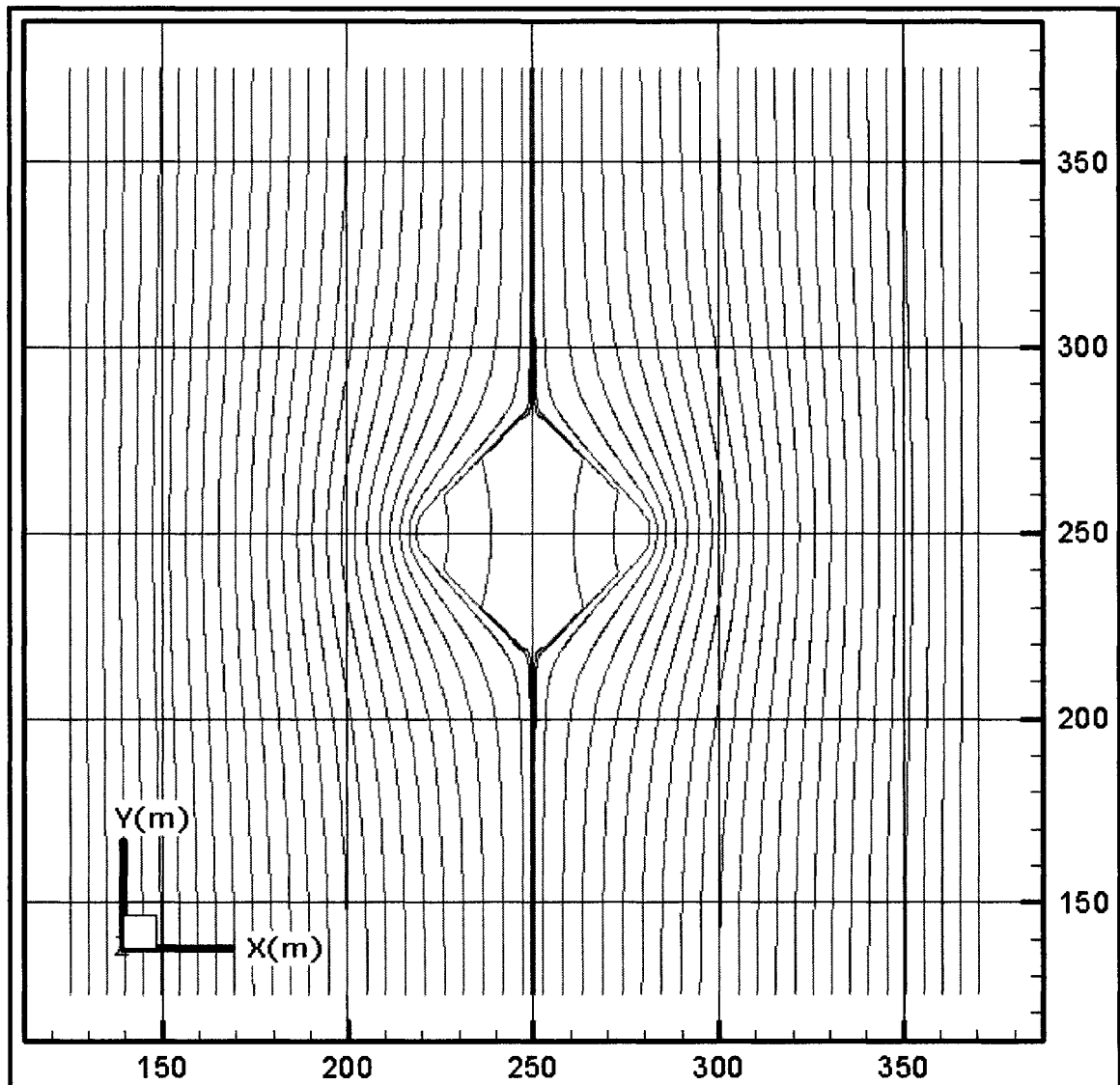


Figure 6.22 : Équipotentiels (m) de la fosse 2.4 fois plus petite, cas sans enveloppe.

Contraste de conductivité hydraulique entre l'enveloppe et les stériles

Les simulations 4, 9, 11 et 12 (tableaux 6.1 et 6.2) ont été réalisées afin de connaître l'effet sur l'efficacité de l'enveloppe du contraste entre la conductivité hydraulique du matériau de l'enveloppe et celle des stériles. Le tableau 6.3 présente les valeurs des conductivités hydrauliques de l'enveloppe et des stériles pour ces simulations.

Tableau 6.3 : Conductivités hydrauliques de l'enveloppe et des stériles pour les simulations 4, 9, 11 et 12.

Simulation	K enveloppe (m/s)	K stériles (m/s)
4 (cas de base)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-5}
12	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}
11	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
9	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}

La figure 6.23 présente le graphique de l'efficacité de l'enveloppe perméable en fonction du rapport K stériles / K enveloppe. Sur cette figure, les points représentent les valeurs calculées à partir des résultats de FRAC3DVS et les lignes servent simplement à relier les points entre eux à titre indicatif. Lorsque l'enveloppe est de même conductivité hydraulique que les stériles, le quotient K stériles / K enveloppe est égal à 1 et l'efficacité de l'enveloppe calculée par l'équation 6.1 est très faible (5%). Ce point est également représenté à la figure 6.23. Il est normal que l'efficacité ne soit pas nulle dans ce cas à cause de la méthode de calcul de l'efficacité (le volume de stériles considéré est légèrement plus grand dans le cas sans enveloppe que dans le cas avec enveloppe). La figure 6.23 montre que l'efficacité de l'enveloppe perméable diminue lorsque le rapport K stériles / K enveloppe augmente. Cette relation est cependant fortement non linéaire dans la plage de valeurs considérées.

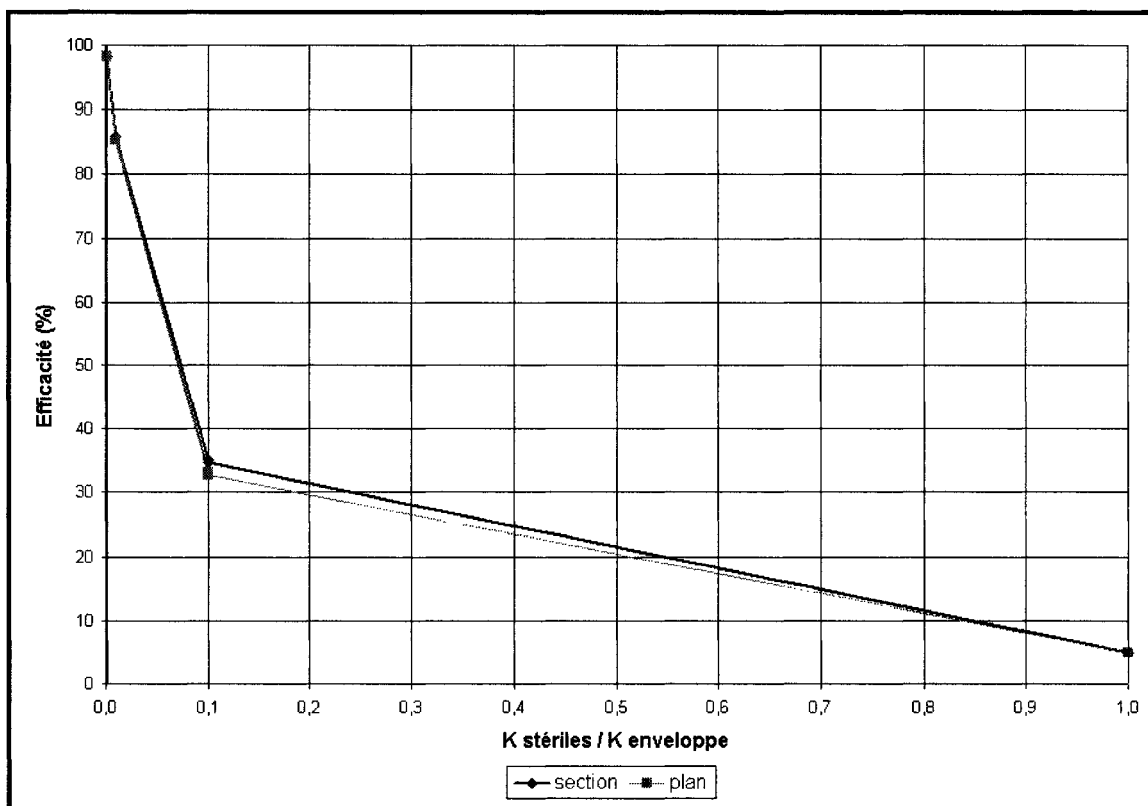


Figure 6.23 : Effet du quotient K stériles / K enveloppe sur l'efficacité.

À titre d'illustration, les figures 6.24 et 6.25 présentent les équipotentiellles des simulations 11a et 11b (tableau 6.2). Il s'agit de la fosse vue en section avec un contraste de un ordre de grandeur entre la conductivité hydraulique de l'enveloppe et celle des stériles. L'efficacité de l'enveloppe perméable pour cette simulation est de 35% comparativement à 86% pour celle du cas de base où le contraste des conductivités hydrauliques est de deux ordres de grandeur). Pour la simulation 11a (cas avec enveloppe, figure 6.24), les gradients hydrauliques au centre de la fosse sont de 0.002% comparativement à 0.004% pour ceux du cas de base. Pour le cas sans enveloppe (figure 6.25), les gradients hydrauliques au centre de la fosse sont de 0.004% comparativement à 0.04% pour ceux du cas de base.

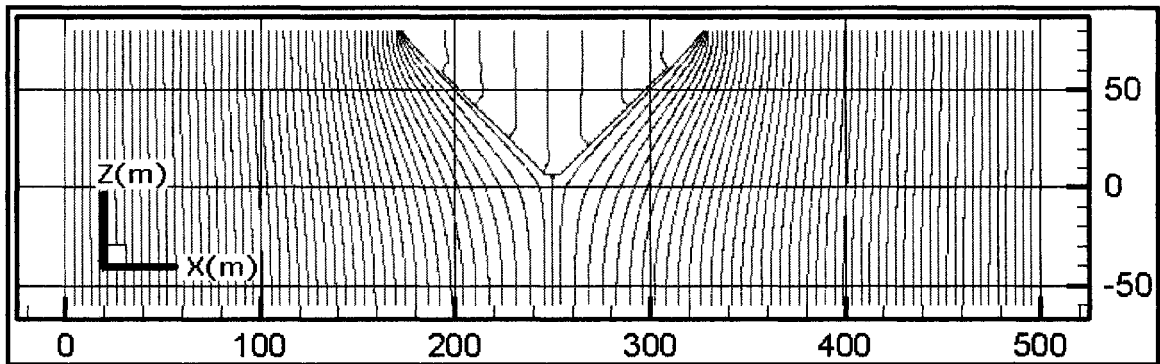


Figure 6.24 : Équipotentiellles (m) de la simulation 11a pour la fosse vue ne section.

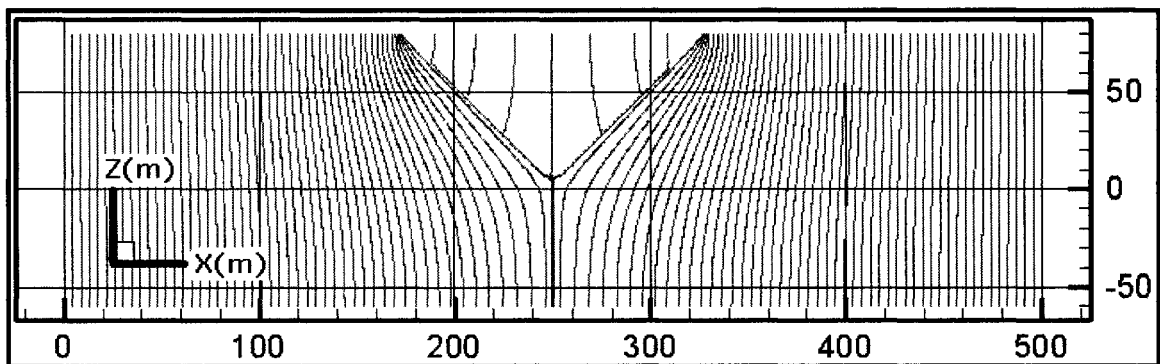


Figure 6.25 : Équipotentiellles (m) de la simulation 11b pour la fosse vue en section.

Contraste de conductivité hydraulique entre le massif fracturé et les stériles

Afin d'évaluer l'effet du contraste entre la conductivité hydraulique du massif fracturé et celle des stériles, plusieurs simulations ont été réalisées. Le quotient K massif fracturé sur K stériles a été varié de 10^{-5} à 10^{+4} (simulations 4 et 13 à 16 du tableau 6.1 et simulations 4 et 13 à 21 du tableau 6.2). Cela en modifiant l'ouverture des fractures, la conductivité de la roche intacte et celle des stériles. Pour chaque simulation, le quotient K stériles / K enveloppe a été maintenu constant à 0.01 (afin d'exclure de l'analyse les variations d'efficacité attribuées pas ce paramètre). Pour toutes ces simulations, l'épaisseur de l'enveloppe et les dimensions des fosses étaient également constantes et égales à celles du cas de base. Dans cette étude, la conductivité hydraulique du massif

fracturé a été modifiée surtout par la variation de l'ouverture des fractures mais aussi par la variation de la conductivité hydraulique de la roche intacte et ce sont ces paramètres qui ont été modifiés afin de faire varier K massif fracturé. La figure 6.26 présente les résultats obtenus pour cette analyse de sensibilité. Les résultats présentés sont l'efficacité de l'enveloppe perméable en fonction du quotient K massif fracturé / K stériles ainsi que les débits unitaires dans les stériles au centre de la fosse (à la ligne BB des figures 6.1 et 6.3 pour les cas avec et sans enveloppe). Les résultats d'une même catégorie sont reliés entre eux à titre indicatif seulement.

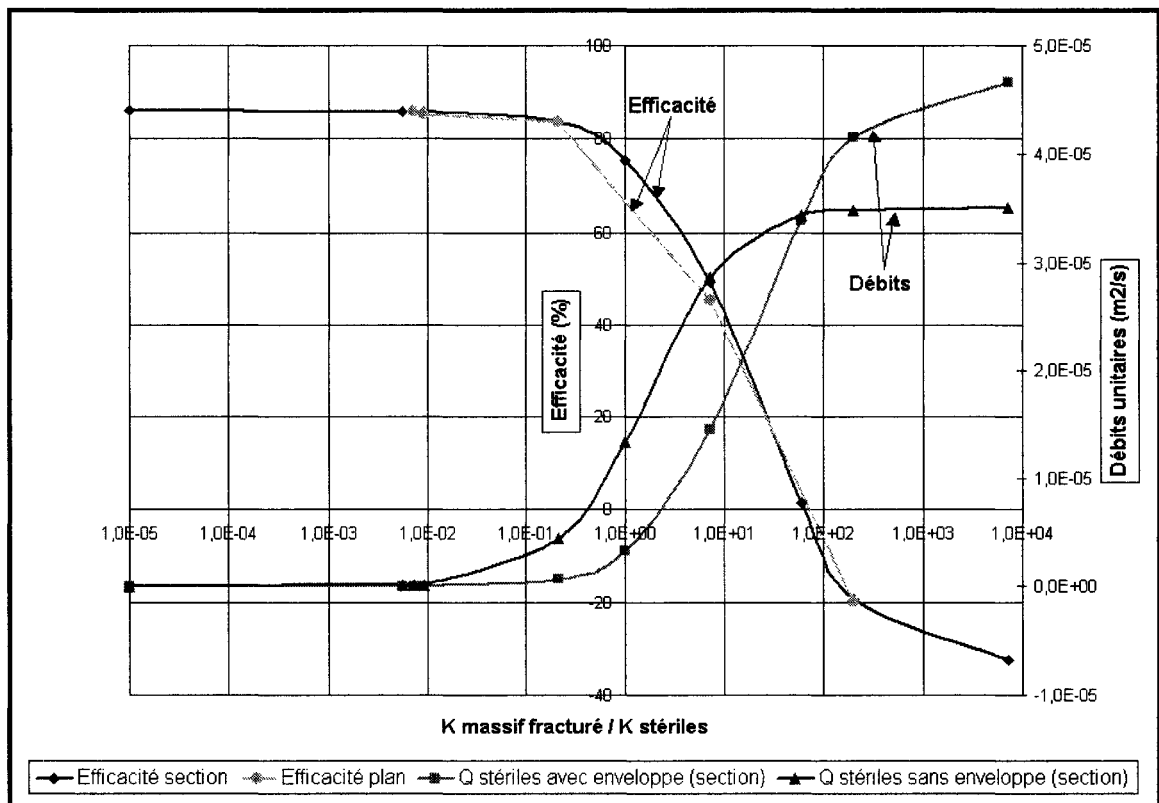


Figure 6.26 : Effet du quotient K massif fracturé / K stériles sur l'efficacité.

Pour les conditions de simulation de cette étude, la figure 6.26 permet de constater que l'efficacité de l'enveloppe perméable demeure pratiquement constante tant que les stériles sont plus perméables que le massif fracturé. Cette figure montre également que

l'efficacité de l'enveloppe perméable diminue rapidement pour des valeurs du quotient K massif fracturé / K stériles situées entre 1 et 60. Passé une valeur de 60 environ, l'enveloppe perméable devient nuisible (efficacités négatives) car elle fait alors entrer plus d'eau dans les stériles que dans le cas sans enveloppe.

La technique de l'enveloppe perméable serait donc efficace pour réduire les débits lorsque les rejets dans la fosse sont plus perméables que le massif fracturé. Par exemple, les figures 6.27 et 6.28 présentent les équipotentielles des simulations 14a et 14b. Il s'agit des simulations avec et sans enveloppe de la fosse vue en plan dont les fractures du massif sont de 3mm d'ouverture. L'efficacité pour ce cas est de -20% (inefficace), c'est-à-dire que la présence de l'enveloppe perméable induit un débit unitaire plus élevé dans les stériles par rapport à celui du cas sans enveloppe.

La conductivité hydraulique du massif fracturé envisagé comme un milieu poreux équivalent pour ces simulations est de 2×10^{-3} m/s, celle de l'enveloppe de gravier est de 1×10^{-3} m/s et celle des stériles est de 1×10^{-5} m/s. Comme la conductivité hydraulique du massif fracturé est très élevée comparativement au contenu de la fosse, peu d'eau traverse la fosse. Le quotient Q fosse / Q domaine est de 4% dans le cas avec enveloppe et de seulement 0.4% dans le cas sans enveloppe. Il y a donc plus d'eau qui entre dans la fosse lorsqu'il y a une enveloppe et c'est probablement car celle-ci est de conductivité hydraulique similaire à celle du massif fracturé et que l'eau y pénètre facilement. Dans le cas sans enveloppe, les stériles étant deux ordres de grandeur moins perméables que le massif fracturé, l'eau a moins tendance à y circuler et elle est préférentiellement déviée autour de la fosse.

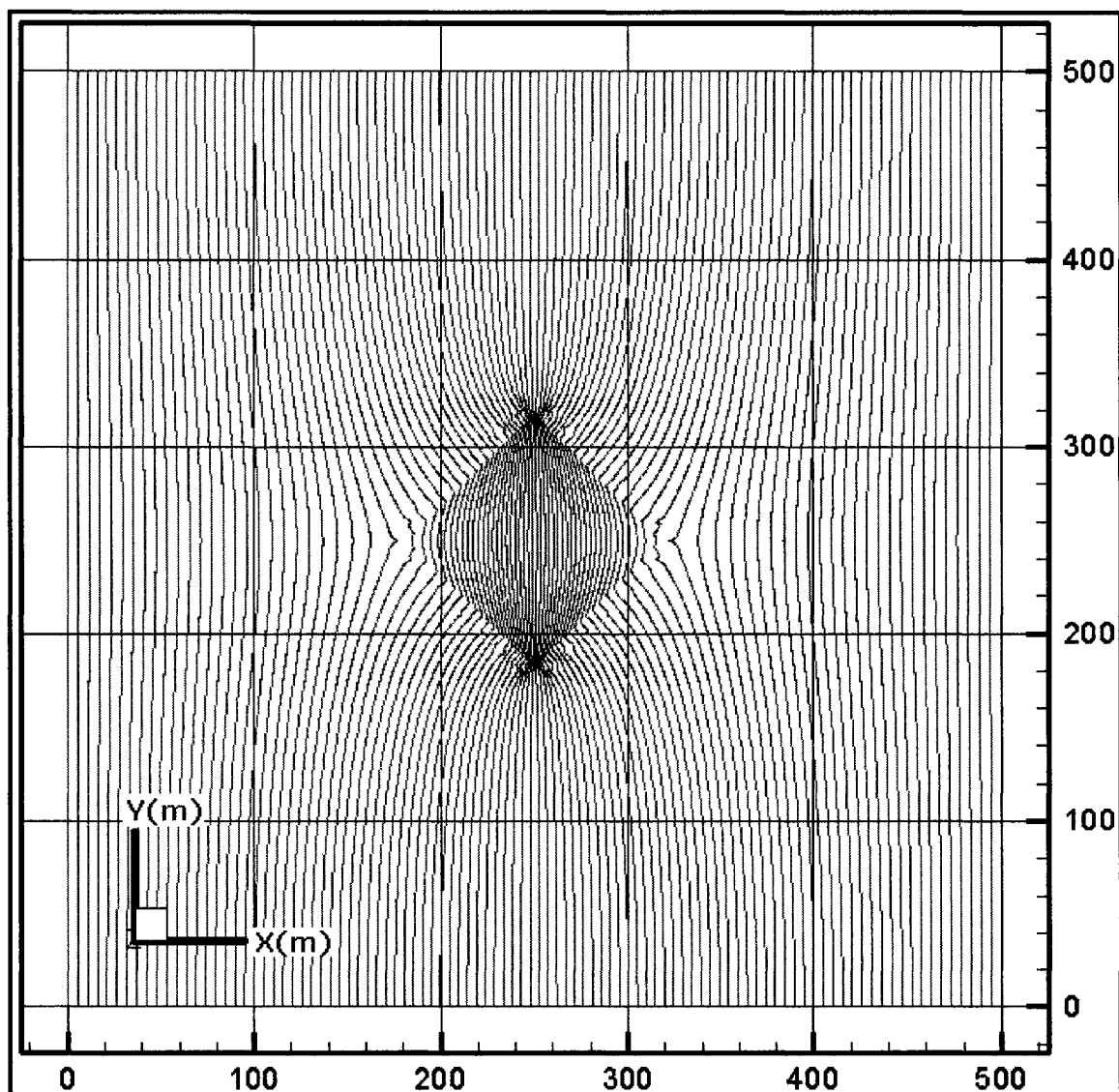


Figure 6.27 : Équipotentiels (m) de la simulation 14a pour la fosse vue en plan.

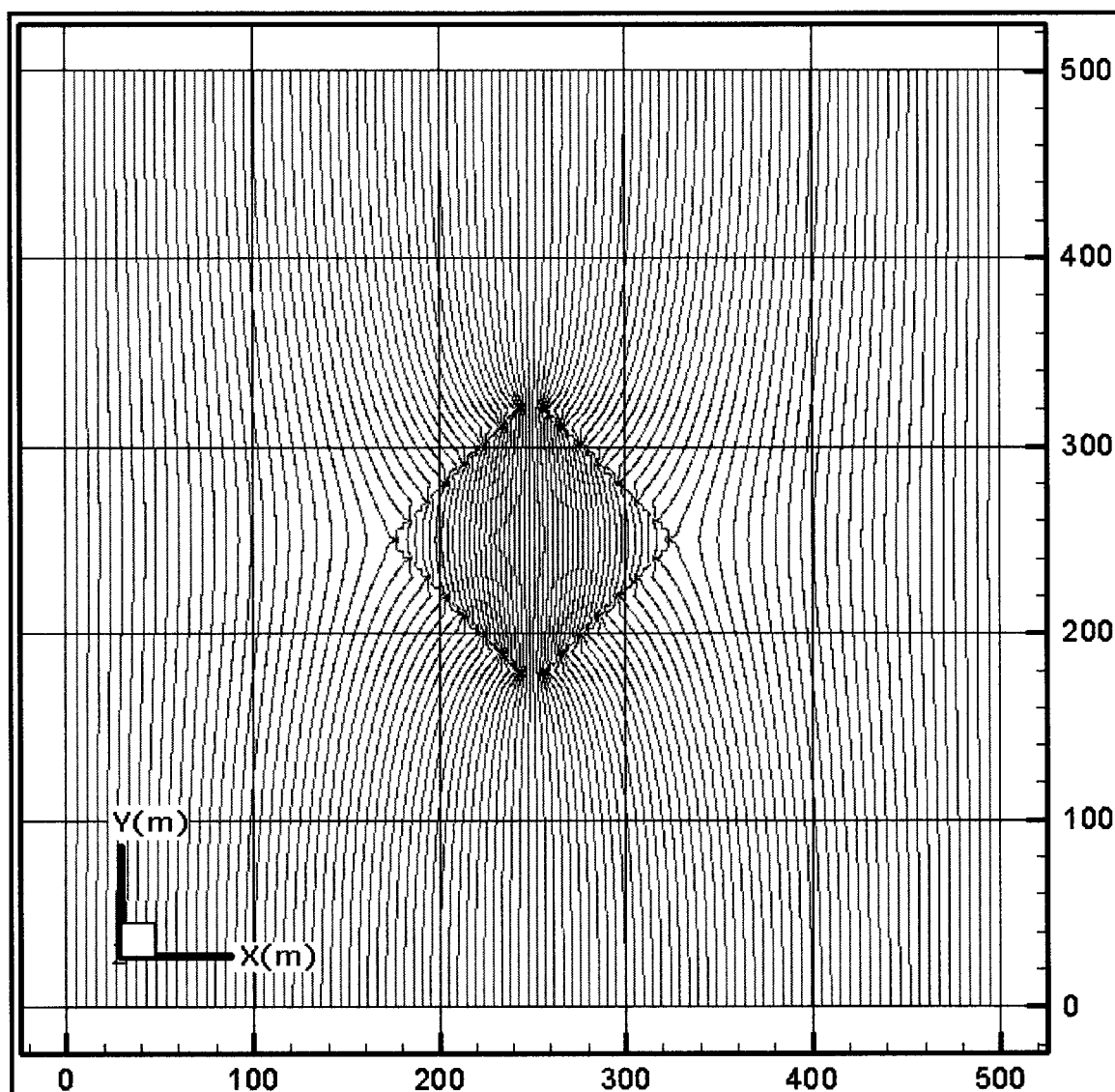


Figure 6.28 : Équipotentiellles (m) de la simulation 14b pour la fosse vue en plan.

Gradient hydraulique régional

Plusieurs simulations du cas de base, pour les vues en plan et en section, ont été réalisées avec un gradient hydraulique régional plus élevé que 2% (jusqu'à 50%). Il s'agit des simulations 4 et 22 à 24 (tableau 6.1) et des simulations 4 et 27 à 31 (tableau 6.2). Ces simulations ont permis de constater que le gradient hydraulique régional n'a aucun impact perceptible sur l'efficacité de l'enveloppe perméable. La conséquence de

l'augmentation du gradient hydraulique régional est de faire circuler plus d'eau dans toutes les régions du domaine. Toutefois, comme les proportions entre les débits unitaires aux différents endroits du domaine demeurent constantes, les efficacités restent les mêmes.

6.3 Discussion

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre montre que l'efficacité de la technique de l'enveloppe perméable est sensible à l'épaisseur de l'enveloppe ainsi qu'à la dimension de la fosse perpendiculaire au gradient hydraulique régional. De plus, l'efficacité varie avec le contraste entre la conductivité hydraulique du matériau de l'enveloppe et celle des stériles. Plus l'enveloppe est perméable comparativement aux stériles contenus dans la fosse, plus la technique est efficace. On a aussi constaté que cette technique d'entreposage des stériles miniers peut être très efficace pour diminuer les débits à travers une fosse dans les cas où la conductivité hydraulique des stériles est plus élevée que celle du massif fracturé.

Lorsqu'une approche de fracturation discrète est employée pour étudier l'écoulement en milieux fracturés, une modélisation tridimensionnelle du domaine est supérieure à une représentation bidimensionnelle. En effet, celle-ci permet de mieux représenter la connectivité entre les fractures dans l'espace et ainsi la distribution de l'écoulement sur le domaine. De façon générale, les modèles numériques 3D sont plus représentatifs que les modèles 2D car ils s'apparentent plus à la réalité. Toutefois, les modèles 3D ont le désavantage d'être difficilement réalisables pour des problèmes à grande échelle à cause des temps de calcul excessivement longs requis avec les ordinateurs courants. L'étude paramétrique de l'enveloppe perméable présentée dans ce chapitre visait à estimer le comportement hydrique de cette technique d'entreposage pour le cas d'une fosse en forme de pyramide à base carrée, par le biais d'analyses de deux modèles 2D. Il s'agissait d'un modèle 2D représentant la fosse vue en plan, à l'élévation de surface,

ainsi que d'un modèle 2D, vertical, représentant la section centrale de la fosse, parallèlement au gradient hydraulique régional. En réalité, le modèle 2D de la fosse vue en plan correspond au cas d'une excavation carrée infiniment profonde et le modèle 2D de la fosse vue en section, au cas d'une fosse infiniment longue. Dans le cas d'une fosse réelle en forme de pyramide à base carrée et vue en 3D, l'écoulement de l'eau dans l'enveloppe perméable s'effectuerait probablement à la fois autour des côtés de la fosse et par la base de celle-ci. Il est également possible de supposer que l'efficacité de l'enveloppe perméable à faire diminuer les débits à travers cette fosse en 3D serait la moyenne entre l'efficacité de l'analyse de la fosse vue en plan (85%) et celle de la vue en section (86%). L'efficacité pourrait même être supérieure puisqu'elle est inversement proportionnelle aux dimensions de la fosse (pour une épaisseur d'enveloppe donnée), et que celles-ci diminuent avec la profondeur et vers les extrémités dans le cas d'une fosse en forme de pyramide inversée.

Aux tableaux 6.1 et 6.2, il est possible de constater que les valeurs d'efficacité des enveloppes perméables sont très similaires (à quelques points de pourcentage près), pour les simulations de la fosse vue en plan et pour celles de la vue en section, lorsque effectuées pour les mêmes conditions. Il en est ainsi en raison de la similarité entre les géométries des deux domaines étudiés. Dans le cas de la fosse vue en plan, la distribution des débits montre un axe de symétrie situé au centre de la fosse, parallèlement au gradient hydraulique régional. En conséquence, il aurait été possible de modéliser seulement une moitié du domaine de la fosse vue en plan, c'est-à-dire la moitié du domaine situé d'un côté ou de l'autre de cet axe de symétrie. Comme la géométrie du domaine de la vue en section correspond approximativement à la demi de celle de la fosse vue en plan (tel que séparé par cet axe de symétrie), il s'agit de deux modélisations pratiquement similaires d'où les résultats d'efficacité similaires (comparer les figures 6.1 et 6.3). Toutefois, si une fosse 3D d'une géométrie différente avait été retenue pour les analyses, les efficacités des simulations des vues 2D en plan et en section auraient probablement été différentes entre elles.

Ensuite, il faut mentionner que bien que cette analyse paramétrique ait été réalisée par une approche conceptuelle de fracturation discrète, l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent aurait aussi pu être utilisée. En effet, la simplicité du réseau de fractures imposé et l'échelle du problème rendait possible la détermination d'un volume élémentaire représentatif «REV» sur le domaine. De plus, les dimensions de celui-ci étaient très inférieures aux dimensions du domaine. Dans le cas des simulations présentées au chapitre 6, le «REV» peut être estimé à un carré de 10m de côté, soit la distance entre le centre des fractures horizontales et verticales sur le domaine. Si un carré de cette dimension est déplacé n'importe où sur le domaine, il comprendra toujours une fracture horizontale et une fracture verticale. La simplicité du réseau de fractures rend la conductivité hydraulique d'un milieu poreux équivalent facilement calculable.

Pour les simulations réalisées dans cette analyse paramétrique, l'approche de la fracturation discrète et l'approche du milieux poreux équivalent donnaient des résultats très semblables des débits à l'intérieur de la fosse et de l'efficacité. La simulation 33 du tableau 6.2 a permis de vérifier la similitude des résultats obtenus (Q domaine, Q fosse, Q stériles et efficacité) par les approches conceptuelle de la fracturation discrète et du milieu poreux équivalent. Cette simulation est très semblable à celle du cas de base (simulation 4), la seule différence étant que le massif fracturé a été modélisé comme un milieu poreux équivalent (au lieu de représenter les fractures discrètement). Les résultats des deux simulations (débits unitaires sur le domaine et efficacité) sont approximativement les mêmes pour les deux approches conceptuelles pour la configuration simple du problème étudié.

Les débits sont toutefois légèrement plus élevés dans le cas du massif fracturé modélisé comme un milieu poreux équivalent car l'espacement moyen entre les fractures a été légèrement sous estimé. Un espacement de 10m a été utilisé; cette valeur correspond à l'espacement entre les fractures, mais l'espacement moyen réel des fractures

horizontales est de 10.8m et celui des fractures verticales 10.2m (dimension du domaine divisé par le nombre de fractures).

En résumé, pour les cas simples présentés ici, l'utilisation de l'approche de la fracturation discrète n'était pas absolument essentielle, mais il n'en reste pas moins que cette approche demeure très utile pour étudier les cas réels rencontrés dans la pratique. Sur le terrain, les hypothèses permettant d'utiliser l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent sont souvent difficiles à vérifier, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de déterminer un «REV» sur le domaine étudié ou que celui-ci n'est pas de dimensions très inférieures à celles du domaine. De façon générale, les fractures majeures sont représentées par l'approche de la fracturation discrète tandis que les fractures mineures et la matrice sont prises en compte par l'approche du milieu poreux équivalent.

Il est également à noter que les conditions aux frontières utilisées dans cette étude paramétrique ne sont pas tout à fait réalistes. Elles ont été choisies afin de simuler des conditions d'écoulement saturées. Celles-ci sont en effet beaucoup plus faciles à faire converger numériquement que des conditions non saturées. Par exemple, pour le cas de base de la fosse vue en section (gradient hydraulique régional de 2%), une charge hydraulique de 90m était imposée aux nœuds de la frontière du domaine située en amont de la fosse et une charge hydraulique de 80m était imposée aux nœuds de la frontière située en aval. Ces conditions aux frontières faisaient en sorte que les éléments du domaine demeuraient saturés, avec un gradient hydraulique régional de 2%. Toutefois, ces conditions impliquent également que le domaine est sous pression positive (élévation maximale du domaine égale à 80m), comme s'il s'agissait d'un aquifère confiné. Cela n'est pas vraiment réaliste puisqu'une fosse est toujours située près de la surface d'un massif fracturé. En réalité, une fosse utilisée pour l'entreposage des rejets miniers, et où la technique de l'enveloppe perméable serait utilisée pourrait comporter une zone saturée située sous le niveau de la nappe phréatique et une zone non saturée située au-dessus. De plus, pour être vraiment efficace, la technique de l'enveloppe perméable

pourrait être utilisée en combinaison avec une couverture peu perméable placée sur le dessus des résidus. De cette façon, l'infiltration de l'eau de surface à travers les résidus et vers le réseau d'écoulement régional serait limité.

De plus, l'épaisseur constante de l'enveloppe perméable, sur les parois de la fosse, ne correspond pas nécessairement à une configuration réaliste. En effet, sur le terrain, le mode de déposition des matériaux de l'enveloppe par bennes de camion ferait probablement en sorte que l'enveloppe serait plus large à la base de la fosse que près de la surface. Il aurait été possible de modéliser une enveloppe d'épaisseur variable sur les parois de la fosse, mais l'utilisation d'une enveloppe d'épaisseur constante était plus facile à générer et à analyser (pour cette étude préliminaire portant sur un nouveau mode de gestion des rejets miniers).

Enfin, la plupart des simulations de cette étude paramétrique, dont les résultats sont présentés aux tableaux 6.1 et 6.2, ont été réalisées avec des maillages légèrement différents de ceux utilisés pour les cas de base. Les maillages des cas de base avaient des éléments de 0.5m x 0.5m partout sur le domaine alors que les autres comportaient des éléments cinq fois plus petits dans les zones où étaient extraites les données pour le calcul des débits unitaires (soit au centre de la fosse, à la position $x=250\text{m}$). Les maillages plus denses permettaient d'avoir une meilleure représentation de la distribution des vitesses dans l'enveloppe perméable ainsi que dans les stériles au centre de la fosse et de calculer les débits unitaires y circulant avec plus de justesse. Les simulations du cas de base ont été reprises avec les maillages plus denses afin de s'assurer qu'il n'y avait pas d'impact significatif sur les résultats (simulation 25 du tableau 6.1 et simulation 32 et tableau 6.2), ce qui était effectivement le cas. La figure 6.29 présente une comparaison entre la distribution des vitesses de Darcy dans l'enveloppe perméable au centre de la fosse pour les deux différents maillages (cas de base vue en section). Il s'agit du maillage plus dense dans la section du domaine située au centre de la fosse (éléments de 0.1m x 0.1m à cet endroit) et du maillage du cas de

base, moins dense, avec des éléments de 0.5m x 0.5m partout sur le domaine. Cette figure permet de constater que plus le maillage est dense, plus il est possible de connaître précisément les valeurs de vitesse près des interfaces entre les matériaux. Dans le cas présent, il s'agit des vitesses à l'interface entre le gravier de l'enveloppe et les stériles et de celles à l'interface entre le gravier de l'enveloppe et la roche intacte.

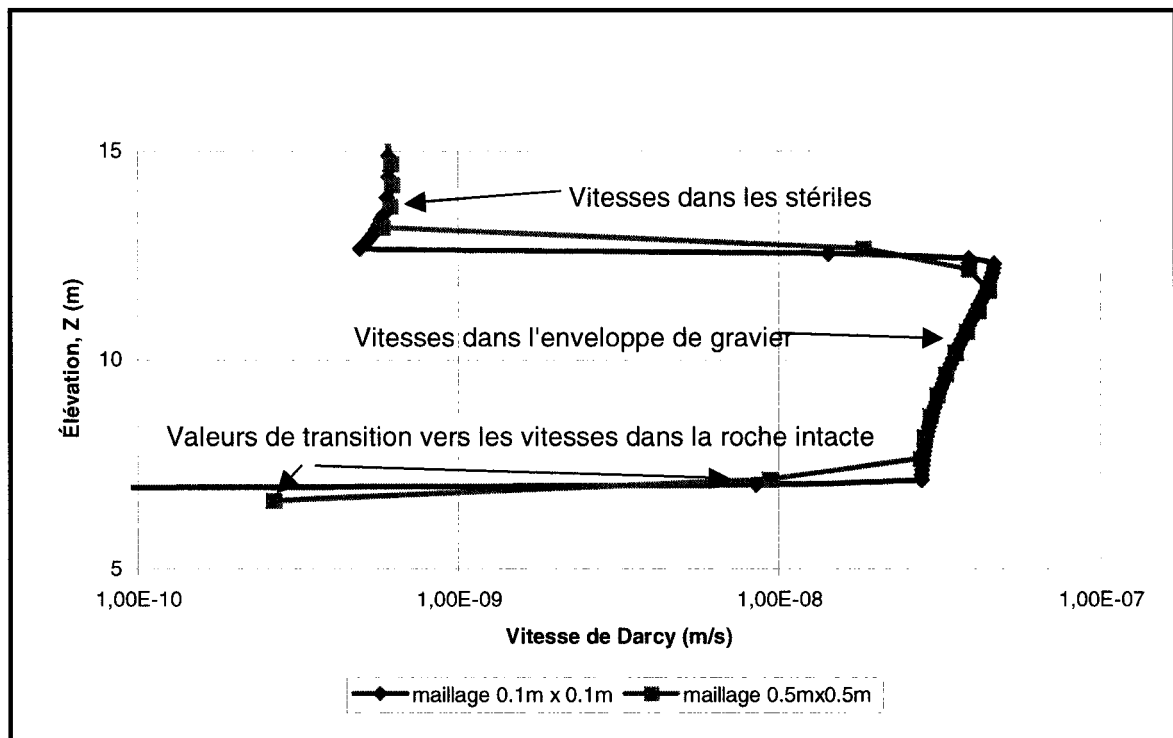


Figure 6.29 : Distribution des vitesses de Darcy dans l'enveloppe perméable de 5.6m d'épaisseur au centre de la fosse pour différents maillages (cas de base, vue en section).

Finalement, il est très important de rappeler que le transport des contaminants n'a pas été inclus dans les modèles numériques de cette étude. En conséquence, l'effet de la diffusion dans le temps sur l'efficacité de la technique de l'enveloppe perméable n'a pas pu être évalué et cela constitue une limitation importante de cette étude. En effet, Belfadhel (2000) mentionne que la diffusion peut être un mécanisme de transport des contaminants non négligeable, d'après les résultats de ses modélisations numériques, car

il pourrait exister un gradient de concentration important à l'interface entre l'enveloppe perméable et les résidus contaminés contenus dans la fosse. Afin de réduire ce gradient de concentration et ainsi ralentir le phénomène de la diffusion, Belfadhel (2000) suggère d'utiliser une enveloppe perméable bicouche. La couche plus perméable étant mise en contact avec le massif fracturé de la fosse et une couche de perméabilité intermédiaire sert de filtre mais aussi de frein à la diffusion. Cette couche est placée entre la couche la plus perméable et les résidus. Ce système est illustré à la figure 2.5. Dans l'étude paramétrique présentée dans ce chapitre, une enveloppe perméable simple (constituée d'un seul matériau) a été modélisée par l'approche conceptuelle du milieu poreux équivalent. Il est à noter cependant que certains auteurs émettent des réserves quant à l'utilisation de ce modèle conceptuel pour modéliser le matériau de l'enveloppe (Salama et al. 2003). En effet, dans le cas où l'épaisseur de l'enveloppe est assez petite et que le matériau de l'enveloppe est très grossier, il est possible que la taille du REV soit égale ou supérieure à l'épaisseur de l'enveloppe et que cette approche conceptuelle ne soit donc pas valide.

Enfin, pour conclure, il serait intéressant d'étudier si la technique de l'enveloppe perméable peut être adaptée à l'entreposage des rejets contaminés en chantiers souterrains, de façon à limiter le transport des contaminants vers l'environnement.

Il faut enfin se rappeler que les modèles numériques sont des outils très pratiques en ingénierie, mais qu'il ne sont que des modèles de la réalité. Ceux-ci doivent être calibrés par des résultats de terrain, et ce en nombre suffisant, afin d'en obtenir des solutions réalistes. Cet aspect n'a pas été abordé dans cette étude.

CHAPITRE 7 – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'industrie minière génère annuellement des quantités importantes de rejets solides potentiellement contaminés et il est important de gérer ces matières résiduelles de façon acceptable pour l'environnement. Les plans de fermeture des mines prévoient souvent l'utilisation des anciennes fosses à ciel ouvert pour entreposer les rejets miniers tels que les roches stériles. Comme ces fosses se situent dans des massifs rocheux fracturés, il est utile de comprendre les principes de l'écoulement dans de telles structures et aussi d'avoir accès à des outils de modélisation numérique de ces phénomènes. Toutefois, jusqu'à présent, peu d'études ont été réalisées spécifiquement à ce sujet.

Le projet de recherche réalisé dans le cadre de ces travaux de maîtrise avait pour objectif d'étudier l'écoulement de l'eau autour d'une fosse remblayée. L'écoulement en massifs fracturés est un axe de recherche relativement récent surtout en ce qui concerne les écoulements non saturés. La conductivité hydraulique saturée d'un massif rocheux fracturé est fonction de l'ouverture des fractures, du degré de connectivité entre elles et de la conductivité hydraulique saturée de la roche intacte. Le degré de connectivité entre les fractures est proportionnel à la densité de fracturation et à la longueur des fractures. La conductivité hydraulique saturée d'une fracture est proportionnelle au carré de l'ouverture mais puisque celle-ci est variable dans l'espace du plan de fracture, la conductivité hydraulique d'une discontinuité est également variable dans l'espace. En effet, les irrégularités des faces d'une fracture et l'enchevêtrement irrégulier de celles-ci font en sorte que certaines zones d'un plan de fracture peuvent être très peu ouvertes, et même complètement fermées, alors que d'autres zones sont très ouvertes avec toutes les conditions intermédiaires entre ces deux extrêmes. La conductivité hydraulique saturée d'une fracture est aussi fonction de la rugosité des faces et de la tortuosité de l'écoulement engendré par les ouvertures variables. De plus, l'évolution dans le temps des contraintes effectives présentes dans un massif rocheux fracturé a également un

impact sur la géométrie de l'espace entre les parois des fractures et en conséquence sur la conductivité hydraulique de celles-ci.

Plusieurs approches conceptuelles peuvent être utilisées pour modéliser l'écoulement en milieux fracturés. L'approche du milieu poreux équivalent est fréquemment utilisée mais les hypothèses qu'elle sous tend ne sont pas toujours vérifiables à l'échelle considérée. En effet, pour que cette approche conceptuelle soit valable, il doit être possible de déterminer un volume élémentaire représentatif («REV») sur le domaine considéré et les dimensions de celui-ci doivent être très inférieures à celles du domaine. L'approche conceptuelle de la fracturation discrète vise à modéliser les différentes fractures du domaine tel qu'elles y apparaissent ou encore de façon stochastique. Une approche de fracturation discrète couramment utilisée est de modéliser les fractures comme des plaques parallèles et la loi d'écoulement est alors la loi cubique, signifiant que le débit dans une fracture est proportionnel au cube de l'ouverture. Il existe également des approches conceptuelles hybrides où deux approches conceptuelles sont combinées dans un même modèle.

Pour ce projet de recherche, le modèle numérique FRAC3DVS a été choisi car il permet d'utiliser l'approche conceptuelle des plaques parallèles pour modéliser l'écoulement dans les fractures. Des simulations pour vérifier le logiciel ont été réalisées, suivies d'une étude paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable. La technique de l'enveloppe perméable est une technique d'entreposage en fosse des rejets miniers. Il s'agit d'une technique d'isolement hydraulique et elle est présentement utilisée pour disposer des rejets radioactifs des mines d'uranium qui sont également, dans certains cas, générateurs de drainage minier acide.

Les vérifications du logiciel FRAC3DVS ont été réalisées en 1D et en 2D pour les conditions non saturées, en régime transitoire. La convergence des solutions était vérifiée en comparant les résultats de charge hydraulique et du degré de saturation à

différents endroits sur le domaine et à différents temps avec les courbes de rétention d'eau définies dans le modèle au départ. Pour tous les cas étudiés, FRAC3DVS donnait d'excellents résultats, c'est-à-dire que les solutions convergeaient bien. Ce logiciel est un outil de modélisation très utile en hydrogéologie de par l'étendue des phénomènes physiques qu'il peut prendre en compte. C'est un modèle tridimensionnel, qui permet d'utiliser les approches conceptuelles du milieu poreux équivalent, de la fracturation discrète, de la double porosité ou encore une approche hybride utilisant une combinaison de ces approches conceptuelles. De plus, les équations incluses dans le modèle FRAC3DVS permettent de simuler l'écoulement en régime permanent ou transitoire et aussi bien pour les conditions saturées que non saturées. FRAC3DVS permet également de simuler le transport de contaminants, mais cette fonction n'a pas été utilisée dans ce projet de maîtrise.

En ce qui concerne les simulations de l'enveloppe perméable, les résultats présentés dans ce mémoire démontrent que cette technique d'entreposage peut être très efficace afin de réduire les débits à travers une fosse remblayée. Elle pourrait donc avantageusement être utilisée pour l'entreposage des rejets des mines de métaux. Le cas d'une fosse d'ouverture carrée de 100m de côté et profonde de 73m avec des pentes à 45 degrés a été analysé avec deux modèles 2D. Le premier est un modèle horizontal représentant une vue en plan de la fosse à l'élévation de surface et, le deuxième, un modèle vertical représentant une vue en section de la fosse au centre de celle-ci et parallèlement au gradient hydraulique régional. Pour les cas de référence de l'étude paramétrique de la technique de l'enveloppe perméable (les deux modèles 2D), la fosse était remblayée avec des stériles de conductivité hydraulique 1.0×10^{-5} m/s et comportait une enveloppe perméable d'épaisseur constante égale à 5.6m, en gravier, de conductivité hydraulique 1.0×10^{-3} m/s. Le gradient hydraulique régional était de 2% et les fractures, d'ouverture égales à 0.1mm, étaient espacées de 10m, horizontalement et verticalement, sur un domaine de 500m x 500m pour la vue en plan de la fosse, et de 500m x 140m pour la vue en section. Pour ces cas de référence, l'efficacité de l'enveloppe perméable

à réduire des débits à travers la fosse (comparativement au cas sans enveloppe) était d'environ 85% dans les deux cas.

L'étude paramétrique a montré que l'efficacité de l'enveloppe perméable augmente avec son épaisseur. Par exemple, pour une épaisseur d'enveloppe deux fois moindre que celle du cas de référence, l'efficacité de l'enveloppe passe à 76% pour la vue en section et à 73% pour la vue en plan. L'effet de la dimension de la fosse sur l'efficacité de l'enveloppe a également été étudié. Pour une épaisseur d'enveloppe constante, celle-ci est d'autant plus efficace que la fosse est petite tel qu'anticipé. Un autre paramètre étudié dans cette étude paramétrique est le contraste entre la conductivité hydraulique des rejets et celle du matériau de l'enveloppe. Les résultats ont montré que plus l'enveloppe est perméable comparativement aux stériles entreposés dans la fosse, plus celle-ci est efficace. Par exemple, lorsque le rapport entre la conductivité hydraulique des stériles et celle du matériau de l'enveloppe varie de 0.1 à 0.01, l'efficacité de l'enveloppe perméable passe de 35% à 85% (cas de la fosse vue en section). L'effet d'une augmentation du gradient hydraulique régional (jusqu'à 50%) n'a pas eu d'impact sur l'efficacité de l'enveloppe perméable. Toutefois, plus le gradient hydraulique régional est élevé, plus les gradients à l'intérieur de la fosse le sont également. Par conséquent, les débits sont plus élevés et une plus forte proportion de contaminant peut être déplacée par advection. Finalement, l'étude paramétrique a permis d'analyser plusieurs cas pour évaluer l'effet du contraste entre la conductivité hydraulique du massif fracturé et celle des stériles sur l'efficacité de l'enveloppe perméable. Il a été constaté que la technique de l'enveloppe perméable est à son maximum d'efficacité lorsque la conductivité hydraulique des stériles entreposés dans la fosse est au moins 10 fois supérieure à celle du massif rocheux fracturé. Lorsque le rapport de la conductivité hydraulique du massif fracturé sur la conductivité hydraulique des stériles est supérieur à 1.0, l'efficacité de l'enveloppe perméable diminue rapidement et elle peut même devenir inefficace si ce rapport est trop élevé. Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'une enveloppe perméable comme technique d'isolement des stériles contaminés serait

avantageuse dans le cas où ceux-ci sont plus perméables que le massif rocheux fracturé environnant la fosse. Cependant, il faut considérer tous les paramètres pouvant affecter l'efficacité de l'enveloppe perméable lors d'une analyse de cas. Par exemple, même si le contraste de conductivité hydraulique entre le massif fracturé et les rejets est faible (comme cela pourrait être le cas avec des rejets de concentrateur), l'installation d'une enveloppe perméable pourrait quand même être avantageuse si le contraste de conductivité hydraulique entre celle-ci et les rejets est élevé.

Les recommandations pour la suite de ces travaux de recherche sont les suivantes. Premièrement, il serait très intéressant de réaliser une analyse paramétrique semblable de la technique de l'enveloppe perméable, mais cette fois-ci en modélisant une fosse en 3D, quitte à réduire l'échelle du problème de façon à obtenir des temps de calculs raisonnables. Pour obtenir des résultats transférables à l'échelle du terrain, il faudrait dimensionner la fosse et l'enveloppe du modèle avec les mêmes proportions qu'anticipées sur le terrain. Deuxièmement, il serait également très intéressant d'inclure le transport des contaminants (ainsi que le facteur temps) dans l'analyse de l'efficacité de l'enveloppe perméable et aussi d'inclure une enveloppe perméable bicouche permettant de limiter le transport des contaminants par diffusion. L'analyse de l'efficacité de l'enveloppe perméable serait de cette façon plus complète car elle impliquerait les deux mécanismes de transport des contaminants, soit l'advection et la diffusion. Troisièmement, il serait bien d'inclure des conditions de simulations plus proches de la réalité afin de raffiner le modèle. Comme par exemple, simuler la zone non saturée située près de la surface, attribuer des propriétés plus représentatives aux matériaux, placer la surface des rejets pas nécessairement à la même élévation que le dessus du massif fracturé. De plus, inclure dans le modèle une couche peu perméable placée sur le dessus des rejets et utilisée en combinaison avec la technique de l'enveloppe perméable pourrait être intéressant. L'effet de différents épisodes de précipitations sur l'écoulement et le transport des contaminants à travers une fosse remblayée pourrait ainsi être étudié. À cet effet, il serait bon d'utiliser la dernière

version de FRAC3DVS, appelée HydroSphere, car elle permet de simuler adéquatement le ruissellement.

RÉFÉRENCES

AMYOT, G. et VÉZINA, S, 1999. *Le suivi de la restauration par inondation au parc à résidus minier Solbec*. [En ligne] Montréal, Canada : Cambior Inc. 14 pages. http://www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/cases/flooding-99_f/flooding-99_f.htm (page consultée de 9 juin 2003).

ANDERSON, M.P. et WOESSNER, W.W. 1992. *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego : Academic Press. 381p.

APITHY, S., 2002. *Étude du comportement à long terme de couvertures avec effets de barrière capillaire en climats semi-aride et aride*. 167p. Mémoire de Maîtrise en hydrogéologie environnementale. École Polytechnique de Montréal.

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*. Vol. 1. pp. 3-13.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. et BERNIER, L. 2002. *Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur cédérom*. Montréal, Canada : Presses Internationales Polytechnique.

BARTON, N., BANDIS, S. and BAKHTAR, K. 1985. «Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Vol. 22, p.121-140.

BARTON, C.C. 1993. *Fractal analysis of the scaling and spatial clustering of fractures*. In: *Fractals and Their Use in the Earth Sciences*. Mem XX, Geol. Soc. Am. (to appear).

BEAR, J. 1993. «Modeling Flow and Contaminant Transport in Fractured Rocks». *Flow and Contaminant Transport in fractured rock*. Sous la direction de Bear, J, Tsang C. F. et Marsily, G. San Diego : Academic Press, Inc. p.169-236 (Chapitre 1).

BELFADHEL, M.B. 2000. «Méthodes de gestion et de déclasséement des résidus miniers d'uranium au Canada». *Compte-rendu de la 53^{ième} conférence de La Société Canadienne de Géotechnique*. p.675-682.

BERKOWITZ, B. 1994. «Modelling flow and contaminant transport in fractured media». *Advances in porous media, Volume 2*. Sous la direction de Corapcioglu, M.Y. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier. pp.397-451

BERKOWITZ, B. 2002. «Characterizing flow and transport in fractured geological media : A review». *Advances in Water Resources*. Vol.25 pp.861-884.

BONNET, E., BOUR, O. ODLING, NE, DAVY, P. MAIN, I., COWIE, P. et al. 2001. *Scaling of fracture systems in geological media*. Rev. Geophys. Vol 39 (3) p.347-383.

BRADY, B.H.G. et BROWN, E.T. 1992. *Rock Mechanics for underground mining*. Deuxième édition. London, UK : Chapman & Hall. 571 p.

BRAESTER, C. 1988. «Discrete and Continuum Approaches to Solution of Flow Problems in Fractured Rocks». *Proceedings of Fourth canadian/american conference on hydrogeology – Fluid flow, Heat transfer and mass transport in fractured rocks*. Alberta, Canada : Alta. Res. C. and N.W.W.A.. pp.223-229.

BROMAN, P.G. et LUNDQVIST, G. 2001. «Decommissioning of a Pyrite Cinder Disposal Site at the Falun Mine, Sweden». *Conference proceedings, Securing the future*. Skelleftea, Sweden : The Swedish Mining Association. Volume 1 . pp. 45-51.

BRUEL, D. 1990. *Exploitation de la chaleur des roches chaudes et sèches. Étude des phénomènes hydrauliques, mécaniques et thermiques au moyen d'un modèle à fractures discrètes*. 161p. Ph.D. thesis, École des Mines de Paris, Fontainebleau.

BUISSIÈRE, B., 1999. *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaires inclinées à l'aide de modélisation physiques et numériques*. 393 pages. Thèse de doctorat, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

CACAS, M.C. 1989. *Développement d'un modèle tridimensionnel stochastique discret pour la simulation de l'écoulement et des transports de masse e de chaleur en milieu fracturé*. Ph.D. thesis. École des mines de Paris, Fontainebleau.

CACAS, M.C., LEDOUX, E., DE MARSILY, G., TILLIE, B., BARBREAU, A., DURAND, E. FEUGA, B. and PEAUDECERF, P. 1990. «Modeling fracture flow wit a stochastic discrete network: 1. The flow model». *Water Resour. Res.* Vl. 26(3) p.479-489.

CARSON, S.J, 2002. «Model Verification and Validation». *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. San Diego, California, USA.

CATALAN, L.J.J., MERLIÈRE, E. et BLISS, M, 2001. « Evaluation of the Lime requirements to neutralize Pre-Oxidised Sulphidic Mine Tailings Prior to submerge». *Conference proceedings, Securing the future*. Skelleftea, Sweden : The Swedish Mining Association. Volume 1 . pp. 72-84.

CHAPUIS, R.P. 1999. *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*. Première édition. Sainte-Foy : Les Publications du Québec. 158 p.

CHAPUIS, R.P., CHENAF, D., BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M. et CRESPO, R., 2001. «A user's approach to asses numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions». *Can. Geotech. J.* Vol.38 p.1113-1126.

CHILÈS, J-P et MARSILY, G. 1993. «Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling». *Flow and Contaminant Transport in fractured rock*. Sous la direction de Bear, J, Tsang C. F. et Marsily, G. San Diego : Academic Press, Inc. p.169-236 (Chapitre 4).

CYR, J. 2002. Le site Lorraine. In. *Site de Ressources naturelles, Faunes et Parcs Québec*. [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2002-02/lorraine.jsp> (page consultée le 9 juin 2003).

DARTOIS, J. 2002. «L'application du PRRI au secteur minier : Orientations du Ministère de l'Environnement et état de la situation». *Symposium 2002 sur l'environnement et les mines*. Rouyn-Noranda : Institut canadien des mines (ICM). Compte-rendu de conférences sur cédérom, document s32a1045p555.

DOMENICO, P.A. and SCHWARTZ, F.W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Deuxième édition. New York : John Wiley and Sons, Inc. 506 p.

EDNIE, H. 2002. «McClellan Lake, World-class technology driving uranium production». *CIM Bulletin* Vol.95 No 1058. p.12-17.

ELSWORTH, D. et MASE, C.R. 1993. «Groundwater in rock Engineering». *Comprehensive Rock Engineering, Volume 2*. Sous la direction de Hudson, J.A.. Great Britain : Elsevier Science and Technology Books. pp.201-226.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2002. Protection du milieu aquatique, Nos programmes, Études de suivi des effets sur l'environnement (ESEE). In. *Site de Environnement Canada*. [En ligne]. http://www.qc.ec.gc.ca/dpe/Francais/dpe_main_fr.asp?eau_esee1#Que_vise (page consultée le 7 janvier 2004).

FLINT, L.E. and SELKER, J.S. 2002. «Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs». *Advances in Water Resources*. Vol. 26 pp. 561-571.

GALE, J. E. 1982. The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress, fracture-closure, fracture permeability relationships. *Proceedings 23rd U.S. Rock Mechanics Symposium*, Berkeley, California.

GALE, J. 1990. «Hydraulic behavior of rock joints». *Proceedings of the International symposium on rock joints*. Loen, Norway : Barton & Stephansson. pp.351-362.

GARRIGUES, J. 2002. *La méthode des éléments finis*. [En ligne]. Marseille, France : École Supérieure de Mécanique de Marseille. <http://esm2.imt-mrs.fr/gar/efhtml/index.html> (page consultée le 6 novembre 2003).

HILLEL, D. 1998. *Environment Soil Physics*. 2^e édition. San Diego : Academic Press. 771p.

HOEK, E. et BRAY, J. 1977. *Rock, slope engineering*. 2^e édition. London : Institution of Mining and Metallurgy. 402p.

HOEK, E. and BROWN, E.T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. London, UK : The Institution of Mining and Metallurgy. 527 p.

HOEK, E., KAISER, P.K. and BAWDEN, W.F. 1997. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Deuxième édition. Rotterdam, Netherlands : A.A. Balkema Publishers. 215 p.

INDRARATNA, B. and RANJITH, P. 2001. *Hydromechanical aspects and unsaturated flow in jointed rock*. Première édition. Meppel, Netherlands : A.A. Balkema Publishers. 286 p.

LAPCEVIC, P.A., NOVAKOWSKI, K.S. et SUDICKY, E.A. 1999. «Groundwater flow and solute transport in fractured media». *Handbook of Groundwater Engineering*. Sous la direction de Delleur, J.W.. Boston, É.U. : CRC Press LLC. pp.17-1 à 17-39.

LOMIZE, G.M. 1951. *Flow in fractured rocks, (in Russian)*. Gosenergoizdat, Moscow. 127p.

LOUIS, C. 1969. *Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux*. BRGM. Bulletin de Direction des Études et Recherches Série A, 3 :5-132. (Thèse présentée à l'Université de Karlsruhe).

LOUIS, C. 1976. *Introduction à l'hydraulique des roches*. PhD Thesis, Paris.

MARTIN, V., 2003. *Étude des propriétés non saturées des stériles miniers*. 210p. Mémoire de Maîtrise en hydrogéologie environnementale. École Polytechnique de Montréal.

MCMULLEN, M. et BIRCHFIELD, G. 2001. Revue générale, Annuaire des minéraux du Canada, Édition 2001. In *Ressources naturelles Canada*. [En ligne]. <http://www.nrcan.gc.ca/mms/cmy/contenu/2001/01f.pdf> (page consultée le 5 mai 2003).

MEND Report 2.17.1, 1996. Review of use of an Elevated Water Table as a Method to Control and Reduce Acid Drainage from Tailings. In *Site de Ressources naturelles Canada*. [En ligne]. <http://www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/reports/2171es-f.htm> (page consultée le 7 janvier 2004).

MORIN, K.A. et HUTT, N.M, 1997. *Environmental Geochemistry of Minesite Drainage, Practical Theory and Case Studies*. Première édition. Vancouver Canada : MDAG Publishing. 333 p.

NEUZIL, C.E. et TRACY, J. V., 1981. «Flow Through Fractures» *Water Resources Research*. Vol. 17 : No. 1. pp.191-199.

OLSSON, R. et BARTON, N. 2000. «An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints». *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol. 38. pp.317-329.

PERRON, F. 2002. «Projet de modification de la Directive 019, modifications proposées». *Symposium 2002 sur l'environnement et les mines*. Rouyn-Noranda : Institut canadien des mines (ICM). Compte-rendu de conférences sur cédérom, document s32a1044p554.

PERSOFF, P. et PRUESS, K., 1995. «Two-phase flow visualisation and relative permeability measurement I natural rough-walled fractures». *Water Ressources Research*. Vol.31. No.5 pp.1175-1186.

PRIEST, S.D. 1993. «Fluid flow in discontinuities». *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Great Britain : Chapman & Hall. 473p.

PRUESS, K. et TSANG Y.W. 1990. «On two-Phase Relative Permeability and Capillary Pressure of Rough-Walled Rock Fractures». *Water Resources Research*. Vol.26. No.9 pp.1915-1926.

PYRAK-NOLTE, L.J., COOK, N.G.W. and MYER, L.R. 1986. «The Effect of Stress on the Hydraulic, Mechanical, Seismic Properties of a Natural Fracture». Paper presented at spring conference Mtg., Amer. Geophys. Union, Baltimore.

RÄISÄNEN, M.L., LESTINEN, P. et KUIVASAARI, T. 2001. «The retention of metal and sulphur in natural wetland – preliminary results from the old Otravaara pyrite mine, eastern Finland». *Conference proceedings, Securing the future*. Skellefteå, Sweden : The Swedish Mining Association. Volume 2. p. 662-670.

RASMUSON, A. et NERETNIEKS, I. 1986. «Radionuclide Transport in Fast Channels in Crystalline Rock». *Water Resources Research*. Vol.22. No.8 pp.1247-1256.

RAVEN, K.G. 1987. *Détermination des propriétés hydrauliques d'un petit système d'écoulement souterrain dans un gneiss monzonitique fracturé*. Institut national de recherche en hydrologie (INRH), direction générale des eaux intérieures et des terres, Saskatoon, Saskatchewan. Rapport INRH no30, étude no 149, série scientifique de la DGEI. 135p.

ROMM, E.S. 1966. *Flow characteristics of fractured rocks (in Russian)*. Nedra, Moscow. 283p.

ROULEAU, A. et GALE, J.E. 1987. «Stochastic Discrete Fracture Simulation of Groundwater Flow into an Underground Excavation in Granite». *International Journal of Rock Mechanic, Mineral Sciences & Geomechanics*. Vol.24, No2. pp99-112.

ROY, P. 2002. « Suivi du milieu bio-physique à la mine Troilus. Corporation minière Inmet ». *Symposium 2002 sur l'environnement et les mines*. Rouyn-Noranda : Institut canadien des mines (ICM). Compte-rendu de conférences sur cédérom, document s32a1047p557.

SALAMA, A., VAN GEEL, P.J., NGUYEN, T.S., BELFADHEL, M.B. et FLAVELLE, P. 2002. «Two-dimensional ground flow and solute transport in an in pit tailings management facility : a parametric study». *Compte-rendu de la 55^{ième} conférence de La Société Canadienne de Géotechnique*. p.1373-1380.

SALAMA, A., VAN GEEL, P.J. et NGUYEN, T.S. 2003. «Potential violation of the REV when modeling the pervious surround concept for the in-pit disposal of uranium mine tailings in fractured rocks systems». *Compte-rendu de la 56^{ième} conférence de La Société Canadienne de Géotechnique*.

SELROOS, J., WALKER, D.D., STRÖM, A., GYLLING, B. et FOLLIN, S. 2002. «Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock». *Journal of Hydrology*. Vol.257. pp.174-188.

SENES Consultants Limited, URS Norecol Dames & Moore, EVS Environment Consultants, BC Research's Acid Mine Drainage Group, SKR Consulting, O'KANE Consultants Inc (2001). *Programme de Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier (NEDEM)*. Rapport 5.4.2. Sous la supervision de Gilles Tremblay et de Charlene M. Hogan et parrainé par Le Ministère des Ressources Naturelles Canada, Northern Ontario Development Agreement (Noda-Mend Ontario),

Quebec Mineral Development (Nedem-Quebec) et le Comité organisateur de la 4^e conférence Internationale sur le Drainage Rocheux Acide. Volume 1 à 6.

SNOW, D.T. 1969. «Anisotropic Permeability of Fractured Media». *Water Resources Research*. Vol. 5. No6. pp.1273-1289.

STEFFEN ROBERTSON AND KIRSTEN (B.C) Inc., NORECOL ENVIRONMENTAL CONSULTANTS and GORMELY PROCESS ENGINEERING. 1991. *Guide technique préliminaire sur le drainage rocheux acide* (une traduction de *Draft Acid Rock Drainage Technical Guide*). Sainte-Foy, (Vancouver), Canada : Groupe de travail sur le drainage minier acide de Colombie Britannique. Volume I.

STOLTZ E. et GREGER M., 2001. «Wetland plant reduce metal content in drainage water from submersed tailings». *Conference proceedings, Securing the future*. Skelleftea, Sweden : The Swedish Mining Association. Volume 2 . p. 806-813.

SU, G.W., GELLER, J.T., PRUESS, K. et WEN F., 1999. «Experimental studies of water seepage and intermittent flow in unsaturated, rough-walled fractures». *Water Resources Research*. Vol. 35 : No. 4. pp.1019-1037.

TAYLOR, G.J. et FOY, C.D. 1985. «Mechanisms of aluminium tolerance in *Triticum aestivum* (wheat). IV. The role of ammonium and nitrate nutrition» . *Can. J. Bot.*, 63: 2181-2186.

TERRIEN, R. et SUDICKY, E.A., 1996 «Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media». *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol 23 p.1-44.

THERRIEN, R., SUDICKY, E.A. et MCLAREN, R.G., 2001. *FRAC3DVS : An Efficient Simulator for Three-dimensional, Saturated-Unsaturated Groundwater Flow and Density-dependant, Chain-Decay Solute Transport in Porous, Discretely-Fractured Porous or Dual-porosity Formations INPUT/OUTPUT USER'S GUIDE*. R. Therrien, E.A. Sudicky R.G. McLaren Groundwater Simulations Group. 80 p.

THERRIEN, R., PANDAY, S.M., MCLAREN, R.G., SUDICKY, E.A., DEMARCO, D.T., MATANGA, G.B. et HUYAKORN, P.S. 2003. *HydroSphere A Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport (DRAFT)*. 218 p.

TODD, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. Deuxième édition. New-York : John Wiley & Sons. 539 p.

TREMBLAY, G. et HOGAN, C. 2002. «The canadian orphaned/abandoned mines program». *Symposium 2002 sur l'environnement et les mines*. Rouyn-Noranda : Institut canadien des mines (ICM). Compte-rendu de conférences sur cédérom, document s32a1035p544.

TREMBLAY, G. et WEATHERELL, C. 2003. NEDEM 2000 : Le progrès par le partenariat. In. *Site de Ressources naturelles Canada*. [En ligne]. http://www.nrcan.gc.ca/mms/poli/med_f.htm (page consultée le 4 juin 2003)

TSANG, Y.W. 1984. «The Effect of Tortuosity on Flow Through a Single Fracture.» *Water Resources Research*. Vol. 20 : No. 9. pp.1209-1215.

TSANG, Y.W. et TSANG C.F. 1987. «Channel Model of Flow Through Fractured Media.» *Water Resources Research*. Vol. 23 : No. 3. pp.467-479.

TSANG, Y.W. 1992. «Usage of “Equivalent Apertures” for Rock Fractures as Derived From Hydraulic and Tracer Tests.» *Water Resources Research*. Vol. 28 : No. 5. pp.1451-1455.

TWISS, R.J. and MORRES, E.M. 1992. *Structural Geology*. W.H. Première édition. New York : W.H. Freeman and Company. 532 p.

WANG, J.S.Y. et NARASIMHAN, T.N. 1993. «Unsaturated flow in fractured porous media». *Flow and Contaminant Transport in fractured rock*. Sous la direction de Bear, J, Tsang C. F. et Marsily, G. San Diego : Academic Press, Inc. p.169-236 (Chapitre 7).

WHITERSPOON, P.A., WANG J.S.Y., IWAI, K. et GALE, J.E. 1980. «Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture.» *Water Resources Research*. Vol. 16 : No. 6. pp.1016-1024.

WITHERSPOON, P.A., 1986. «Flow of Groundwater in Fractured Rocks.» *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*. No34. p.103-115.