POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Vérification numérique des méthodes d'interprétation d'essai de pompage dans un aquifère à nappe semi-captive
Auteur: Author:	Julie Gauthier
Date:	2003
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Gauthier, J. (2003). Vérification numérique des méthodes d'interprétation d'essai de pompage dans un aquifère à nappe semi-captive [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7034/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/7034/
Directeurs de recherche: Advisors:	Robert P. Chapuis, & Djaouida Chenaf
Programme: Program:	Non spécifié

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

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

VÉRIFICATION NUMÉRIQUE DES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION D'ESSAI DE POMPAGE DANS UN AQUIFÈRE À NAPPE SEMI-CAPTIVE

JULIE GAUTHIER

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVLI, GÉOLOGIQUES ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCE APPLIQUÉES

(GÉNIE MINÉRAL)

AVRIL 2003

©Julie Gauthier, 2003

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

Our file Notre référence

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.

0-612-81549-8

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

VÉRIFICATION NUMÉRIQUE DES MÉTHODES
D'INTERPRÉTATION D'ESSAI DE POMPAGE DANS UN AQUIFÈRE
À NAPPE SEMI-CAPTIVE

présenté par : GAUTHIER Julie

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

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

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président

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

Mme CHENAF Djaouida, Ph.D., membre et codirectrice de recherche

M. ROULEAU Alain, Ph.D., membre

À mes parents qui m'ont montré comment passer à travers les épreuves de la vie.

À mon compagnon de vie, Patrick, qui ne me laisse jamais tomber.

À mes ami(e)s, toujours source de joie.

Et à tous ceux qui ont cru en moi.

REMERCIEMENTS

Un gros merci à mon bienfaiteur, M. Robert P. Chapuis qui m'a donné la chance de réaliser un rêve : aller étudier en Europe. Grâce à sa force créatrice et à ses projets innovateurs, ma vie a pris une direction bien au-delà de mes espérances. Que la force reste toujours avec vous, M. Chapuis. Merci aux membres du jury, vous donnez de la vie à mon travail en y accordant de l'intérêt et en y apportant vos connaissances. Merci à Mme Djaouida Chenaf pour avoir acceptée d'être ma codirectrice. Merci à tout le personnel de l'école Polytechnique, particulièrement à Manon Latour. Merci à mes professeurs de l'UQAC et de Polytechnique qui ont façonnés l'étudiante que je suis. Merci à Romain Chesnaux, Isabelle Masse, Maria Sheriff, Vincent Martin, Valérie Thériault, Sénami Apity, Audrey Gamache, Véronique Dallaire, Daniel Campos, Philippe Pasquier, Jean-Baptiste, Oliver Riffon, Dominic Tremblay, Mariam Ouangrawa, Omar Fala, Youri Brochu et à tous les autres étudiants de Poly que j'oublie pour avoir apporter la vie dans cette école et faire en sorte que j'ai le courage de me lever chaque matin. Merci à tous mes ami(e)s de l'UQAC, je garde un souvenir impérissable de mes études universitaires. Merci à toutes mes amies d'enfances qui font de moi une personne heureuse. Finalement, un gros merci à mon père, Marcel Gauthier, à ma mère, Monique Arseneault, à mon doux, Patrick F. Desbiens et à toute ma famille pour leur amour inconditionnel.

RÉSUMÉ

L'analyse d'un pompage dans un aquifère à nappe semi-captive est moins connue et plus complexe qu'une analyse d'un pompage dans un aquifère à nappe captive puisqu'en régime transitoire l'eau vient à la fois horizontalement de l'aquifère et verticalement de l'aquitard. Il est important de savoir si l'aquifère est à nappe captive ou semi-captive en particulier pour déterminer un bon périmètre de protection autour du puits de pompage. Une éventuelle pollution de la nappe libre affectera l'aquifère à nappe semi-captive si cette dernière n'est pas protégée adéquatement.

Les simulations numériques en régime permanent donnent des résultats comparables aux théories de DeGlee (1930) et de Hantush-Jacob (1955). Plusieurs aspects ont été considérés lors des comparaisons entre les calculs numériques et les prédictions théoriques : le débit vertical (Q_v) dans l'aquitard, le débit horizontal (Q_h) dans l'aquifère, les valeurs de rabattement (s) sur toute la longueur du modèle et la valeur du rayon d'action (r_o) du pompage. Les conditions d'applications du régime permanent ne tiennent pas compte de l'influence des épaisseurs de l'aquifère à nappe semi-captive et de l'aquitard. Toutefois, il est possible d'utiliser les théories pour n'importe quel rapport d'épaisseur à condition d'y incorporer un facteur de sécurité correspondant à un pourcentage de différence entre les calculs numériques et les théories.

Toutes les simulations numériques en régime transitoire sont comparables aux différentes théories de Walton (1955), du point d'inflexion d'Hantush (1956), du point d'inflexion d'Hantush pour plusieurs piézomètres (1956) et de Hantush (1960) sauf à celle de Neuman et Witherspoon (1972) qui requière un raffinement vertical plus important. Pour les simulations numériques qui sont comparables aux théories, les courbes de rabattement sont similaires même au-delà des conditions d'applications émises par les auteurs. Autant pour le régime permanent que pour le régime transitoire, les comparaisons sont toujours meilleures lorsque la distance r entre le piézomètre et le puits est inférieur au rayon d'action du puits ($r \leq r_o$). Dans l'étude d'un cas réaliste qui ne respecte pas l'hypothèse simplificatrice concernant un rabattement négligeable de l'aquifère à nappe libre, la théorie est valide seulement en régime transitoire. Finalement, la nouvelle version de Seep/w (version 5) donne de meilleurs calculs numériques que l'ancienne version (version 4) du même logiciel.

ABSTRACT

The analysis of a pump test in a leaky aquifer is a less known and more complex problem than the analysis of a pump test in a confined aquifer. This is so because water flows horizontally from the aquifer and vertically from the aquitard in the transient state. It is important to know if the aquifer is confined or leaky, especially when it comes to defining the protection area surrounding a well. A contamination of the unconfined aquifer could affect the leaky aquifer if it is not appropriately protected.

Numerical models completed in steady state conditions give similar results than those obtained using the theories developed by DeGlee (1930) and Hantush-Jacob (1955). Many aspects were taken into account while completing the comparison between the numerical models and the theoretical predictions: the vertical flow (Q_v) in the aquitard, the horizontal flow (Q_h) in the leaky aquifer, the drawdown (s) on the whole model length and the radius of influence (r_o) of the pump test. The initial conditions for steady state flow in the theoretical models do not take into account the influence of the thickness of the leaky aquifer and of the aquitard. However, it is possible to use these theories for any thickness ratio between the aquitard and the aquifer as long as a safety factor which corresponds to the difference between the numerical models and the theories is added.

All numerical models completed in the transient state give similar results than the following theories: Walton (1955), Hantush inflection point for many piezometers (1956)

and Hantush (1960). The only exception is Newman and Witherspoon (1972) which requires a higher vertical mesh density in the numerical model. The drawdown curves of the numerical models which are similar to the theories are matching even to a greater distance than the application conditions given by the authors. Both in steady state and transient conditions, the comparisons are always more accurate when the distance r between the piezometer is smaller than the radius of influence of the well ($r \leq r_o$). In a real case scenario where it cannot be assumed that the drawdown in the unconfined aquifer is negligible, the theory works only in transient conditions. Finally, the new version of SEEP/w (version 5.0) gives better numerical results than the previous version of the same software.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES x

LISTE DES TABLEAUX xvi

LISTE DES FIGURES xviii

LISTE DES SYMBOLES xxvi

LISTE DES ANNEXES xxix

CHAPITRE I – INTRODUCTION 1

1.1 Définition du problème et objectifs de l'étude 1
1.2 Méthodologie 3

CHAPITRE II – THÉORIE 6

2.1 Introduction 6
2.2 L'aquifère à nappe semi-captive 6
2.3 Les hypothèses simplificatrices 8
2.4 Les méthodes théoriques 11
2.4.1 Méthodes en régime permanent 11
2.4.1.1 La méthode de DeGlee (1930, 1951; voir aussi Anonymous 1964, pp 35-41) 11

2.4.1.2 La méthode de Hantush-Jacob (1955) 12
2.4.2 Méthodes en régime transitoire 14
2.4.2.1 La méthode de Walton (1955) 15
2.4.2.2 La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour un piézomètre 17
2.4.2.3 La méthode du point d'inflexion de Hantush pour plusieurs piézomètres (1956) 18
2.4.2.4 La méthode de Hantush (1960) 20
2.4.2.5 La méthode de Neuman-Witherspoon (1972) 21

CHAPITRE III – SIMULATIONS NUMÉRIQUES 25

3.1 Description du logiciel retenu 25
3.2 Étude sur le maillage numérique 29
3.2.1 Caractéristiques générales 29
3.2.2 Paramètres de comparaison 34
3.2.3 Première étape; aucun *ratio* 36
3.2.4 Deuxième étape; facteur *ratio* horizontal seulement 38
3.2.5 Troisième étape; facteur *ratio* horizontal et facteur *ratio* vertical inverse 40
3.2.6 Discussion et conclusion 41
3.3 Les conditions limites au puits 43

CHAPITRE IV - COMPARAISONS ENTRE LES RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET LES RÉSULTATS THÉORIQUES EN RÉGIME PERMANENT 47

4.1 Introduction 47
4.2 Les critères limitatifs 48

4.3 Caractéristiques générales 50
4.3.1 Ordres de grandeur 50
4.3.2 Valeurs d'entrée communes 51
4.3.3 Longueur de la "flux section" horizontale servant à mesurer le débit vertical Q_v 53
4.3.4 Lecture des rabattements 57
4.3.5 Calcul du rayon d'action r_o numérique 58
4.3.6 Calcul du débit théorique 59
4.3.7 Courbe de rabattement théorique 59
4.3.8 Comment et pourquoi calculer un rabattement analytique 60
4.4 CAS K/K' = 2 61
4.4.1 Introduction 61
4.4.2 Comparaisons entre le r_o numérique et le r_o théorique 61
4.4.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique 62
4.4.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes 63
4.4.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la supposition de Neuman et Witherspoon (1969a) 63
4.5 CAS K/K' = 10 64
4.5.1 Introduction 64
4.5.2 Comparaisons entre le r_o numérique et le r_o théorique 65
4.5.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique 65
4.5.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes 66
4.5.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la supposition de Neuman et Witherspoon (1969a) 66

4.6 CAS K/K' = 100 67
4.6.1 Introduction 67
4.6.2 Comparaisons entre le r_o numérique et le r_o théorique 68
4.6.3 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique 68
4.6.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes 69
4.6.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la supposition de Neuman et Witherspoon (1969a) 69
4.7 CAS K/K' = 1000 70
4.7.1 Introduction 70
4.7.2 Comparaisons entre le r_0 numérique et le r_0 théorique 70
4.7.3 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique 71
4.7.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes 71
4.7.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la supposition de Neuman et Witherspoon (1969a) 72
4.8 CAS K/K' = 10 000 72
4.9 Discussion 73
4.9.1 Influence du rapport des épaisseurs b/b' 73
4.9.2 Interaction entre les critères de DeGlee/Hantush avec celui de Neuman et Witerspoon 73
4.9.3 Les critères limitatifs 76
4.9.4 Applications des résultats de cette étude 77

CHAPITRE V - COMPARAISON ENTRE LES CALCULS NUMÉRIQUES ET LES RÉSULTATS THÉORIQUES CONSIDÉRANT OU PAS LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE.....78

5.1 Introdution.....78
5.2 Critères limitatifs.....79
5.3 Caractéristiques générales.....80
5.3.1 Choix du modèle et conditions limites.....80
5.3.2 Coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère à nappe semi-captive.....81
5.3.3 Les paramètres numériques.....85
5.4 Le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard est négligé.....86
5.4.1 La méthode de Walton (1962).....87
5.4.2 La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956).....91
5.4.2.1 Vérification de l'équation 2.10.....92
5.4.2.2 Vérification de l'équation 2.11.....93
5.4.2.3 Vérification de l'équation 2.12.....94
5.4.3 La méthode du point d'inflexion de Hantush pour plusieurs piézomètres (1956).....95
5.4.4 Conclusion lorsque S' n'est pas considéré (S'=cte).....98
5.5 Le coefficient d'emmagasinement de l'aquitard S' est considéré.....99
5.5.1 Coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard.....99
5.5.2 La méthode de Hantush (1960).....100
5.5.3 La méthode de Neuman-Witherspoon (1972).....110
5.5.4 Conclusion lorsque S' est considéré (S'≠ cte).....115
5.6 Conclusion sur le régime transitoire.....116

CHAPITRE VI - LA NOUVELLE VERSION : SEEP/W 5 120

6.1 Introduction 120
6.2 Régime permanent 121
6.3 Régime transitoire ne considérant pas S' – La méthode Walton (1962) 124
6.4 Régime transitoire considérant S' 126
6.4.1 La méthode de Hantush (1956) 126
6.4.2 La méthode de Neuman et Witherspoon (1972) 127
6.5 Conclusion 130

CHAPITRE VII - ÉTUDE D'UN POMPAGE DANS UN AQUIFÈRE À NAPPE SEMI-CAPTIVE POUR UN CAS RÉALISTE 131

7.1 Introduction 131
7.2 Description du modèle numérique 133
7.2.1 Caractéristiques hydrauliques et géométriques 133
7.2.2 Conditions aux limites 134
7.2.3 Grille numérique et rayon du modèle 134
7.3 Régime permanent 136
7.4 Régime transitoire ne considérant pas S' 137
7.5 Régime transitoire considérant S' 139
7.6 Conclusion 140

CHAPITRE VIII – CONCLUSION 142

RÉFÉRENCES 144

ANNEXES 150

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Nombre de cas simulés pour chacune des étapes de l'étude sur le maillage numérique 33

4.1 Liste des cas à l'étude dans le chapitre IV avec R=1000m, r_w=0.1m et s_m=5m 50

4.2 Valeurs de rabattement dans l'aquifère prises en haut, au centre et en bas de celui-ci à r=1m pour le cas 13 58

5.1 Description de la fonction #1 de teneur en eau volumique provenant de la banque de données de Seep/w pour un sable uniforme ayant un $K_s=1*10^{-4}$ m/s. 84

5.2 Paramètres de convergence utilisés dans Seep/w pour toutes les simulations en régime transitoire 85

5.3 Incrémentation du temps utilisée dans Seep/w pour toutes les simulations en régime transitoire 86

5.4 Pente de la partie rectiligne des courbes de rabattement en fonction du temps pour les trois piézomètres situés à r=3m, 20m et 40m. 96

5.5 Description de la fonction de teneur en eau volumique #4 provenant de la banque de données de Seep/w pour S_1'. 99

5.6 Description de la fonction de teneur en eau volumique pour S_2' 100

6.1 Valeurs de rabattement dans l'aquifère prises en haut, au centre et en bas de celui-ci à r=1m pour le cas 13 123

7.1 Calculs et résultats du cas réaliste obtenus pour R=200m, 400m et 1000m 136

Tableau en annexe

Tableau 1 : Résultats de la grille sans raffinement 151

Tableau 2 : Résultats de la grille avec un facteur de raffinement présent selon l'axe des x (Fx) seulement 152

Tableau 3 : Résultats de la grille avec un facteur de raffinement selon l'axe des x (Fx) et un facteur de raffinement inverse selon l'axe des z (Fz) 154

Section 1 : Pour un rapport de **K/K'=2** et un L=5.66m 158

Section 2 : Pour un rapport de **K/K'=10** et un L=12.65m 159

Section 3 : Pour un rapport de **K/K'=100** et un L=40m 160

Section 4 : **K/K'=1000** avec L=126.49m 161

Section 5 : **K/K'=10 000** avec L=400m 162

LISTE DES FIGURES

1.1 Différence entre l'aire d'alimentation d'un aquifère à nappe captive et d'un aquifère à nappe semi-captive en présence d'un gradient régional 2

2.1 Différence entre un aquifère à nappe captive et semi-captive 7

2.2 Vue en coupe d'un pompage dans un aquifère à nappe semi-captive 8

2.3 Distance verticale z en m dans l'aquitard 23

3.1 Étape 1, 2 et 3 de l'étude d'optimisation des paramètres numériques.....32

3.2 Grille numérique montrant les "flux section" horizontales (f_h) et verticale (f_v) et leurs calculs soit le débit vertical (Q_v) et le débit horizontal (Q_h).....35

3.3 État des vitesses de bas (b=0m) en haut (b=4m) de l'aquifère à nappe semi-captive, selon $h(r_w)$=cte et selon $q(r_w)$=cte pour le cas Nx80Nz20Fx20.....44

3.4 Rabattement de bas (b=0m) en haut (b=4m) de l'aquifère à nappe semi-captive, selon $h(r_w)$=cte et selon $q(r_w)$=cte pour le cas Nx80Nz20Fx20 46

4.1 Quatre débits verticaux calculées par les "flux section" horizontales et un débit horizontal calculé par la "flux section" verticale avec les lignes d'écoulement associé au cas 18 53

4.2 Vitesse verticale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #1 de la figure 4.1 (dans l'aquitard) avec un r_0=141.7m et un s=0m à 568m.....55

4.3 Vitesse horizontale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #2 de la figure 4.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un s=0m à 568m.....55

4.4 Variation du débit vertical Q_v dans l'aquitard en fonction de la longueur radiale de la "flux section" horizontale pour le cas 6 où s=0m (environ 116m). 56

4.5 Variation du débit vertical Q_v dans l'aquitard en fonction de la longueur radiale de la "flux section" horizontale pour le cas 18 où s=0m (environ 568m) 56

4.6 À r=1m, rabattement dans l'aquifère selon z 57

4.7 Différence entre deux courbes de rabattement ayant le même r_o 62

4.8 Classification des cas respectant ou non les critères de DeGlee et Hantush pour le Q_h 74

4.9 Classification des cas respectant ou non les critères de DeGlee et Hantush pour le r_o 75

5.1 Rabattement d'un aquifère à nappe captive en fonction du temps calculé avec Seep/w pour un rayon r=3m, $S=3.7491*10^{-4}$, $K=1*10^{-4}$m/s, b=4m, h=50 et $q=8.225*10^{-4}$ m/s 83

5.2 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 140m pour la méthode de Walton (1962) 88

5.3 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r =200m pour la méthode de Walton (1962). 88

5.4 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 3m pour la méthode de Walton (1962) 89

5.5 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 20m pour la méthode de Walton (1962) 89

5.6 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 40m pour la méthode de Walton (1962) 90

5.7 Présentation graphique des variables de la méthode du point d'inflexion de Hantush mesurées avec Seep/w pour un r= 3m 92

5.8 Graphique du rabattement en fonction du temps pour les rayons r de 3m, 20m et 40m. 95

5.9 Distance r des piézomètres par rapport à la pente Δs de la partie rectiligne du rabattement en fonction du temps. 96

5.10 Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celles prédites par Hantush (1960) pour $S_1'= 3.9228*10^{-3}$ et pour les r=0.507m, 2.52m et 25.3m. 102

5.11 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=0.507m et S_1'= $3.9228*10^{-3}$. 103

5.12 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=2.52m et S_1'= $3.9228*10^{-3}$. 103

5.13 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=25.3m et S_1'= $3.9228*10^{-3}$. 104

5.14 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r> r_0$ où r=50.6m et S_1'= $3.9228*10^{-3}$ 104

5.15 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_0$ où r=101.2m et S_1'= $3.9228*10^{-3}$ 105

5.16 Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celles prédites par Hantush (1960) pour $S_2'=3.9228*10^{-4}$ et pour les r=0.32m, 1.6m, 8m et 32m..... 106

5.17 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=0.32m et S_1'= $3.9228*10^{-4}$. 107

5.18 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=1.6m et $S_1'=3.9228*10^{-4}$ 107

5.19 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=8m et S_1'= $3.9228*10^{-4}$. 108

5.20 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=32m et $S_1'=3.9228*10^{-4}$. 108

5.21 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_0$ où r=80m et $S_1'=3.9228*10^{-4}$. 109

5.22 Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=0.507m et t=1.0083s..... 113

5.23 Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=2.52m et t=24.911s.....113

5.24 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=25.3m et t=2510.93s.....114

5.25 Comparaison entre une courbe de rabattement numériques considérant S' et l'autre pas pour un piézomètre situé à r=3m dans l'aquifère. 117

5.26 Comparaison entre une courbe de rabattement numériques considérant S' et l'autre pas pour un piézomètre situé à r=3m dans l'aquitard. 118

6.1 Quatre débits verticaux calculés par les sections de flux horizontales et un débit horizontal calculé par la section de flux verticale avec les lignes d'écoulement pour le cas 18 121

6.2 Vitesse verticale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #1 de la figure 7.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un r_i=568m 122

6.3 Vitesse horizontale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #2 de la figure 4.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un r_i=568m 122

6.4 À r=1m, rabattement dans l'aquifère selon z 123

6.5 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 140m pour la méthode de Walton (1962). 125

6.6 Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 200m pour la méthode de Walton (1962). 125

6.7 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_o$ où r=101.2m et $S_1'=3.9228*10^{-3}$. 127

6.8 Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=0.507m et t=1.0083 128

6.9 Comparaison entre la courbe rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=2.52m et t=24.911s.....129

6.10 Comparaison entre la courbe de rabattement numérique et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=25.3m et t=2510.93s.....129

7.1 Vu en plan et en coupe du cas réaliste.....132

7.2 Comparaison de la courbe rabattement théorique de DeGlee (1951) avec les courbes de rabattements obtenus selon différentes valeurs de rayon R en régime permanent.....135

7.3 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique de Walton (1962) pour des $r<r_o$ correspondant à 3m et 20m pour R=200m, 400m et 1000m.....138

7.4 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique de Hantush (1960) avec S_1' pour $r<r_o$ correspondant à 0.507m, 2.52 et 25.3m.....140

Figures en annexe

Graphique 1 : Rabattement en fonction de la distance pour le cas Nx100Nz20.....156

Graphique 2 : Rabattement en fonction de la distance pour le cas Nx100Nz20Fx20.....157

Graphique 3 : Comparaison entre les courbes calculées avec l'équation de DeGlee et avec l'équation analytique pour le cas 9.....165

1 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 1; b=1m et b'=16m.....167

2 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 2; b=2m et b'=8m.....167

3 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 3; b=4m et b'=4m.....168

4 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 4; b=8m et b'=2m.....168

5 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 5; b=16m et b'=1m 169

6 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 1; b=1m te b'=16m 169

7 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 2; b=2m et b'=8m. 170

8 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 3; b=b'=4m. 170

9 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 4; b=8m et b'=2m 171

10 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 5; b=16m te b'=1m. 171

11 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 6; b=1m et b'=16m 173

12 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 7; b=2m et b'=8m. 173

13 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 8; b=4m et b'=4m 174

14 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 9; b=8m et b'=2m 174

15 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 15; b=16m et b'=1m 175

16 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 6; b=1m et b'=16m. 175

17 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 7; b=2m et b'=8m. 176

18 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 8; b=b'=4m. 176

19 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 9; b=8m et b'=2m 177

20 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 10; b=16m et b'=1m 177

21 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 11; b=1m et b'=16m 179

22 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 12; b=2m et b'=8m. 179

23 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 13; b=4m et b'=4m 180

24 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 14; b=8m et b'=2m 180

25 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 15; b=16m et b'=1m 181

26 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 11; b=1m et b'=16m. 181

27 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 12; b=2m et b'=8m 182

28 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur 172obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 13; b=b'=4m. 182

29 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 14; b=8m et b'=2m 183

30 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 15; b=16m et b'=1m. 183

31 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 16; b=1m et b'=16m 185

32 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 17; b=2m et b'=8m 185

33 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 18; b=4m et b'=4m 186

34 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 19; b=8m et b'=2m 186

35 Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 20; b=16m et b'=1m 187

36 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 16; b=1m et b'=16m 187

37 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 17; b=2m et b'=8m 188

38 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 18; b=b'=4m 188

39 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 19; b=8m et b'=2m 189

40 Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 20; b=16m et b'=1m 189

LISTE DES SYMBOLES

LETTRES ROMAINES

b épaisseur de l'aquifère, [L]

b' épaisseur de l'aquitard, [L]

f ligne de flux, [L]

h hauteur de charge, [L]

K conductivité hydraulique de l'aquifère, [LT^{-1}]

K_s conductivité hydraulique saturée, [LT^{-1}]

K_x conductivité hydraulique dans la direction x, [LT^{-1}]

K_y conductivité hydraulique dans la direction y, [LT^{-1}]

K' conductivité hydraulique de l'aquitard, [LT^{-1}]

$K_o(x)$ fonction de Bessel modifiée de second degré et d'ordre zéro, [-]

$L=(Kbb'/K')^{1/2}$ coefficient de drainance de l'aquitard, [L]

n nombre de segments sur l'axe, [-]

N nombre d'éléments sur l'axe, []

q vitesse ou flux unitaire, [LT^{-1}]

Q débit pompé, [$L^3 T^{-1}$]

r distance radiale, [L]

r_w rayon du puits, [L]

r_i rayon d'influence, [L]

r_o rayon d'action du puits, [L]

R rayon du modèle numérique, [L]

s rabattement dans l'aquifère, [L]

s_c rabattement dans l'aquitard, [L]

S coefficient d'emmagasinement de l'aquifère durant le pompage, [-]

S' coefficient d'emmagasinement de l'aquitard durant le pompage, [-]

t temps compté depuis le début du pompage, [T]

T transmissivité, $[L^2T^{-1}]$

u pression d'eau interstitielle, $[ML^{-1}T^{-2}]$

W(u) fonction de puits de Theis, fonction exponentielle intégrale, [-]

z distance verticale, [L]

LETTRES GRECQUES

Δ variation, [-]

β argument de Hantush (1960), [-]

θ teneur en eau volumique, [-]

γ poids volumique, $[ML^{-2}T^{-2}]$

ACRONYMES

Seep/w un logiciel d'analyse de l'écoulement souterrain

INDICES

a air

b bas

c centre

h horizontale ou haut

m maximum

p point d'inflexion

ℓ libre (aquifère à nappe libre)

s saturé

v verticale

w eau

x composante selon l'axe des x

y composante selon l'axe des y

z composante selon l'axe des z

the théorique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 150
ANNEXE 2 158
ANNEXE 3 164
ANNEXE 4 (K/K'=2) 166
ANNEXE 5 (K/K'=10) 172
ANNEXE 6 (K/K'=100) 178
ANNEXE 7 (K/K'=1000) 184

CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'industrialisation de la planète pollue autant les eaux de surface que les eaux souterraines. L'eau potable a donc pris de la valeur pour sa rareté et son faible coût de traitement. Dans l'optique de protéger les ressources d'eau souterraine encore non polluées, il est important de bien connaître le mode d'alimentation des puits d'eau potable afin d'établir un périmètre de protection adéquat autour de ces puits (M.E.F., 1995).

1.1 DÉFINITION DU PROBLÈME ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'eau prélevée d'un puits suite à un pompage peut provenir de trois sortes d'aquifère :

1. un aquifère à nappe libre ;
2. un aquifère à nappe captive ;
3. ou un aquifère à nappe semi-captive.

En général, les essais de pompage sont interprétés en utilisant les équations appliquées à un aquifère à nappe captive ou à nappe libre. Les équations traitant un aquifère à nappe semi-captive sont plus difficiles à appliquer car il est difficile de connaître la proportion de l'eau provenant de l'aquifère versus la proportion provenant de l'aquitard. On ne connaît pas présentement de solution théorique permettant de lever à coup sûr cette indétermination (Chapuis, 1999). Cependant, le périmètre de protection à établir autour d'un puits en régime permanent sera très différent en forme et en superficie selon le type d'aquifère de même que les conditions géologiques et hydrauliques le limitant.

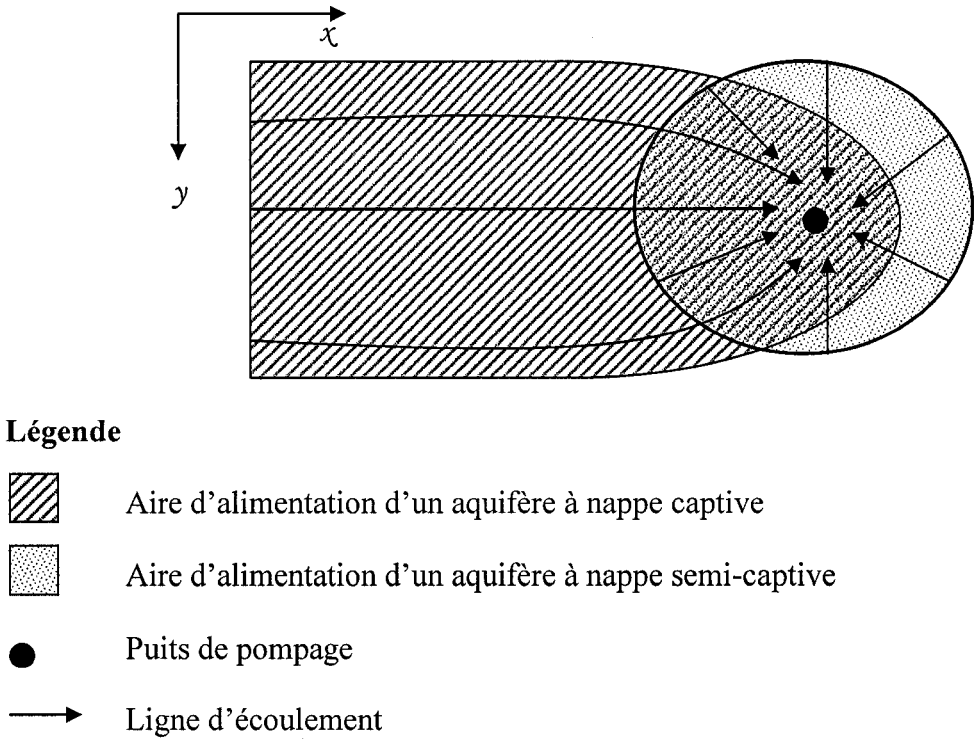


Figure 1.1 : Différence entre l'aire d'alimentation d'un aquifère à nappe captive et d'un aquifère à nappe semi-captive en présence d'un gradient régional.

L'objectif de ce travail est d'évaluer numériquement les théories disponibles pour interpréter les essais de pompage dans une nappe semi-captive. Ultérieurement, des travaux seraient requis pour développer des méthodes permettant de connaître la proportion de l'eau provenant de l'aquifère versus la proportion provenant de l'aquitard. Les deux options extrêmes sont : (i) l'eau pompée provient exclusivement de l'aquifère où elle se déplace latéralement (l'aquifère est alors à nappe captive) : (ii) en régime permanent l'eau pompée provient exclusivement de l'aquitard supérieur par percolation verticale (l'aquifère est alors à nappe semi-captive). Il existe aussi des situations entre ces deux options extrêmes dans lesquelles une partie de l'eau vient latéralement de l'aquifère et l'autre partie vient verticalement à travers l'aquitard (Chapuis, 1999).

1.2 MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre le premier objectif, on a effectué des analyses par éléments finis (2D) à l'aide du logiciel Seep/w, version 4, afin de vérifier les théories existantes et leurs domaines de validité. En régime permanent, deux méthodes sont présentées dans la littérature pour déterminer les caractéristiques d'un aquifère à nappe semi-captive et d'un aquitard soit la méthode de DeGlee (1930) et la méthode de Hantush-Jacob (1955). En régime transitoire, cinq méthodes ont été dénombrées. Trois méthodes ne tiennent pas compte du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard soit la méthode de Walton (1962), la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) et la méthode de Hantush

(1956) pour plusieurs piézomètres. Deux autres méthodes tiennent compte du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard soit la méthode de Hantush (1960) et la méthode de Neuman-Witherspoon (1972). Toutes ces méthodes ont été développées en se basant sur plusieurs hypothèses simplificatrices et quelques conditions d'applications propres à chacune des méthodes.

Avant de vérifier les théories existantes et leurs domaines de validité, on a effectué une étude afin d'optimiser les paramètres numériques utilisés lors de la construction de la grille d'éléments finis. Donc, les paramètres numériques choisis et optimisés sont ceux qui donneraient des calculs de rabattement voisins des prévisions théoriques en régime permanent et des temps de calcul raisonnables. En effet, une grille d'éléments finis peut avoir quelques nœuds (200) engendrant ainsi un grand écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique mais un faible temps de calcul. Contrairement, une grille avec beaucoup de nœuds (10 000) engendre un faible écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique mais un grand temps de calcul.

Une fois les paramètres numériques fixés, différents cas ont été simulés afin de comparer les calculs numériques avec les équations théoriques d'un aquifère à nappe semi-captive respectant les conditions d'applications données par les auteurs. D'autres cas ont été simulés en ne respectant pas les conditions d'applications données par les auteurs afin d'évaluer le domaine de validité des équations théoriques en comparant les

résultats aux calculs numériques. Plusieurs aspects ont été considérés lors des comparaisons entre les calculs numériques et les prédictions théoriques :

- le débit vertical (Q_v) dans l'aquitard ;
- le débit horizontal (Q_h) dans l'aquifère ;
- les valeurs de rabattement (s) sur toute la longueur du modèle ;
- la valeur du rayon d'action (r_o) du puits;
- et la valeur de l'aire d'influence (r_i) du pompage.

Aussi, l'étude d'un cas plus réaliste a été établie en examinant l'impact d'un changement de l'hypothèse d'une charge constante dans l'aquifère supérieur, sachant qu'en réalité, cette charge varie. On comparera les résultats de ce changement avec ceux obtenus pour les méthodes de DeGlee (1951) en régime permanent, de Walton (1962) en régime transitoire ne considérant pas S' et de Hantush (1960) en régime transitoire considérant S'.

Finalement, quelques simulations numériques ont été recalculées avec la toute dernière version du logiciel, Seep/w 5, mise sur le marché seulement à la fin de cette maîtrise. Les résultats obtenus avec Seep/w 5 ont été comparés avec ceux, plus problématiques, calculés avec Seep/w 4.

CHAPITRE II

THÉORIE

2.1 INTRODUCTION

Lors d'un pompage, il est commun de considérer les couches de silt, d'argile ou de shale comme étant imperméables. Le débit qui percole à travers ces unités géologiques peut être faible si l'on considère une petite surface mais ce débit est sûrement non négligeable à travers une surface plus importante de l'ordre du kilomètre carré ou plus.

2.2 L'AQUIFÈRE À NAPPE SEMI-CAPTIVE

Les unités géologiques considérées comme imperméables, mais où peut percoler des quantités appréciables d'eau à l'échelle du kilomètre carré ou plus, sont spécifiquement appelées aquitards. Un pompage effectué dans un aquifère ayant un plancher et un plafond composés d'aquitards où il y a percolation verticale de l'eau prend donc sa source dans une nappe semi-captive puisque le débit au puits provient en partie de l'aquifère (écoulement horizontal) et en partie de l'aquitard (écoulement vertical) (figure 2.1). Donc, un aquifère sera captif si la nappe d'eau souterraine est prise en

sandwich entre deux aquitards imperméables mais sera semi-captif si les aquitards laissent percoler l'eau verticalement.

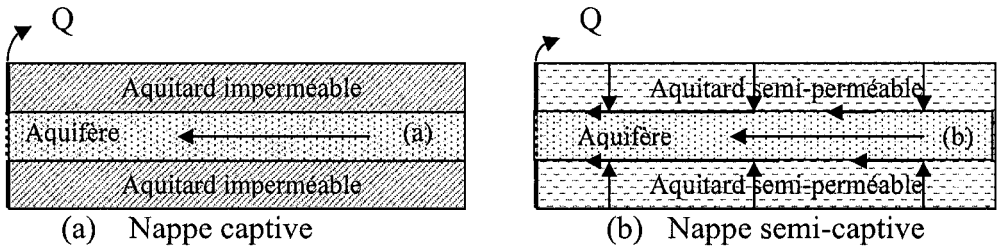


Figure 2.1 : Différence entre un aquifère à nappe captive et semi-captive

Le modèle d'aquifère à nappe semi-captive de la figure 2.2 a été utilisé pour chacun des calculs théoriques et pour chacune des modélisations numériques sauf pour l'étude du cas réel. L'aquifère à nappe semi-captive ci-dessous est délimité par un plancher imperméable et un plafond par lequel l'eau se draine verticalement de l'aquifère à nappe libre. En pompant l'aquifère à nappe semi-captive, la charge hydraulique diminue dans ce dernier et la percolation verticale augmente en intensité dans l'aquitard. Il en découle ainsi une réalimentation de l'aquifère à nappe semi-captive par drainance de l'aquifère à nappe libre. L'eau pompée provient donc de trois sources : de l'emmagasinement "élastique" de l'eau dans l'aquifère à nappe semi-captive, de l'emmagasinement "élastique" de l'eau dans l'aquitard et du drainage de l'aquifère à nappe libre. Après un certain temps, l'eau "emmagasinée élastiquement" dans l'aquifère à nappe semi-captive et dans l'aquitard est épuisée et le puits est alimenté uniquement par l'eau drainée verticalement au travers de l'aquitard. C'est à ce moment qu'un régime permanent peut

être atteint. Dans ces circonstances, le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard n'intervient plus puisque l'aquitard ne sert que de médium au transfert de l'eau.

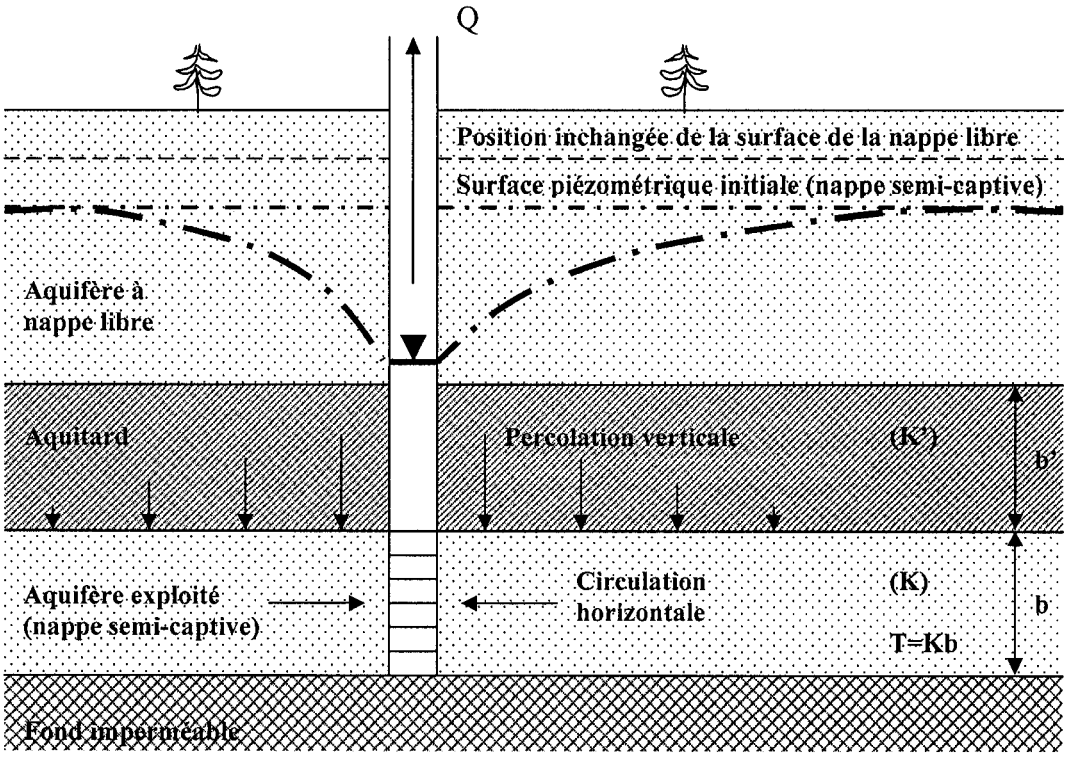


Figure 2.2 : Vue en coupe d'un pompage dans un aquifère à nappe semi-captive.

2.3 LES HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

Le modèle d'aquifère à nappe semi-captive qui a été utilisé pour développer des équations théoriques de pompage respecte plusieurs hypothèses simplificatrices (Kruseman et De Ridder 1990) soit :

- l'aquifère à nappe semi-captive et l'aquifère à nappe libre sont séparés par un aquitard, toutes ces strates sont horizontales;
- l'aquifère à nappe semi-captive a comme socle un aquiclude;
- l'aquifère à nappe semi-captive et l'aquitard sont homogènes, isotropes et d'épaisseurs constantes et ce, même au-delà de la zone d'influence du puits;
- le puits vertical pénètre complètement l'aquifère à nappe semi-captive, il est crépiné sur toute l'épaisseur de l'aquifère et il reçoit l'eau horizontalement;
- le débit dans l'aquitard est vertical;
- le puits n'est pas crépiné dans l'aquifère à nappe libre ni dans l'aquitard;
- l'aquifère à nappe semi-captive et les aquitards ont une extension infinie;
- avant de commencer un pompage, le système est en équilibre : la surface piézométrique de l'aquifère à nappe semi-captive coïncide avec la surface piézométrique de l'aquifère à nappe libre et elles sont toutes les deux horizontales;
- le débit de pompage au puits est constant;
- le rabattement dans l'aquifère à nappe libre est négligeable donc la surface piézométrique de cet aquifère reste constante.

Et spécialement pour le régime permanent :

- Le taux de drainage dans l'aquifère à nappe semi-captive est proportionnel au gradient hydraulique dans l'aquitard.

Cette condition a pour effet d'ignorer l'influence du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard.

Et spécialement pour le régime transitoire :

- L'eau pompée provenant de l'emmagasinement de l'aquifère à nappe semi-captive est instantanément remplacée par l'eau drainée dans l'aquitard lorsque la charge hydraulique diminue;
- Le diamètre du puits est très petit : l'emmagasinement dans le tuyau du puits est négligé.

La condition impliquant une position constante de la surface de l'aquifère à nappe libre n'est valable que si la nappe libre est réalimentée par une source extérieure comme un système de fossés étroitement espacés par exemple. Un rabattement important dans l'aquifère à nappe libre pourrait amener des erreurs considérables sur l'estimation de la transmissivité par exemple.

Finalement, on suppose que le flux occasionné par le pompage est vertical dans l'aquitard et horizontal dans l'aquifère. Selon Neuman and Witherspoon (1969a), l'erreur introduite par cette supposition serait moins de 5% si la conductivité hydraulique de l'aquifère a un ordre de grandeur au moins deux fois plus grand que celui de l'aquitard. On vérifiera numériquement cette hypothèse, particulièrement pour le régime permanent.

2.4 LES MÉTHODES THÉORIQUES

2.4.1 Méthodes en régime permanent

2.4.1.1 La méthode de DeGlee (1930, 1951; voir aussi Anonyme 1964, pp 35-41)

Le rabattement maximal stabilisé s_m, exprimé en mètre, dans un piézomètre situé a une distance r (en m) du puits est donné par :

$$s_m = \frac{Q}{2\pi Kb} K_0\left(\frac{r}{L}\right) \tag{2.1}$$

où

$Q = 2\pi r_w bq(r_w)$ = débit pompé en m^3/s; (2.2)

$q(r_w)$ = vitesse ou flux unitaire au puits en m/s;

r_w = rayon du puits en m;

r = distance radiale en m;

$L = \sqrt{\frac{Kbb'}{K'}}$ = coefficient de drainance de l'aquitard en m; (2.3)

b = l'épaisseur de l'aquifère à nappe semi-captive en m;

b' = l'épaisseur de l'aquitard en m;

K = conductivité hydraulique de l'aquifère à nappe semi-captive en m/s;

K' = conductivité hydraulique de l'aquitard en m/s;

K_0 (x) = fonction de Bessel modifiée de second degré et d'ordre zéro.

Les valeurs de K_0 (x) pour différentes valeurs de x sont tirées de Hantush (1956).

La méthode de DeGlee ne peut être utilisée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime permanent,
- $L > 3b$ selon DeGlee (1951).

2.4.1.2 La méthode de Hantush-Jacob (1955)

La méthode de Hantush-Jacob ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime permanent,
- $L > 3b$, et
- $r/L \leq 0.05$ selon Hantush-Jacob (1955).

Ignorant les travaux faits plus tôt par DeGlee, Hantush-Jacob (1955) ont dérivé l'équation 2.1. Hantush (1956, 1964) a noté que si r/L est petit ($r/L \leq 0.05$), alors l'équation 2.1 est approximée par

$$s_m \approx \frac{2.30Q}{2\pi Kb} \log\left(1.12\frac{L}{r}\right). \tag{2.4}$$

Pour un $r/L < 0.16$, 0.22, 0.33 et 0.45, les erreurs sur le rabattement seront moins de 1%, 2%, 5% et 10% respectivement si on utilise cette équation au lieu de l'équation 2.1 (Huisman 1972).

Sur la partie rectiligne de la courbe, c'est-à-dire la différence de rabattement Δs_m par cycle log de r, est exprimée par

$$\Delta s_m = \frac{2.30Q}{2\pi Kb} \tag{2.5}$$

Lorsque l'on extrapole la partie rectiligne de la courbe jusqu'à ce que $s_m=0$ et que $r = r_0$, alors l'équation 2.4 devient

$$0 = \frac{2.30Q}{2\pi Kb} \log\left(1.12\frac{L}{r_0}\right) \tag{2.4.2}$$

et on en tire la valeur de r_o

$$r_0 = 1.12L \tag{2.6}$$

où

r_0 = rayon d'action du puits en m.

2.4.2 Méthodes en régime transitoire

En régime transitoire, le coefficient d'emmagasinement de l'aquitard S' ne devrait pas être négligé ce qui est tout de même le cas pour trois des cinq méthodes de ce régime. Le fait de ne pas tenir compte du coefficient d'emmagasinement de l'aquitard en régime transitoire peut mener à (Neuman and Witherspoon, 1972) :

- une surestimation de la conductivité hydraulique K de l'aquifère à nappe semi-captive;
- une sous estimation de la conductivité hydraulique K' de l'aquitard;
- une fausse impression d'hétérogénéité de l'aquifère à nappe semi-captive.

2.4.2.1 La méthode de Walton (1962)

En négligeant le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard, le rabattement causé par le pompage dans l'aquifère à nappe semi-captive est décrit par la formule de Hantush-Jacob (1955)

$$s = \frac{Q}{4\pi Kb}\int_u^\infty \frac{1}{y}\exp\left(-y - \frac{r^2}{4L^2 y}\right)dy = \frac{Q}{4\pi Kb}W(u, r/L) \tag{2.7}$$

où

$$u = \frac{r^2 S}{4\pi Kbt} \tag{2.8}$$

S = coefficient d'emmagasinement de l'aquifère à nappe semi-captive,

t = temps en s.

L'équation 2.7 est similaire à celle de Theis pour les grandes valeurs de L, quand le terme exponentiel $r^2/4L^2y$ approche de zéro.

On rappelle l'équation de Theis (1935) pour une nappe captive en régime transitoire :

$$s = \frac{Q}{4\pi Kb}\int_u^\infty \frac{e^{-y}dy}{y} = \frac{Q}{4\pi Kb}W(u) \tag{2.9.a}$$

Où

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \ldots = \text{fonction du puits} \qquad (2.9.b)$$

En se basant sur l'équation 2.7, Walton (1962) a développé une modification de la solution de Theis (1935) en utilisant une courbe caractéristique pour chaque valeur de r/L au lieu d'utiliser seulement un type de courbe où r/L=0. Cette famille de courbes caractéristiques peut être tracée à partir des valeurs de la fonction W(u, r/L) publiées par Hantush (1956).

La méthode de Walton ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime transitoire,
- l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est négligée, c'est-à-dire son coefficient d'emmagasinement S' est négligé.

2.4.2.2 La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour un piézomètre

Pour déterminer le point d'inflexion P, il est nécessaire d'avoir atteint le régime permanent. Sur une courbe du rabattement s versus le log du temps t, il est possible de trouver le point d'inflexion P en suivant la relation

$$s_p = 0.5 s_m = \frac{Q}{4\pi Kb} K_0\left(\frac{r}{L}\right) \tag{2.10}$$

Où s_p est le rabattement au point d'inflexion P en m.

Pour le point d'inflexion

$$u_p = \frac{r^2 S}{4Kbt_p} \cong \frac{r}{2L} \tag{2.11}$$

Pour un cycle log, la pente au point d'inflexion est donnée par

$$\Delta s_p = \frac{2.30Q}{4\pi Kb} e^{-r/L} \tag{2.12}$$

et

$$r = 2.30L\left(\log\frac{2.30Q}{4\pi Kb} - \log \Delta s_p\right) \tag{2.13}$$

où

t_p = temps au point d'inflexion en s,

$$\Delta s_p = \frac{s_2 - s_1}{\log t_2 - \log t_1} = \text{la pente pour un cycle log en m} \qquad (2.14)$$

(Le point d'inflexion P est compris entre les points 1 et 2).

La méthode du point d'inflexion de Hantush pour un piézomètre ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime transitoire,
- l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est négligée, c'est-à-dire son coefficient d'emmagasinement S' est négligé,
- il est possible d'extrapoler le rabattement Δs_m du régime permanent pour chaque piézomètre.

2.4.2.3 La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour plusieurs piézomètres

Il faut au minimum deux piézomètres pour utiliser cette méthode. Sur du papier semi-logarithmique, on détermine les pentes Δs de la partie rectiligne des courbes du rabattement s versus le temps t (t étant en échelle log) de chaque piézomètre. Toujours

sur du papier semi-logarithmique, on construit un graphique de la position r versus la pente Δs pour chaque piézomètre (Δs étant en échelle log) et on trace une droite moyenne entre les points. On calcule ensuite la pente Δr pour un cycle log puis on extrapole cette droite jusqu'à ce qu'elle intercepte l'abscisse ($r = 0$) afin d'y lire la valeur de $(\Delta s)_0$. Connaissant maintenant Δr et $(\Delta s)_0$, il est possible d'appliquer la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour plusieurs piézomètres.

$$L = \frac{1}{2.30}\Delta r \tag{2.15}$$

et

$$Kb = 2.30\frac{Q}{4\pi(\Delta s)_0} \tag{2.16}$$

La méthode du point d'inflexion de Hantush pour plusieurs piézomètres ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime transitoire,
- l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est négligée, c'est-à-dire son coefficient d'emmagasinement S' est négligé.

Il est préférable d'avoir plus de deux piézomètres afin de diminuer le pourcentage d'erreur sur la droite du graphique r vs Δs.

Fort heureusement deux autres méthodes ont été développées qui, elles, tiennent compte du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard.

La méthode de Hantush détermine les caractéristiques de l'aquifère à nappe semi-captive et de l'aquitard tandis que la méthode de Neuman-Witherspoon détermine seulement les caractéristiques de l'aquitard.

2.4.2.4 La méthode de Hantush (1960)

Pour de petites valeurs de temps de pompage (t < S'b'/10K'), Hantush (1960) a développé la solution suivante :

$$s = \frac{Q}{4\pi Kb} W(u, \beta) \tag{2.17}$$

Où

$$u = \frac{r^2 S}{4Kbt} \tag{2.18}$$

$$\beta = \frac{r}{4}\sqrt{\frac{K'/b'}{Kb} * \frac{S'}{S}} \tag{2.19}$$

S' = coefficient d'emmagasinement de l'aquitard,

$$W(u,\beta)=\int_u^{\infty}\frac{e^{-y}}{y}\,erfc\,\frac{\beta\sqrt{u}}{\sqrt{y(y-u)}}\,dy\,.$$

Les valeurs de la fonction $W(u,\beta)$ sont présentées dans les tables de Hantush (1960).

Cette méthode de Hantush ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- l'écoulement est en régime transitoire,
- l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est considérée, c'est-à-dire son coefficient d'emmagasinement S' est considéré,
- $t < S'b'/10K'$.

2.4.2.5 La méthode de Neuman-Witherspoon (1972)

Cette méthode est basée sur la théorie développée par Neuman et Witherspoon (1968) dans laquelle le rabattement de l'aquifère à nappe semi-captive est décrit par l'équation de Theis (équation 2.8) et le rabattement s_c dans l'aquitard de conductivité hydraulique K' est décrit par

$$s_c = \frac{Q}{4\pi Kb} W(u, u_c) \tag{2.20}$$

Où

$$W(u, u_c) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{u_c}}^{\infty} -Ei\left(-\frac{uy^2}{y^2 - u_c}\right) e^{-y^2} dy$$

$$Ei(u) = -\gamma - In(u) + (u/1.1!) - (u^2/2.2!) + (u^3/3.3!) - (u^4/4.4!)...$$

où γ=0.577 215 664 9.. est la constante d'Euler

$$u_c = \frac{z^2 S'}{4K'b't} \tag{2.21}$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Kbt}$$

$\frac{K'b'}{S'}$ =diffusivité hydraulique de l'aquitard en m^2/s,

z = distance verticale dans l'aquitard (en m) entre la surface de contact aquifère-aquitard et la prise d'eau du piézomètre installée dans l'aquitard (figure 2.3).

La fonction $W(u,u_c)$ est fournie sous forme de tableau par Witherspoon et al. (1967)

Selon les auteurs, l'équation 2.20 peut être utilisée pour un aquifère à nappe semi-captive réalimenté par une forte drainance si la distance radiale des piézomètres par rapport au puits est inférieure à 100m.

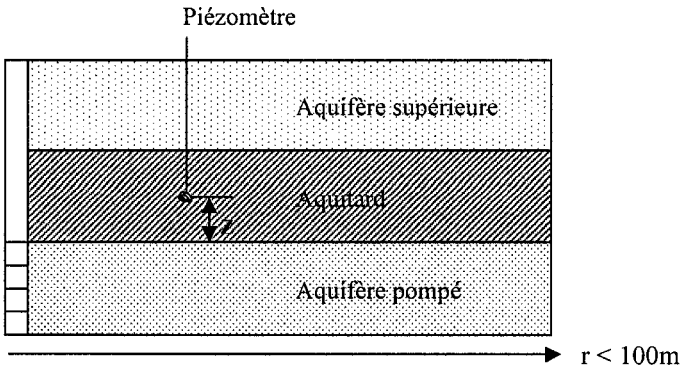


Figure 2.3 : Distance verticale z en m dans l'aquitard.

La méthode de Neuman et Witherspoon (1972) ne peut être appliquée que si les conditions d'applications suivantes sont satisfaites :

- les hypothèses simplificatrices citées au début de ce chapitre sont respectées,
- le débit dans le puits est en régime transitoire,
- l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est considérée, c'est-à-dire son coefficient d'emmagasinement S' est considéré,
- $t < {S'b'}/{10K'}$;
- $\beta < 1.0$ (voir équation 2.19), c'est-à-dire la distance du piézomètre considéré au puits doit être inférieur à la valeur limite définie par $\beta < 1.0$.

Seuls les premiers rabattements (temps t petits) peuvent être utilisés.

Lors de cette étude, on vérifiera si oui ou non les résultats numériques concordent avec les méthodes en régime transitoire et lesquelles concordent le mieux : celles qui tiennent compte de l'influence du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard ou celles qui n'en tiennent pas compte. Aussi, on vérifiera la véracité des conclusions que les auteurs ont tiré de leurs méthodes théoriques et l'adéquation des conditions restrictives qu'ils ont proposées.

CHAPITRE III

SIMULATIONS NUMÉRIQUES

3.1 DESCRIPTION DU LOGICIEL RETENU

Lors d'un pompage dans un aquifère à nappe semi-captive, il est possible de déterminer les caractéristiques d'un aquifère et d'un aquitard qui respectent les hypothèses simplificatrices et les conditions d'application du chapitre II en utilisant des méthodes graphiques relativement simples (Kruseman et De Ridder, 1991). Cependant, l'étude de cas où les hypothèses simplificatrices et les conditions d'application ne sont pas respectées est possible notamment grâce à l'utilisation des méthodes numériques. Dans la réalité de terrain, les hypothèses simplificatrices sont rarement respectées puisque les milieux géologiques ne sont pas homogènes et constants contrairement a ce que suppose les approches théoriques. Les méthodes numériques sont importantes car elles modélisent les équations au-delà des hypothèses simplificatrices afin d'ajuster le modèle à la géologie en place.

Le logiciel de simulations numériques Seep/w, version 4, a été choisi pour la qualité des résultats obtenus lors d'études antérieures (Chenaf, 1997; Chapuis et al., 2001). Les caractéristiques du logiciel sont expliquées en détails dans le guide de

l'utilisateur (Geo-slope, 1998) mais voici un résumé des grandes lignes directrices du logiciel.

Seep/w utilise la procédure de Green et Corey (1971) pour estimer la conductivité hydraulique K non saturée à partir des caractéristiques du sol et de l'eau. Il est possible, avec ce logiciel, de traiter des cas impliquant un milieu saturé et un milieu non saturé. Seep/w calcule et présente toutes les conditions d'écoulement (h, v_{Darcy}, K, θ, etc.). En ce qui concerne les états de contraintes totales, Seep/w se base sur deux hypothèses principales :

- il n'y a aucun chargement ou déchargement de la masse de sol donc la contrainte totale demeure constante;
- durant la phase transitoire, la pression interstitielle de l'air est constante et équivalente à la pression atmosphérique.

Seep/w utilise la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation d'écoulement générale dans le plan (x, y).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(u)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q=\frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad \text{.....(3.1)}$$

où

$K_x(u)$: fonction de conductivité hydraulique dans la direction x;

$K_y(u)$: fonction de conductivité hydraulique dans la direction y;

Q : débit volumique de recharge ou de pompage;

h : charge hydraulique;

θ_w : teneur en eau volumique;

u : pression d'eau interstitielle;

t : temps.

Cette équation montre que la différence dans le temps entre un débit qui rentre et un débit qui sort d'un volume élémentaire est égale à la variation de la teneur en eau volumique.

Le but de la résolution d'une équation d'éléments finis est de calculer la charge pour chacun des éléments. La distribution de la charge dans un élément suit la fonction d'interpolation de Bathe (1982), ce qui implique que la distribution de la charge est linéaire s'il n'y a pas de nœuds secondaires et non linéaires s'il y a des nœuds secondaires. En deux dimensions, l'épaisseur d'un élément est considérée constante d'une unité sur tout l'élément. Seep/w utlise le premier cadran d'un système cartésien *x-y* conventionnel.

Seep/w emploie la technique d'élimination de Gauss pour résoudre les équations d'éléments finis. Cette technique peut ajouter ou enlever des éléments si le logiciel a donné plus d'une fois un numéro à un nœud d'un élément.

Au début de l'analyse, les bonnes valeurs de (h, u, θ, etc.) du matériau sont inconnues et c'est pourquoi il est nécessaire de faire des itérations pour résoudre les équations. Seep/w utilise une technique de substitution répétitive dans son processus d'itération. Pour la première itération, il utilise les données entrées initialement. Pour le régime permanent, il utilise le plus récent calcul de la charge et pour le régime transitoire, il utilise la charge dans le milieu de l'intervalle de temps utilisé pour définir les propriétés du matériel. Le processus d'itération se continue jusqu'à ce qu'il satisfasse les critères de convergence entrés initialement.

Pour faire une analyse en régime transitoire, il est nécessaire de connaître les charges initiales à chaque nœud du modèle avant de commencer les incrémentations.

Il existe trois interfaces dans Seep/w appelées DEFINE, SOLVE et CONTOUR. Par exemple, dans DEFINE est enregistrée la contribution des conditions limites, dans SOLVE est calculée la charge à chacun des nœuds et CONTOUR sert à présenter tous les résultats des calculs sous forme de graphiques et de tableaux exploitables dans d'autres logiciels comme Excel.

3.2 ÉTUDE SUR LE MAILLAGE NUMÉRIQUE

3.2.1 Caractéristiques générales

Afin d'augmenter les chances d'obtenir une bonne comparaison entre les résultats numériques et théoriques, il est important d'avoir un modèle numérique optimisé. La qualité d'un modèle numérique par éléments finis dépend de plusieurs paramètres : le maillage, le choix des éléments, le calcul à l'ordinateur, etc. Les éléments quadratiques utilisés dans Seep/w sont assez précis pour donner de bons résultats (Chenaf, 1997). Pour optimiser le modèle numérique, une étude en régime permanent sur les différentes possibilités de maillage d'un aquifère à nappe semi-captive a été effectuée en trois étapes avec, à chaque étape, l'ajout d'un facteur de raffinement. Tous les cas ont été analysés à partir d'un modèle numérique axisymétrique c'est-à-dire un modèle numérique ayant une infinité de plan de symétrie qui se coupe à un axe appelé axe de symétrie et qui est apparenté à l'axe de révolution du puits de pompage. Les modèles numériques sont axisymétriques car la géométrie, les conditions limites, la charge et les propriétés hydrauliques ne varient pas d'un plan de symétrie à l'autre.

Un des buts de cette étude est d'évaluer l'impact du raffinement sur les calculs du modèle. Ce raffinement peut être modélisé de deux façons :

- par la fonction *ratio* décrite postérieurement (équation 3.2); et
- par une augmentation du nombre d'éléments.

L'augmentation du nombre d'éléments répartie de façon homogène le raffinement sur l'ensemble du modèle tandis que la fonction *ratio* réparti de façon hétérogène le raffinement sur l'ensemble du modèle. Le *ratio* se définit comme étant, dans le même axe, le rapport de la longueur du dernier élément sur la longueur du premier élément. Par exemple, un *ratio* selon x de 2 signifie que la longueur du dernier élément est 2 fois plus importante que celle du premier élément. Tous les *ratios* sont attribués de façon à avoir un raffinement important près du puits de pompage puisque le rabattement à cet endroit est plus important et qu'il suit une fonction logarithmique.

La fonction *ratio* est définie par (courriel de Lori Newman) :

$$\Delta = \frac{2*(1-(n*c))}{n*(n-1)} \tag{3.2}$$

où

n = nombre de segments sur l'axe;

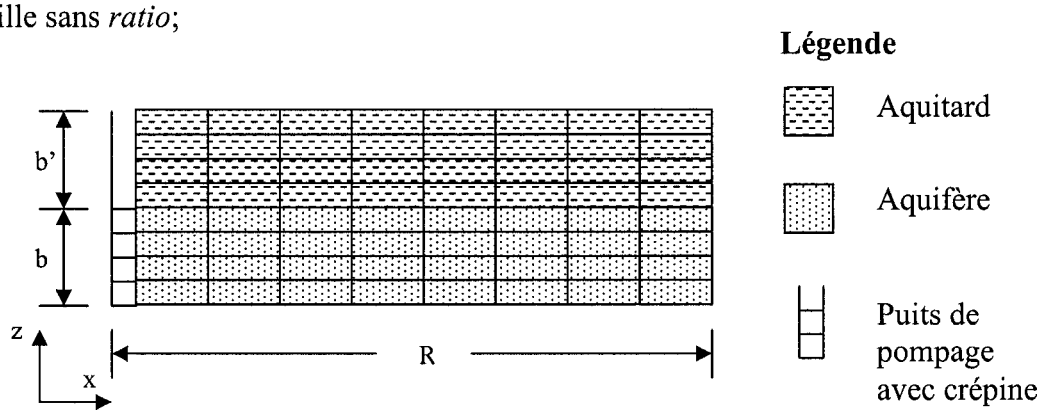
$$c = \frac{2}{n*(ratio+1)}. \tag{3.3}$$

Chaque segment augmente de Δ

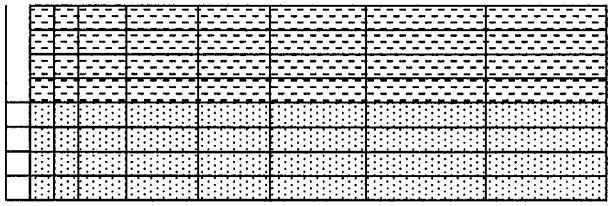
Premier segment	$c+(0*\Delta)$;
Deuxième segment	$c+(1*\Delta)$;
Troisième segment	$c+(2*\Delta)$;
Etc.	

La fonction *ratio* sera imposée dans la deuxième et la troisième étape seulement. Donc, la première étape est importante car c'est là que l'on observe l'impact de l'augmentation du nombre d'éléments. Pour les étapes 2 et 3, on a raffiné le maillage selon l'axe des x (étapes 2 et 3) et des z (étape 3) avec la fonction *ratio* parce que, lors du pompage, il y a une augmentation importante du gradient hydraulique près du puits et à l'interface entre l'aquifère et l'aquitard.

1. Grille sans *ratio*;



2. Grille avec un facteur *ratio* présent selon l'axe des x (Fx) seulement;



3. Grille avec un facteur *ratio* selon l'axe des x (Fx) et facteur *ratio* inverse selon l'axe des z (Fz).

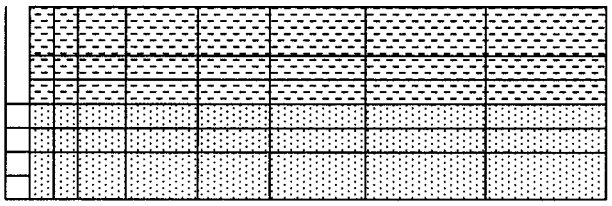


Figure 3.1 : Étape 1, 2 et 3 de l'étude d'optimisation des paramètres numériques.

Pour chacune des trois étapes, il y a plusieurs cas qui sont simulés ayant, d'une fois à l'autre, un changement concernant le nombre d'élément ou le facteur *ratio* (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Nombre de cas simulés pour chacune des étapes de l'étude sur le maillage numérique.

Étapes	Nombre de cas
1	25
2	30
3	30

Tous les paramètres autres que ceux de la grille ont été maintenus constants afin de mieux comparer les résultats entre eux. Le rayon du puits r_w=0.1m, le rayon du modèle R=200m, le rapport K/K'=10 avec K=1*10^{-4} m/s et K'=1*10^{-5} m/s, l'épaisseur de l'aquifère et de l'aquitard b=b'=4m, la charge au puits à h_w=45m, le rabattement au puits s_m=5m, la charge constante h=50m dans l'aquifère supérieur et l'imperméabilité du socle sous-jacent à l'aquifère.

Le choix du rayon du modèle R a été établi en se basant sur l'hypothèse simplificatrice énonçant que l'aquifère à nappe semi-captive et l'aquitard ont une extension infinie (chapitre II). L'extension infinie est représentée par un rayon R quatorze fois plus grand que le rayon d'action théorique propre à chacun des cas. On suppose que la valeur de R est suffisante pour simuler l'extension infinie.

3.2.2 Paramètres de comparaisons

Pour chacune des trois étapes, trois paramètres numériques ont été relevés et comparés avec les prédictions théoriques de DeGlee (1951) soit :

- le débit horizontal Q_h dans l'aquifère;
- le débit vertical Q_v dans l'aquitard;
- et le rayon d'action r_o.

Tous les résultats des comparaisons se retrouvent à l'annexe 1.

Pour tous les cas à l'étude, on a tracé trois lignes servant à calculer le débit qui les traversent perpendiculairement (figure 3.2). Dans Seep/w, ces lignes sont appelées "flux section". Il y a deux lignes horizontales et une ligne verticale. Une ligne positionnée horizontalement est appelée "flux section" horizontale (f_h) et elle calcule un débit la traversant verticalement. Avec cette ligne, il est possible de calculer le débit vertical $Q_v=2\pi f_h$. La même logique s'applique pour la "flux section" positionnée verticalement.

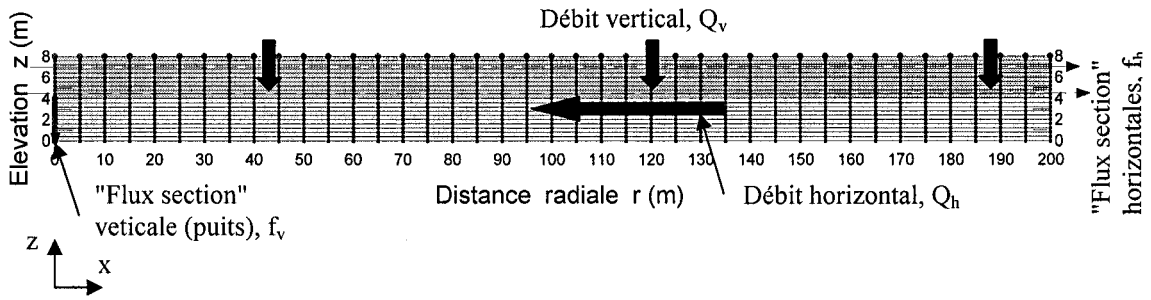


Figure 3.2 : Grille numérique montrant les "flux section" *horizontales (f_h) et verticale (f_v) et leurs calculs soit le débit vertical (Q_v) et le débit horizontal (Q_h).*

Les débits verticaux calculés par les "flux section" horizontales ne sont pas exactement les mêmes pour une ligne située en haut (7.25m) ou en bas (4.5m) de l'aquitard, où z = 0m est à la base de l'aquifère à nappe semi-captive. La différence de débit entre ces deux "flux section" horizontales est de l'ordre de $1*10^{-6}$ m^3/s. Le calcul de f_h donné pour chacun des cas dans les tableaux 1, 2 et 3 (annexe 1) est une moyenne des débits calculés par les deux "flux section" horizontales.

Le rapport de f_v/f_h (annexe 1 et 2) devrait idéalement être égal à 1 car, pour une nappe semi-captive en régime permanent, toute l'eau pompée provient du drainage gravitaire à travers l'aquitard supérieur.

Pour les cas où r/L<0.05 le débit théorique est calculé à partir de l'équation 2.4.

$$Q_{the} = \frac{2\pi T s_w}{\ln\left(1.12\, L/r_w\right)} \tag{2.4}$$

Cependant, les modèles numériques sont effectués selon un plan axisymétrique où le débit est calculé par radian, alors l'équation devient :

$$Q_{the} = \frac{Ts_w}{\ln\left(1.12\, L/r_w\right)} \tag{3.4}$$

où

T = Kb = transmissivité de l'aquifère à nappe semi-captive en m^2/s.

Le rayon d'action du puits r_0 théorique se calcule à partir de l'équation 2.6.

3.2.3 Première étape; aucun *ratio*

Pour la première étape (figure 3.1), vingt-cinq cas sont simulés. Les cas sont définis par le nombre d'éléments qui les constitue selon l'axe des x (Nx) et selon l'axe des z (Nz). Par exemple, un cas ayant 40 éléments selon l'axe des x et 20 éléments selon l'axe des z sera nommé Nx40Nz20. Donc, les vingt-cinq cas à l'étude lors de la première étape sont le résultat des combinaisons NxNz où Nx=20, 40, 60, 80 et 100 et Nz=10, 20, 30, 40 et 50.

Les rayons d'action r_o des modèles numériques ont été calculés en utilisant seulement les deux premiers points de la courbe de rabattement en fonction du temps (annexe 1, graphique 1). Si les r_0 avaient été calculés à l'aide de la deuxième partie

linéaire de la courbe de rabattement, les résultats auraient été plus proches de la valeur théorique. Toutefois, ce n'est pas le résultat de la comparaison entre le r_0 numérique et le r_0 théorique qui est important mais la distance à laquelle ce résultat a été calculé. Cette distance doit toujours être la même afin de pouvoir comparer les diverses simulations numériques entre elles. Il est donc nécessaire de toujours faire les calculs du rayon d'action et des débits aux mêmes endroits.

Alors voici l'analyse de l'effet de l'augmentation du nombre d'éléments selon l'axe des x et des z tirée des résultats présentés à l'annexe 1, tableau 1 :

- Pour un Nx constant, le débit horizontal est indépendant du nombre d'éléments en z (Nz);
- Plus il y a d'éléments selon l'axe des x (Nx), plus les débits horizontaux et verticaux se rapprochent du débit théorique;
- Les débits horizontaux et verticaux sont pratiquement égaux lorsqu'il y a 20 éléments dans l'aquitard et 20 éléments dans l'aquifère (Nz=20);
- Pour d'obtenir un rayon d'action proche de la valeur théorique, il faut plus de six éléments dans les premiers dix mètres du modèle à partir du puits de pompage.

3.2.4 Deuxième étape; facteur *ratio* horizontal seulement

En observant les résultats des modèles sans *ratio* (annexe 1, tableau 1), on remarque que le pourcentage de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques de DeGlee (1951) pour Q_h et Q_v est à son plus bas lorsque le nombre d'éléments selon l'axe des z (Nz) est égal à 20 et ce, pour la majorité des Nx. On choisit donc de garder Nz=20 constant dans l'étude de l'application du facteur *ratio* horizontal (Fx). Donc, pour la deuxième étape, trente cas sont étudiés soit Nx=20, 40, 60, 80 et 100 associés avec Fx=5, 20, 50, 100, 300 et 500 où Fx représente le facteur *ratio* horizontal à partir du puits selon l'axe des x (figure 3.1). Les cas sont nommés selon leurs caractéristiques Nx, Nz et Fx. Par exemple, un cas ayant 10 éléments selon l'axe des x, 20 éléments selon l'axe des z et un facteur *ratio* horizontal de 50 sera nommé Nx10Nz20Fx50.

Pour tous les cas à l'étude, le facteur *ratio* horizontal a été obtenu sur toute la longueur du modèle. Cependant, un problème survient lorsqu'on atteint la limite de capacité de raffinement du modèle numérique. Dépassé cette limite, le logiciel ne met pas le nombre de nœuds imposé dans le modèle mais un nombre ajusté à la limite de raffinement. Le logiciel ajuste le nombre de nœuds selon la technique d'élimination de Gauss. Cet ajustement survient lorsqu'il y a des facteurs de raffinement trop élevés comme pour les cas : Nx20Nz20Fx500, Nx40Nz20Fx300, Nx40Nz20Fx500, Nx60Nz20Fx300, Nx60Nz20Fx500, Nx80Nz20Fx100, Nx80Nz20Fx300,

Nx100Nz20Fx50, Nx100Nz20Fx100 et Nx100Nz20Fx300. La conséquence d'un facteur de raffinement trop élevé est que l'on obtient un nombre de nœuds inférieur à celui entré lors de la construction de la grille. Les cas où les facteurs de raffinement sont trop élevés ne sont pas pris en compte ni dans les représentations graphiques ni dans les discussions de résultats.

Dans les graphiques de s vs r, la valeur du rayon d'action r_o a été mesurée avec plus de deux points (annexe 1, graphique 2) sauf pour le cas Nx20Nz20Fx5.

Voici l'analyse de l'effet de l'application du facteur *ratio* horizontal sur des grilles numériques de la deuxième étape tirée des résultats présentés à l'annexe 1, tableau 2 :

- En général, plus le facteur de facteur *ratio* Fx est grand (deuxième nœud proche de 0.1m), plus l'écart est petit entre les valeurs numériques et théoriques de débit et de r_o;
- Plus le nombre d'éléments en x (Nx) est important, plus l'écart est petit entre les valeurs numériques et théoriques de r_o;
- En comparant le cas Nx100Nz20<u>Fx20</u> (avec *ratio*) avec le cas Nx100Nz20 (sans *ratio*), on peut dire qu'une grille avec un facteur *ratio* horizontal donne des résultats qui se rapprochent plus des valeurs théoriques de 30.2% pour le Q_h, de 32.0% pour le Q_v et de 291.6% pour le r_0.

3.2.5 Troisième étape; facteur *ratio* horizontal et facteur *ratio* vertical inverse

Le facteur *ratio* vertical inverse (figure 3.1) est requis afin de bien modéliser la loi de réfraction entre l'aquifère et l'aquitard.

Tiré de la deuxième étape, les cas où Nx=80 et Nz=20 donnent de bons résultats. De ce groupe de cas, celui où Fx=20 a été choisi comme le meilleur à cause de l'excellence de son rapport f_v/f_h. Donc, il serait maintenant intéressant de regarder l'effet d'un changement de Nz en gardant Nx et Fx constants. C'est pourquoi, dans la troisième étape, trente cas sont analysés en gardant Nx=80 et Fx=20 tout au long des constructions numériques. Les autres paramètres sont Nz=10, 20, 30, 40 et 50 associés avec Fz=1, 3, 5, 8, 10 et 20 où Fz représente le facteur *ratio* vertical dans l'aquifère selon l'axe des z. Pour l'aquitard, les valeurs entrées dans la fonction *ratio* de Seep/w sont égales à 1/Fz afin d'obtenir un *ratio* inverse.

Comme pour la deuxième étape, le r_0 a été calculé à l'aide de plusieurs points (de 0.1m à 5.06m) sur la partie rectiligne du graphique du rabattement en fonction du logarithme de la distance.

Alors voici l'analyse de l'effet du facteur *ratio* vertical inverse sur des grilles numériques de la troisième étape tirée des résultats présentés à l'annexe 1, tableau 3 :

- Le facteur *ratio* vertical inverse n'a aucun impact sur le calcul du débit horizontal;
- Le facteur *ratio* vertical inverse n'a aucun impact sur le calcul des valeurs de r_0 numérique;
- Plus il y a d'éléments en z (Nz), plus l'écart entre le débit vertical numérique et théorique augmente; on verra plus loin que cet écart s'annule avec la version 5 de Seep/w, (rendue disponible à la fin de ma maîtrise);
- En général, l'augmentation du facteur *ratio* vertical inverse Fz ne diminue pas l'écart entre le débit vertical numérique et le débit vertical théorique.

3.2.6 Discussion et conclusion

Avec les paramètres choisis de débit et de perméabilité, cités en introduction de ce chapitre, le rabattement dans l'aquifère se fait seulement sentir sur les quarante premiers mètres à partir du puits de pompage (annexe 1, graphiques 1 et 2). Dans les conditions de cette étude, le nombre d'éléments sur l'axe horizontal (Nx) joue un rôle important à l'intérieur de ces quarante premiers mètres pour une bonne détermination du débit horizontal et vertical. Pour la détermination du r_o, c'est à l'intérieur des sept premiers mètres environ que le nombre d'éléments est important (annexe 1, graphique 1 et 2). Plus il y a d'éléments et plus l'écart entre le r_o numérique et le r_o théorique est petit. Aussi, plus le deuxième nœud de la grille est près du puits et plus le r_o est juste. En effet, de par sa propriété, l'échelle logarithmique d'un graphique s vs r donne beaucoup d'importance

aux nœuds près du puits. Le fait d'avoir beaucoup de ces nœuds permet de tracer une bonne droite les reliant. On obtient donc de meilleures comparaisons entre les r_o numériques et les r_o théoriques lorsque la grille à un facteur *ratio* horizontale et un nombre d'éléments selon x (Nx) est important. Dans la même logique, le facteur *ratio* horizontale diminue aussi l'écart entre le débit numérique et le débit théorique car le nombre de nœuds est plus concentré dans les quarante premiers mètres à partir du puits de pompage. Donc, plus le facteur *ratio* horizontal est important, plus l'écart diminue jusqu'à ce qu'on atteigne la limite de raffinement du logiciel Seep/w.

En définitive l'étude montre que plus il y a d'éléments selon l'axe des x à l'intérieur des quarante premiers mètres, plus le modèle est juste. Cependant, il n'est pas nécessaire d'avoir un facteur *ratio* vertical et un nombre élevé d'éléments en z car cela n'affecte pas toujours les résultats de façon positive. Donc, la réfraction entre l'aquifère et l'aquitard n'a pas besoin d'être modélisée par un facteur *ratio* vertical important.

Pour avoir de meilleurs résultats numériques, il est possible de construire une grille de différentes façons. Dans tous les cas étudiés dans ce chapitre, le maillage a été effectué d'un seul jet sur toute la longueur R du modèle. Cependant, il est tout aussi valable de construire une grille et de la raffiner en trois opérations successives. Par exemple une première opération serait de créer une grille entre 0.1m et 3m, une deuxième opération entre 3m et 40 m et une troisième opération entre 40 m et 200 m. Cette façon de procéder permettrait de mieux contrôler le nombre de nœuds aux endroits stratégiques et d'avoir

une progression constante des mailles selon un axe logarithmique. C'est dans cette optique que les futures grilles numériques seront construites.

3.3 LES CONDITIONS LIMITES AU PUITS

Dans Seep/w, deux sortes de conditions limites peuvent être imposées au puits; soit une charge constante ($h(r_w)$=cte), soit un flux constant ($q(r_w)$=cte). Pour le cas Nx80Nz20Fx20, la figure 3.3 montre que lorsque l'on impose la limite $h(r_w)$=cte au puits, Seep/w ajuste, selon l'axe des *x*, la vitesse en x correspondant à chacun des nœuds du puits. Avec cette limite à charge constante, il est possible de calculer le débit en régime permanent grâce à l'équation 2.2 en prenant la valeur de la section de flux vertical comme moyenne de la vitesse. La limite $q(r_w)$=cte, par contre, donne une vitesse constante au puits. Cette limite à flux constant est utilisée lors du calcul du rabattement dans les équations en régime transitoire car il est trop complexe d'ajuster la charge à chacun des nœuds composant le puits pour chaque Δt.

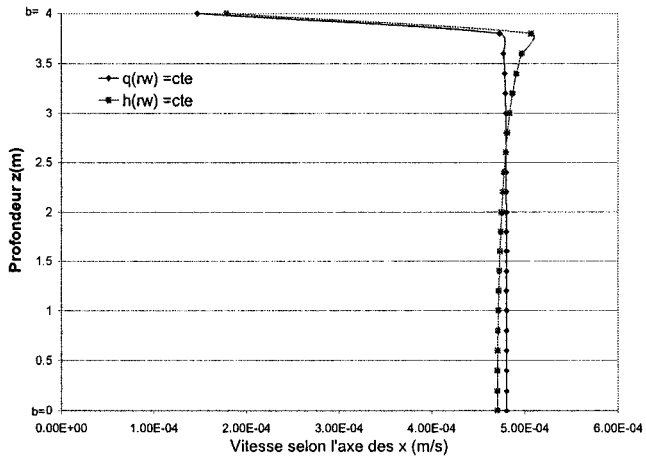


Figure 3.3 : État des vitesses de bas (b=0m) en haut (b=4m) de l'aquifère à nappe semi-captive, selon $h(r_w)$=cte et selon $q(r_w)$=cte pour le cas Nx80Nz20Fx20.

Pour mieux comprendre l'interaction entre vitesse et charge voici l'équation de Darcy :

$$v = -K\left(\Delta h / \Delta L\right) \tag{3.4}$$

Où

v = vecteur vitesse de Darcy (m/s);

K= tenseur de conductivité hydraulique dans l'aquifère à nappe semi-captive (m/s);

Δh = perte de charge hydraulique (m);

ΔL = distance parcourue par l'écoulement (m);

$\Delta h/\Delta L$ = gradient hydraulique *i*.

Si l'on étudie l'écoulement par rapport à l'équation 3.4, on peut en déduire les observations suivantes. Sachant que dans nos modèles K est constant en tout temps peu importe la limite choisie, si $h(r_w)$=cte alors le gradient hydraulique *i* varie à chaque nœud du puits puisque la vitesse varie. Donc si *i* varie et que $h(r_w)$=cte, alors ΔL varie. La distance parcourue par l'écoulement (ΔL) possède des composantes en x (y) et en z. La composante verticale parcourue par l'écoulement (ΔL) est plus courte en haut qu'en bas de la crépine qui est présente sur toute l'épaisseur de l'aquifère à nappe semi-captive. Donc, la vitesse diminue vers le bas de l'aquifère (b=0m) car ΔL devient de plus en plus grand (*i* diminue). Si $q(r_w)$=cte alors c'est la charge h qui s'ajuste à chaque ΔL pour garder un gradient hydraulique *i* constant.

Le fait d'imposer un flux constant comme condition limite au puits force le modèle à ajuster la charge hydraulique le long de la crépine et par conséquent, à faire varier le rabattement de bas en haut du puits (figure 3.4). Le rabattement est plus faible en haut de l'aquifère puisque l'aquitard juxtaposé fournit de l'eau principalement à ce secteur de la crépine. Évidemment, le rabattement est constant pour la limite à charge constante car, de par sa définition même, la charge est constante tout au long puits.

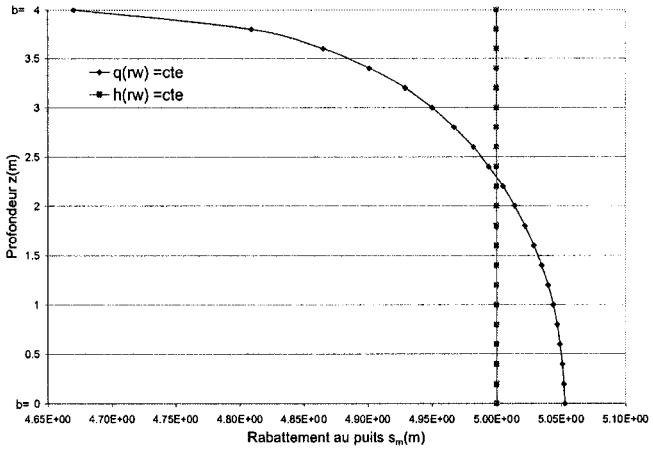


Figure 3.4 : Rabattement de bas (b=0m) en haut (b=4m) de l'aquifère à nappe semi-captive, selon $h(r_w)$=cte et selon $q(r_w)$=cte pour le cas Nx80Nz20Fx20.

CHAPITRE IV

COMPARAISONS ENTRE LES RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET LES RÉSULTATS THÉORIQUES EN RÉGIME PERMANENT

4.1 INTRODUCTION

Les paramètres en régime d'écoulement permanent sont, par définition, indépendants du temps. Numériquement, il existe deux catégories de paramètres : géométriques et hydrauliques. Les épaisseurs de l'aquifère b et de l'aquitard b', le rayon du puits r_w, et le rayon du modèle numérique R constituent la liste des paramètres géométriques qui orientent les performances d'une nappe semi-captive. Les paramètres hydrauliques tels que les conductivités hydrauliques de l'aquifère K et de l'aquitard K' ainsi que le débit au puits Q sont d'autres facteurs qui régissent l'écoulement dans ce type de nappe. Le but de ce chapitre est donc de comparer les calculs numériques effectués avec Seep/w et les prédictions théoriques en effectuant, d'une fois à l'autre, des changements paramétriques.

4.2 LES CRITÈRES LIMITATIFS

Deux critères limitatifs ont été identifiés parmi les conditions d'applications des différentes théories. Le premier est donné dans la méthode de DeGlee (1951) et le deuxième dans l'article de Hantush (1967).

1. **L > 3b**
2. **K/K' ≥ 100 * b/b'**

où

L = $\sqrt{Kbb'/K'}$ = facteur de drainance.

Il est possible de simplifier le critère 1 en l'exprimant en fonction du rapport des conductivités hydraulique K/K'.

$$\sqrt{Kbb'/K'} > 3b$$

$$\frac{Kbb'}{K'} > 9b^2$$

$$\frac{K}{K'} > 9\frac{b}{b'}$$

Donc, les critères de DeGlee et de Hantush peuvent se vérifier en un seul critère principal.

$$\frac{K/K'}{b/b'} \text{ doit être supérieur à } \begin{cases} 9 & \text{(DeGlee)} \\ 100 & \text{(DeGlee + Hantush)} \end{cases} \tag{4.1}$$

Il est très important de noter que, pour un même rapport K/K', les critères peuvent être respectés par plusieurs combinaisons d'épaisseurs b et b', pourvu que le rapport b/b' demeure constant.

Dans ce chapitre, vingt-cinq cas (tableau 4.1) ont été soumis à une étude paramétrique par simulation numérique afin de vérifier la pertinence des deux critères limitatifs ainsi que l'interaction des paramètres géométriques et hydrauliques entre eux. L'étude se divise en cinq parties. Dans chaque partie, les simulations numériques ont été faites avec un rapport K/K' constant et des épaisseurs b et b' variables. Mais avant tout, les caractéristiques communes aux cinq parties sont groupées dans une section intitulée caractéristiques générales. Finalement, l'étude se termine par une conclusion suivie de plusieurs annexes, nécessaires à la bonne compréhension du texte.

*Tableau 4.1 : Liste des cas à l'étude dans le chapitre IV avec R=1000m, r_w=0.1m, s_m=5m et K=1*10^{-4}m/s.*

Cas	b (m)	b' (m)	K' (m/s)	Cas	b (m)	b' (m)	K' (m/s)
1	1	16	$5*10^{-5}$	**14**	8	2	$1*10^{-6}$
2	2	8	$5*10^{-5}$	**15**	16	1	$1*10^{-6}$
3	4	4	$5*10^{-5}$	**16**	1	16	$1*10^{-7}$
4	8	2	$5*10^{-5}$	**17**	2	8	$1*10^{-7}$
5	16	1	$5*10^{-5}$	**18**	4	4	$1*10^{-7}$
6	1	16	$1*10^{-5}$	**19**	8	2	$1*10^{-7}$
7	2	8	$1*10^{-5}$	**20**	16	1	$1*10^{-7}$
8	4	4	$1*10^{-5}$	**21**	1	16	$1*10^{-8}$
9	8	2	$1*10^{-5}$	**22**	2	8	$1*10^{-8}$
10	16	1	$1*10^{-5}$	**23**	4	4	$1*10^{-8}$
11	1	16	$1*10^{-6}$	**24**	8	2	$1*10^{-8}$
12	2	8	$1*10^{-6}$	**25**	16	1	$1*10^{-8}$
13	4	4	$1*10^{-6}$				

4.3 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

4.3.1 Ordres de grandeur

Vu que l'on suppose que le flux est vertical dans l'aquitard et horizontal dans l'aquifère, il faut garder un rapport K/K'≥ 100 pour avoir moins de 5% de différence par rapport aux valeurs théoriques selon Neuman et Witherspoon (1969a). Toutefois, une étude sur des cas ne respectant pas ce rapport (K/K'< 100) a été effectuée afin de vérifier le domaine de validité de cette supposition ainsi que le comportement des

vérifier le domaine de validité de cette supposition ainsi que le comportement des critères limitatifs. Donc, les rapports choisis sont K/K'= 2, 10, 100, 1000 et 10 000. Les épaisseurs b et b' peuvent varier raisonnablement de 1m à 50m mais celles choisies correspondent aux facteurs du nombre 16 soit b=b'= 1, 2, 4, 8 et 16m. Le nombre 16 a été sélectionné parce que ses facteurs sont nombreux et parce qu'on retrouve la racine du nombre 16 dans la liste de facteurs. Il est inutile de vérifier numériquement des cas où les épaisseurs b et b' sont élevées (b*b'> 16) avec un rapport de K/K'= 100 000 puisque, selon l'équation 2.6, le r_o (projection de la droite du graphique s vs log r jusqu'à ce qu'elle intercepte l'axe des abscisses soit s=0m) donne une valeur dépassant généreusement (+ de 265m) le rayon du modèle R égale à 1000m. De façon réaliste, le rayon d'action r_o peut atteindre au maximum 1000m.

4.3.2 Valeurs d'entrée communes

Le K est constant avec une valeur de $1*10^{-4}$m/s. Le rayon au puits est r_w=0.1m et le rabattement au puits pompé s_m est constant à 5m. La charge h est supposée constante au sommet de l'aquitard à 50m et celle dans le puits h_w est de 45m. Le rayon R du modèle est constant à 1000m et le nombre d'éléments servant à la construction des grilles aussi.

Selon l'axe des x

- De 0.1m à 3m : 19 éléments avec un ratio de 4;
- De 3m à 40m : 50 éléments avec un ratio de 5;
- De 40m à 200m : 50 éléments avec un ratio de 4;
- De 200m à 1000m : 50 éléments avec un ratio de 5.

Selon l'axe des z

- 3 éléments / m.

Pour chacun des cinq groupes où K/K'=cte, cinq grilles numériques ont été construites. Chacune des grilles correspond aux différents facteurs de 16 et qui représentent les différentes épaisseurs b et b' de l'aquifère et de l'aquitard.

1. b=1m, b'=16m;
2. b=2m, b'=8m;
3. b=b'=4m;
4. b=8m, b'=16m;
5. b=16m, b'=1m.

Les grilles ont entre 4 250 et 8 840 nœuds ce qui est acceptable pour une étude en régime transitoire.

4.3.3 Longueur de la "flux section" servant à mesurer le débit vertical Q_v.

Avec la version 4 de Seep/w, il faut tracer une "flux section" horizontale jusqu'à ce que le rabattement ne se fasse plus sentir (s=0m) pour obtenir un débit vertical Q_v équivalent au débit théorique.

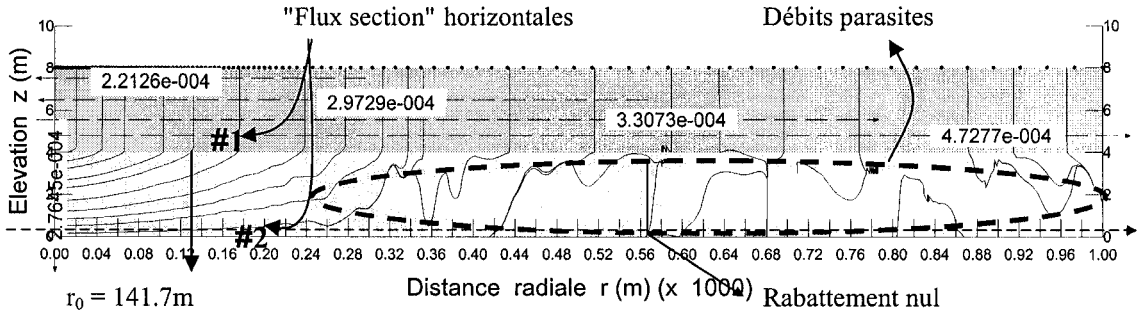


Figure 4.1 : Quatre débits verticaux calculées par les "flux section" horizontales et un débit horizontal calculé par la "flux section" verticale avec les lignes d'écoulement associées au cas 18.

Ce problème est numérique. Il provient du fait que la version 4 de Seep/w travaille en simple précision. La version 5 (voir chapitre VII) travaille en double précision et il n'y a aucune relation entre la longueur de la "flux section" et le débit vertical tel que montrée par les figures 4.1 à 4.5. Toutefois, les études ayant été faites avec Seep/w 4, une solution a été trouvée afin d'obtenir des valeurs de débit vertical calibrées.

Numériquement, il faut que la valeur de débit calculé par la "flux section" horizontale soit équivalente à celle calculée par la "flux section" verticale pour justifier un rabattement nul. Dans tous les cas, la distance associée à un rabattement nul a été déterminé avec Seep/w-contour à l'aide des valeurs de s vs log x. Lorsque s=0, alors la valeur correspondante de x était relevée (annexe 2) et le calcul refait avec une nouvelle "flux section" horizontale ayant une longueur x ainsi déterminée. Les prochaines figures illustres bien la variation des valeurs du Q_v par rapport à la longueur de la "flux section" horizontale. Les figures 4.4 et 4.5 montrent bien que la "flux section" horizontale calcule un Q_v équivalent au Q_v théorique lorsque la longueur de la "flux section" est similaire à la distance associée à un s=0m (s=0m à environ 116m pour K/K'=10, s=0m à environ 568m pour K/K'=1000). On voit aussi que le Q_v mesuré sur toute la longueur du modèle numérique est de 1.5 fois (cas 18) à 4 fois (cas 6) plus grand que le débit théorique. Les "flux section" mesurent les débits parasites à grande distance et ces débits parasites influencent fortement le Q_v par l'importante surface qu'ils occupent; c'est-à-dire un grand rayon (équation 2.2).

Les figures 4.1 et 4.2 affichent clairement que dans l'aquitard, il y a la présence de débits parasites au-delà de la distance (longueur de la "flux section") associé au rabattement nul. Dans le même ordre d'idée, les figures 4.1 et 4.3 montrent clairement la présence de débits parasites dans l'aquifère mais au-delà du rayon d'action $\mathbf{r_0}$ du puits.

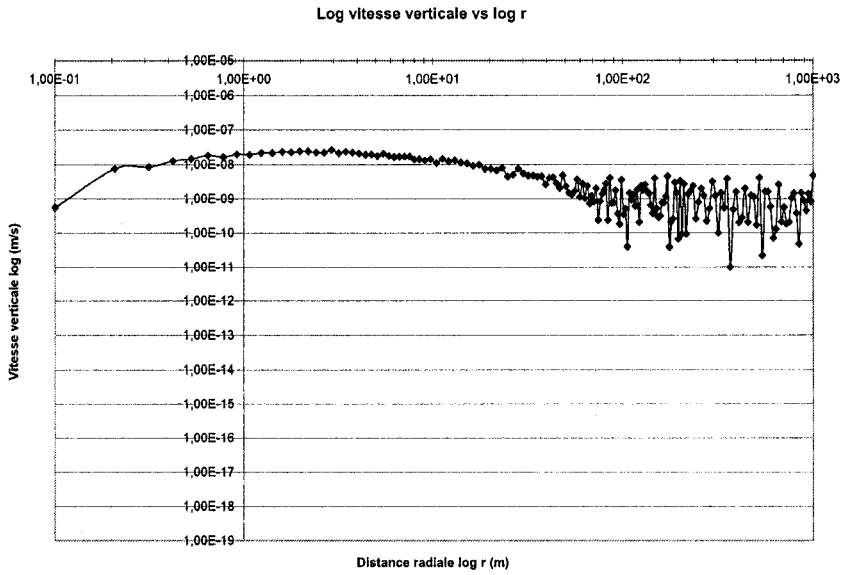


Figure 4.2 : Vitesse verticale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #1 de la figure 4.1 (dans l'aquitard) avec un r_0=141.7m et un s=0m à 568m.

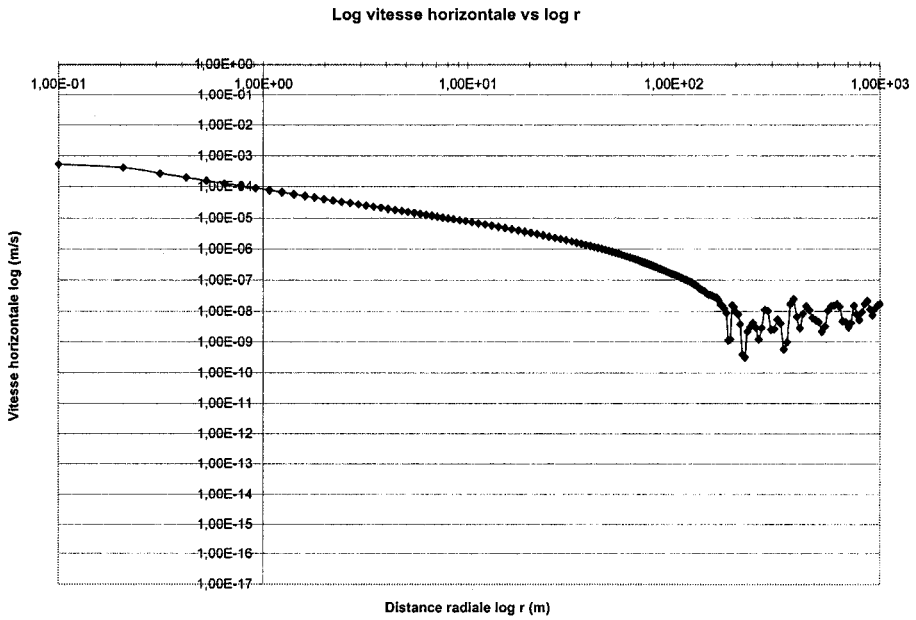


Figure 4.3 : Vitesse horizontale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #2 de la figure 4.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un s=0m à 568m.

Dans les chapitres IV et V, les résultats numériques ont été calculés avec la version 4 de Seep/w et seul ceux obtenus à des distances $r<r_o$ ont été analysés.

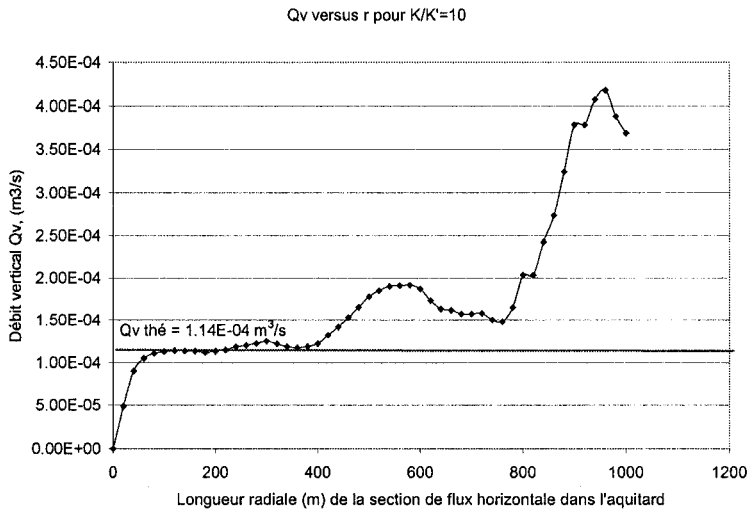


Figure 4.4 : Variation du débit vertical Q_v dans l'aquitard en fonction de la longueur radiale de la "flux section" horizontale pour le cas 6 où s=0m (environ 116m).

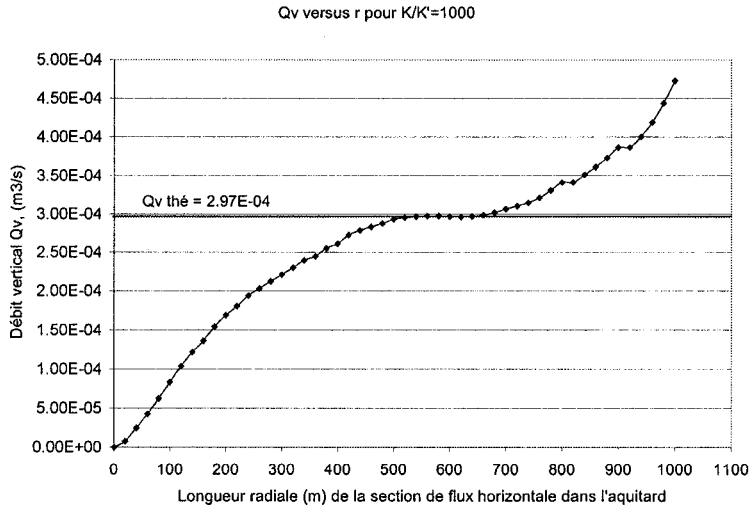


Figure 4.5 : Variation du débit vertical Q_v dans l'aquitard en fonction de la longueur radiale de la "flux section" horizontale pour le cas 18 où s=0m (environ 568m).

4.3.4 Lecture des rabattements

Avec les résultats d'une simulation numérique, il est possible de calculer les rabattements à chaque nœud de la grille. Toutefois, les résultats ne sont pas les mêmes si les rabattements sont calculés dans le haut de l'aquifère (s_h), dans le centre de l'aquifère (s_c) ou dans le bas de l'aquifère (s_b). Les résultats sont aussi influencés par la nature de la couche sous-jacente à l'aquifère. Cette couche peut-être soit imperméable, soit semi-perméable (aquitard). Pour cette étude, seul le cas d'une couche sous-jacente imperméable a été pris en compte.

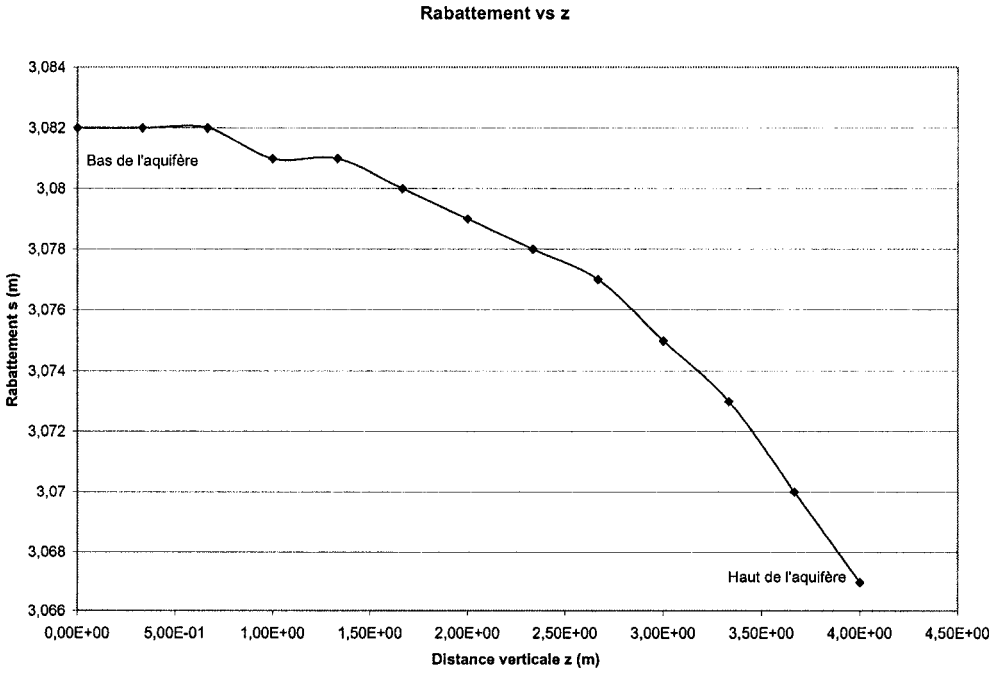


Figure 4.6 : À r=1m, rabattement dans l'aquifère selon z.

Tableau 4.2 : Valeurs de rabattement dans l'aquifère prises en haut, au centre et en bas de celui-ci à r=1m pour le cas 13.

Cas à l'étude	Mesures prises à r=1m		
	s_h (z=3.7m)	s_c (z=2m)	s_b (z=0.3m)
Cas 13 K/K'=100; b=b'=4m	3.070m	3.079m	3.082m

Dans l'exemple présenté au tableau 4.2, il y a une différence de rabattement à r=1m de 1.1 cm entre les calculs faits en haut et en bas de l'aquifère. Donc, il est préférable de toujours prendre les valeurs de rabattement au même endroit afin de limiter les erreurs de comparaison entre chaque cas. Le meilleur endroit pour prendre cette mesure est le bas de l'aquifère car il n'est pas influencé par l'apport d'eau de l'aquitard. Dans la même logique, il faudrait donc prendre les valeurs de rabattement au centre de l'aquifère si la couche sous-jacente de l'aquifère était semi-perméable.

4.3.5 Calcul du rayon d'action r_0 numérique

Tous les rayons d'action numériques ont été calculés de la même façon. Dans le logiciel Excel, les valeurs de rabattement calculées avec Seep/w sont présentées sous la forme d'un graphique s vs log r. En utilisant la fonction 'courbe tendance' de Excel, il est possible d'obtenir une équation pour la partie rectiligne de la courbe de rabattement

pour des valeurs r de [0.161, 5.15]. Il est donc facile d'obtenir la valeur de r_o en posant dans l'équation y=0.

4.3.6 Calcul du débit théorique

Le calcul du débit théorique se fait avec l'équation 3.1.

Par exemple, le débit théorique du cas b=b'=4m avec K/K'=100 serait :

$$Q_{the} = \frac{1*10^{-4} m^2 / s * 4m * 5m}{\ln\left(1.12 * 40m / 0.1m\right)} = 3.28*10^{-4} m^3 / s$$

Tous les cas à l'étude respectent la condition d'application r/L<0.05.

4.3.7 Courbe de rabattement théorique

Les courbes de rabattement théoriques sont tracées avec l'équation 2.1 à l'aide des valeurs de débit horizontal et des valeurs de $K_o(x)$ présentes dans les tables de DeGlee (1951).

4.3.8 Comment et pourquoi calculer un rabattement analytique

Le rabattement analytique se calcule à l'aide d'une équation décrivant $K_0(x)$.

$$K_0(x) = -\left\{\ln\left(\frac{x}{2}\right) + \gamma\right\} I_0(x) + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 * 4^2}\left(1 + \frac{1}{2}\right) + \frac{x^6}{2^2 * 4^2 * 6^2}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) + \ldots \qquad (4.1)$$

où

$$I_0(x) = 1 + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 * 4^2} + \frac{x^6}{2^2 * 4^2 * 6^2} + \ldots$$

La valeur de ce $K_0(x)$ est ensuite intégrée dans l'équation 2.1. L'avantage d'utiliser l'équation analytique est que l'on peut calculer le rabattement à n'importe quelle distance radiale x. Les valeurs déjà établies dans les tables de DeGlee (1951) correspondent sans doute à une approximation de l'équation 4.1 (annexe 3). Cependant, les tables de DeGlee permettent seulement de calculer le rabattement à des distances radiales x déjà établies. Le fait d'obtenir les valeurs de rabattement à n'importe quelle distance est nécessaire lorsque l'on veut tracer les différences de rabattement entre les courbes calculées numériquement et celles prédites théoriquement. Ici, l'équation s'arrête au 12ème degré car ce degré est suffisant pour faire représenter correctement les tables de DeGlee (1951) jusqu'à une distance de 30m à partir du puits.

4.4 CAS K/K' = 2

4.4.1 Introduction

Cette section traite des cas 1 à 5 qui sont caractérisés par des épaisseurs b et b' de 1, 2, 4, 8 et 16m. Selon l'équation 2.3, le facteur de drainance correspondant à cette section est L=5.66m.

4.4.2 Comparaisons entre le r_o numérique et le r_o théorique

L'augmentation du r_o numérique est directement proportionnelle à l'augmentation de l'épaisseur b de l'aquifère (annexe 2, section 1). Le r_o numérique se rapproche du r_o théorique lorsque b=2m, b'=8m (cas 2) avec -6.3% de différence entre les deux. Le pourcentage de différence entre numérique et théorique atteint son maximum lorsque b=16m, b'=1m (cas 5) avec 179.4%. Il est possible que les r_o numérique et théorique soient identiques mais que les courbes de rabattement ne soient pas superposées (figure 4.7). On ne peut pas se fier qu'aux valeurs de r_o pour affirmer qu'il existe une bonne concordance entre numérique et théorique, il faut aussi comparer les courbes de rabattement entre elles.

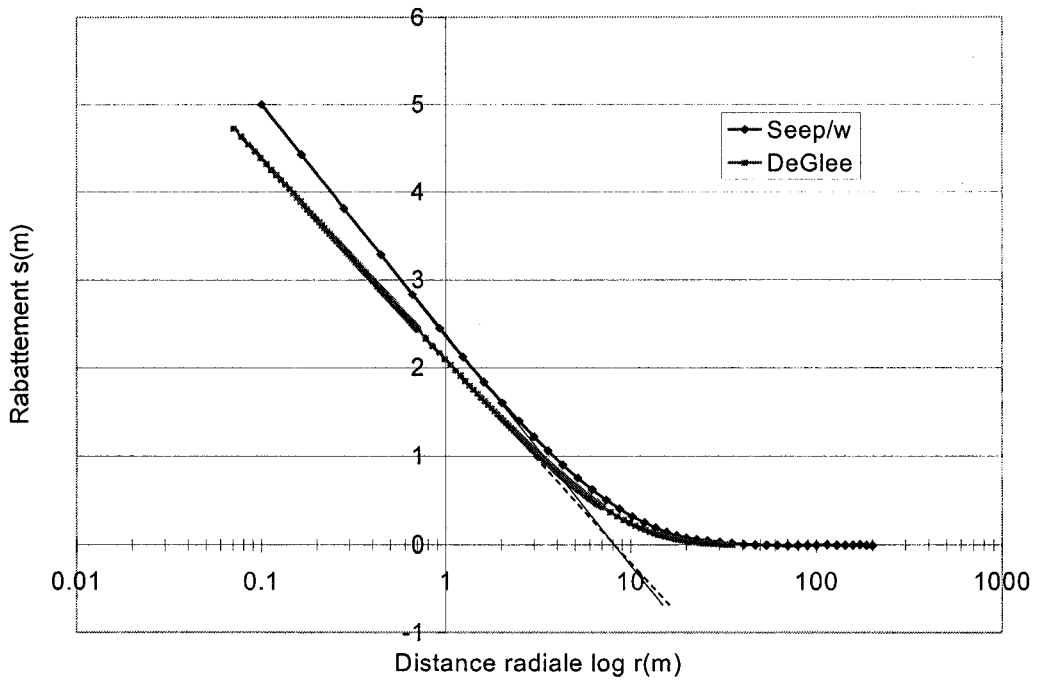


Figure 4.7 : Différence entre deux courbes de rabattement ayant le même r_o.

4.4.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique

Le cas 2 (b=2, b'=8) et le cas 3 (b=b'=4) sont ceux qui présentent le plus petit écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique (annexe 4) avec -0.08m et 0.13m respectivement. Pour le cas 1 (b=1, b'=16) et le cas 5 (b=16, b'=1), il y a une nette différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique avec -0.37m et 0.65m respectivement. Pour sa part, le cas 4 (b=8, b'=2) représente une moyenne entre les deux extrêmes avec 0.35m d'écart.

4.4.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes

Pour deux cas ayant les mêmes facteurs comme par exemple b=2m, b'=8m (cas 2) et b=8m, b'=2m (cas 4), l'écart entre les courbes de rabattements numérique et théorique (annexe 4) est plus petit lorsque le rapport b/b' est inférieur à 1. Selon l'exemple, le cas 2 a un écart de 0.08m et un rapport b/b'= 0.25 et la cas 4 a un écart de 0.35m et un rapport de 4. Donc, les courbes sont plus concordantes lorsque l'aquitard est plus épais que l'aquifère. En général, plus le rapport b/b' est près de 1 et plus l'écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique est petit.

4.4.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la condition de Neuman et Witherspoon (1969a)

Les cas 1 à 5 ne respectent pas la condition restrictive de Neuman et Witherspoon (1969a) car K/K' < 100. Donc, le débit et le r_o seraient susceptibles d'avoir plus de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques. Pour le débit, seuls les cas 1, 2 et 5 ont des pourcentages de différences importants par rapport au débit horizontal théorique avec 24%, 10.4% et 10.4% respectivement (annexe 2, section 1). Les cas 3 et 4 ne respectent pas la condition restrictive de Neuman et Witherspoon (1969a) et pourtant ils ont moins de 5% de différence par rapport au débit horizontal théorique avec 2.1% et -3.5% respectivement. Pour le r_o, tous les cas ont plus de 5% de

différence d'avec la valeur théorique. Donc, il est possible d'utiliser l'équation de rabattement en nappe semi-captive pour un K/K'=2 en considérant que l'on risque d'avoir des différences de l'ordre de 24% sur le débit horizontal pour un rapport b/b'=0.0625 et des différences pouvant aller jusqu'à 179.4% pour un r_0 ayant un rapport b/b'=16.

Lorsque le rapport b/b' se rapproche de 1, la différence sur le débit horizontal tourne autour de 2.1% et la différence sur le r_0 se situe vers les 27%. Seul le cas 1 (b=1, b'=16) répond au critère de DeGlee et c'est le cas qui a le plus grand pourcentage de différence sur les débits horizontaux et verticaux (24.0% et 33.9%). Aucun cas ne répond au critère de Hantush. Donc, les critères de DeGlee et de Hantush servent de guide en ce qui concerne l'ensemble des résultats. En général, lorsque K/K'=2, les différentes comparaisons entre numérique et théorique sont généralement médiocres et les critères les rejettent (sauf pour le cas 1).

4.5 CAS K/K' = 10

4.5.1 Introduction

Les cas 6 à 10 (K/K'=10) sont résumés dans la section 2 de l'annexe 2. Ils ont les mêmes épaisseurs que les cas 1 à 5 de la section précédente afin d'avoir une base de

comparaison entre les rapports K/K'. Le facteur de drainance correspondant à cette section est L=12.65m selon l'équation 2.3.

4.5.2 Comparaisons entre le r_0 numérique et le r_0 théorique

L'augmentation du r_0 numérique est directement proportionnelle à l'augmentation de l'épaisseur b de l'aquifère (annexe 2, section 2). Le r_0 numérique se rapproche du r_0 théorique lorsque b=2m, b'=8m (cas 7) avec +3.5% de différence entre les deux. Le pourcentage de différence entre numérique et théorique atteint son maximum lorsque b=16m, b'=1m (cas 10) avec 60.7%.

4.5.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique

Le cas 7 (b=2, b'=8) et le cas 8 (b=b'=4) sont ceux qui présentent le plus petit écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique (annexe 5) avec -0.04m et 0.03m respectivement. Pour le cas 6 (b=1, b'=16) et le cas 10 (b=16, b'=1), il y a une nette différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique avec -0.17m et 0.27m respectivement. Pour sa part, le cas 9 (b=8, b'=2) représente une moyenne entre les deux extrêmes avec 0.11m d'écart.

4.5.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes

Pour deux cas ayant les mêmes facteurs comme par exemple b=2m, b'=8m (cas 7) et b=8m, b'=2m (cas 9), l'écart entre les courbes de rabattements numérique et théorique (annexe 5) est plus petit lorsque le rapport b/b' est inférieur à 1. Selon l'exemple, le cas 7 a un écart de 0.04m et un rapport b/b'= 0.25 et le cas 9 a un écart de 0.11m et un rapport de 4. Donc, il y a une meilleure comparaison entre les courbes lorsque l'aquitard est plus épais que l'aquifère. En général, plus le rapport b/b' est près de 1 et plus l'écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique est petit.

4.5.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la condition de Neuman et Witherspoon (1969a)

Les cas 6 à 10 ne respectent pas la condition restrictive de Neuman et Witherspoon (1969a) car K/K' < 100. Donc, le débit et le r_o seraient susceptibles d'avoir plus de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques. Pour le débit, seul le cas 6 a une différence supérieure à 5% avec 9.9% de différence par rapport au débit horizontal théorique (annexe 2, section 2). Les autres cas varient de -0.5% à 4.0% de différence par rapport au débit horizontal théorique. Pour le r_o, tous les cas sauf le cas 7 avec 3.5% ont plus de 5% de différence d'avec la valeur

théorique. Donc, il est possible d'utiliser l'équation de rabattement en nappe semi-captive pour un K/K'=10 en considérant que l'on risque d'avoir des différences de l'ordre de 10% sur le débit horizontal pour un rapport b/b'=0.0625 et des différences pouvant aller jusqu'à 60% sur le r_o quand le rapport b/b'=16.

Lorsque le rapport b/b' se rapproche de 1, la différence sur le débit horizontal tourne autour de 1% et la différence sur le r_0 se situe vers les 12%. Ensuite, le seul cas (cas 6) qui répond positivement aux critères de DeGlee et de Hantush est celui qui a le plus grand écart (10%) entre les valeurs de débit numérique et théorique. Deux autres cas, le 7 et le 8, répondent positivement au critère de DeGlee et négativement au critère de Hantush et donnent des résultats numériques près de la théorie. Donc, les critères de DeGlee et de Hantush ne sont pas suffisants pour valider une bonne comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique.

4.6 CAS K/K' = 100

4.6.1 Introduction

Les cas 11 à 15 (K/K'=100) sont présentés dans la section 3 de l'annexe 2. Les cas étudiés ont les mêmes épaisseurs que ceux des sections précédentes afin d'avoir une

base de comparaison entre les rapports de K/K'. Selon l'équation 2.3, le facteur de drainance correspondant à cette section est L=40m.

4.6.2 Comparaisons entre le r_0 numérique et le r_0 théorique

L'augmentation du r_0 numérique est directement proportionnelle à l'augmentation de l'épaisseur b de l'aquifère (annexe 2, section 3). Le r_0 numérique se rapproche du r_0 théorique lorsque b=2m, b'=8m (cas 12) avec +1.1% de différence entre les deux. Le pourcentage de différence entre numérique et théorique atteint son maximum lorsque b=16m, b'=1m (cas 15) avec +11.8%.

4.6.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique

Les comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique obtenues à l'aide de ce rapport K/K' sont excellentes (annexe 6). Le cas 12 (b=2, b'=8) et le cas 13 (b=b'=4) sont ceux qui présentent le plus petit écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique (annexe 6) avec -0.003m et 0.006m respectivement. Pour le cas 11 (b=1, b'=16) et le cas 15 (b=16, b'=1), il y a une plus grande différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique avec -0.023m et 0.050m respectivement. Pour sa part, le cas 14 (b=8, b'=2) représente une moyenne entre les deux extrêmes avec 0.020m d'écart.

4.6.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes

Pour deux cas ayant les mêmes facteurs comme par exemple b=2m, b'=8m (cas 12) et b=8m, b'=2m (cas 14), l'écart entre les courbes de rabattements numérique et théorique (annexe 6) est semblable. Selon l'exemple, le cas 12 a un écart de -0.023m et un rapport b/b'= 0.25 et le cas 14 a un écart de 0.020m et un rapport de 4. Donc, la comparaison entre les courbes est équivalente peu importe l'épaisseur des couches. En général, plus le rapport b/b' est près de 1 et plus l'écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique est petit.

4.6.5 Critique des critères de DeGlee et de Hantush et de la condition de Neuman et Witherspoon (1969a)

Les cas 11 à 15 respectent la condition restrictive de Neuman et Witherspoon (1969a) car K/K' = 100. Donc, le débit et le r_o devraient avoir moins de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques. Autant pour le débit horizontal que pour le débit vertical, tous les cas ont moins de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques (annexe 2, section 3). Pour le r_o, seuls les cas 11, 12 et 13 ont moins de 5% de différence. La condition de Neuman et

Witherspoon (1969a) est en concordance avec le respect du critère de Hantush et du critère de DeGlee (sauf le cas 14).

4.7 CAS K/K' = 1000

4.7.1 Introduction

Les cas 16 à 20 (K/K'=1000) sont présentés dans la section 4 de l'annexe 2. Les cas étudiés ont les mêmes épaisseurs que dans les parties précédentes afin d'avoir une base de comparaison entre les rapports de K/K'. Selon l'équation 2.3, le facteur de drainance correspondant à cette section est L=126.5m.

4.7.2 Comparaisons entre le r_o numérique et le r_o théorique

Contrairement aux cas précédents, l'augmentation du r_o numérique est inversement proportionnelle à l'épaisseur b de l'aquifère (annexe 2, section 4). Le r_o se rapproche du r_o théorique lorsque b=8m, b'=2m (cas 19) avec +0.6% entre les deux. Le pourcentage de différence entre numérique et théorique atteint son maximum lorsque b=1m, b'=16m (cas 16) avec +4.5%.

4.7.3 Comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique

Les comparaisons entre les courbes de rabattement numérique et théorique obtenues à l'aide de ce rapport K/K' sont excellentes (annexe 7). Le cas 18 (b=b'=4m) a un écart de seulement -0.003m entre les courbes de rabattement, numérique et théorique. Ensuite, il y a le cas 19 (b=8, b'=2) et le cas 17 (b=2, b'=8) avec -0.008m et -0.018m d'écart respectivement. Le cas 20 (b=16, b'=1) et le cas 16 (b=1, b'=16) sont ceux qui ont le plus grand écart des cinq cas avec -0.019m et -0.027m respectivement.

4.7.4 Relation entre l'épaisseur des couches et la concordance entre les courbes

L'écart entre les courbes de rabattements numérique et théorique (annexe 7) est plus un peu plus petit lorsque le rapport b/b' est supérieur à 1 et ce, pour deux cas ayant les mêmes facteurs comme par exemple b=2m, b'=8m (cas 17) et b=8m, b'=2m (cas 19). Selon l'exemple, le cas 17 a un écart de -0.018m et un rapport b/b'= 0.25 et le cas 19 a un écart de -0.008m et un rapport de 4. Donc, la comparaison entre les courbes est meilleure de 10cm lorsque l'aquifère est plus épais que l'aquitard. En général, plus le rapport b/b' est près de 1 et plus l'écart entre les courbes de rabattement numérique et théorique est petit.

4.7.5 Critique des critères de DeGlee et Hantush et de la condition de Neuman et Witherspoon (1969a)

Les cas 16 à 20 respectent la condition de Neuman et Witherspoon (1969a) car K/K'> 100. Donc, le débit et le r_o devraient avoir moins de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques. Pour tous les cas, le débit horizontal a moins de 1% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques. Cependant, le débit vertical a plus de 5% de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques sauf pour le cas 16. Pour le r_o, tous les cas ont moins de 5% de différence entre numérique et théorique.

Tous les cas, sauf le 20, répondent positivement aux deux critères limitatifs de DeGlee et de Hantush. Donc, le critère de DeGlee et de Hantush sont concordant avec la condition de Neuman et Witherspoon (1969a) sauf pour le cas 20 (Hantush seulement).

4.8 CAS K/K' = 10 000

Les modèles numériques 21 à 25 ne sont pas fiables car les rapports f_v/f_h sont loin de 1 et le pourcentage de différence entre le débit numérique et le débit théorique est élevé (annexe 2, section 5). Le problème est probablement de source numérique car la

version 4 du logiciel Seep/w ne travaille qu'avec six chiffres significatifs. Cette limitation ne permet pas de traiter correctement un ratio K/K'=10 000. Les résultats de cette section ne sont pas inclus dans les analyses des critères.

4.9 DISCUSSION

4.9.1 Influence du rapport des épaisseurs b/b'

La concordance entre les courbes numérique et théorique est meilleure lorsque le rapport b/b' est près de 1. Les meilleurs résultats numériques ont été obtenus avec un rapport de K/K' = 1000 pour le cas 18 (b=b'=4m) et avec un rapport K/K'= 100 pour le cas 12 (b=2, b'=8).

4.9.2 Interaction entre les critères de DeGlee/Hantush avec celui de Neuman et Witerspoon

Pour le débit horizontal Q_h (figure 4.8), les cas qui respectent les deux critères de DeGlee et de Hantush ont une différence de moins de 5% entre le Q_h numérique et le Q_h théorique, comme supposée par Neuman et Witherspoon (1969a). Cependant, il existe des cas qui ne respectent pas ces critères et qui ont moins de 5% de différence. Par

exemple, le cas 15 a 0% de différence entre le Q_h numérique et le Q_h théorique et ne respecte aucun des deux critères. Au bout du compte, le critère de DeGlee est plus cohérent avec la condition de Neuman et Witherspoon (1969a) que celui de Hantush car il accepte des cas que Hantush rejettent et qui ont moins de 5% de différence.

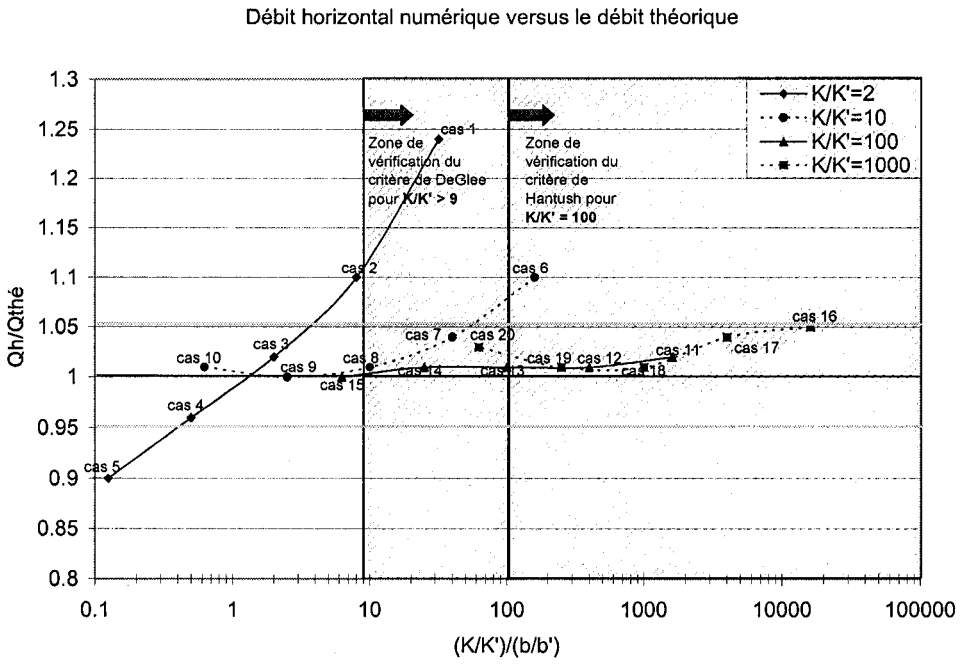


Figure 4.8 : Classification des cas respectant ou non les critères de DeGlee et Hantush pour le Q_h.

Pour le rayon d'action r_o (figure 4.9), le critère de DeGlee respecte à 0.1% près la supposition de Neuman et Witherspoon (1969a). Par contre celui de Hantush n'est pas cohérent avec la condition de Neuman et Witherspoon (1969a) car il ne respecte pas le cas 20 qui a seulement 2.8% de différence entre le r_o numérique et théorique.

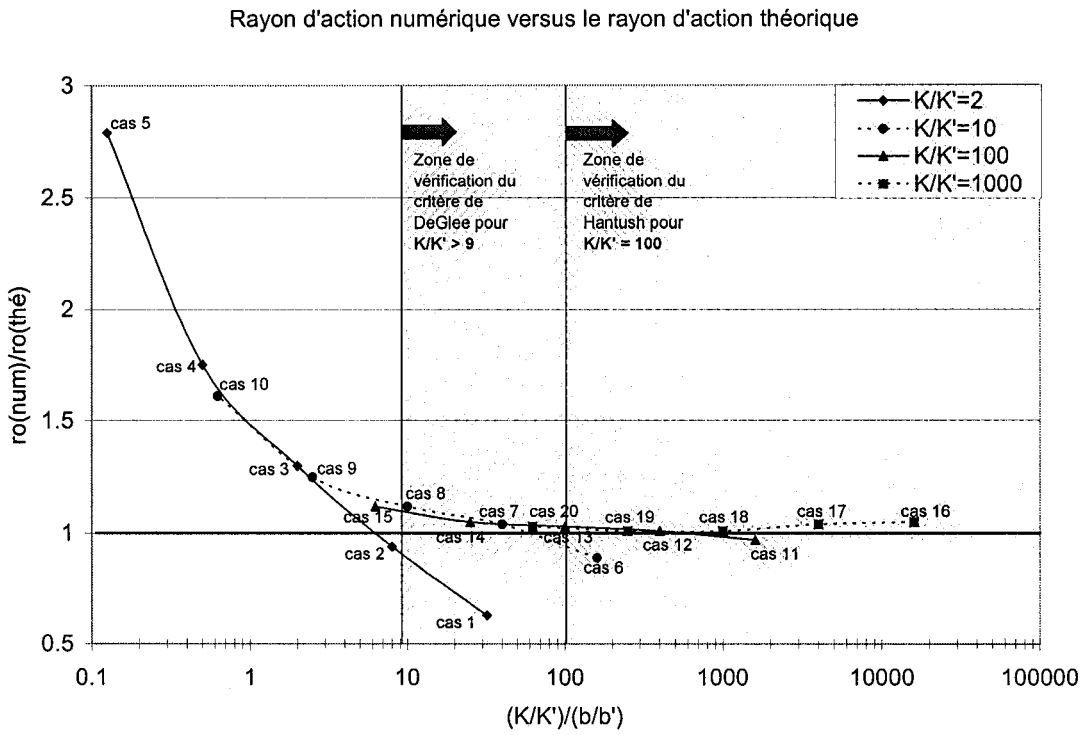


Figure 4.9 : Classification des cas respectant ou non les critères de DeGlee et Hantush pour le r_o.

Donc, les critères de DeGlee et de Hantush combinés avec celui de Neuman et Witherspoon (1969a) s'appliquent bien pour l'évaluation du rayon d'action r_0 et du débit horizontal. Cependant, on rencontre des incohérences entre les deux critères lorsque l'aquifère est plus épais que l'aquitard (b=16, b'=1). Donc, le critère de DeGlee est plus cohérent que celui de Hantush.

4.9.3 Les critères limitatifs

Le critère de DeGlee (1930) qui se définit par L > 3b n'est pas un critère absolu. L'application de ce critère n'est pas implicite à une parfaite conformité avec la réalité. D'autres variables tel que les épaisseurs de l'aquifère et de l'aquitard, ainsi que le rapport de ces épaisseurs ont une influence non négligeable sur les résultats et ces variables ne sont pas considérées lors de l'application de ce critère. Toutefois, l'application de ce critère limite l'écart entre les valeurs théoriques et les valeurs provenant d'un essai de pompage (figures 4.8 et 4.9).

Le critère de Hantush (1967) qui est défini par $K/K' \geq 100*b/b'$ suit le même raisonnement que celui de DeGlee. Plus sévère, ce critère limite encore plus les éventuels écarts entre les valeurs numérique et théorique mais en revanche, il retranche de bons résultats (figures 4.8 et 4.9).

4.9.4 Applications des résultats de cette étude

Il est possible d'utiliser les équations de rabattement pour une nappe semi-captive lorsque K/K' < 100 en gardant à l'esprit que les erreurs risquent d'être plus importantes dépendamment du rapport des épaisseurs b/b'. Pour le cas où K/K=2, il peut y avoir des différences de l'ordre de 24% sur le débit horizontal pour un rapport b/b'= 0.0625 et des différences pouvant aller jusqu'à 179.4% sur le r_0 pour un rapport b/b'= 16. Lorsque le rapport b/b' se rapproche de 1, la différence sur le débit horizontal tourne autour de 2.1% et la différence sur le r_0 se situe vers les 27%. Pour le cas où K/K'=10, il y aura des différences de l'ordre de 10% sur le débit horizontal pour un rapport b/b'= 0.0625 et des différences pouvant aller jusqu'à 60% sur le r_0 pour un rapport b/b'= 16. Lorsque le rapport b/b' se rapproche de 1, la différence sur le débit horizontal tourne autour de 1% et la différence sur le r_0 se situe vers les 12%.

Éventuellement, il serait possible de modéliser les cas où K/K'=1 et y appliquer les équations d'une nappe semi-captive. Ces modèles représenteraient le cas d'un aquifère recouvert d'un lac où le puits ne pénètre que partiellement. Avec ces modélisations, il serait possible d'avoir une idée de la différence entre les modèles et la théorie versus les rapports b/b'.

CHAPITRE V

COMPARAISON ENTRE LES CALCULS NUMÉRIQUES ET LES RÉSULTATS THÉORIQUES EN RÉGIME TRANSITOIRE, CONSIDÉRANT OU PAS LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

5.1 INTRODUCTION

Les équations théoriques développées pour prédire le rabattement en régime transitoire se divisent en deux catégories : une qui tient compte du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard et l'autre pas. Le fait de ne pas tenir compte du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard peut amener des erreurs d'interprétation des caractéristiques hydrauliques et physiques de l'aquifère et de l'aquitard (Neuman and Witherspoon, 1972). Le but de ce chapitre est de vérifier le comportement des simulations numériques de deux catégories d'équation en régime transitoire en comparant ces résultats avec la théorie.

5.2 CRITÈRES LIMITATIFS

Deux critères limitatifs ont été identifiés parmi les conditions d'applications des différentes théories du régime transitoire. Le premier est présent dans la méthode de Hantush (1960) et dans la méthode de Neuman et Witherspoon (1972) tandis que le deuxième critère est seulement présent dans le critère de Neuman et Witherspoon (1972).

1. **t < S'b'/10K'**
2. **ß < 1.0**

où

$$\beta = \frac{r}{4}\sqrt{\frac{K'/b'}{Kb} * \frac{S}{S'}} \qquad \text{(voir équation 2.19)}$$

Le premier critère impose une condition par rapport au temps t tandis que le deuxième critère impose une condition par rapport à la distance r.

5.3 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

5.3.1 Choix du modèle et conditions limites

Dans ce chapitre, un seul modèle d'aquifère à nappe semi-captive a été étudié. Le modèle a été choisi en se basant sur les comparaisons entre les modèles numérique et théorique du régime permanent et sur la possibilité d'obtenir un rapport r/L présent dans les tables de Hantush (1956). Dans les tables de Hantush, le rapport r/L doit être compris entre 0.01 et 9. Le choix du modèle a été limité par la valeur du coefficient de drainance L de l'aquitard. Cette valeur doit être un nombre entier afin de faciliter le choix de la position r du nœud dans la grille numérique. Sachant qu'en régime permanent le modèle b=b'=4m donne de bonnes comparaisons entre les résultats numériques et les prédictions théoriques, et que le cas K/K'=100 a un coefficient de drainance L=40, le **cas 13** (chapitre IV) a été choisi pour effectuer les calculs en régime transitoire. Donc, toutes les caractéristiques liées au maillage numérique du cas 13 ainsi qu'à ses conditions géométriques et hydrauliques sont présentées dans le chapitre IV. Toutefois, la condition limite au puits ne sera pas h=45m car il a été démontré dans la section 3.3 qu'il était préférable d'utiliser un débit unitaire (flux) q au puits constant en régime transitoire, plutôt qu'une charge constante. Pour connaître la valeur de $q(r_w)$ provoquant un rabattement maximum s_m au puits de 5m, il faut tout d'abord connaître la valeur du débit total (annexe 2, section 3) mesurée sur la section de flux verticale que l'on divise ensuite par la surface du puits (équation 2.2).

Pour le **cas 13**,

$$0.002060448\,m^3/s = q(r_w) * 2\pi \times 0.1m \times 4m$$
$$q(r_w) = 0.0008225\,m/s$$

Les valeurs de rabattement numérique ont toutes été calculées pour des nœuds situés à la base de l'aquifère à nappe semi-captive suite aux raisons invoquées dans la section 4.3.4.

5.3.2 Coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère à nappe semi-captive

Les valeurs de transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère introduites dans Seep/w ont été comparées aux valeurs déduites des courbes numériques de rabattement dans le cas d'un aquifère à nappe captive et d'un aquifère à nappe semi-captive afin de vérifier la précision du logiciel.

1. Nappe captive : Le coefficient d'emmagasinement S est défini comme la quantité d'eau qu'un aquifère relâche ou emmagasine par unité de surface d'aquifère d'épaisseur b (volume b m^3), lorsque la charge hydraulique varie d'une unité (Chapuis, 1999). Donc, le S de la nappe captive devrait être égal au S de la nappe semi-captive pour un aquifère ayant les mêmes propriétés géométriques et

hydrauliques. Avec le graphique de s versus log t (Cooper-Jacob, 1946), on peut obtenir :

$$T = 2.3Q/4\pi\Delta s \tag{5.1}$$

$$S = 2.25Tt_0/r^2 \tag{5.2}$$

où

Δs = pente de la partie rectiligne de la courbe de rabattement en fonction du temps pour un cycle log;

t_0 = valeur du temps lorsque le rabattement est nul (extrapolation de la pente linéaire de la courbe).

Afin de vérifier les calculs du logiciel par rapport aux équations de Cooper-Jacob (1946), une courbe de rabattement en fonction du temps pour un aquifère à nappe captive a été calculée à l'aide de Seep/w (figure 5.1) en se référant sur les valeurs d'entrée propres au cas 13. En analysant les résultats du graphique du rabattement en fonction du temps, on obtient les renseignements suivants : $t_0 = 3.7$ s et $\Delta s = 0.9307$m. Sachant que le débit de pompage entré initialement dans Seep/w est $Q = 2.060885*10^{-3}$ m^3/s, alors il est possible de calculer la transmissivité à l'aide de l'équation (5.1) ($T = 4.05308*10^{-4}$ m^2/s). En se basant sur la relation $T = Kb = 4*10^{-4}$ m^2/s, l'écart entre le résultat mesuré graphiquement et les données entrées initialement dans Seep/w est de 1.3%. Connaissant le rayon r=3m, où les mesures du rabattement ont été calculées, et le $t_0 = 3.7$s, associé à

ce rabattement, alors **S = 3.7491*10^{-4}** selon Cooper-Jacob (1946). Les valeurs de teneur en eau versus la pression entrées initialement dans Seep/w sont les mêmes pour un aquifère à nappe captive et un aquifère à nappe semi-captive (tableau 5.1). Donc, la valeur du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère imposée au logiciel est calculée selon l'équation 5.3. En se basant sur cette équation, l'écart entre le résultat mesuré graphiquement et les données entrées initialement dans Seep/w est de 4.4%.

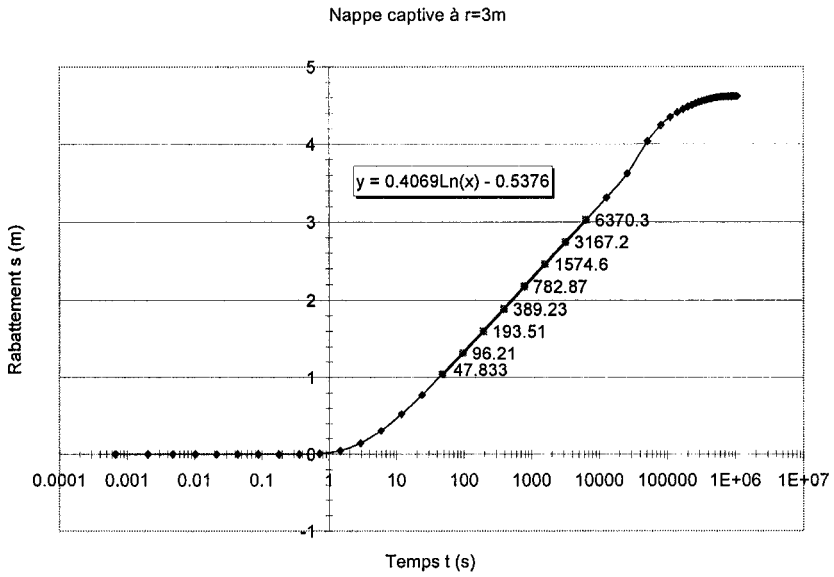


*Figure 5.1 : Rabattement d'un aquifère à nappe captive en fonction du temps calculé avec Seep/w pour un rayon r=3m, S=3.7491*10^{-4}, K=1*10^{-4}m/s, b=4m, h=50 et q=8.225*10^{-4} m/s.*

2. <u>Nappe semi-captive</u> : Le modèle d'aquifère à nappe semi-captive a été calqué sur le cas 13 en y ajoutant un coefficient d'emmagasinement S. Pour imposer un S dans Seep/w, il faut définir une fonction de teneur en eau dans la section KeyIn-

Fonctions-Vol.Water.Content. Dans notre cas, cette fonction se décrit en trois points.

Tableau 5.1 : Description de la fonction #1 de teneur en eau volumique provenant de la banque de données de Seep/w pour un sable uniforme ayant un $K_s=1*10^{-4}$ m/s.

#	Pression (kPa)	Teneur en eau volumique
1)	0	0.3470
2)	10	0.3471
3)	20	0.3472

À partir de cette fonction de teneur en eau, il est possible d'en tirer le coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère à l'aide de cette équation.

$$S = b\gamma_w \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{u_2 - u_1} \right) \tag{5.3}$$

Où

γ_w = poids volumique de l'eau (=ρg) en N/m^3,

θ = teneur en eau volumique,

u = pression en Pa.

Dans Seep/w, g=9.807 ms^{-2}, d'où un poids volumique de l'eau de 9807 N/m^3. En utilisant les points 1 et 3 pour faire le calcul, on obtient un **S = 3.9228*10^{-4}**.

En ce qui concerne l'aquitard, la valeur de la fonction de teneur en eau doit être constante peu importe la pression (u>0) lorsque le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard est négligé. Si le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard n'est pas négligé alors le calcul de S' se fera comme dans le cas de l'aquifère à nappe semi-captive (voir section 5.4.1).

Finalement, les coefficients d'emmagasinement calculés pour la nappe captive et la nappe semi-captive sont pratiquement identiques et réalistes.

5.3.3 Les paramètres numériques

Lors des simulations numériques, des paramètres spécifiques de convergence ont été utilisés afin de mieux définir les résultats numériques finaux.

Tableau 5.2 : Paramètres de convergence utilisés dans Seep/w pour toutes les simulations en régime transitoire.

Max. # of iterations	50
Tolerance (%)	0.001
Conductivity change (in order in magnitude)	
Max change	5
Rate of change	1.1
Min change	$1*10^{-12}$

Aussi, une définition de l'incrémentation du temps a été nécessaire afin de bien décrire la phase transitoire, d'atteindre le régime permanent et de ne pas trop prolonger le temps d'attente pour la résolution des simulations.

Tableau 5.3 : Incrémentation du temps utilisée dans Seep/w pour toutes les simulations en régime transitoire.

# of time steps	300
Starting time	0
Initial increment size	0.0001
Expansion factor	1.15
Max. inc. Size	6000
Start saving at step :	5
Save multiple of :	5

5.4 LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DE L'AQUITARD S' EST NÉGLIGÉ

Trois méthodes théoriques décrites dans le chapitre II ont été comparées avec les résultats numériques calculés avec Seep/w pour le cas 13.

1. La méthode de Walton (1962);
2. La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956);
3. La méthode de Hantush (1956) pour plusieurs piézomètres.

5.4.1 La méthode de Walton (1962)

Cinq distances radiales r ont été choisies comme base de comparaison soit r=3m, 20m, 40m, 140m, et 200m. La raison de ces choix s'explique par la concordance de la position r d'un nœud de la grille numérique avec les valeurs présentes dans les tables de la fonction W(u, r/L) (Hantush, 1956).

En régime permanent (t très grand), le rayon d'action r_o théorique du cas 13 est de 44.8m. Au delà de cette distance, les courbes de rabattement numérique et théorique ne concordent plus (figures 5.2 et 5.3). Donc, les courbes ayant un $r_o > 44.8$m ne sont pas considérées lors des comparaisons numérique/théorique à cause des calculs de débit parasite qu'effectue Seep/w au-delà du r_o (section 4.3.3). Par exemple, entre 1000s et 2000s, le cas où r=140m a un pourcentage de différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique de 12.5% et pour le cas où r=200m, le pentes numérique et théorique sont trop divergentes pour faire un calcul de pourcentage de différence.

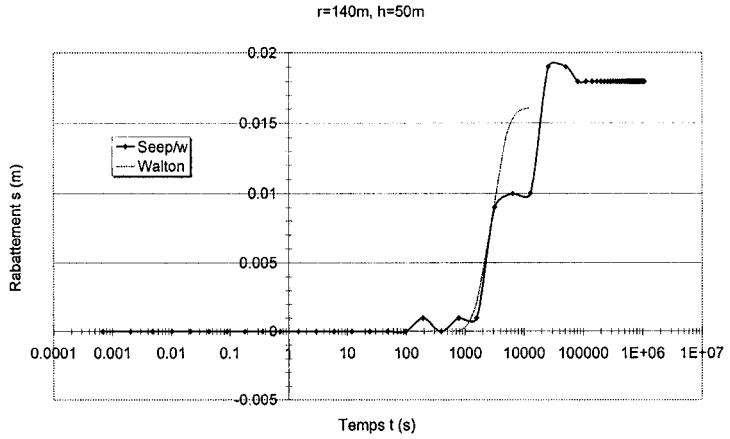


Figure 5.2: Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 140m pour la méthode de Walton (1962)

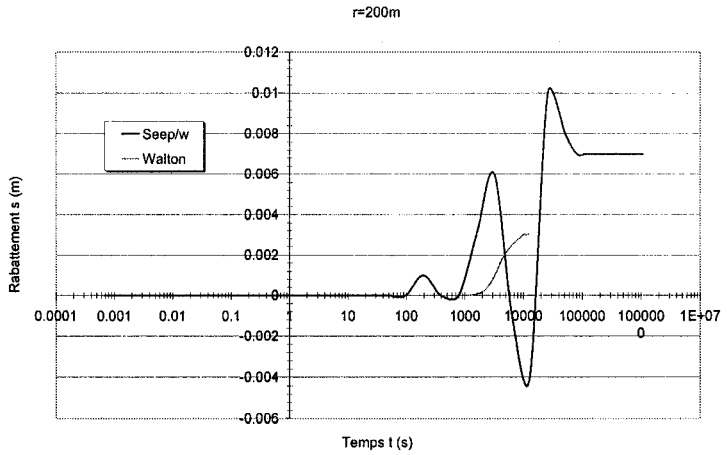


Figure 5.3: Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 200m pour la méthode de Walton (1962).

Les courbes de rabattement numérique et théorique sont concordantes pour les cas où r=3m, 20m et 40m. Toutefois, on note une petite augmentation de l'écart entre les rabattements maximaux en fonction de r (figure 5.4 à 5.6).

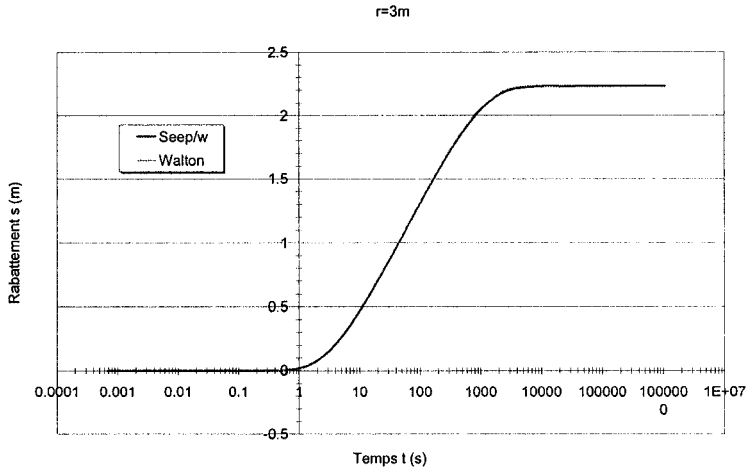


Figure 5.4: Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 3m pour la méthode de Walton (1962).

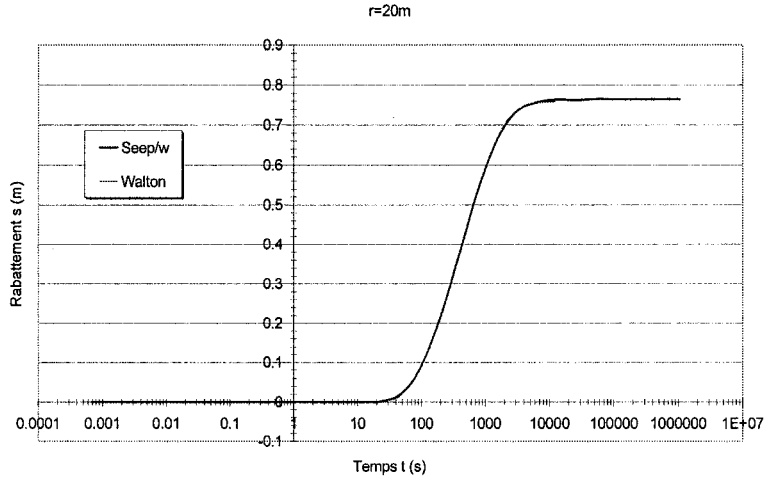


Figure 5.5: Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 20m pour la méthode de Walton (1962)

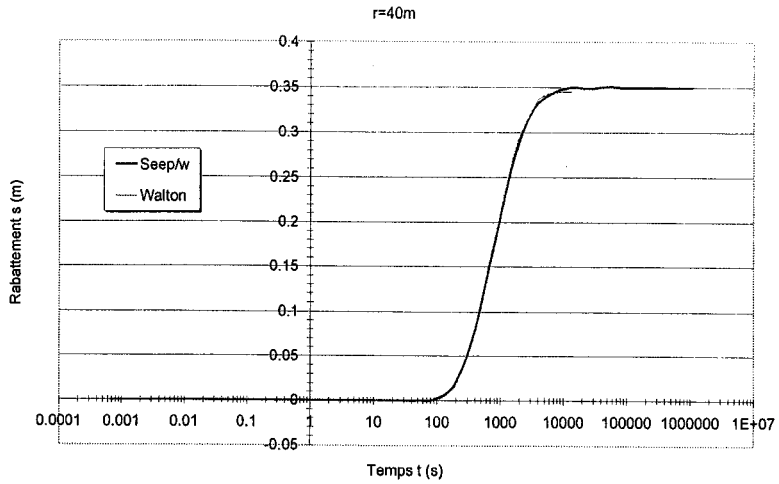


Figure 5.6 : Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 40m pour la méthode de Walton (1962).

Il est important de noter que l'échelle de l'axe vertical des figures 5.4 à 5.6 varie d'un graphique à l'autre puisque le rabattement diminue avec la distance. En régime permanent, l'écart entre le rabattement maximum s_m numérique et le rabattement maximum s_m théorique est de 9mm, 7mm et 5mm pour des rayons r allant de 3m, 20m et 40m respectivement. Toutefois, le fait de ramener cet écart sur le rabattement maximum théorique pour chacun des r remet les choses en perceptive quand à l'importance de cet écart et donne un pourcentage de différence entre numérique et théorique. Donc, le pourcentage de différence entre les rabattements maximaux numériques et théoriques passe de -0.4%, -0.9% à -1.4% pour des rayons r allant de 3m, 20m et 40m respectivement. En somme, plus le rayon r augmente et se rapproche de r_0, moins les courbes sont concordantes. Le pourcentage de différence entre les pentes des courbes numérique et théorique passe de 0.5%, -0.6% à 4.4% pour les rayons allant de 3m, 20m et

40m respectivement. Le signe négatif signifie que le résultat numérique est plus élevé que le résultat théorique.

5.4.2 La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956)

La vérification de cette méthode s'effectuera à l'aide d'équations. Deux sortes d'équations sont à l'étude, une première qui tire sa valeur des mesures effectuées avec le logiciel Seep/w et une deuxième qui calcule directement sa valeur à partir des équations théoriques décrites au chapitre II. Ensuite, on compare ces équations entre elles.

On a choisi d'évaluer seulement la distance **r = 3m** car cette méthode nécessite l'utilisation d'un seul piézomètre. Voici donc les caractéristiques calculées avec le logiciel Seep/w à r = 3m qui sont nécessaires pour effectuer toutes comparaisons avec les résultats théoriques.

- $s_m = 2.232$ m
- $t_p = 60$ s
- $\Delta s_p = 0.845$ m

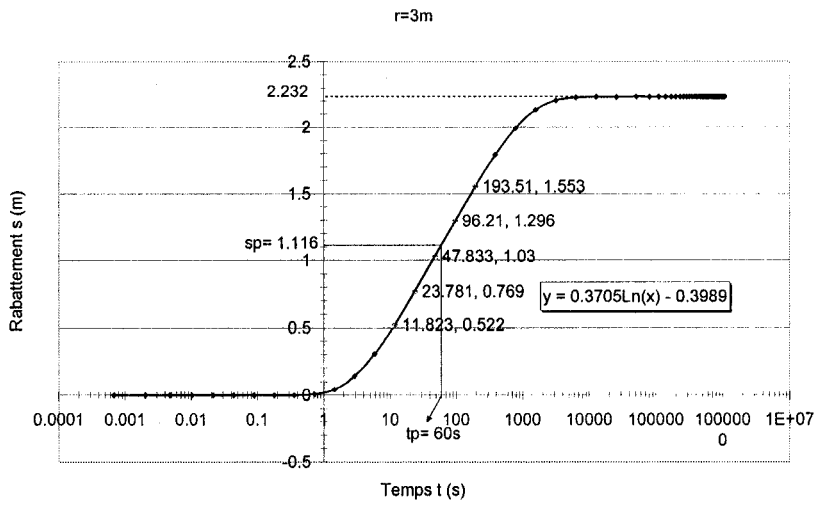


Figure 5.7 : Présentation graphique des variables de la méthode du point d'inflexion de Hantush mesurées avec Seep/w pour un r= 3m.

5.4.2.1 Vérification de l'équation 2.10

Considérant le graphique obtenue avec les calculs numériques, l'équation 2.10 se calcule :

$$s_p = 0.5 s_m = 1.112m$$

Or, pour la même équation mais avec les valeurs entrées initialement dans le modèle numérique

$$s_p = \frac{Q}{4\pi Kb} K_0\left(\frac{r}{L}\right) = \frac{0.002060885\, m^3/s}{4\pi * 1 * 10^{-4}\ m^2/s * 4m} * K_0\left(\frac{3m}{40m}\right) = 0.41 * 2.7114m = 1.1117m$$

Les rabattements de la modélisation numérique et les rabattements calculés avec les paramètres (K, K', b, b' et Q) entrés initialement dans l'équation 2.10 coïncident à 0.4% près. Il ne faut pas oublier que la donnée numérique de rabattement nécessaire pour vérifier l'équation 2.10 est en régime permanent. De par le chapitre IV, on sait qu'en régime permanent les modèles numérique et théorique sont concordants.

5.4.2.2 Vérification de l'équation 2.11

Avec les valeurs numériques :

$$u_p = \frac{r^2 S}{4Kbt_p} = \frac{9m^2 * 3.92278 * 10^{-4}}{4 * 1 * 10^{-4}\ m^2/s * 4m * 60s} = 0.03678.$$

Cette relation est vérifiée par :

$$u_p = \frac{r}{2L} = \frac{3m}{80m} = 0.0375.$$

Donc, le temps associé au point d'inflexion (t_p) mesuré avec la courbe de rabattement numérique respecte la relation théorique de Hantush avec 1.9% de différence.

5.4.2.3 Vérification de l'équation 2.12

Lorsque la pente de la droite de rabattement est mesurée avec les données calculées numériquement alors :

$$\Delta s_p = \frac{s_2 - s_1}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{1.553 - 0.522}{\log(193.51) - \log(11.82)} = 0.845m.$$

Et théoriquement,

$$\Delta s_p = \frac{2.30Q}{4\pi Kb} e^{-r/L} = \frac{2.30 * 0.002060885\, m^3/s}{4\pi * 1 * 10^{-4}\ m^2/s * 4m} e^{-0.075} = 0.875m.$$

La valeur numérique de Δs_p peut varier de ±0.5% environ car elle dépend des points choisis pour le calcul sur la droite de rabattement. Donc, encore ici, la valeur prédite théoriquement et celle calculée numériquement se ressemblent mais avec une différence d'environ 3.4%.

En conclusion, la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) concorde bien avec les résultats calculés numériquement pour un r=3m ayant au maximum 4% de différence avec les prédictions théoriques.

5.4.3 La méthode du point d'inflexion de Hantush pour plusieurs piézomètres (1956)

On doit avoir au minimum 2 piézomètres pour utiliser cette méthode, car il faut tracer une pente sur un graphique de r en fonction de Δs afin d'obtenir des informations sur le facteur de drainance L. Pour avoir une pente bien définie, il est donc préférable d'avoir les résultats de plus de deux piézomètres. Dans cette étude, les résultats de trois piézomètres seront utilisés soit ceux situés à r = 3m, 20m et 40m. Ces piézomètres correspondent aux trois distances répondant positivement à la concordance numérique/théorique lors de la comparaison avec la méthode de Walton (1962). Les courbes de rabattement numérique de ces trois piézomètres ont été tracées sur un graphique du rabattement (s) en fonction du temps (t) (figure 5.8).

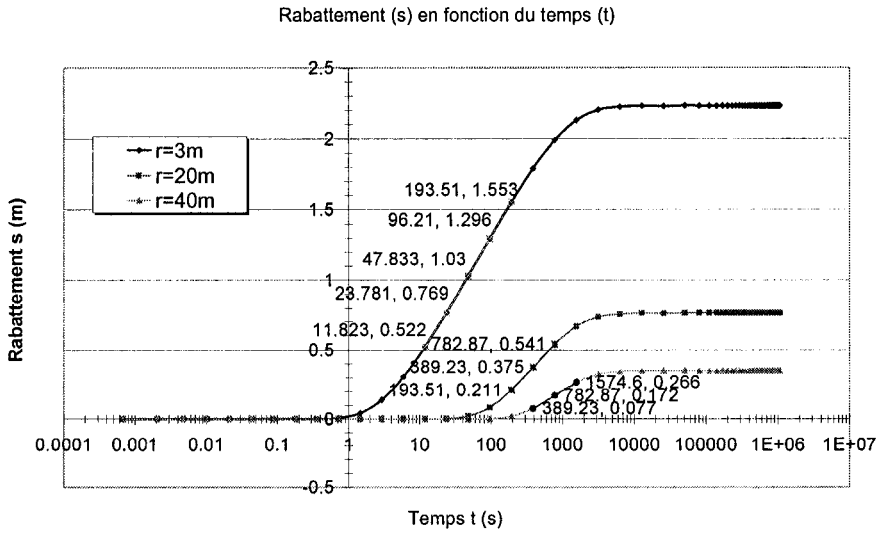


Figure 5.8 : Graphique du rabattement en fonction du temps pour les rayons r de 3m, 20m et 40m.

Tableau 5.4 : Pente de la partie rectiligne des courbes de rabattement en fonction du temps pour les trois piézomètres situés à r=3m, 20m et 40m.

Piézomètres	Δs
r=3m	0.845m
r=20m	0.544m
r=40m	0.311m

Par la suite, un graphique de r vs log Δs a été tracé ainsi que la droite s'ajustant le mieux aux trois points pour qu'ultérieurement, il soit possible d'en calculer la pente Δr. La droite reliant ces trois points a les caractéristiques suivantes :

- $\Delta r = -85.34$ m,
- $\Delta s_0 = 0.9224$m.

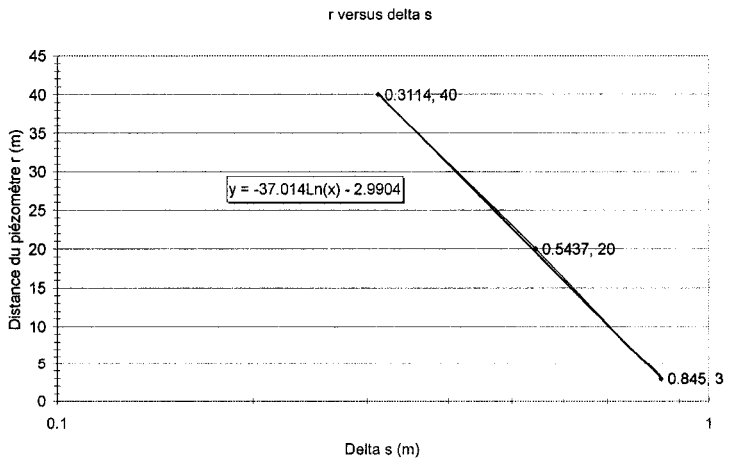


Figure 5.9 : Distance r des piézomètres par rapport à la pente Δs de la partie rectiligne du rabattement en fonction du temps.

Maintenant, voici les équations 2.15 et 2.16 qui permettent de vérifier la concordance entre les calculs numériques et les prédictions théoriques.

Équation 2.15

$$L = \frac{1}{2.3}\Delta r = \frac{1}{2.3} * 85.34 = 37.1$$

Initialement, le coefficient de drainance imposé dans le modèle numérique est L=40. Il y a donc une différence de 7.2% avec la théorie.

Équation 2.16

$$Kb = 2.30\frac{Q}{4\pi(\Delta s)_0} = 2.30\frac{0.002060885\, m^3/s}{4\pi * 0.9224m} = 4.089 * 10^{-4}\ m^2/s$$

Initialement, la valeur entrée dans le logiciel Seep/w est Kb=1*10^{-4}m/s * 4m = 4*$10^{-4}$$m^2$/s. Il y a donc une erreur de 2.3% entre les calculs numériques et les prédictions théoriques.

5.4.4 Conclusion lorsque S' n'est pas considéré (S'=cte)

Lorsque les méthodes théoriques ne tiennent pas compte de l'influence du coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard lors les essais de pompage en régime transitoire, le pourcentage de différence entre les calculs numériques et les prédictions théoriques varie de 0.5% à 7.2% environ. La méthode de Walton (1962) montre une bonne concordance entre les valeurs numérique et théorique pour des $r<r_o$. La méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) fonctionne aussi très bien pour un r=3m avec au maximum 4% d'écart entre les valeurs calculées numériquement et celles prédites théoriquement. Dans la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour plusieurs piézomètres il est important de considérer l'orientation spatiale des piézomètre afin de ne pas inclure une éventuelle anisotropie du secteur à l'étude lorsque l'on trace le graphique de r vs $\log\Delta s$. Cette méthode est directement proportionnelle à la quantité de piézomètres utilisés. Plus il y aura de points pour tracer le graphique de r vs $\log\Delta s$, plus la pente sera représentative de la réalité terrain jusqu'à ce que l'ajout d'un point ne change plus rien à la tendance générale de la courbe. Numériquement, le choix des points de mesure doit considérer ($r\leq r_o$) les problèmes numériques évoqués plus tôt concernant Seep/w 4. La différence entre les valeurs obtenues numériquement et théoriquement en régime transitoire lorsque S' n'est pas considéré est semblable à celle obtenue pour le cas 13 en régime permanent.

5.5 LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT S' DE L'AQUITARD EST CONSIDÉRÉ

5.5.1 Coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard

Lorsque l'on considère le coefficient d'emmagasinement S' de l'aquitard dans une simulation numérique, il est nécessaire d'attribuer à l'aquitard une valeur de teneur en eau qui varie en fonction de la pression (u>0). Deux valeurs de S' ont été sélectionnées pour comparer les calculs numériques avec la théorie. Une première valeur, S_1', a été choisie parmi celles présentées dans la banque de données de Seep/w (tableau 5.5).

Tableau 5.5 : Description de la fonction de teneur en eau volumique #4 provenant de la banque de données de Seep/w pour S_1'.

#	Pression (kPa)	Teneur en eau volumique θ
1)	0	0.3800
2)	5	0.3805
3)	10	0.3810
4)	20	0.3820

Une deuxième valeur a été choisie dans l'optique de modéliser un sol ayant un S' moyen (tableau 5.6) S_2'.

Tableau 5.6 : Description de la fonction de teneur en eau volumique pour S_2'.

#	Pression (kPa)	Teneur en eau volumique θ
1)	0	0.38000
2)	5	0.38005
3)	10	0.38010
4)	20	0.38020

En se basant sur l'équation 5.3 et les valeurs du tableau 5.5, il est possible de calculer le premier coefficient d'emmagasinement de l'aquitard S_1'.

$$S_1' = 4m * 9807\, {}^{N}\!/_{m^3} * \left(\frac{0.3820 - 0.3800}{20000Pa - 0Pa} \right) = 3.9228 * 10^{-3}$$

Et avec les valeurs du tableau 5.6, le deuxième coefficient d'emmagasinement S_2'.

$$S_2' = 4m * 9807\, {}^{N}\!/_{m^3} * \left(\frac{0.3802 - 0.3800}{20000Pa - 0Pa} \right) = 3.9228 * 10^{-4}$$

5.5.2 La méthode de Hantush (1960)

Pour vérifier la méthode de Hantush (1960), il est nécessaire d'avoir une valeur de rayon r qui coïncide avec un des nœuds de la grille numérique et une valeur de ß de telle

sorte que l'équation 2.19 donne un ß présent dans les tables de Hantush (1960). À partir de ces deux critères, cinq rayons ont été sélectionnés. Sachant que r_0=44.8m, alors trois $r< r_0$ et deux $r>r_0$ ont été choisis pour S_1' soit r=0.507m, 2.52m, 25.3m, 50.6m et 101.2m et quatre $r< r_0$ et un $r>r_0$ ont été choisis pour S_2' soit r=0.32m, 1.6m, 8m, 32m et 80m. La comparaison entre les calculs numériques et les prédictions théoriques a été faite à l'aide de courbes de rabattement en fonction du temps. Pour que les comparaisons soient justes, il est nécessaire que le temps respecte le critère limitatif tiré de la condition d'application citée à la section 2.4.2.4 soit :

$t < S'b'/10K' < 1569$s pour S_1'

et

$t < S'b'/10K' < 157$s pour S_2'.

Avec le S_1' et les $r<r_0$, la figure 5.10 montre que les courbes numérique et théorique concordent jusqu'à ce que t=1569s. Donc, les courbes numérique et théorique respectent le critère limitatif sur le temps et elles sont concordantes même au-delà du temps imposé par ce critère.

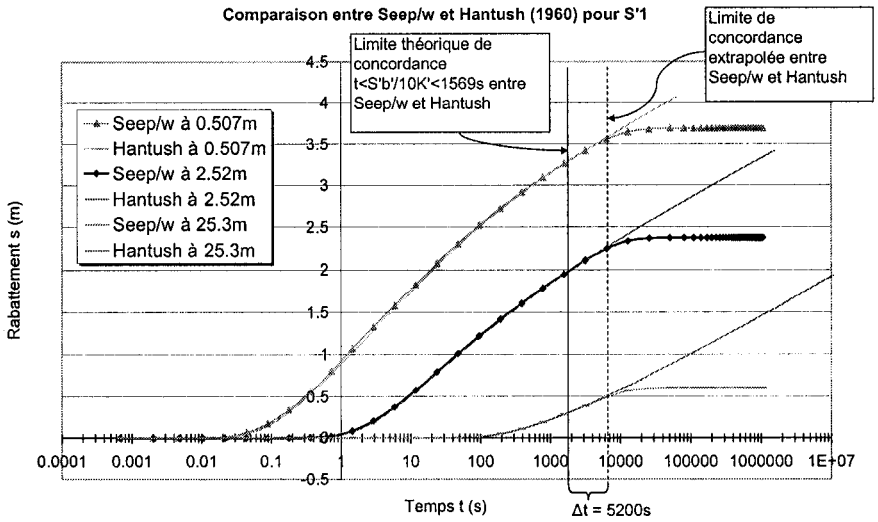


Figure 5.10 : Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celles prédites par Hantush (1960) pour $S_1' = 3.9228*10^{-3}$ et pour les r=0.507m, 2.52m et 25.3m.

Toujours pour S_1', la figure 5.11 jumelée à la différence entre les premières pentes numérique et théorique montre que la concordance entre les deux types de courbes est à 0.7% près jusqu'à ce que t=6000s environ et ce, pour un r=0.507m. Dans le même ordre d'idée, les figures 5.12 et 5.13 montrent que la différence entre les pentes des courbes numérique et théorique est à 0.9% et 1.6% jusqu'à ce que t=6000s et 5000s respectivement pour les r=2.52m et 25.3m.

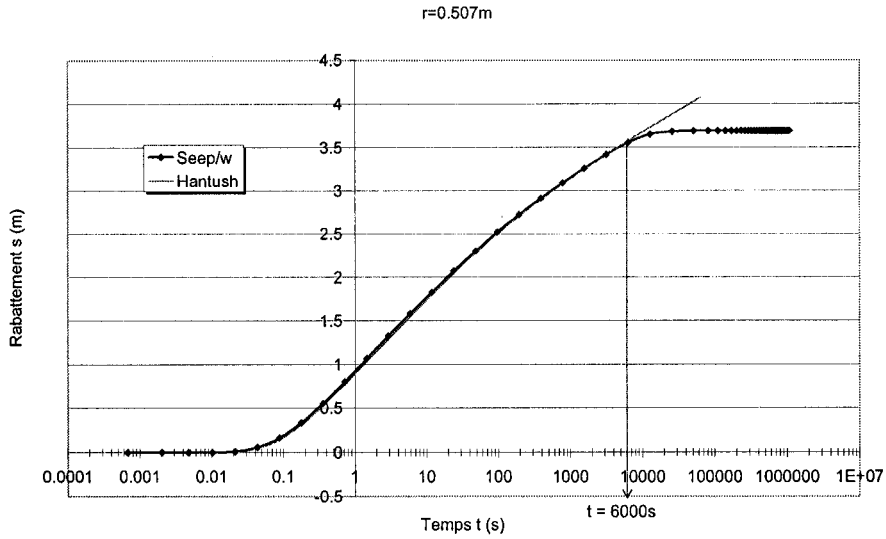


Figure 5.11 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où $r=0.507m$ et $S_1'= 3.9228*10^{-3}$.

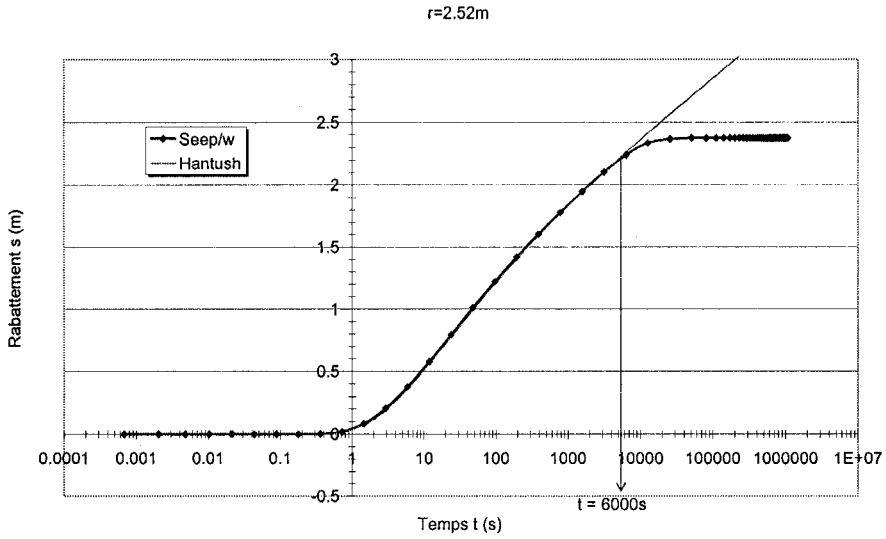


Figure 5.12 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où $r=2.52m$ et $S_1'= 3.9228*10^{-3}$.

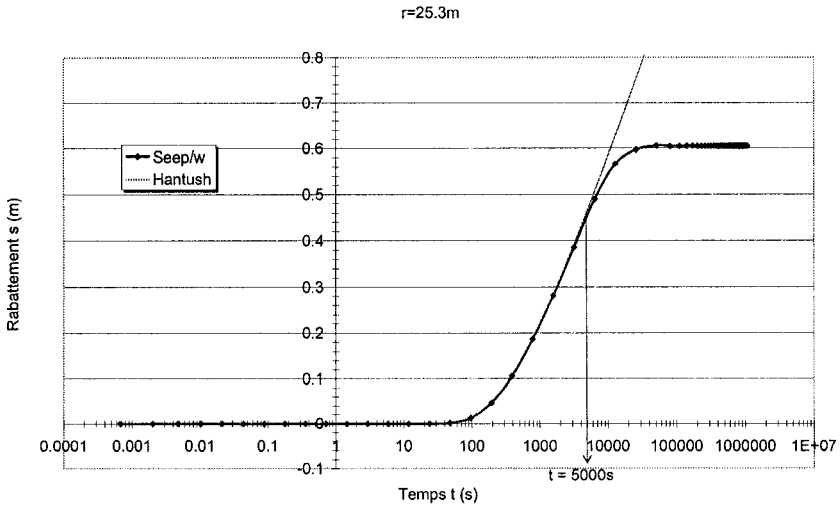


Figure 5.13 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=25.3m et $S_1'= 3.9228*10^{-3}$.

Pour les cas où $r>r_0$, les courbes de rabattement numérique et théorique sont comparables lorsque r=50.6m mais visiblement différentes lorsque r=101.2m.

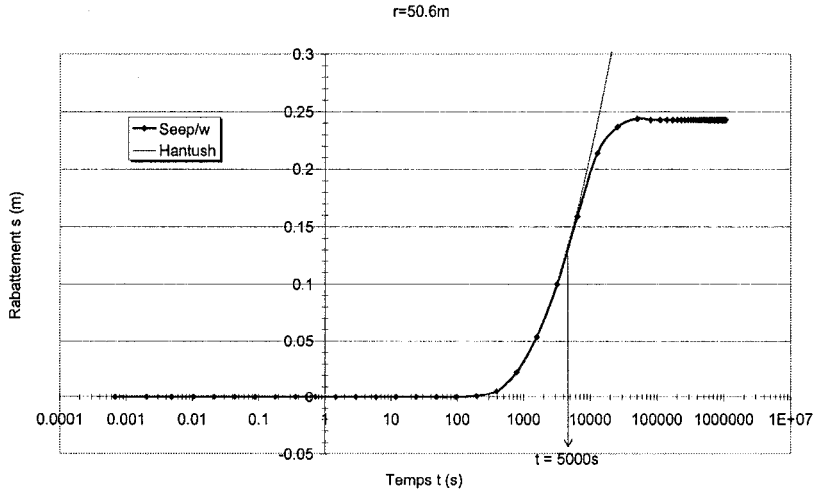


Figure 5.14 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r> r_0$ où r=50.6m et $S_1'= 3.9228*10^{-3}$.

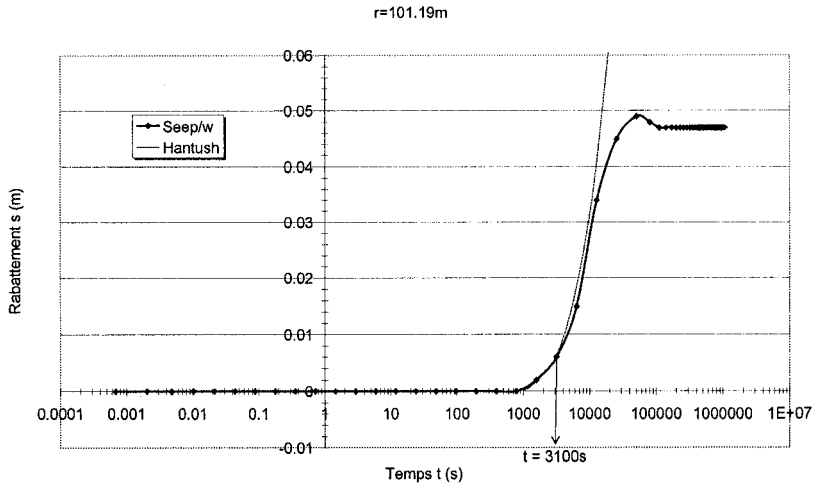


Figure 5.15 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_0$ où $r=101.2m$ et $S_1'= 3.9228*10^{-3}$

En résumé, la tendance veut que les courbes de rabattement des rayons plus faibles comme r=0.507m et r=2.52m concordent plus longtemps (6000s) que les rayons plus grands comme r=25.3m, 50.6m et 101.19m (5000s et 3100s). Donc, la méthode de Hantush (1960) fonctionne bien lorsque $S_1'= 3.9228*10^{-3}$ car elle respecte en tout temps le critère limitatif impliquant le temps t. Cependant, la méthode fonctionne mieux lorsque $r<r_0$ ou presque égale à r_0 (r=50.6m par exemple).

Avec le S_2' et les $r<r_0$, la figure 5.16 montre que les courbes numérique et théorique concordent jusqu'à ce que t=157s. Donc, les courbes numérique et théorique respectent le critère limitatif sur le temps et elles sont concordantes même au-delà du temps imposé par ce critère.

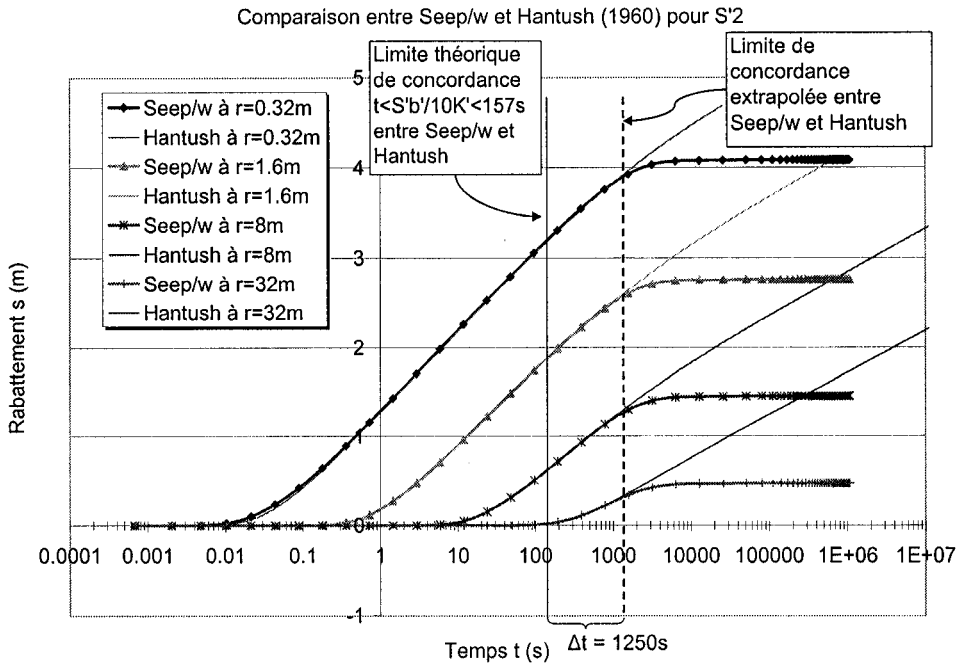


Figure 5.16 : Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celles prédites par Hantush (1960) pour $S_2'=3.9228*10^{-4}$ et pour les r=0.32m, 1.6m, 8m et 32m.

Toujours pour S_2', la figure 5.17 jumelée à la différence entre les premières pentes numérique et théorique montre que la concordance entre les deux types de courbes est à 0.07% près jusqu'à ce que t=1200s environ et ce, pour un r=0.32m. Dans le même ordre d'idée, les figures 5.18 à 5.20 montrent que la différence entre les pentes des courbes numérique et théorique est de 0.08%, 1.6% et 2.1% jusqu'à ce que t=1000s, 850s et 1000s respectivement pour les r=1.6m, 8m et 32m.

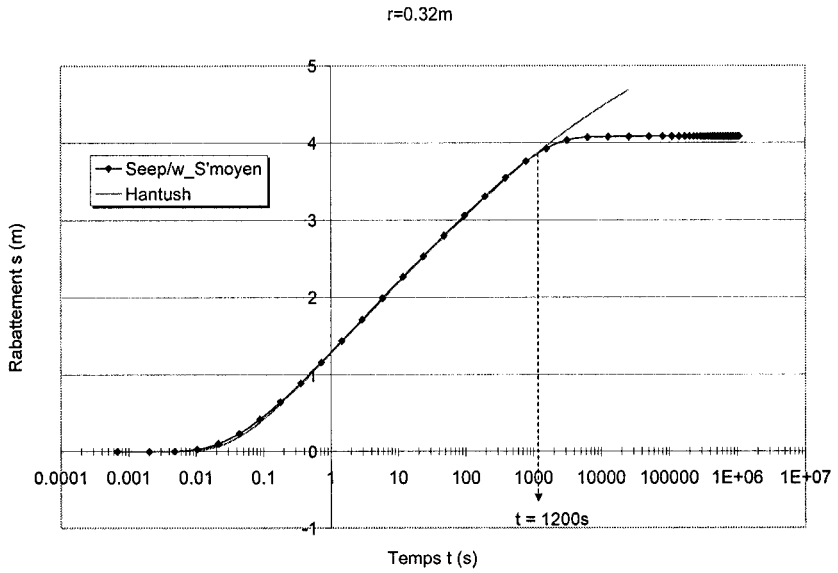


Figure 5.17 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où $r=0.32m$ et $S_1'= 3.9228*10^{-4}$.

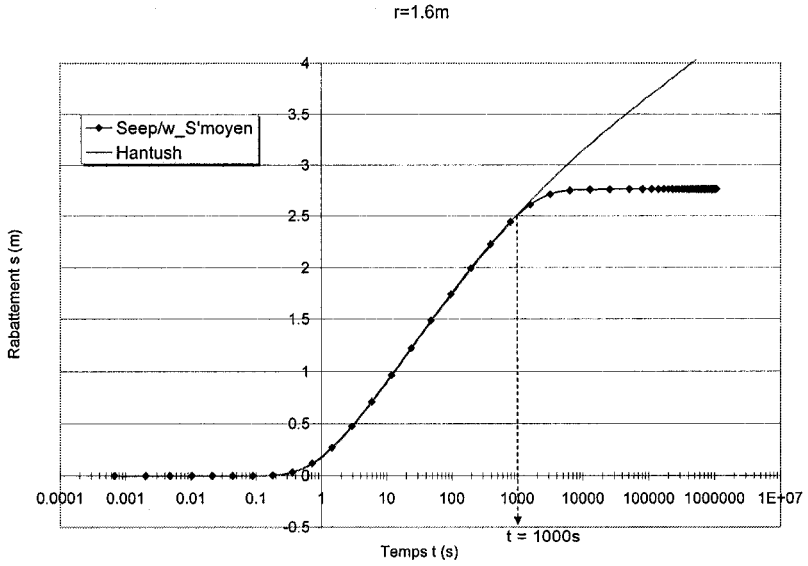


Figure 5.18 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où $r=1.6m$ et $S_1'= 3.9228*10^{-4}$.

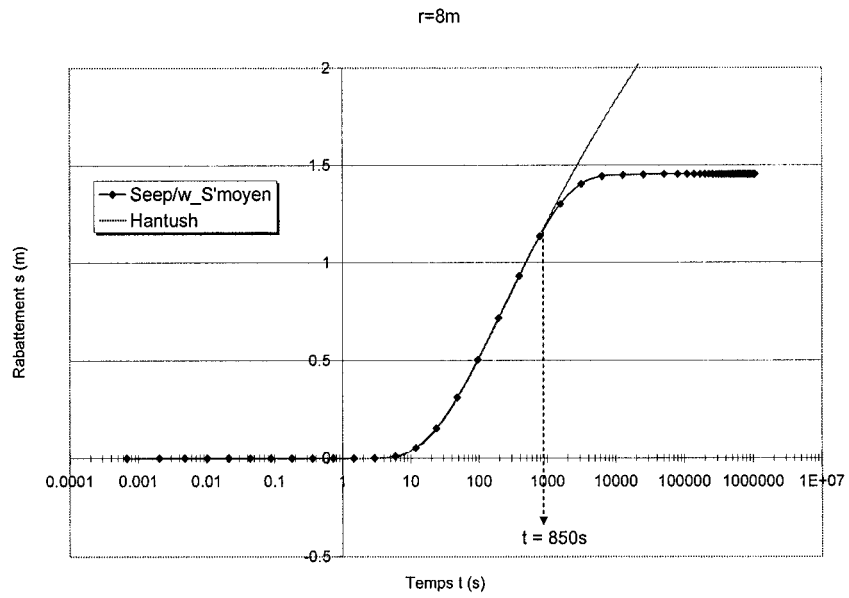


Figure 5.19 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=8m et $S_1'= 3.9228*10^{-4}$.

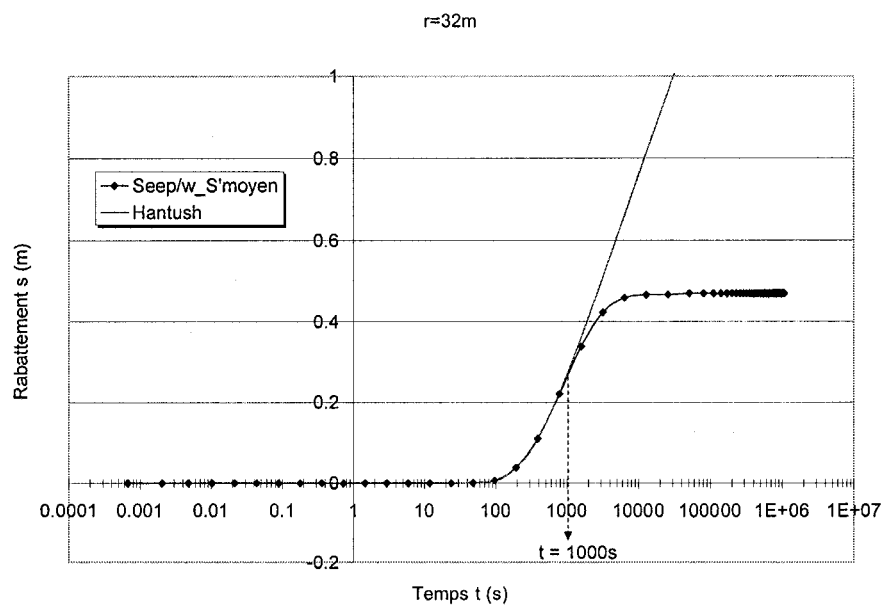


Figure 5.20 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r<r_0$ où r=32m et $S_1'= 3.9228*10^{-4}$.

Pour le cas où $r>r_0$ donc à r=80m, la courbe de rabattement numérique et théorique n'ont pas de sections rectilignes assez importantes pour calculer le pourcentage de différence entre les pentes.

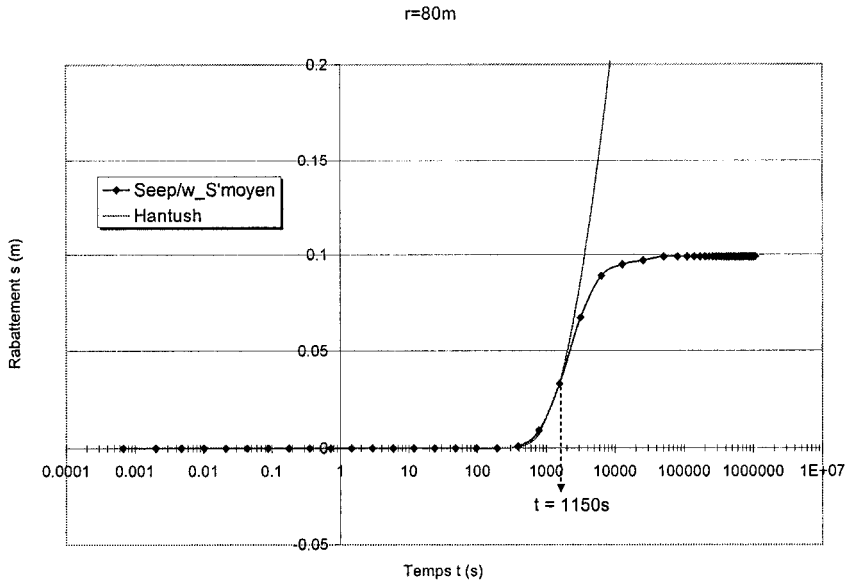


Figure 5.21 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_0$ où r=80m et $S_1' = 3.9228*10^{-4}$.

En conclusion, peu importe la valeur de S', les courbes de rabattement obtenues avec la méthode de Hantush (1960) sont comparables avec celles obtenues avec Seep/w lorsque $r<r_0$ avec au maximum 2.1% quand r=32m et $S'=3.9228*10^{-4}$ (S_2'). Cependant, le rapport entre la limite théorique de concordance et la limite de concordance extrapolée entre Seep/w et Hantush est plus grand dans le cas de S_1' ($\Delta t \approx 5200$s) que dans le cas de S_2' ($\Delta t \approx 1250$s).

5.5.3 La méthode de Neuman-Witherspoon (1972)

Pour comparer la méthode de Neuman-Witherspoon (1972) avec les calculs numériques, il faut avoir des mesures de rabattement dans l'aquitard à un temps t et à un rayon r précis de telle sorte que les valeurs de u et de u_c tirée de l'équation 2.21 soient présentes dans les tables de Witherspoon et al. (1967). Une valeur de u de 0.0625 a été choisie tandis que les valeurs choisies pour r sont les mêmes que dans la méthode de Hantush (1960). Donc, il suffit d'appliquer l'équation 2.21 pour trouver les valeurs de temps à imposer dans Seep/w. Seuls les $r<r_o$ ont été choisis (r=0.507m, 2.52m et 25.3m) pour faire les comparaisons entre numérique et théorique. Ces trois rayons r ont été retenus à cause de leurs valeurs de temps associées qui répondent au critère de temps proposé par les auteurs pour pouvoir utiliser leur méthode. La méthode de Neuman et Witherspoon (1972) donne le rabattement s_c dans l'aquitard, en fonction de l'élévation z et du temps t. La valeur z=0m représente le contact entre l'aquifère à nappe semi-captive et l'aquitard et la valeur z=4m représente le sommet de l'aquitard.

Pour S_1', le critère limitatif relié au temps t a la même valeur que dans la méthode de Hantush (1960) soit t < 1569s. Cette hypothèse n'est pas respectée dans le cas où r=25.3m et u=0.0625. Le deuxième critère limitatif $\beta<1$ concernant la distance radiale r est respectée dans tous les cas puisque selon l'équation 2.19 :

$$\beta = \frac{r}{4}\sqrt{\frac{K'/b'}{Kb} * \frac{S'}{S}} < 1.0\,;$$

donne

$$\beta = \frac{r}{4}\sqrt{0.000625 * 10} < 1.0\,;$$

et donc

$r < 50.6$m.

Avec la grille d'éléments finis utilisée tout au long de cette étude, on obtient des résultats médiocres pour cette méthode. Que le cas respecte les hypothèses simplificatrices ou non, les courbes de rabattement numérique et théorique ne concordent pas (figures 5.22 à 5.24). Lorsque r=0.507m, la courbe numérique de rabattement oscille entre un rabattement négatif et un rabattement positif jusqu'à ce qu'elle se stabilise à s_c=0m. À cette distance, il est impossible de quantifier la différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique à cause de leurs divergences. Cette divergence est causée, en partie, par les éléments de Seep/w qui sont trop grands pour pouvoir suivre la courbe théorique. Lorsque r=2.52m, un nœud de la courbe de rabattement numérique a une valeur de rabattement négatif s_c = -0.014m. Ensuite, elle se stabilise jusqu'à un rabattement nul. La différence entre numérique et théorique pour un $z \approx 0.2$m est de 85.5%. Lorsque r=25.3m, les courbes de rabattement numérique et théorique sont pratiquement parallèles mais ne se recoupent pas. La différence entre ces courbes pour un

z ≈ 2m est de 16.1%. En utilisant la grille numérique décrite à la section 4.3.2, les courbes de rabattement numérique et théorique tendent vers une concordance avec l'augmentation de r.

Il est donc important de vérifier l'influence des deux paramètres suivants sur les calculs numériques afin d'obtenir une meilleure concordance avec les courbes théoriques de Neuman et Witherspoon (1972) :

- l'augmentation du nombre de nœuds sur l'axe des z dans l'aquitard;
- le raffinement vertical de la grille numérique dans l'aquitard.

Une deuxième grille a donc été créée en regroupant les deux paramètres cités ci-dessus soit :

- 8 éléments/m
- et un ratio de 0.5.

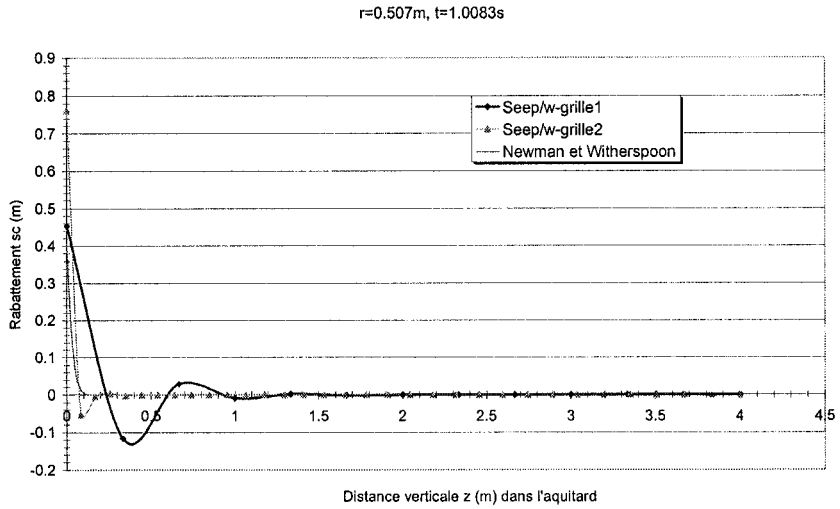


Figure 5.22 : Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=0.507m et t=1.0083s.

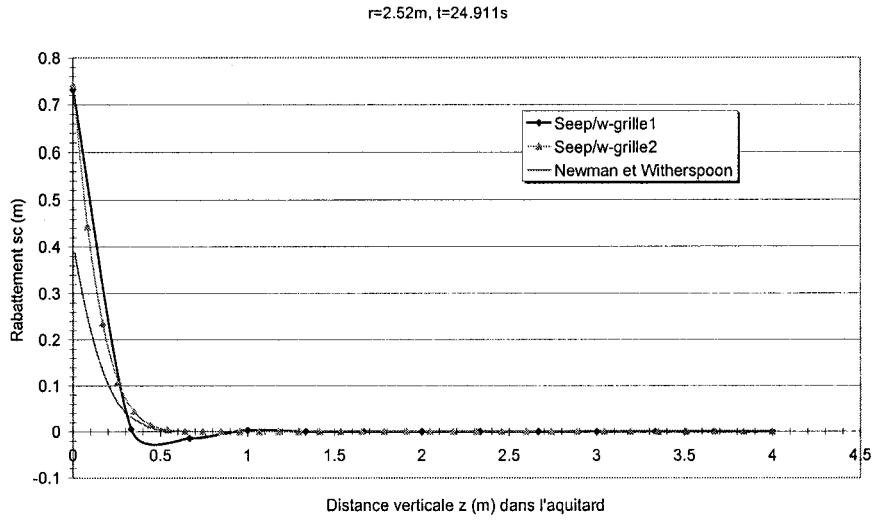


Figure 5.23 : Comparaison entre les courbes de rabattement calculées numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=2.52m et t=24.911s.

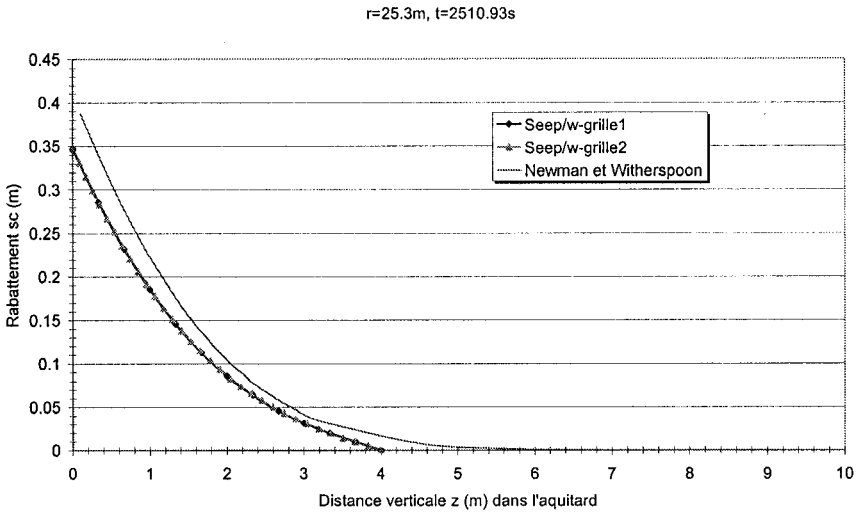


Figure 5.24 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=25.3m et t=2510.93s.

Les changements apportés dans la grille numériques sont suffisants pour voir une amélioration notable dans les cas où r=0.507m et 2.52m (figure 5.22 et 5.23) et même une concordance entre les courbes numérique et théorique dans le cas où r=25.3m. Il serait approprié de faire une étude sur le nombre d'éléments versus le ratio afin de connaître les paramètres qui donneront les meilleurs comparaisons. Mais en général, on peut conclure que le raffinement de l'aquitard doit être plus important que celui de l'aquifère lors de la vérification numérique de la méthode de Neuman et Witherspoon (1972).

Finalement, pour obtenir des valeurs de rabattement à partir d'un essai de pompage sur le terrain, il faut avoir des piézomètres situés dans l'aquitard munis de capteurs de pression afin d'éviter les délais de retard des piézomètres hydrauliques (Hvorslev, 1951). Cependant, cette pratique n'est pas courante, ce qui limite beaucoup les applications de cette méthode.

5.5.4 Conclusion lorsque S' est considéré (S'≠cte)

La méthode de Hantush (1960) est comparable aux calculs numériques pour S_1' et S_2' même au-delà des valeurs de temps imposé par la condition d'application émise par les auteurs. Cependant, les courbes de rabattement numérique et théorique concordent plus longtemps lorsque $r<r_0$ ou $r=r_0$ (r=50.6m par exemple). Pour le cas de S_1', le pourcentage de différence entre les premières pentes des courbes numérique et théorique varie de 0.7% à 1.6% pour des rayons r variant de 0.507m à 25.3m. Pour le cas de S_2', le pourcentage de différence entre les premières pentes des courbes numérique et théorique varie de 0.07% à 2.1% pour des rayons r variant de 0.32m à 32m. Donc, plus r est petit et plus les résultats sont semblables.

Pour la méthode de Neuman et Witherspoon (1972), la relation entre le pourcentage de différence et r est contraire. Tout d'abord, cette méthode donne le rabattement dans l'aquitard s_c en fonction de la profondeur du piézomètre dans l'aquitard. Avec la

première grille numérique utilisée soit celle décrite dans la section 4.3.2, les calculs numériques et les prédictions théoriques ne concordent pas pour les trois rayons étudiés soit 0.507m, 2.52, et 25.3m mais tendent vers une concordance avec l'augmentation de r. Cette divergence est causée, en partie, par les éléments de Seep/w qui sont trop grands pour pouvoir suivre la courbe théorique. Les courbes de rabattement numériques ont des valeurs de rabattement négatives ce qui ne devrait pas se produire. Pour contrer ce problème numérique, une modification de la grille numérique a été effectuée en augmentant, dans l'aquitard, le nombre de nœuds dans l'axe vertical et le raffinement selon z. Avec cette deuxième grille numérique, la comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique est meilleure. Donc pour avoir de bonnes comparaisons, il est nécessaire d'avoir un nombre de nœuds ainsi qu'un raffinement de l'aquitard supérieur à celui de l'aquifère.

5.6 CONCLUSION DU RÉGIME TRANSITOIRE

En général, les courbes de rabattement numérique et théorique sont semblables pour une même théorie mais le pourcentage de différence entre ces courbes est un peu plus faible lorsque S'$\neq$ cte (S' considéré). Donc, les résultats de K, K' et r_o calculés à partir des courbes de rabattement numériques sont plus près de la théorie lorsque S' est considéré.

Selon Neuman et Witherspoon (1972), les résultats numériques qui ne tiennent pas compte de S' risquent de:

- Surestimer la conductivité hydraulique K de l'aquifère à nappe semi-captive;
- Sous estimer la conductivité hydraulique K' de l'aquitard;
- Donner une fausse impression d'hétérogénéité.

Donc, il faut comparer les théories qui considèrent S' et celles qui ne le considèrent pas pour savoir si les suppositions de Neuman et Witherspoon ci-dessus sont fondées. Sachant que les courbes numériques et théoriques sont pratiquement semblables dans les deux cas (considérant ou non S'), il est possible de comparer les courbes de rabattement numériques entre elles afin de savoir si l'on surestime ou si l'on sous estime les résultats numériques qui ne tiennent pas compte de S'.

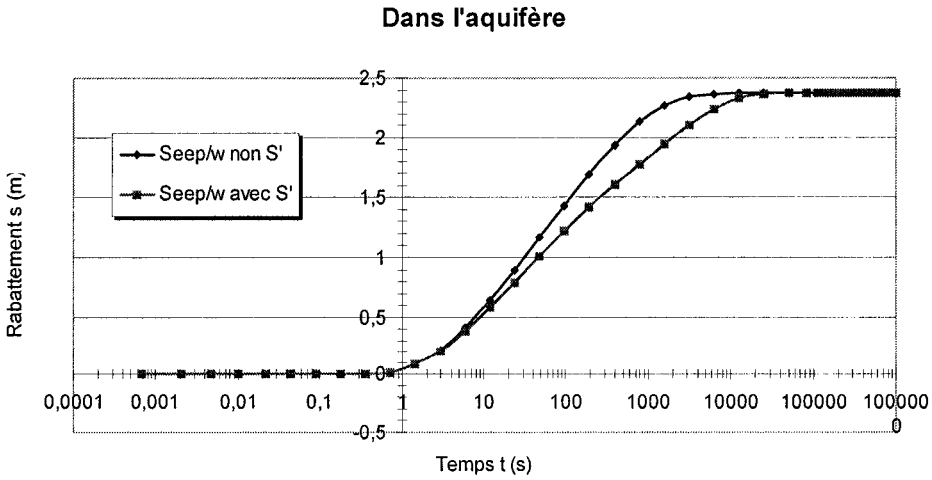


Figure 5.25 : Comparaison entre une courbe de rabattement numériques considérant S' et l'autre pas pour un piézomètre situé à r=3m dans l'aquifère.

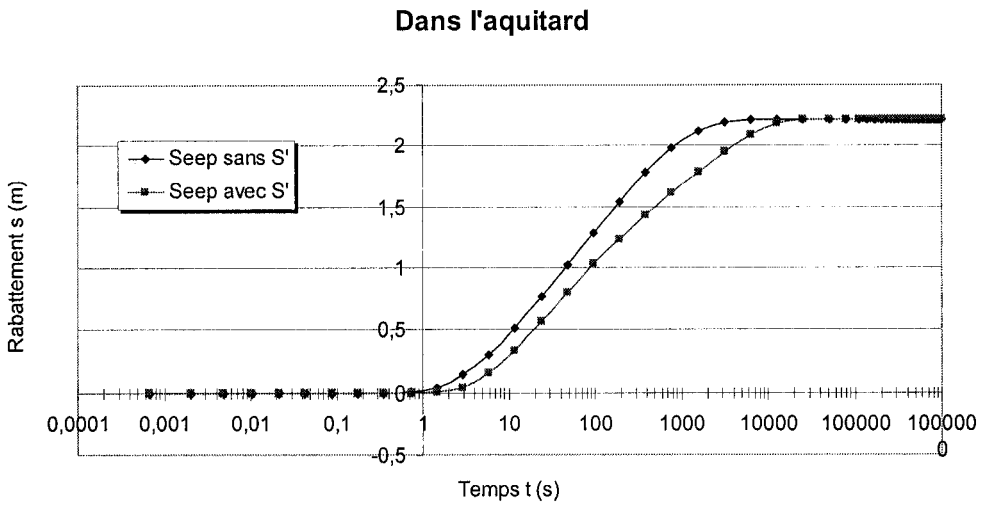


Figure 5.26 : Comparaison entre une courbe de rabattement numériques considérant S' et l'autre pas pour un piézomètre situé à r=3m dans l'aquitard

Les figures 5.25 et 5.26 montrent bien la différence qu'il existe entre les courbes de rabattement numérique qui considèrent ou non S'. Dans les graphiques du rabattement en fonction du temps, la pente de la simulation ne considérant pas S' est plus élevée que celle de la simulation qui considère S' et ce, autant dans l'aquifère que dans l'aquitard. Dans l'aquifère, la différence entre les pentes commence plus tôt et elle est plus marquée que dans l'aquitard. Alors, vue que la pente de la simulation qui ne considère pas S' est plus élevée, cela implique que la conductivité hydraulique est plus faible que celle interprétée avec la courbe de rabattement qui considère S'. Finalement, pour des mesures prises dans l'aquifère et dans l'aquitard, les conclusions sont les mêmes : les résultats numériques qui ne tiennent pas compte de S' risquent de sous estimer la conductivité hydraulique. Par conséquent, l'hétérogénéité apparente ne s'en trouve pas accrue, et ce, contrairement aux hypothèses avancées par Neuman et Witherspoon (1972).

La méthode de Walton (1962), la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour un piézomètre et la méthode du point d'inflexion de Hantush (1956) pour plusieurs piézomètres ne peuvent être appliquées que si l'eau libérée par le tassement de l'aquitard est négligée, i.e. S' négligé. Autrement, les courbes de rabattement ne sont pas similaires. La même logique s'applique pour les méthodes qui tiennent compte de S'.

Aussi, pour les méthodes qui tiennent compte de S', la condition d'application $t < S'b'/10K'$ est respectée et dépassée dans tous les cas étudiés. Les équations théoriques sont valides plus longtemps que le prédit cette condition d'application.

Pour la méthode de Neuman et Witherspoon (1972), les modèles numériques et théoriques ne concordent pas même si la condition d'application $\beta < 0.1$ (distance inférieure à 100m) est respectée.

CHAPITRE VI

LA NOUVELLE VERSION : SEEP/W 5

6.1 INTRODUCTION

Certaines améliorations de la nouvelle version de Seep/w permettent de réduire les problèmes numériques rencontrés précédemment. Ces améliorations sont:

- une double précision (32 bits processing) sur les calculs;
- une absence de restrictions sur les limites physiques du problème à résoudre.

Le but de ce chapitre est de comparer les calculs effectués avec la nouvelle version de Seep/w par rapport aux calculs effectués avec Seep/w 4. Seul le cas 13 est recalculé et comparé. Le cas 13 est comparé avec la théorie de DeGlee (1930), de Walton (1962), de Hantush (1956) et de Neuman et Witherspoon (1972). Une conclusion générale est tirée à partir de ces comparaisons.

6.2 RÉGIME PERMANENT

Un des problèmes que l'on rencontrait avec Seep/w 4, était la présence de débits parasites (section 4.3.3) dans l'aquifère à partir d'un rayon d'environ 250m. Ce problème est désormais réglé avec la nouvelle version de Seep/w. Après avoir atteint le rayon d'influence r_i à 568m, les trois calculs de débits verticaux sont pratiquement égaux entre eux (figure 6.1). Le débit vertical total, calculé sur toute la longueur du modèle, est pratiquement identique au débit horizontal avec $1*10^{-8}$ m^3/s de différence. De plus, les lignes d'écoulement sont bien définies sur tout le rayon du modèle (comparer avec la figure 4.1).

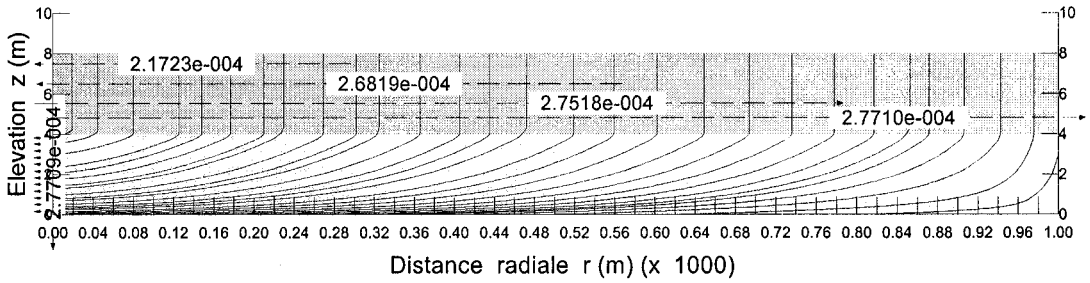


Figure 6.1: Quatre débits verticaux calculés par les sections de flux horizontales et un débit horizontal calculé par la section de flux verticale avec les lignes d'écoulement pour le cas 18.

Les figures 6.2 et 6.3 montrent bien l'absence de débits parasites sur toute la longueur du modèle pour Seep/w version 5 autant pour la vitesse calculée en x que pour celle calculée en y (comparer aux figures 4.2 et 4.3).

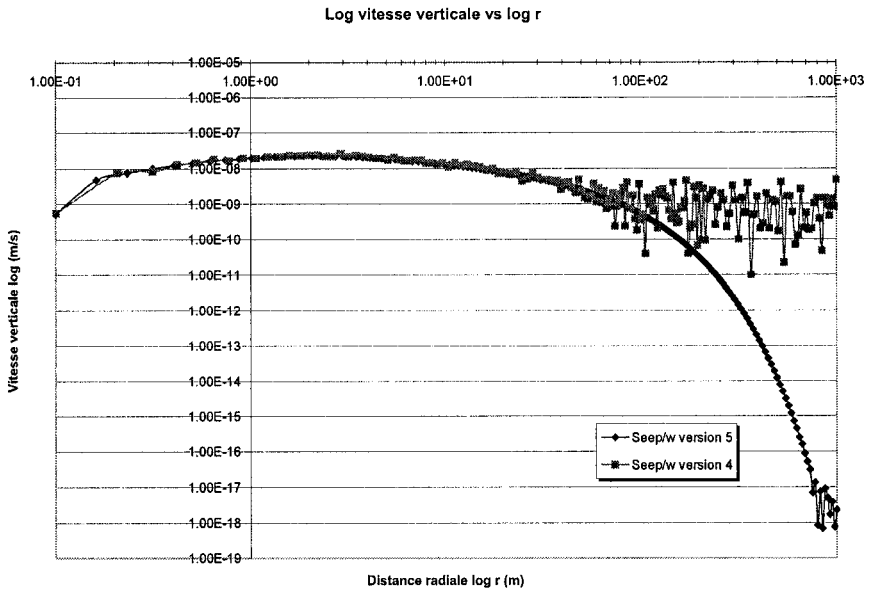


Figure 6.2 : Vitesse verticale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #1 de la figure 6.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un r_i=568m pour Seep/w version 4 et 5.

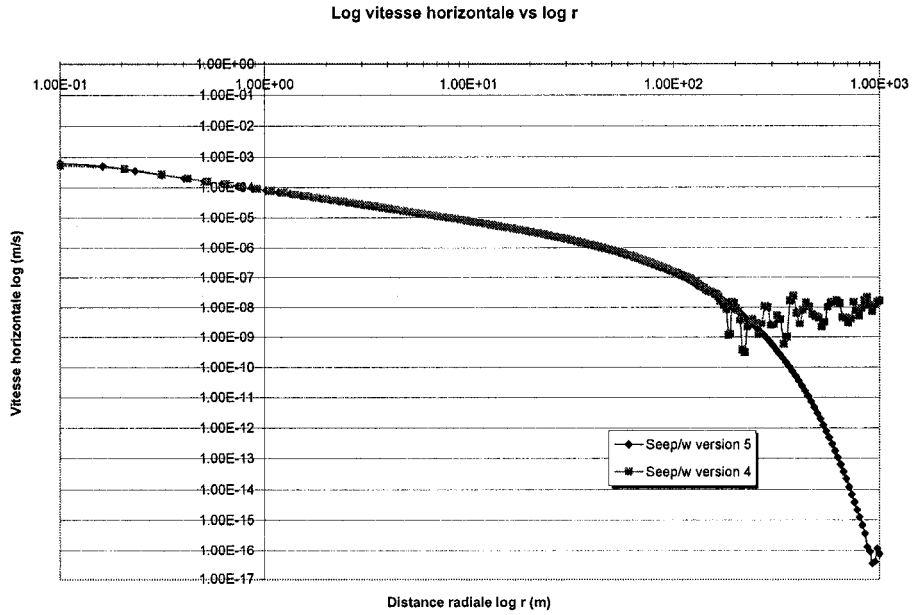


Figure 6.3 : Vitesse horizontale de l'eau en fonction de la distance radiale pour la section #2 de la figure 6.1 (dans l'aquifère) avec un r_o=141.7m et un r_i=568m pour Seep/w version 4 et 5.

Nous avons aussi vérifié les différences de rabattement entre le haut et le bas de l'aquifère lors du calcul avec la nouvelle version de Seep/w. Le cas 13 a été gardé comme base de comparaison avec la section 4.3.4.

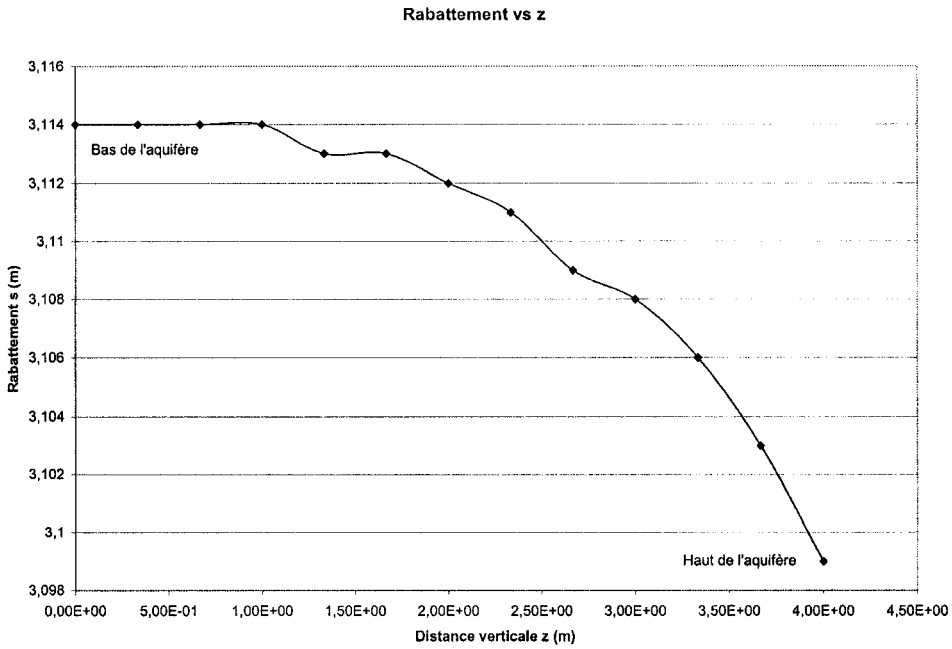


Figure 6.4 : À r=1m, rabattement dans l'aquifère selon z.

Tableau 6.1: Valeurs de rabattement dans l'aquifère prises en haut, au centre et en bas de celui-ci à r=1m pour le cas 13.

Cas à l'étude	Mesures prises à r=1m		
	s_h (z=3.7m)	s_c (z=2m)	s_b (z=0.3m)
Cas 13 K/K'=100; b=b'=4m	3.103m	3.112m	3.114m

Comparativement à la différence de 12mm calculée avec Seep/w 4 entre le haut et le bas de l'aquifère, les calculs de la nouvelle version donne une différence de 11mm entre le haut et le bas de l'aquifère. Il y a donc une diminution peu significative de 1mm entre la différence de rabattement mesurée en haut et en bas de l'aquifère avec les logiciels Seep/w 4 et Seep/w 5. Le rabattement ne change pas beaucoup selon l'axe des z, l'impact est plutôt significatif selon l'axe des x.

6.3 RÉGIME TRANSITOIRE NE CONSIDÉRANT PAS S' – LA MÉTHODE DE WALTON (1962)

Avec Seep/w 4, les graphiques de rabattement numérique et théorique ne concordaient pas au-delà du rayon d'action r_o=44.8m. Le cas où r=140m avait un pourcentage de différence entre les pentes des courbes de rabattement numérique et théorique de 12.5% entre 1000s et 2000s tendis que pour le cas où r=200m, les courbes de rabattement étaient tellement divergentes qu'il était impossible de calculer un pourcentage de différence. Ces deux cas, ainsi que ceux ayant un $r<r_o$ (r=3m, 20m et 40m), ont été recalculés avec Seep/w 5. Le pourcentage de différence entre les pentes des courbes de rabattement numérique et théorique calculé avec Seep/w 5 pour les cas où $r<r_o$ est identique au pourcentage calculé avec Seep/w 4 sauf pour r=20m qui passe de -0.6% à -0.3%. Cependant, pour les deux cas où $r>r_o$, la comparaison entre les courbes de

rabattement numérique et théorique s'est grandement améliorée (figure 6.5 et 6.6 à comparer avec figure 5.2 et 5.3).

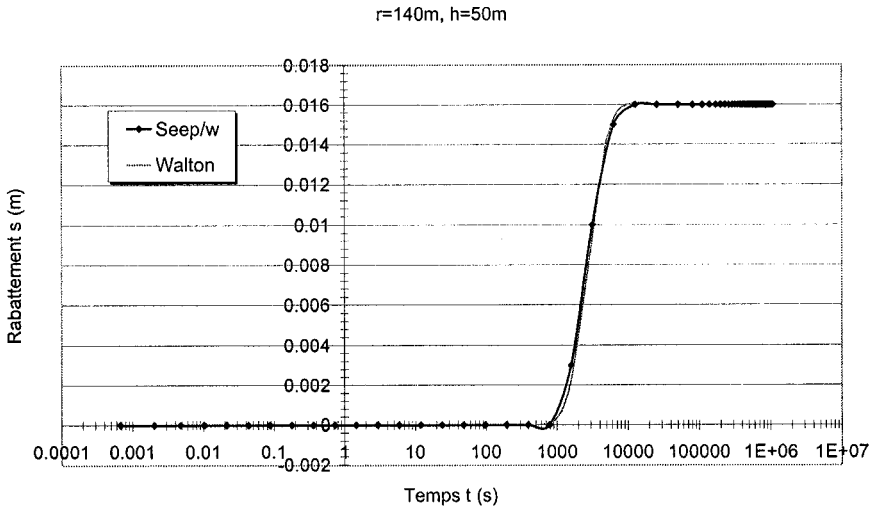


Figure 6.5: Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 140m pour la méthode de Walton (1962).

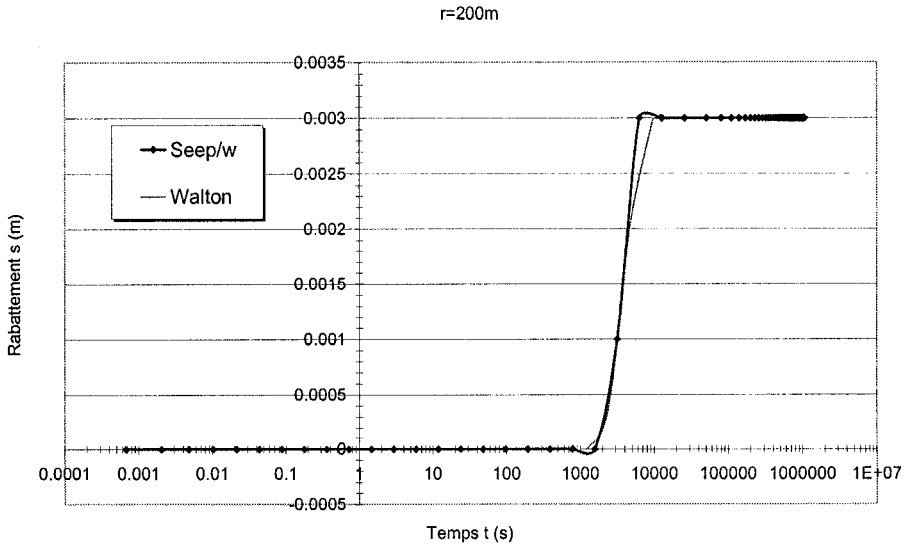


Figure 6.6 : Comparaison entre la courbe numérique et théorique de rabattement en fonction du temps lorsque r = 200m pour la méthode de Walton (1962).

Avec Seep/w 5, pour le cas où r=140m, le pourcentage de différence entre les pentes numérique et théorique est maintenant de 4.5%. Pour r=200m, les courbes de rabattement sont présentement comparables avec un pourcentage de différence de -8.9% entre 2000s et 4000s et un pourcentage de différence de -120% entre 4000s et 10 000s.

6.4 RÉGIME TRANSITOIRE CONSIDÉRANT S'

6.4.1 La méthode de Hantush (1956)

Les essais ont été faits avec une valeur de $S_1'=3.9228*10^{-3}$. Les rayons étudiés sont les même que ceux de la section 5.4.2 soit r=0.507m, 2.52m, 25.3m, 50.6m et 101.2m. Les simulations avec Seep/w 5 impliquant les cas ayant un $r<r_o$ (r_o=44.8m) ainsi que celui où r=50.6m, donnent les même résultats qu'avec Seep/w 4. Seul le cas où r=101.2m présente une différence entre les courbes de rabattement numérique et théorique (figure 6.7). En effet, les courbes sont comparables jusqu'à 7000 secondes environ avec la cinquième version de Seep/w tendis qu'elles sont comparables jusqu'à 3100 secondes environ avec la quatrième version de Seep/w.

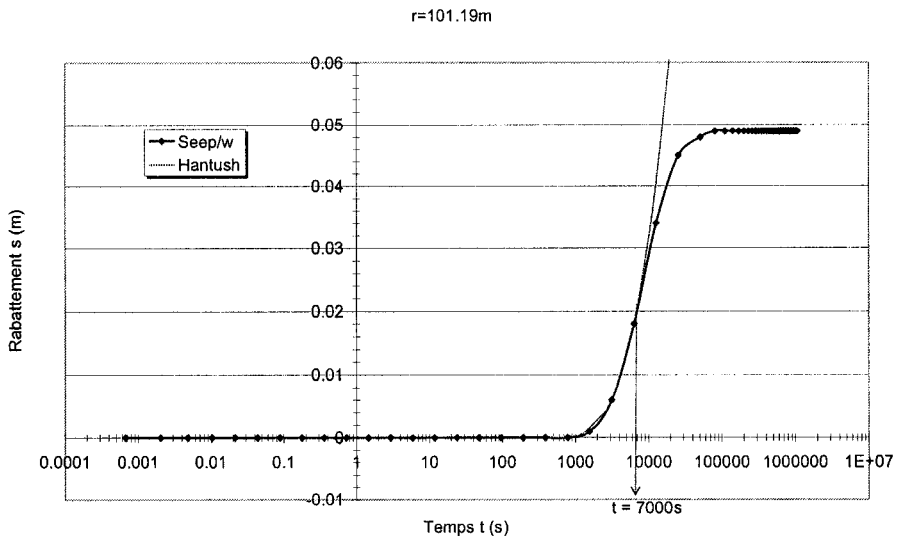


Figure 6.7 : Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Hantush (1960) pour $r>r_o$ où $r=101.2m$ et $S_1'=3.9228*10^{-3}$.

Donc, la différence entre les calculs des deux versions de Seep/w se fait seulement sentir à grande distance, après le rayon d'action.

6.4.2 La méthode de Neuman et Witherspoon (1972)

Les deux grilles, celle décrite à la section 4.3.2 et celle avec l'aquitard raffiné, ont été analysées ainsi que les autres paramètres (S_1', ß, etc.) tout comme dans la section 5.4.3. Évidemment, les mêmes rayons que dans l'étude avec Seep/w 4 ont été considérés afin de comparer l'influence de la nouvelle version de Seep/w. Pour la grille-1, la grille "normale", les calculs numériques effectués avec la nouvelle version ne donnent plus de

rabattement négatif. Même si la courbe numérique prend une tangente négative (figure 6.8), les valeurs attribuées aux nœuds ne sont pas négatives. De cette façon, les courbes de rabattement obtenues avec la nouvelle version pour la grille-1 sont plus près de la courbe théorique. Lorsque r=25.3m, il n'y a plus de différence entre le modèle numérique "normal" et le modèle ayant un aquitard raffiné (grille-2) contrairement aux cas où r=0.507m et 2.52m qui eux, ont de meilleurs comparaisons entre numérique/théorique avec le modèle raffiné. Pour sa part, la grille-2 ne subit aucun changement peu importe la version de Seep/w utilisée.

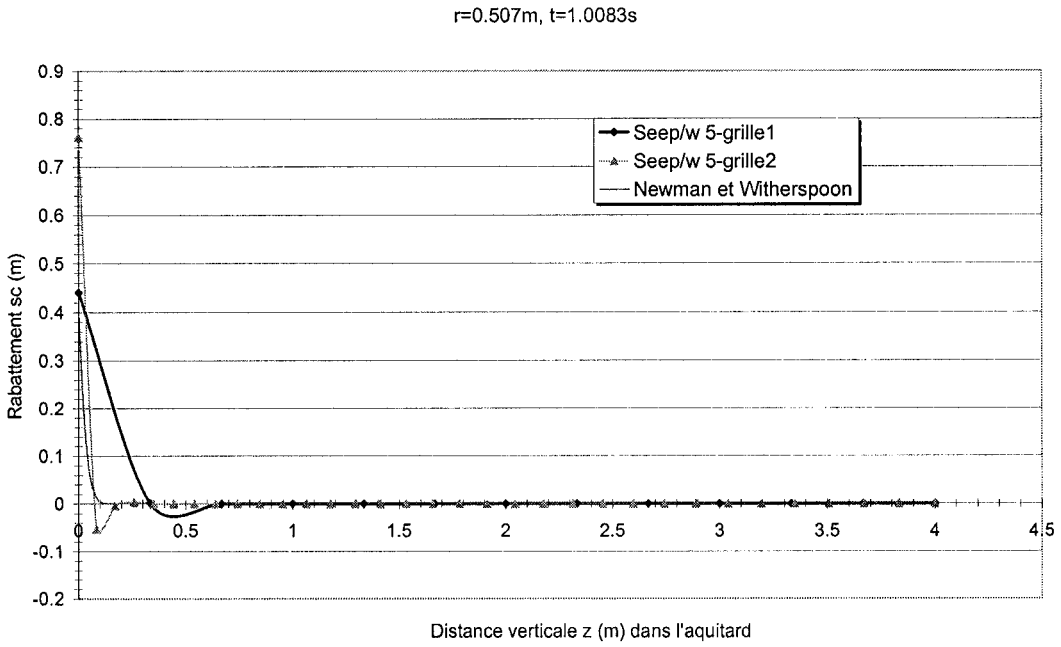


Figure 6.8: Comparaison entre la courbe de rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=0.507m et t=1.0083

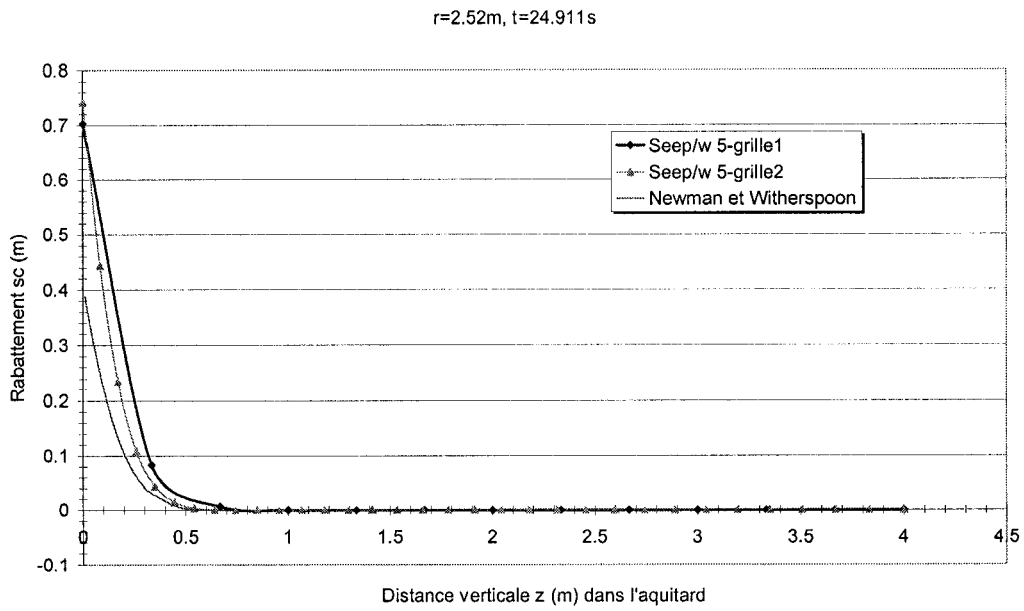


Figure 6.9: Comparaison entre la courbe rabattement calculée numériquement et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=2.52m et t=24.911s.

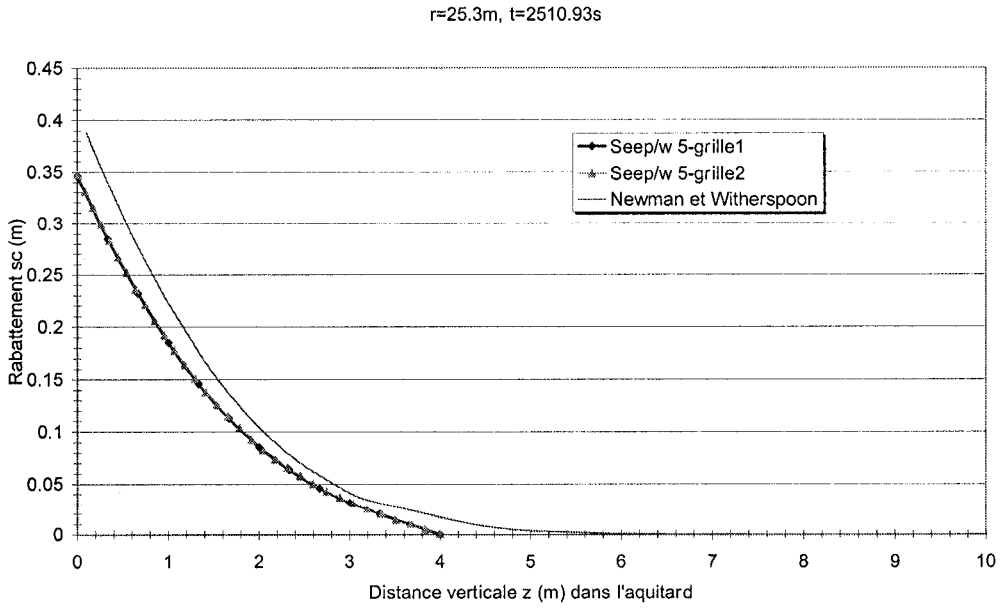


Figure 6.10: Comparaison entre la courbe de rabattement numérique et celle prédite par Neuman et Witherspoon (1972) pour r=25.3m et t=2510.93s.

6.5 CONCLUSION

Comparativement à l'ancienne version de Seep/w, Seep/w 5 est plus performant pour des calculs effectués en régime permanent autant qu'en régime transitoire. Les débits parasites ont été éradiqués, les lignes d'écoulement sont plus régulières, les rabattements négatifs ont été éliminés et les courbes de rabattement sont comparables même à des distances deux fois supérieures au rayon d'action. Donc, les calculs numériques obtenus avec la nouvelle version, Seep/w 5, sont plus près des calculs théoriques.

CHAPITRE VII

ÉTUDE D'UN POMPAGE DANS UN AQUIFÈRE À NAPPE SEMI-CAPTIVE POUR UN CAS RÉALISTE

7.1 INTRODUCTION

Une des hypothèses simplificatrices du chapitre II mentionne que le rabattement dans l'aquifère à nappe libre doit être négligeable. Ceci implique que la surface piézométrique de cet aquifère doit rester constante durant tout le pompage. Le débit d'eau extrait par pompage d'un aquifère à nappe libre provient presque exclusivement de la recharge par les eaux atmosphériques (Chapuis, 1999). Donc, pour que la surface piézométrique de l'aquifère à nappe libre reste constante, il faut que la recharge par les eaux atmosphériques soit constante sur toute la surface de l'aquifère et ce, tout au long de l'année. À moins de pomper sous un lac ou une rivière, cette hypothèse est utopique. Pour cette étude de cas réaliste, la hauteur de la surface de la nappe libre n'est pas constante sur toute la longueur du modèle mais seulement à un rayon R où l'on simule la présence d'une île entourée d'eau (figure 7.1).

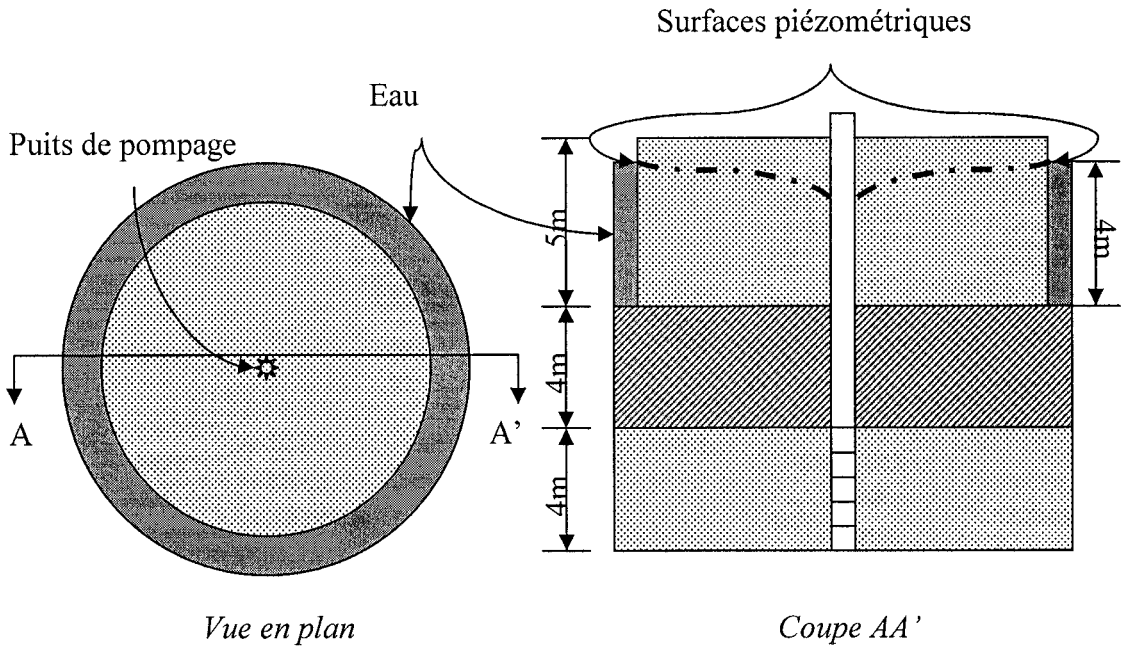


Figure 7.1 : Vue en plan et en coupe du cas réaliste.

L'analyse du cas réaliste se fera selon trois théories vues précédemment soit la théorie de DeGlee (1951) pour le régime permanent, la théorie de Walton (1962) pour le régime transitoire ne considérant pas S' et la théorie de Hantush (1960) pour le régime transitoire considérant S'. Les calculs numériques seront tous effectués avec la nouvelle version 5 de Seep/w.

7.2 DESCRIPTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle utilisé pour la simulation numérique est semblable au cas 13 décrit dans le chapitre IV et V. L'ajout d'une nouvelle unité géologique, la diminution du rayon R du modèle et la modification des conditions aux limites sont les trois changements apportés au cas 13 dans l'étude du cas réaliste.

7.2.1 Caractéristiques hydrauliques et géométriques

La nouvelle unité géologique est un aquifère à nappe libre homogène et isotrope de 5m d'épaisseur situé au-dessus de l'aquitard d'épaisseur b'=4m (figure 7.1). Cet aquifère a les mêmes propriétés hydrauliques que l'aquifère à nappe semi-captive d'épaisseur b=4m soit un sable de $K_s=1*10^{-4}$m/s et un $S=3.9228*10^{-4}$. Ce qui change, c'est la définition de la courbe de teneur en eau dans la zone non saturée. Les données de teneur en eau versus la pression sont tirées de la banque d'exemples de Seep/w (Fn_metre.sep, fonction #1) et quelques points y ont été ajoutés afin d'obtenir une meilleure précision. L'aquitard a un $K'=1*10^{-6}$ m/s et un $S'=3.9228*10^{-3}$ (S'_1).

7.2.2 Conditions aux limites

Une charge constante de 12m (h=12m) est appliquée verticalement sur une hauteur de 4m à l'extrémité du modèle de l'aquifère à nappe libre (figure 7.1). Le rabattement au puits est de 5m en régime permanent donc en régime transitoire le débit unitaire q au puits est le même que celui imposé au cas 13 soit $8.225*10^{-4}$ m/s. Pour comparer avec la théorie, on a considéré une charge constante de 12m appliquée sur la surface supérieure de l'aquitard (z=8m).

7.2.3 Grille numérique et rayon du modèle

Lors de sa construction, la grille numérique a été raffinée verticalement dans le haut de l'aquifère à nappe libre afin de bien calculer les différences de pression et les variations de teneur en eau provoquées par la désaturation de l'aquifère à nappe libre lors du pompage. Les bases de construction de la grille numérique sont les mêmes que celles utilisées dans la section 4.3.2 pour l'aquifère à nappe semi-captive et pour l'aquitard. Seul, le critère selon l'axe des z change pour l'aquifère à nappe libre.

- De 8m à 13m: 30 éléments avec un ratio de 10.

Le rayon du modèle numérique R influence les rabattements mesurés dans l'aquifère à nappe semi-captive (figure 7.2). La courbe de rabattement pour R=1000m est plus distante de la courbe de rabattement de DeGlee (1951) que la courbe de rabattement pour R=200m. Ceci s'explique par le fait que l'on impose la recharge de la nappe libre à la limite du modèle numérique donc à r=R. Plus la recharge est loin du puits de pompage, plus le rabattement numérique est loin du rabattement théorique

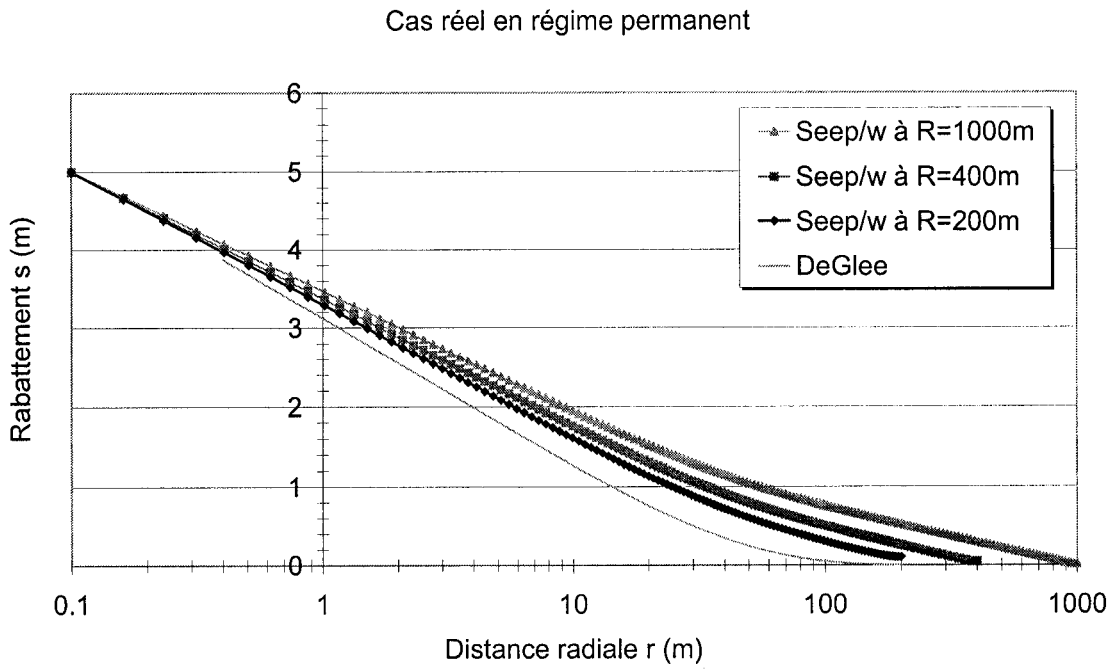


Figure 7.2 : Comparaison de la courbe rabattement théorique de DeGlee (1951) avec les courbes de rabattements obtenues selon différentes valeurs de rayon R en régime permanent.

Toutefois, on a constaté que le rayon du modèle R n'influence pas les courbes de rabattement obtenues numériquement en régime transitoire. Donc, l'étude considère les trois valeurs de R (200m, 400m et 1000m) afin d'établir l'influence de cette condition limite sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère à nappe semi-captive.

7.3 RÉGIME PERMANENT

À partir des simulations de la figure 7.2, le débit Q_w, le r_o et le Δs ont été relevés dans le but d'appliquer les équations de Hantush-Jacob (1955) et de comparer ces résultats avec ceux entrés initialement dans le modèle numérique.

Tableau 7.1 : Calculs et résultats du cas réaliste obtenus pour R=200m, 400m et 1000m.

		Calculs de Seep/w 5			Application de H-J (1955)			
R (m)	s_w (m)	Q_w (m^3/s)	r_o (m)	Δs (m)	T (m^2/s)	L (m)	K (m/s)	K' (m/s)
200	5	$1.88*10^{-3}$	86.2	0.1893	$3.64*10^{-3}$	77.0	$9.09*10^{-4}$	$2.45*10^{-6}$
400	5	$1.80*10^{-3}$	117.5	0.1811	$3.64*10^{-3}$	104.9	$9.09*10^{-4}$	$1.32*10^{-6}$
1000	5	$1.69*10^{-3}$	184.2	0.1702	$3.64*10^{-3}$	164.5	$9.09*10^{-4}$	$5.37*10^{-7}$
Données entrées dans Seep/w					*$4.00*10^{-4}$*	*40*	*$1.00*10^{-4}$*	*$1.00*10^{-6}$*

Le L a été déterminé à l'aide de l'équation 2.6 (r_o=1.12*L) et le K a été déterminé à l'aide de l'équation 2.5 ($K=2.30Q/2\pi\Delta s_m b$). Par la suite, le K' a été calculé à l'aide de l'équation 2.3 ($K'=Kbb'/L^2$) et finalement la transmissivité T a été établie avec la valeur de K trouvée précédemment (T=Kb).

En régime permanent, le débit pompé diminue avec l'augmentation de R, donc Q_w est inversement proportionnel à R. La logique est la même pour le Δs. Par conséquent, le r_o augmente proportionnellement avec R pour pratiquement doubler entre R=200m et R=1000m (figure 7.2). Les trois valeurs de K sont identiques donc indépendantes de R, mais sont neuf fois plus grandes que la valeur utilisée numériquement de $K=1*10^{-4}$ m/s. Les trois valeurs de K' sont inversement proportionnelles à R et elles ont un pourcentage de différence de 145%, 32% et -46% pour des R=200m, 400m et 1000m respectivement. Il est normal que le K' ait un plus grand pourcentage de différence quand R=200m car la superficie est faible comparativement à l'hypothèse simplificatrice d'un aquifère infini.

7.4 RÉGIME TRANSITOIRE NE CONSIDÉRANT PAS S'

Un temps de calcul numérique de 14 ans a été utilisé pour le régime transitoire. Ce temps est nécessaire pour bien voir l'aspect "ondulé" de la courbe de rabattement numérique (figure 7.3). La courbe de rabattement théorique de Walton s'arrête à 6h (22 065s) lorsque r=3m, et à 3h30 (12 258s) lorsque r=20m. Durant tout le temps où la

courbe théorique de Walton est présente, les courbes de rabattement numérique et théorique sont identiques, indépendamment du R. Après, les courbes divergent du régime permanent pour ensuite se dissocier (à environ 20 jours) selon les différents R. Plus le R est grand et plus le rabattement final est important avec une différence de 1m environ entre R=200m et R=1000m. Cet effet est attribuable à une réponse lente de la part de la nappe libre qui doit parcourir une distance latérale pour ensuite percoler dans l'aquitard. Plus la limite de recharge est éloignée et plus le rabattement au puits est important. Dans un contexte d'un essai de pompage de 72h, il serait possible de voir l'influence de la nappe libre qui recharge un aquifère à nappe semi-captive.

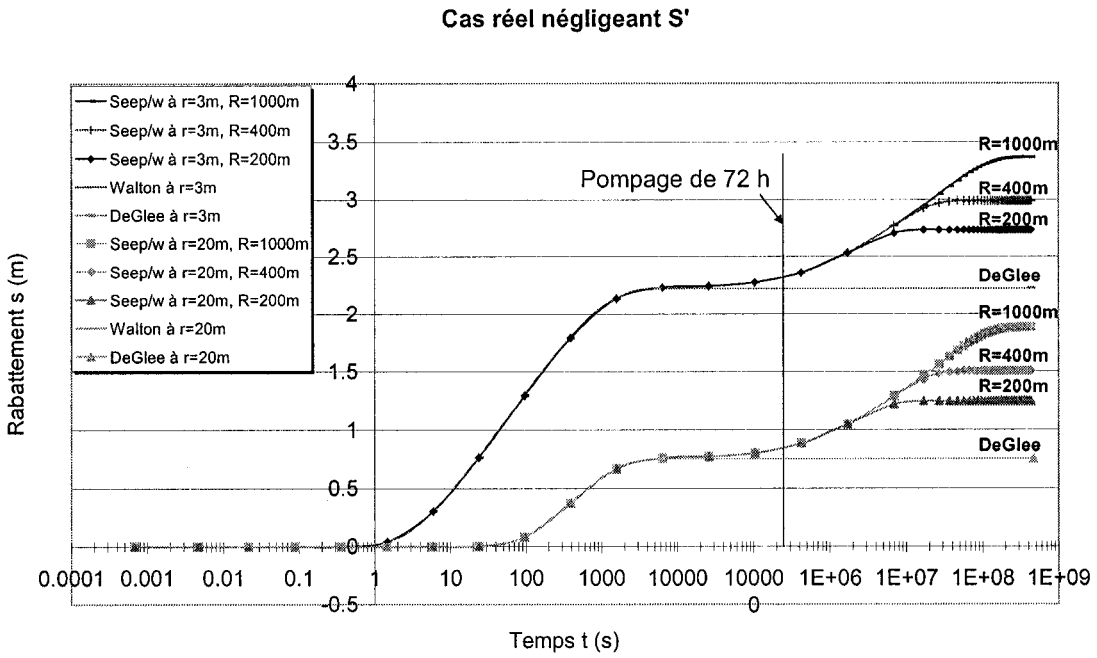


Figure 7.3 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique de Walton (1962) pour des $r<r_o$ correspondant à 3m et 20m pour R=200m, 400m et 1000m.

7.5 RÉGIME TRANSITOIRE CONSIDÉRANT S'

La valeur de S' choisie est $3.9228*10^{-3}$ (S'_1). Pour un même r et durant tout le temps des courbes de rabattement de Walton (1960), les courbes numériques à R=200m, 400m et 1000m sont concordantes (figure 7.4). Donc, les valeurs de K, K' et S' sont les mêmes que celles entrées initialement dans le logiciel Seep/w 5. Après le régime transitoire, les courbes semblent atteindre un régime proche de celui de DeGlee mais le rabattement s'intensifie jusqu'à l'obtention du régime permanent réel, celui via la nappe libre. Pour un pompage de 72h, il est possible de voir l'influence de la nappe libre mais cette influence est plus visible dans les piézomètres situés près du puits (0.5m). À très grande distance (100m), il est impossible de voir cette influence à moins de pomper très longtemps (plusieurs jours). La valeur de temps imposée par la condition simplificatrice ($t<1569s$) est respectée et surpassée dans les tous les cas. Les courbes sont comparables jusqu'à ce que $t\approx6000s$ ce qui est analogue au temps obtenu lors de la simulation d'un aquifère à nappe semi-captive respectant les hypothèses simplificatrices de la section 5.4.2.

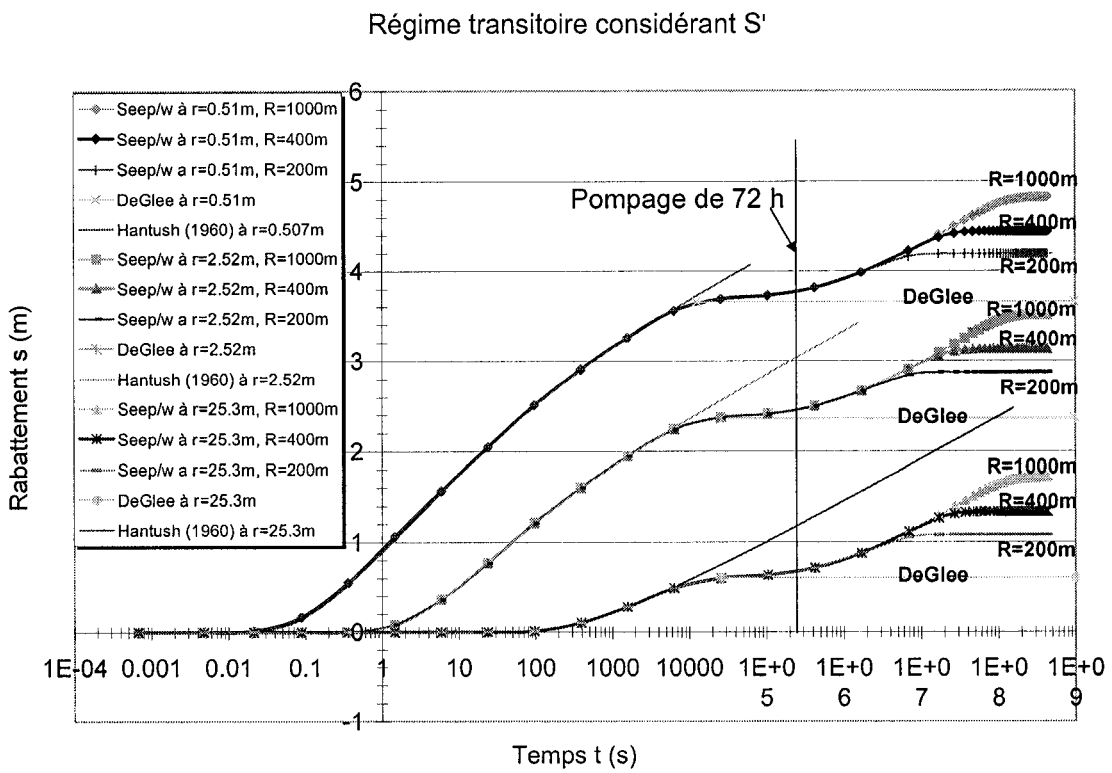


Figure 7.4 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique de Hantush (1960) avec S_1' pour $r<r_o$ correspondant à 0.507m, 2.52 et 25.3m.

7.6 CONCLUSION

Lors de la simulation d'un cas où l'hypothèse simplificatrice sur la hauteur de la nappe libre constante n'est pas respectée, deux comportements se manifestent. Avec les méthodes de Walton et de Hantush pour la phase transitoire, les valeurs de K, K' et S' (pour Hantush seulement) sont identiques à celles entrées dans le modèle numérique puisque les courbes sont concordantes. Au contraire, en régime permanent, les courbes de

rabattement numérique et théorique divergent et la divergence augmente en fonction de R. Le pourcentage de différence est de +809% entre le K du régime permanent et le K entré initialement dans le modèle numérique. En comparaison, les méthodes d'analyses donnent

K (permanent) > K (transitoire=théorie)

car il existe, dans ce cas réaliste, une distance supplémentaire (et un temps) pour que la perturbation de pression engendrée par le pompage se fasse sentir verticalement et horizontalement dans la nappe libre. Cette distance était inexistante lorsque la condition limite se situait immédiatement au-dessus de l'aquitard. Le temps que prend l'eau de la nappe libre pour avoir une influence sur la courbe de rabattement est plus long que le temps théorique du régime transitoire (quand on néglige les pertes de charge dans l'aquifère supérieure). Cette influence se fait sentir après avoir atteint un palier équivalent au régime permanent théorique. Mais lors d'un essai de pompage de 72h, il est possible de voir l'influence de la nappe libre. La position de la recharge (R) joue un rôle à 20 jours (dans les conditions de l'essai) ainsi plus la recharge est loin et plus le rabattement est important à long terme jusqu'à l'atteinte du régime permanent.

Toutes les simulations effectuées ne considèrent pas l'influence des phénomènes de surface tel que les précipitations, l'évapo-transpiration, etc. L'incorporation de ces phénomènes changerait les courbes de rabattement.

CHAPITRE VIII

CONCLUSION

Les théories existantes traitant d'un aquifère à nappe semi-captive imposent des conditions d'applications qui peuvent être dépassées. Les courbes de rabattement d'un modèle numérique optimisé montrent qu'il est possible d'utiliser les théories même si le cas étudié ne respecte pas les conditions émises par leurs auteurs.

En régime permanent, le pourcentage de différence entre un cas numérique ne respectant pas les conditions d'applications et la théorie dépend des rapports K/K' et b/b'. En se basant sur les résultats calculés à partir de quelques modèles numériques tels qu'élaborés au chapitre 3, il semble que le pourcentage de différence diminue lorsque le rapport b/b' se rapproche de 1. Toutefois, des calculs effectués à partir d'autres logiciels tel que Seep/w 5 sont nécessaires pour vérifier cette tendance. Néanmoins, il est possible avec l'étude des modèles numériques, de traiter un aquifère à nappe semi-captive qui ne respecte pas les conditions d'application initiales des auteurs. Ceci est réalisable en ajoutant, aux calculs théoriques, le pourcentage de différence (évalué numériquement) qui correspond aux rapports géométriques et hydrauliques du cas analysé.

En régime transitoire, pour le cas K/K'=100 et b/b'=1, toutes les modélisations concordent avec les théories sauf celle de Neuman et Witherspoon (1972) qui semble nécessiter une très grande finesse de la grille numérique. La comparaison entre les courbes de rabattement numériques et celles de Hantush (1956) montre que la condition d'application sur le temps a une trop faible valeur et qu'elle ne tient pas compte de l'influence du S'. Aussi, la comparaison est meilleure lorsque $r<r_o$ et elle se détériore avec l'augmentation de r.

Lorsque l'hypothèse simplificatrice concernant un rabattement négligeable de l'aquifère à nappe libre n'est pas respectée, alors la théorie en régime transitoire est applicable aux rabattements, mais celle du régime permanent ne l'est pas. En régime permanent, les courbes varient selon la position de la frontière de recharge (figure 7.2).

Finalement, les calculs numériques effectués avec la nouvelle version de Seep/w (version 5, sortie en 2002) donne des résultats plus près des prédictions théoriques que ceux faits avec Seep/w version 4.

RÉFÉRENCES

ANONYME 1964. Steady flow of groundwater towards wells. Proc. Comm. Hydrol. Research TNO, **10**: 179.

ASTM. 1995. Standard test method for (analytical procedure) for determining transmissivity and storage coefficient of a confined nonleaky or leaky aquifer by constant drawdown method in a flowing well (D5855). *In* Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.09. ASTM, Philadelphia, Pa.

ASTM. 1996. Standard test method (analytical procedure) for determining properties of a confined aquifer taking into consideration storage of water in leaky confining beds by modified Hantush method (D6028). *In* Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.09. ASTM, Philadelphia, Pa.

ASTM. 1996. Standard test method (analytical procedure) for determining hydraulic properties of a confined aquifer and a confining bed with negligible storage by the Hantush-Jacob method (D6029). *In* Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.09. ASTM, Philadelphia, Pa.

BATHE, K-J. 1982. Finite element procedure in engineering analysis. Prentice-Hall, 200-230.

CHAPUIS, R.P. 1999. Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Les publications du Québec, 156.

CHAPUIS, R.P., CHENAF, D., BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., et CRESPO, R. 2001. A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. Canadian Geotechnical Journal, **38:** 1113-1126.

CHENAF, D. 1997. Détection des frontières pendant la phase remontée des essais d'aquifère. Ph. D. École Polytechnique de Montréal, Montréal.

CHENG, A.H.-D. and MOROHUNFOLA, O.K. 1993. Multilayered leaky aquifer systems: 1. Pumping well solutions. Water Resources Research, **29**: 2787-2800.

COOPER, H.H. Jr., and JACOB, C.E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American geophysical Union, **27**(4): 526-534.

DEGLEE, G.J. 1930. Over grondwaterstomingen bij wateronttrekking door middle van putten. Thesis. J. Waltman, Delft (The Nethelands): 175.

DEGLEE, G.J. 1951. Berekeningsmethoden voor de winning van groundwater. In: Drinkwatervoorziening, 3e Vacantiecursus: 38-80 Moorman's periodieke pers, The Hague.

DERIDDER, N.A. 1961. The hydraulic characteristics of the Tielerwaard calculated from pumping test data (in Dutch). Inst. Land and Water Manag. Res., Wageningen, Report no **83**: 15.

GEO-SLOPE. 1998. Seep/W for finite element seepage analysis. User's guide. Geo-Slope, Calgary, Alberta, Canada.

GREEN, R.E. and COREY, J.C. 1971. Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods. Soil Science of America Proceedings, **35**:3-8.

HANTUSH, M.S. 1956. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Transactions American Geophysical Union, **37**: 702-714.

HANTUSH, M.S. 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. Journal of Geophysical Research, **65**: 3713-3725.

HANTUSH, M.S. 1964. Hydraulic of wells. In: V.T. Chow (editor). Advanced in hydroscience, **1**: 281-432.

HANTUSH, M.S. et JACOB, C.E. 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Transactions American Geophysical Union, **36**(1): 95-100.

HANTUSH, M.S. 1967. Flow to wells in aquifers separated by semipervious layer. Journal of Geophysical Research, **72**: 1709-1720.

HEMKER, C.J. 1984. Steady groundwater flow in leaky multiple-aquifer systems. Journal of Hydrology, **72**: 355-374.

HEMKER, C.J. 1985. Transient well flow in leaky multiple-aquifer systems. Journal of Hydrology, **81**: 111-126.

HEMKER, C.J. and C. MAAS. 1987. Unsteady flow to wells in layered and fissured aquifer systems. Journal of Hydrology, **90**: 231-249.

HEMKER, C.J. and C. MAAS. 1994. Comment on "Multilayered leaky aquifer systems, 1, Pumping well solutions" by A.H.-D. Cheng and O.K. Morohunfola. Water Resources Research, **30**(11): 3229-3230.

HERRERA, I. 1970. Theory of multiple leaky aquifers. Water Resources Research, **6**: 185-193.

HERRERA, I. 1976. A review of the integrodifferential equations approach to leaky aquifer mechanics. Adv. Groundwater Hydrol., 29-47.

HERRERA, I. and RODARTE, L. 1973. Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers and applications – 1. The nature of approximate theories. Water Resources Research, **9:** 995-1015.

HERRERA, I., and YATES, R. 1977. Integrodifferential equations for systems of leaky aquifers and applications – 3. A numerical method of unlimited applicability. Water Resources Research, **13**: 725-732.

HUISMAN, L. 1972. Groundwater recovery. MacMillan: 336.

HUNT, B. 1985. Flow to a well in a multiaquifer system. Water Resources Research, **21**: 1637-1641.

HVORSLEV, M.J. 1951. Time-lag and soil permeability in ground water observations. Bulletin 36, U.S. Army Eng. Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.Hvorslev, 1951

INDELMAN, P., DAGAN, G., CHENG, A.H.-D. and OUAZAR, I. 1966. Sensitivity analysis of flow in multilayered leaky aquifer systems. Hydraulic Engineering, **122**(1): 41-45

KIRKHAM, D. 1964. Exact theory for the shape of the free water surface about a well in a semi-confined aquifer. Journal of Geophysical Research, **69**(12).

KRUSMAN, G.P. et DE RIDDER, N.A. 1990. Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, The Netherlands.

LAI, R.Y.S. and C. W. SU. 1974. Non steady flow to a large well in a leaky aquifer. Journal of Hydrology, **22**: 333-345.

M.E.F. 1995. Les périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine. Les publications du Québec, 55.

MÉGNIEN, C. 1979. Hydrogéologie du centre du basin de Paris. Mémoire BRGM n°98.

NEUMAN, S.P. et WITHERSPOON, P.A. 1968. Theory of flow in aquicludes adjacent to slightly leaky aquifers. Water Resources Research, **4**(1): 103-112.

NEUMAN, S.P. et WITHERSPOON, P.A. 1969a. Theory of flow in a confined two aquifer system. Water Resources Research, **5**(4): 803-816.

NEUMAN, S.P. et WITHERSPOON, P.A. 1969b. Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. Water Resources Research, **5**(4): 817-829.

NEUMAN, S.P. et WITHERSPOON, P.A. 1972. Field determination of hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. Water Resources Research, **8**: 1284-1298.

SCHROTH, B., NARASIMHAN, T.N. 1997. Application of a numerical model in the interpretation of a leaky aquifer test. Ground Water, **35:** 371-375.

THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions, American Geophysical Union, **16**: 519-524.

VANDENBERG, A. 1977. Type curves for analysis of pump tests in leaky strip aquifers. Journal of Hydrology, **33**: 15-26.

WALTON, W.C. 1960. Leaky artesian aquifer conditions in Illinois. Illinois State Water Survey Report of Investigation, 39, Urbana, 27p.

WALTON, W.C. 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey Bull., **49**: 81.

WITHERSPOON, P.A., J. JAVANDEL, S.P. NEUMAN, et R.A. FREEZE. 1967. Interpretation of aquifer gas storage conditions from water pumping tests. Amer. Gas. Assoc. New York: 273.

ANNEXE 1

Tableau 1: Résultats de la grille sans *ratio*

Cas		Débit Q						Rayon d'action r_o		
Nx	Nz	$f_v=Q_h/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_v/2\pi$ (m^3/s)	$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence entre $Q_{(h;v)}$ numérique et $Q_{thé}$		r_o num (m)	r_o thé (m)	% différence
						Q_h	Q_v			
20	10	$7.79*10^{-4}$	$9.19*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.85	+93.0%	+127.5%	44.0	14.2	209.9%
20	20	$7.79*10^{-4}$	$9.03*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.86	+92.9%	+123.7%	44.1	14.2	210.6%
20	30	$7.78*10^{-4}$	$1.11*10^{-3}$	$4.04*10^{-4}$	0.70	+92.7%	+173.6%	44.3	14.2	212.0%
20	40	$7.82*10^{-4}$	$1.22*10^{-3}$	$4.04*10^{-4}$	0.64	+93.6%	+202.7%	43.0	14.2	202.8%
20	50	$7.81*10^{-4}$	$9.92*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.78	+93.3%	+145.6%	43.6	14.2	207.0%
40	10	$6.54*10^{-4}$	$7.23*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.90	+61.9%	+78.9%	55.8	14.2	293.0%
40	20	$6.54*10^{-4}$	$6.25*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.05	+61.9%	+54.7%	55.8	14.2	293.0%
40	30	$6.53*10^{-4}$	$8.98*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.73	+61.8%	+122.4%	56.0	14.2	294.4%
40	40	$6.54*10^{-4}$	$8.65*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.76	+61.9%	+114.2%	55.8	14.2	293.0%
40	50	$6.54*10^{-4}$	$9.14*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.72	+61.9%	+126.4%	55.8	14.2	293.0%
60	10	$5.95*10^{-4}$	$6.10*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.98	+47.2%	+51.0%	59.2	14.2	316.9%
60	20	$5.95*10^{-4}$	$5.89*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.01	+47.3%	+45.9%	59.5	14.2	319.0%
60	30	$5.95*10^{-4}$	$5.14*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.16	+47.3%	+27.3%	59.4	14.2	318.3%
60	40	$5.94*10^{-4}$	$7.14*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.83	+47.2%	+76.9%	59.7	14.2	320.4%
60	50	$5.95*10^{-4}$	$8.41*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.71	+47.3%	+108.3%	59.4	14.2	318.3%
80	10	$5.59*10^{-4}$	$5.92*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.94	+38.4%	+46.5%	59.6	14.2	319.7%
80	20	$5.59*10^{-4}$	$5.67*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.99	+38.4%	+40.3%	59.7	14.2	320.4%
80	30	$5.59*10^{-4}$	$6.42*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.87	+38.5%	+58.9%	59.4	14.2	318.3%
80	40	$5.59*10^{-4}$	$5.88*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.95	+38.4%	+45.7%	59.6	14.2	319.7%
80	50	$5.59*10^{-4}$	$3.14*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.78	+38.4%	-22.2%	59.7	14.2	320.4%
100	10	$5.35*10^{-4}$	$5.43*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.99	+32.4%	+34.4%	57.9	14.2	307.7%
100	20	$5.35*10^{-4}$	$5.34*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.00	+32.4%	+32.3%	58.0	14.2	308.5%
100	30	$5.35*10^{-4}$	$5.92*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.90	+32.4%	+46.6%	58.1	14.2	309.2%
100	40	$5.35*10^{-4}$	$6.69*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.80	+32.5%	+65.7%	57.9	14.2	307.7%
100	50	$5.35*10^{-4}$	$6.10*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.88	+32.4%	+51.1%	58.0	14.2	308.5%

Tableau 2 : Résultats de la grille avec un facteur *ratio* présent selon l'axe des x (Fx) seulement

Nz = 20 = cte pour tous les cas

Cas		Débit Q						Rayon d'action r_o			Noeuds	
Nx	Fx	$f_v=Q_h/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_v/2\pi$ (m^3/s)	$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence entre $Q_{(h;v)}$ numérique et $Q_{thé}$		r_o num (m)	r_o thé (m)	% différence	2ème (m)	Total sur x
						Q_h	Q_v					
20	5	$5.98*10^{-4}$	$6.95*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.86	+48.1%	+72.1%	57.2	14.2	+302.8%	3.43	21
20	20	$4.85*10^{-4}$	$6.61*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.73	+20.0%	+63.6%	22.4	14.2	+57.7%	1.05	21
20	50	$4.54*10^{-4}$	$4.96*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.92	+12.4%	+22.8%	19.8	14.2	+39.4%	0.49	21
20	100	$4.51*10^{-4}$	$4.35*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.04	+11.7%	+7.7%	19.6	14.2	+38.0%	0.30	21
20	300	$4.68*10^{-4}$	$4.51*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.04	+15.8%	+11.6%	20.7	14.2	+45.8%	0.17	21
20	500	$4.97*10^{-4}$	$3.44*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.44	+23.0%	-14.7%	23.1	14.2	+62.7%	1.23	**20**
40	5	$5.18*10^{-4}$	$5.26*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.98	+28.4%	+30.2%	25.8	14.2	+81.7%	1.77	41
40	20	$4.42*10^{-4}$	$3.80*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.16	+9.6%	-6.0%	19.0	14.2	+33.8%	0.58	41
40	50	$4.24*10^{-4}$	$4.36*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.97	+5.0%	+7.9%	17.3	14.2	+21.8%	0.30	41
40	100	$4.22*10^{-4}$	$4.46*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.95	+4.4%	+10.5%	16.9	14.2	+19.0%	0.20	41
40	300	$4.31*10^{-4}$	$3.89*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.11	+6.8%	-3.7%	18.0	14.2	+26.8%	0.42	**40**
40	500	$4.30*10^{-4}$	$5.28*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.81	+6.4%	+30.9%	17.8	14.2	+25.4%	0.40	**40**
60	5	$4.85*10^{-4}$	$5.76*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.84	+20.0%	+42.7%	22.6	14.2	+59.2%	1.21	61
60	20	$4.28*10^{-4}$	$4.71*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.91	+5.9%	+16.7%	17.6	14.2	+23.9%	0.42	61
60	50	$4.16*10^{-4}$	$3.99*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.04	+3.1%	-1.3%	16.6	14.2	+16.9%	0.23	61
60	100	$4.14*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.96	+2.6%	+6.9%	16.4	14.2	+15.5%	0.17	61
60	300	$4.17*10^{-4}$	$3.98*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.05	+3.2%	-1.4%	16.7	14.2	+17.6%	0.26	**60**
60	500	$4.16*10^{-4}$	$3.48*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.20	+3.0%	-13.9%	16.5	14.2	+16.2%	0.24	**60**

Tableau 2 (suite)

Nz = 20 = cte pour tous les cas

Cas		Débit Q						Rayon d'action r_o			Noeuds	
Nx	Fx	$f_v=Q_h/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_v/2\pi$ (m^3/s)	$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence entre $Q_{(h;v)}$ numérique et $Q_{thé}$		r_o num (m)	r_o thé (m)	% différence	2ème (m)	Total sur x
						Q_h	Q_v					
80	5	$4.65*10^{-4}$	$4.84*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.96	+15.2%	+19.8%	20.9	14.2	+47.2%	0.93	81
80	20	$4.21*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.98	+4.2%	+7.0%	16.9	14.2	+19.0%	0.34	81
80	50	$4.13*10^{-4}$	$3.80*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.09	+2.2%	-6.0%	15.9	14.2	+12.0%	0.20	81
80	100	$4.15*10^{-4}$	$3.81*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.09	+2.7%	-5.6%	16.3	14.2	+14.8%	0.26	80
80	300	$4.12*10^{-4}$	$4.42*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.93	+2.1%	+9.3%	16.0	14.2	+12.7%	0.20	80
80	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	5	$4.53*10^{-4}$	$4.21*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.08	+12.2%	+4.3%	17.8	14.2	+25.4%	0.77	101
100	20	$4.17*10^{-4}$	$4.05*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.03	+3.2%	+0.3%	16.6	14.2	+16.9%	0.29	101
100	50	$4.16*10^{-4}$	$4.30*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.97	+3.0%	+6.4%	16.4	14.2	+15.5%	0.30	100
100	100	$4.12*10^{-4}$	$4.34*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.95	+2.0%	+7.6%	16.0	14.2	+12.7%	0.22	100
100	300	$4.14*10^{-4}$	$3.63*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.14	+2.5%	-10.0%	16.3	14.2	+14.8%	0.26	99
100	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 : Résultats de la grille avec un facteur *ratio* selon l'axe des x (Fx) et un facteur *ratio* inverse selon l'axe des z (Fz)

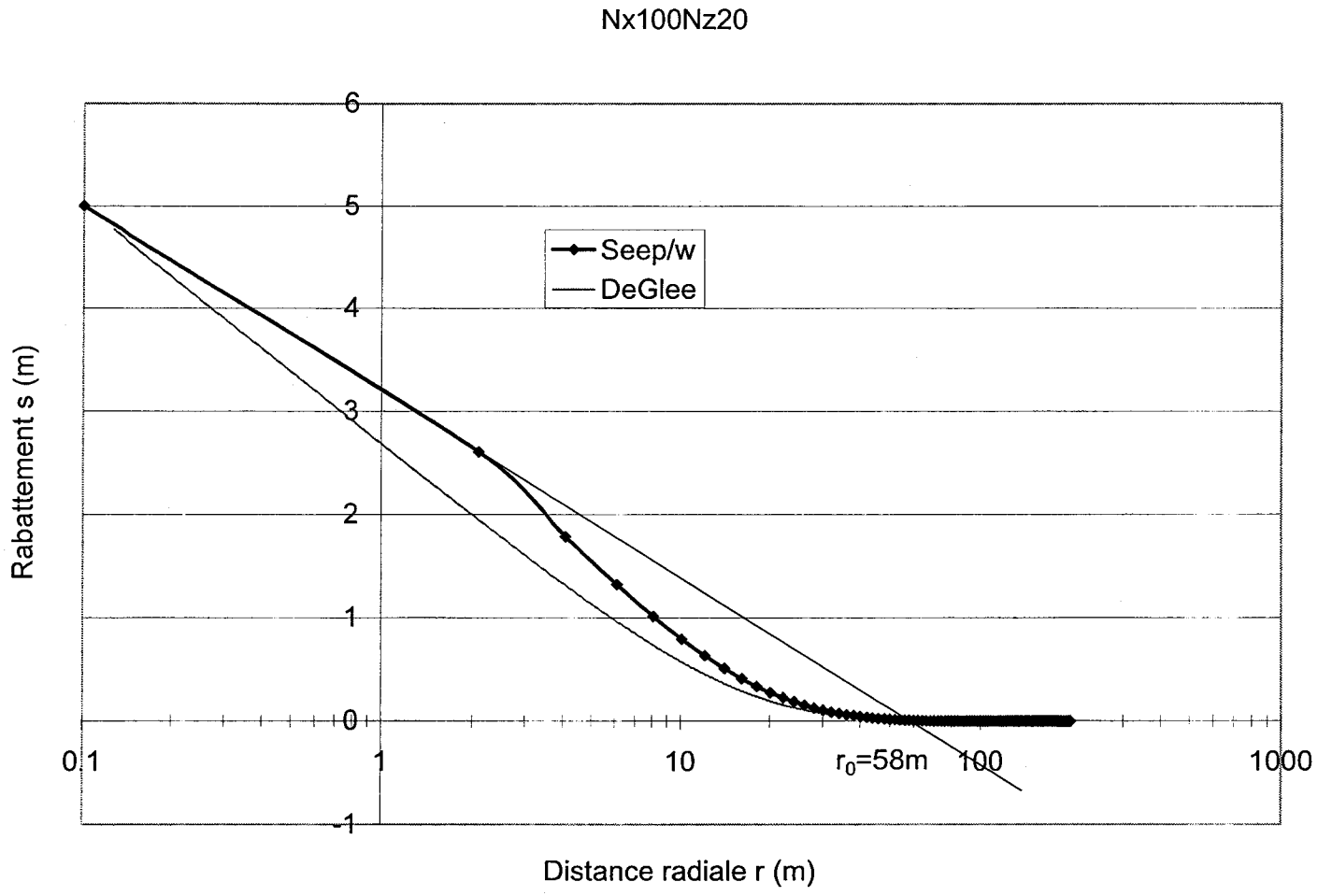
Avec Nx=80 et Fx=20 constant pour tous les cas.

Cas		Débit Q						Rayon d'action r_o		
Nz	Fz	$f_v=Q_h/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_v/2\pi$ (m^3/s)	$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence entre $Q_{(h;v)}$ numérique et $Q_{thé}$		r_o num (m)	r_o thé (m)	% différence
						Q_h	Q_v			
10	1	$4.20*10^{-4}$	$4.11*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.02	+4.0%	+1.7%	17.0	14.2	+19.7%
10	3	$4.21*10^{-4}$	$4.19*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.00	+4.2%	+3.7%	16.9	14.2	+19.0%
10	5	$4.21*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.97	+4.2%	+6.9%	17.1	14.2	+20.4%
10	8	$4.21*10^{-4}$	$4.00*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.05	+4.2%	-1.0%	17.0	14.2	+19.7%
10	10	$4.21*10^{-4}$	$4.52*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.93	+4.2%	+11.9%	16.9	14.2	+19.0%
10	20	$4.21*10^{-4}$	$4.11*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.02	+4.2%	+1.7%	17.0	14.2	+19.7%
20	1	$4.21*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.97	+4.2%	+6.9%	16.9	14.2	+19.0%
20	3	$4.21*10^{-4}$	$4.32*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.97	+4.2%	+6.9%	17.0	14.2	+19.7%
20	5	$4.21*10^{-4}$	$4.20*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.00	+4.2%	+4.0%	17.0	14.2	+19.7%
20	8	$4.21*10^{-4}$	$4.43*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.95	+4.2%	+10.0%	16.9	14.2	+19.0%
20	10	$4.21*10^{-4}$	$5.09*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.83	+4.2%	+26.0%	17.0	14.2	+19.7%
20	20	$4.20*10^{-4}$	$5.57*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.75	+4.0%	+37.9%	17.0	14.2	+19.7%
30	1	$4.21*10^{-4}$	$4.16*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.01	+4.2%	+3.0%	16.9	14.2	+19.0%
30	3	$4.21*10^{-4}$	$5.19*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.81	+4.2%	+28.5%	16.9	14.2	+19.0%
30	5	$4.21*10^{-4}$	$3.23*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.30	+4.2%	-20.0%	16.9	14.2	+19.0%
30	8	$4.21*10^{-4}$	$3.93*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.07	+4.2%	-2.7%	16.9	14.2	+19.0%
30	10	$4.21*10^{-4}$	$5.67*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.74	+4.2%	+40.3%	16.8	14.2	+18.3%
30	20	$4.21*10^{-4}$	$5.89*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.71	+4.2%	+45.8%	16.9	14.2	+19.0%

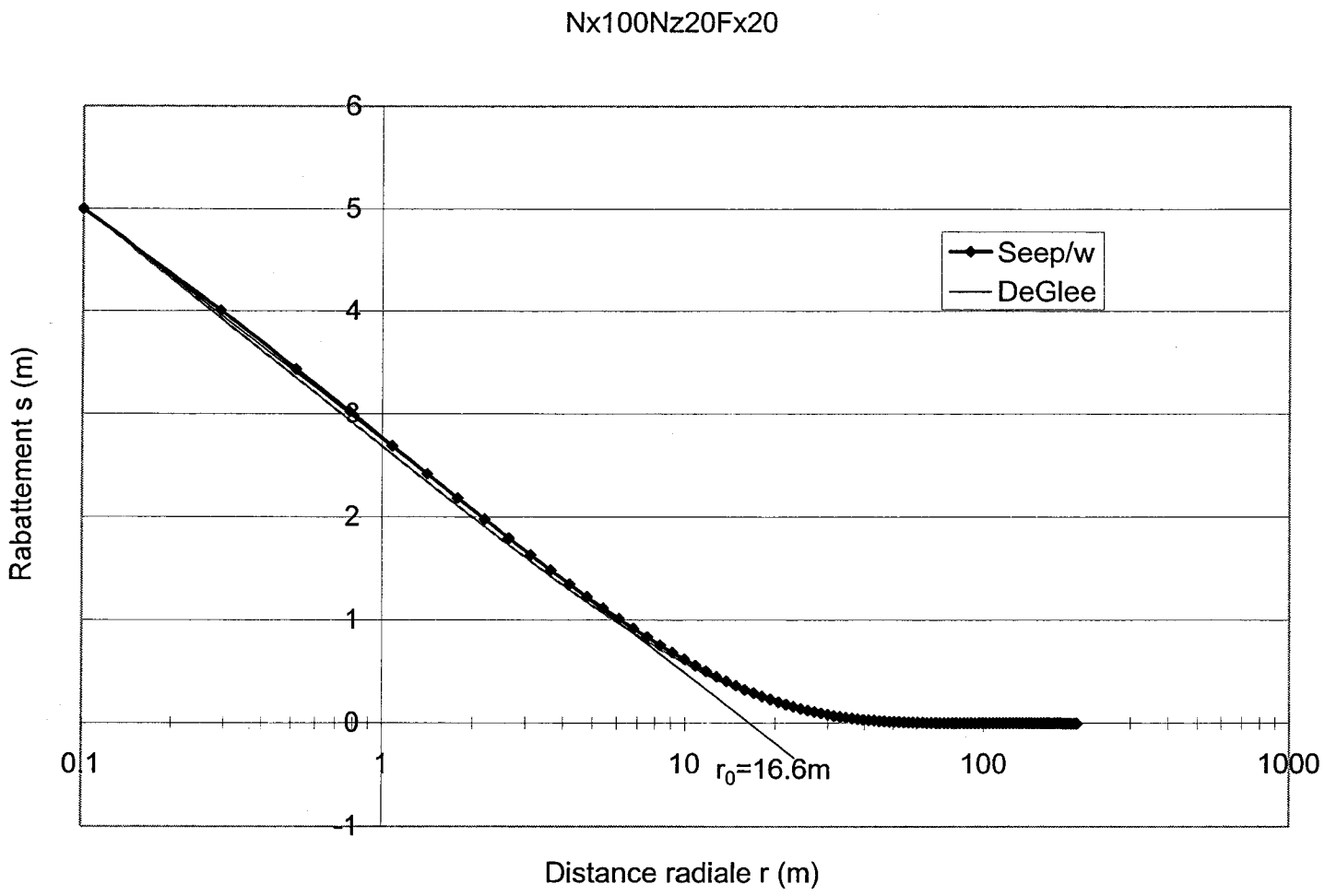
Tableau 3 : (Suite)

Cas		Débit Q						Rayon d'action r_o		
Nz	Fz	$f_v=Q_h/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_v/2\pi$ (m^3/s)	$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence entre $Q_{(h;v)}$ numérique et $Q_{thé}$		r_o num (m)	r_o thé (m)	% différence
						Q_h	Q_v			
40	1	$4.20*10^{-4}$	$3.78*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.11	+4.0%	-6.4%	17.0	14.2	+19.7%
40	3	$4.21*10^{-4}$	$4.10*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.03	+4.2%	+1.5%	16.9	14.2	+19.0%
40	5	$4.21*10^{-4}$	$4.44*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.95	+4.2%	+10.0%	16.9	14.2	+19.0%
40	8	$4.21*10^{-4}$	$5.18*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.81	+4.2%	+28.2%	16.9	14.2	+19.0%
40	10	$4.21*10^{-4}$	$6.14*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.69	+4.2%	+52.0%	16.8	14.2	+18.3%
40	20	$4.21*10^{-4}$	$3.74*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.13	+4.2%	-7.4%	16.9	14.2	+19.0%
50	1	$4.20*10^{-4}$	$3.41*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.23	+4.0%	-15.6%	17.0	14.2	+19.7%
50	3	$4.21*10^{-4}$	$3.54*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.19	+4.2%	-12.4%	16.8	14.2	+18.3%
50	5	$4.21*10^{-4}$	$4.26*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.99	+4.2%	+5.4%	16.9	14.2	+19.0%
50	8	$4.21*10^{-4}$	$5.92*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.71	+4.2%	+46.5%	16.9	14.2	+19.0%
50	10	$4.21*10^{-4}$	$3.74*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.13	+4.2%	-7.4%	16.8	14.2	+18.3%
50	20	$4.20*10^{-4}$	$4.64*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	0.91	+4.0%	+14.9%	17.1	14.2	+20.4%

Graphique 1 : Rabattement en fonction de la distance pour le cas Nx100Nz20



Graphique 2 : Rabattement en fonction de la distance pour le cas Nx100Nz20Fx20



ANNEXE 2

Section 1 : Pour un rapport de **K/K'= 2** et un L = 5.66 m

Cas	Épaisseur		r_o			Débit							
	b (m)	b' (m)	Num (m)	Thé (m)	% différence	$f_v=Q_{h,num}/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_{v,num}/2\pi$ (m^3/s) x(m)=r_i		$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v / f_h	% différence Q_h	% différence Q_v	r_i / r_o
1	1	16	4.0	6.3	-36.5%	$1.50*10^{-4}$	72	$1.62*10^{-4}$	$1.21*10^{-4}$	0.93	+24.0%	+33.9%	24.4
2	2	8	5.9	6.3	-6.3%	$2.66*10^{-4}$	56	$2.76*10^{-4}$	$2.41*10^{-4}$	0.96	+10.4%	+14.5%	4.54
3	4	4	8.0	6.3	+27.0%	$4.92*10^{-4}$	47	$5.01*10^{-4}$	$4.82*10^{-4}$	0.98	+2.1%	+3.9%	2.25
4	8	2	11.0	6.3	+74.6%	$9.30*10^{-4}$	54	$9.38*10^{-4}$	$9.64*10^{-4}$	0.99	-3.5%	-2.7%	1.75
5	16	1	17.6	6.3	+179.4%	$1.73*10^{-3}$	75	$1.73*10^{-3}$	$1.93*10^{-3}$	1.00	-10.4%	-10.4%	1.53

Cas	Épaisseur		Rapport	Ratio			Critères limitatifs	
	b (m)	b' (m)	b/b'	r_o num / r_o thé	Q_h num / Q_h thé	(K/K')/(b/b')	DeGlee (9)	Hantush (100)
1	1	16	0.0625	0.63	1.24	32	Oui	Non
2	2	8	0.25	0.94	1.10	8	Non	Non
3	4	4	1	1.30	1.02	2	Non	Non
4	8	2	4	1.75	0.96	0.5	Non	Non
5	16	1	16	2.79	0.90	0.125	Non	Non

Section 2 : Pour un rapport de **K/K'= 10** et un L = 12.65m

Cas	Épaisseur		r_o			Débit					% différence		
	b (m)	b' (m)	Num (m)	Thé (m)	% différence	$f_v=Q_{h,num}/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_{v,num}/2\pi$ (m^3/s) x(m)=r_i		$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v / f_h	Q_h	Q_v	r_i / r_o
6	1	16	12.6	14.2	-11.3%	$1.11*10^{-4}$	116	$1.14*10^{-4}$	$1.01*10^{-4}$	0.97	+9.9%	+12.9%	3.84
7	2	8	14.7	14.2	+3.5%	$2.10*10^{-4}$	102	$2.12*10^{-4}$	$2.02*10^{-4}$	0.99	+4.0%	+5.0%	2.67
8	4	4	15.9	14.2	+12.0%	$4.09*10^{-4}$	99	$4.07*10^{-4}$	$4.04*10^{-4}$	1.00	+1.2%	+0.7%	2.41
9	8	2	17.8	14.2	+25.4%	$8.04*10^{-4}$	102	$8.01*10^{-4}$	$8.08*10^{-4}$	1.00	-0.5%	-0.9%	2.33
10	16	1	22.8	14.2	+60.7%	$1.57*10^{-3}$	109	$1.56*10^{-3}$	$1.61*10^{-3}$	1.01	-2.5%	-3.1%	2.61

Cas	Épaisseur		Rapport	Ratio			Critères limitatifs	
	b (m)	b' (m)	b/b'	r_o num / r_o thé	Q_h num / Q_h thé	(K/K') / (b/b')	DeGlee (9)	Hantush (100)
6	1	16	0.0625	0.89	1.10	160	Oui	Oui
7	2	8	0.25	1.04	1.04	40	Oui	Non
8	4	4	1	1.12	1.01	10	Oui	Non
9	8	2	4	1.25	1.00	2.5	Non	Non
10	16	1	16	1.61	0.98	0.625	Non	Non

Section 3 : Pour un rapport de **K/K'= 100** et un L = 40m

Cas	Épaisseur		r_o			Débit						
	b (m)	b' (m)	Num (m)	Thé (m)	% différence	$f_v=Q_{h,num}/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_{v,num}/2\pi$ (m^3/s) x(m)=r_i		$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence Q_h	% différence Q_v
11	1	16	43.4	44.8	-3.1%	$8.35*10^{-5}$	180	$8.15*10^{-5}$	$8.19*10^{-5}$	1.02	+2.0%	-0.5%
12	2	8	45.3	44.8	+1.1%	$1.65*10^{-4}$	224	$1.69*10^{-4}$	$1.64*10^{-4}$	0.98	+0.6%	+3.0%
13	4	4	46.1	44.8	+2.9%	$3.29*10^{-4}$	217	$3.22*10^{-4}$	$3.28*10^{-4}$	1.02	+0.3%	-1.8%
14	8	2	47.1	44.8	+5.1%	$6.57*10^{-4}$	239	$6.43*10^{-4}$	$6.55*10^{-4}$	1.02	+0.3%	-1.8%
15	16	1	50.1	44.8	+11.8%	$1.31*10^{-3}$	283	$1.32*10^{-3}$	$1.31*10^{-3}$	0.99	0.0%	+0.8%

Cas	Épaisseur		Rapport	Ratio			Critères limitatifs	
	b (m)	b' (m)	b/b'	r_o num / r_o thé	Q_h num / Q_h thé	(K/K') / (b/b')	DeGlee (9)	Hantush (100)
11	1	16	0.0625	0.97	1.02	1600	Oui	Oui
12	2	8	0.25	1.01	1.01	400	Oui	Oui
13	4	4	1	1.03	1.01	100	Oui	Oui
14	8	2	4	1.05	1.01	25	Oui	Non
15	16	1	16	1.12	1.00	6.25	Non	Non

Section 4 : **K/K'=1000** avec L=126.49m

Cas	Épaisseur		r_o			Débit						
	b (m)	b' (m)	Num (m)	Thé (m)	% différence	$f_v=Q_{h,num}/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_{v,num}/2\pi$ (m^3/s) x(m)=r_i		$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence Q_h	% différence Q_v
16	1	16	148.1	141.7	+4.5%	$6.88*10^{-5}$	606	$7.04*10^{-5}$	$6.89*10^{-5}$	0.98	-0.1%	+2.2%
17	2	8	147.3	141.7	+4.0%	$1.38*10^{-4}$	531	$1.64*10^{-4}$	$1.38*10^{-4}$	0.84	0.0%	+18.8%
18	4	4	143.5	141.7	+1.3%	$2.76*10^{-4}$	568	$2.97*10^{-4}$	$2.76*10^{-4}$	0.93	0.0%	+7.6%
19	8	2	142.5	141.7	+0.6%	$5.54*10^{-4}$	568	$5.05*10^{-4}$	$5.51*10^{-4}$	1.10	+0.5%	-8.3%
20	16	1	145.7	141.7	+2.8%	$1.11*10^{-3}$	514	$1.15*10^{-3}$	$1.10*10^{-3}$	0.97	+0.1%	+4.5%

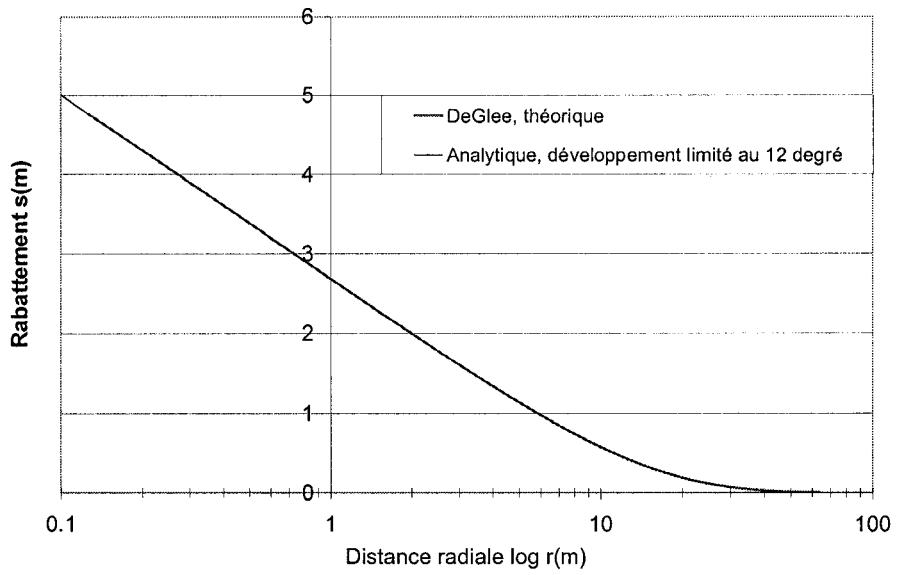
Cas	Épaisseur		Rapport	Ratio			Critères limitatifs	
	b (m)	b' (m)	b/b'	r_o num / r_o thé	Q_h num / Q_h thé	(K/K') / (b/b')	DeGlee (9)	Hantush (100)
16	1	16	0.0625	1.05	1.00	16 000	Oui	Oui
17	2	8	0.25	1.04	1.00	4000	Oui	Oui
18	4	4	1	1.01	1.00	1000	Oui	Oui
19	8	2	4	1.01	1.01	250	Oui	Oui
20	16	1	16	1.03	1.01	62.5	Oui	Non

Section 5 : **K/K'=10 000** avec L=400m

Cas	Épaisseur		r_o			Débit						
	b (m)	b' (m)	Num (m)	Thé (m)	% différence	$f_v=Q_{h,num}/2\pi$ (m^3/s)	$f_h=Q_{v,num}/2\pi$ (m^3/s) x(m)=r_i		$Q_{thé}/2\pi$ (m^3/s)	f_v/f_h	% différence Q_h	% différence Q_v
21	1	16	221.9	448	-50.5%	$6.52*10^{-5}$	650	$1.04*10^{-4}$	$5.95*10^{-5}$	0.63	+9.6%	+74.8%
22	2	8	214.8	448	-52.1%	$1.31*10^{-4}$	606	$1.50*10^{-4}$	$1.19*10^{-4}$	0.87	+10.1%	+26.1%
23	4	4	204.3	448	-54.4%	$2.64*10^{-4}$	587	$2.73*10^{-4}$	$2.38*10^{-4}$	0.97	+10.9%	+14.7%
24	8	2	198.8	448	-55.6%	$5.29*10^{-4}$	568	$4.49*10^{-4}$	$4.76*10^{-4}$	1.18	+11.1%	-5.7%
25	16	1	206.3	448	-54.0%	$1.05*10^{-3}$	568	$1.11*10^{-3}$	$9.52*10^{-4}$	0.95	+10.3%	+16.6%

Cas	Épaisseur		Rapport	Ratio			Critères limitatifs	
	b (m)	b' (m)	b/b'	r_o num / r_o thé	Q_h num / Q_h thé	(K/K') / (b/b')	DeGlee (9)	Hantush (100)
21	1	16	0.0625	0.50	1.10	160 000	Oui	Oui
22	2	8	0.25	0.48	1.11	40 000	Oui	Oui
23	4	4	1	0.46	1.11	10 000	Oui	Oui
24	8	2	4	0.44	1.11	2 500	Oui	Oui
25	16	1	16	0.46	1.10	625	Oui	Oui

ANNEXE 3



Graphique 3 : Comparaison entre les courbes calculées avec l'équation de DeGlee et avec l'équation analytique pour le cas 9.

ANNEXE 4

(K/K'=2)

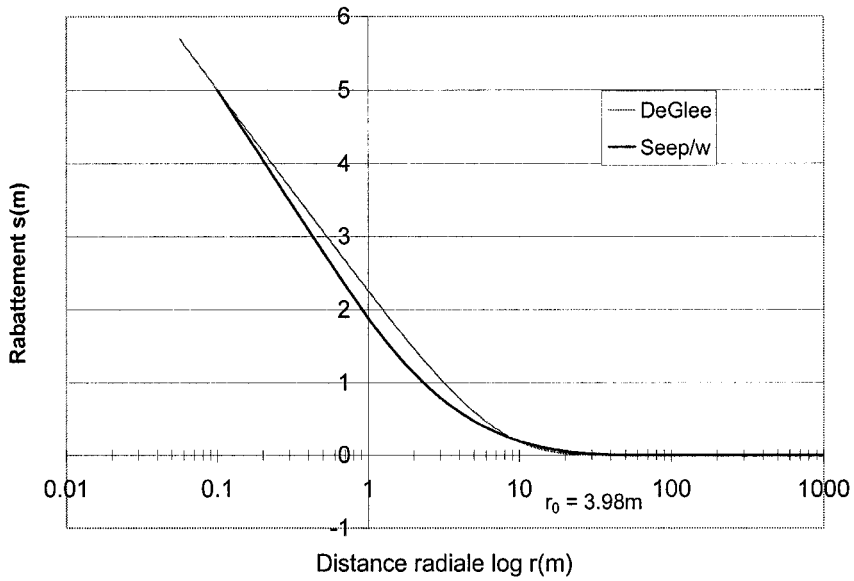


Figure 1: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 1; b=1m et b'=16m.

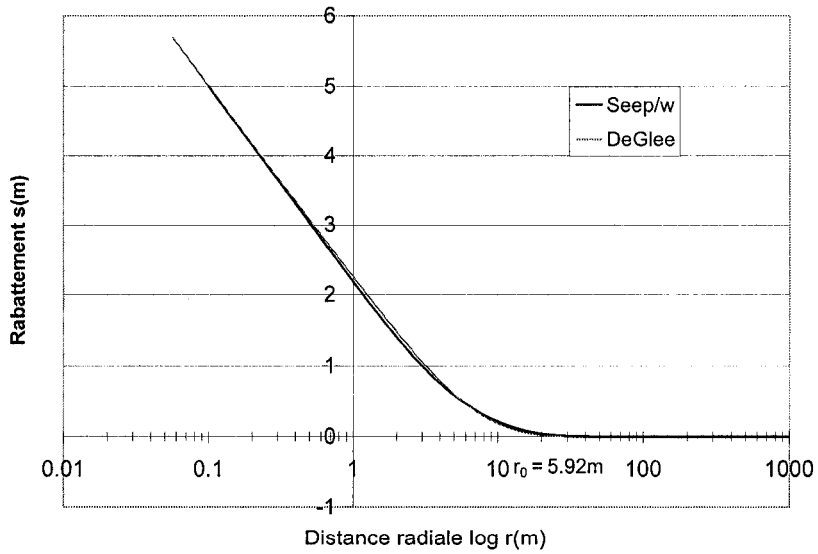


Figure 2 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 2; b=2m et b'=8m.

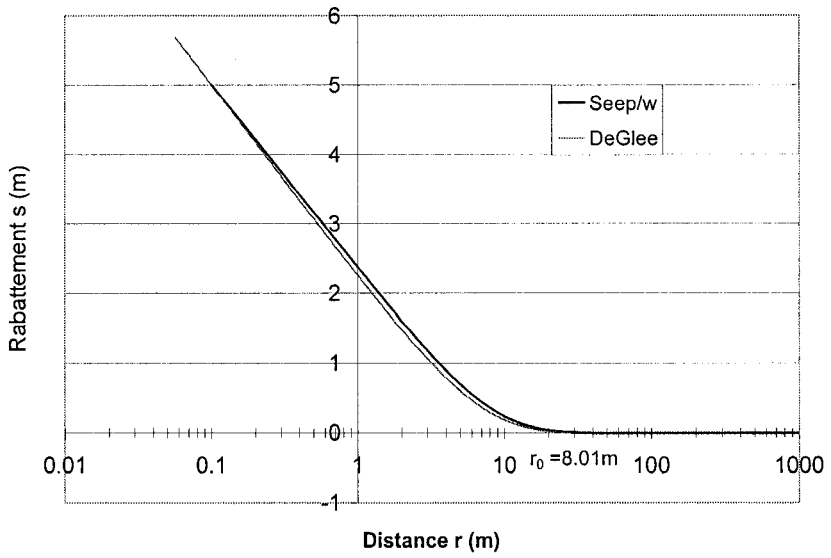


Figure 3 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 3; b=4m et b'=4m.

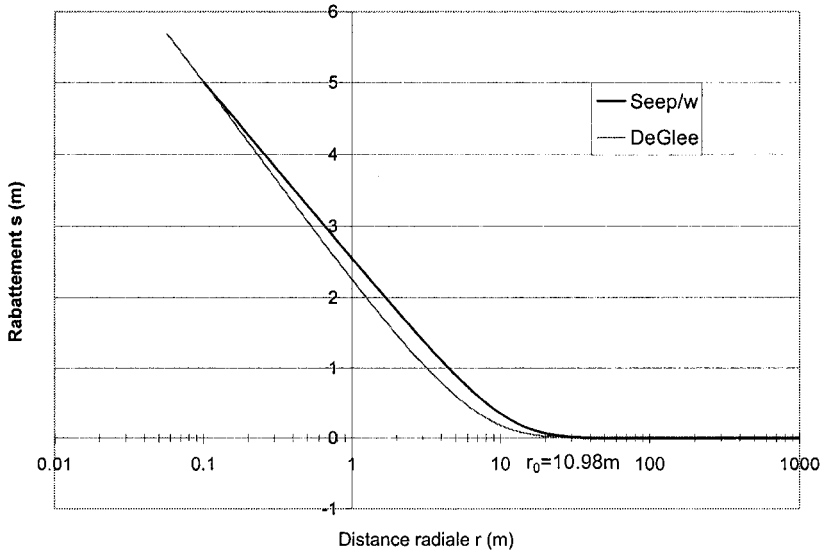


Figure 4 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 4; b=8m et b'=2m.

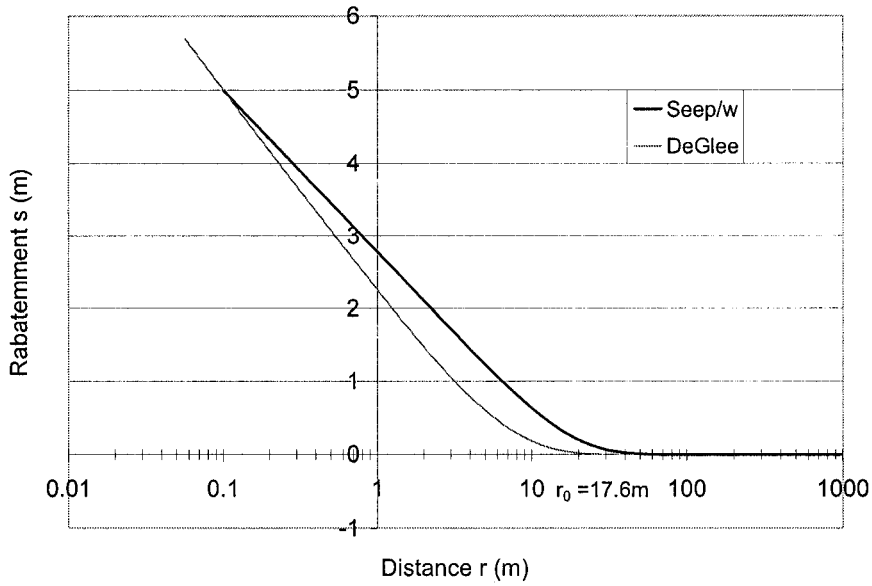


Figure 5 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 5; b=16m et b'=1m

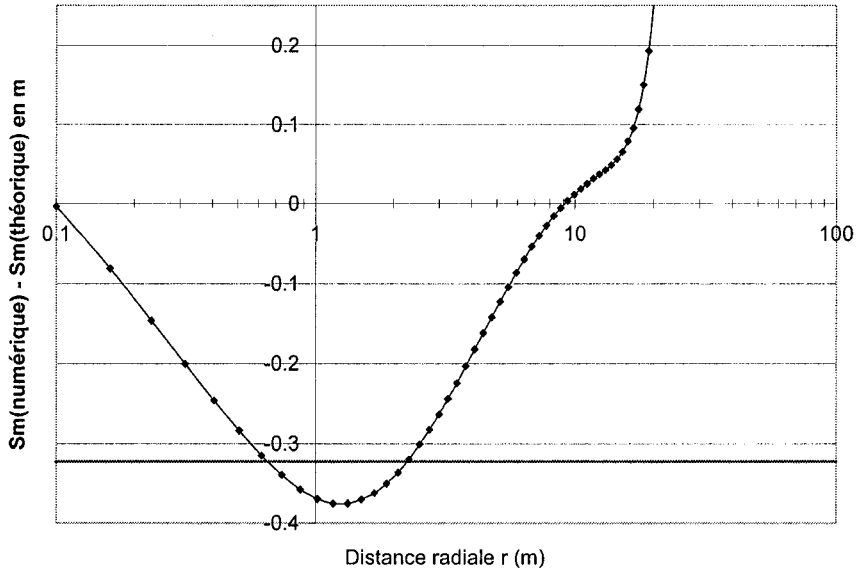


Figure 6 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 1; b=1m te b'=16m.

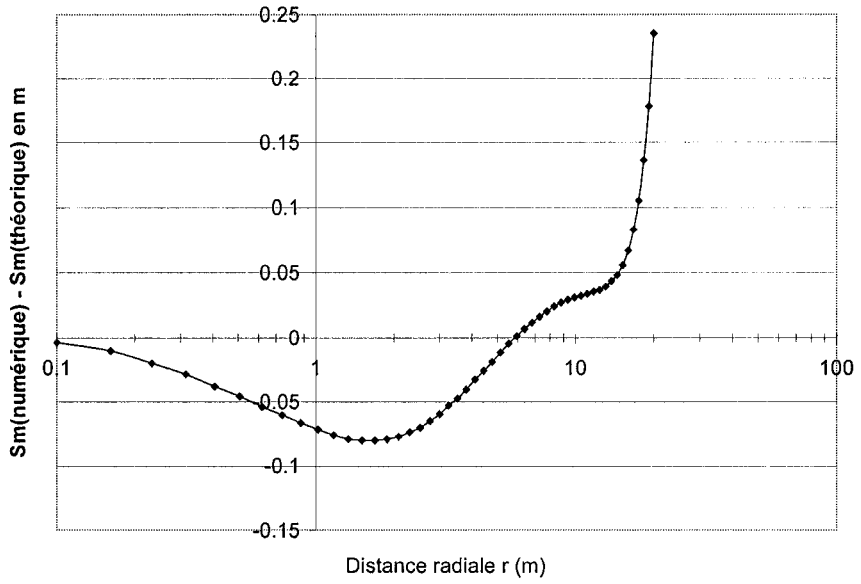


Figure 7 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 2; b=2m et b'=8m.

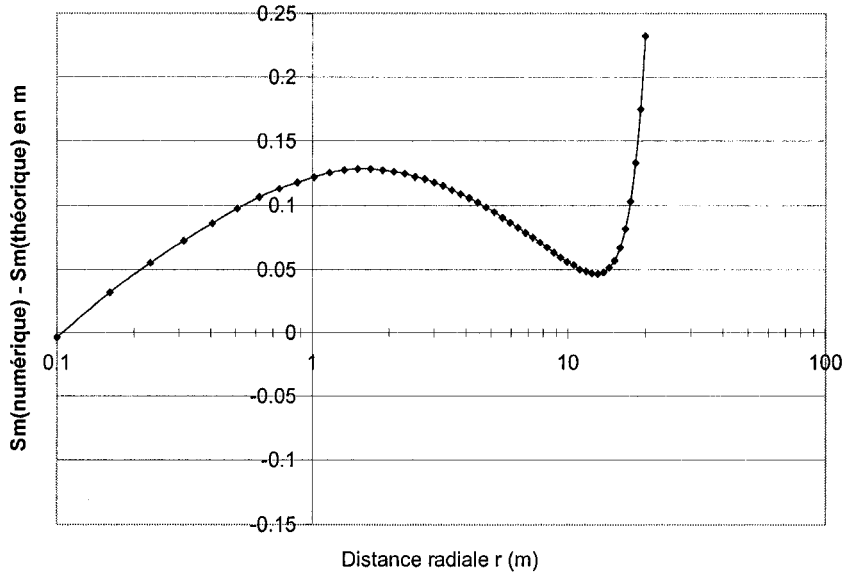


Figure 8 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 3; b=b'=4m.

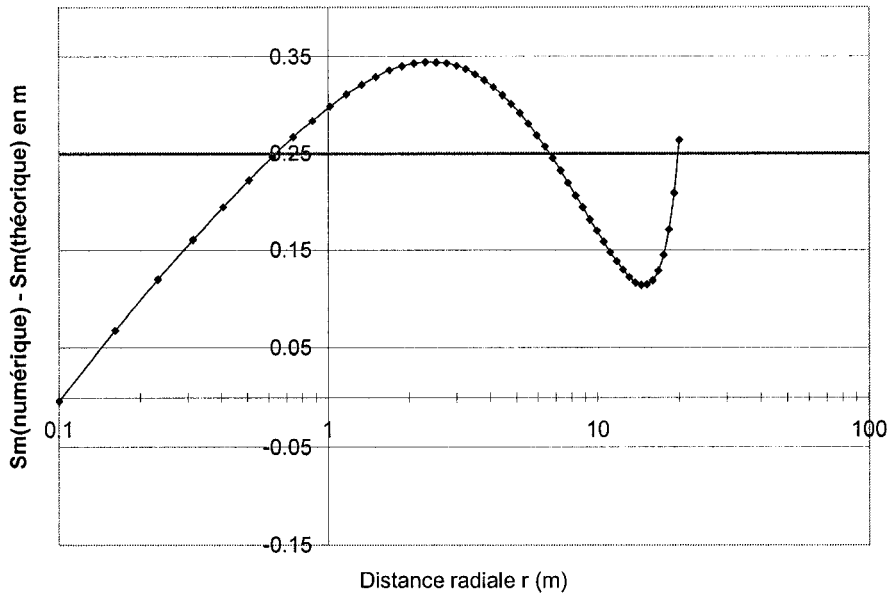


Figure 9 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 4; b=8m et b'=2m.

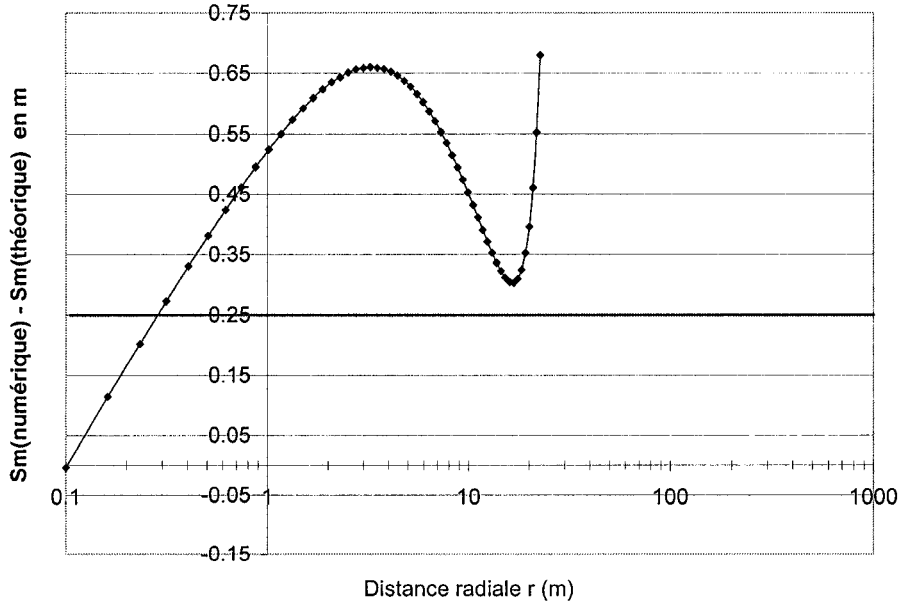


Figure 10 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 5; b=16m et b'=1m.

ANNEXE 5

(K/K'=10)

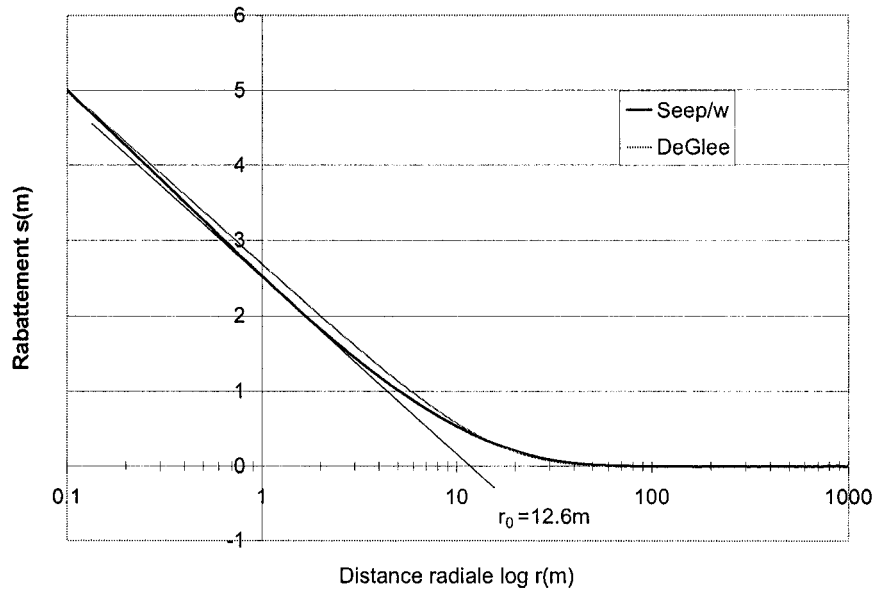


Figure 11: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 6; b=1m et b'=16m.

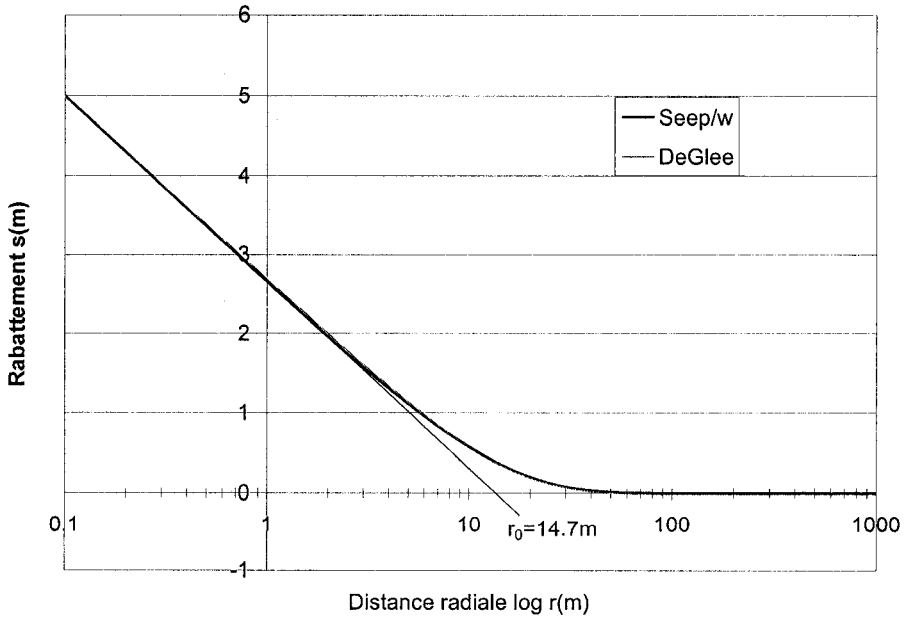


Figure 12 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 7; b=2m et b'=8m.

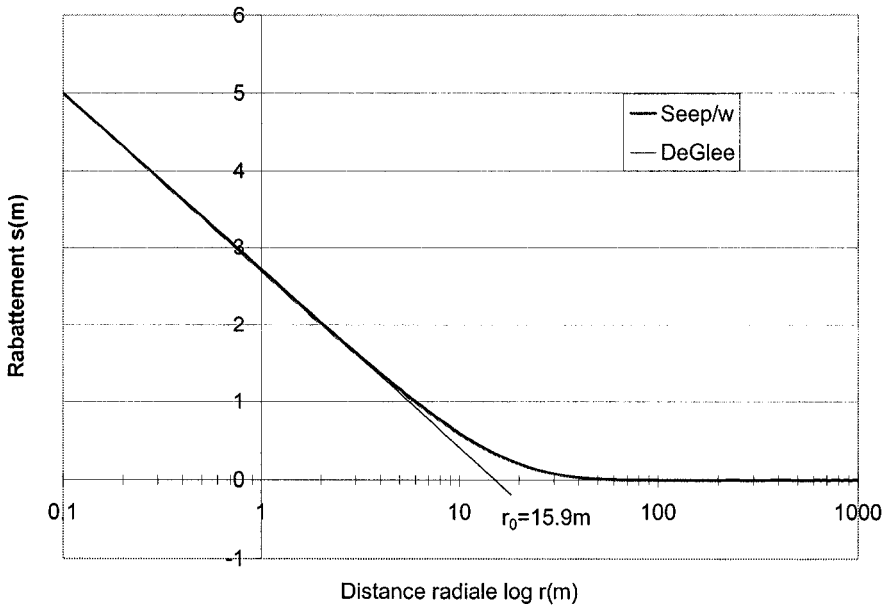


Figure 13 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 8; b=4m et b'=4m.

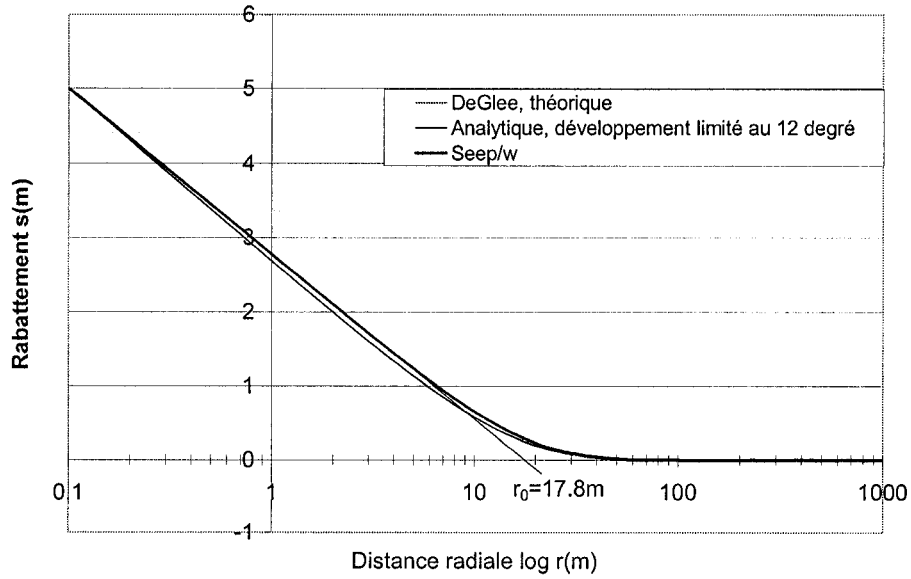


Figure 14 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 9; b=8m et b'=2m.

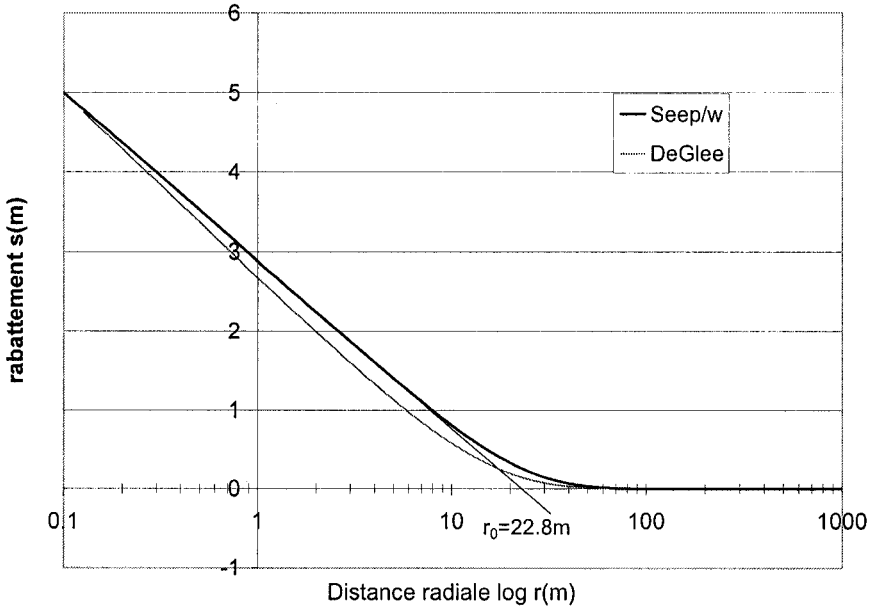


Figure 15 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 15; b=16m et b'=1m

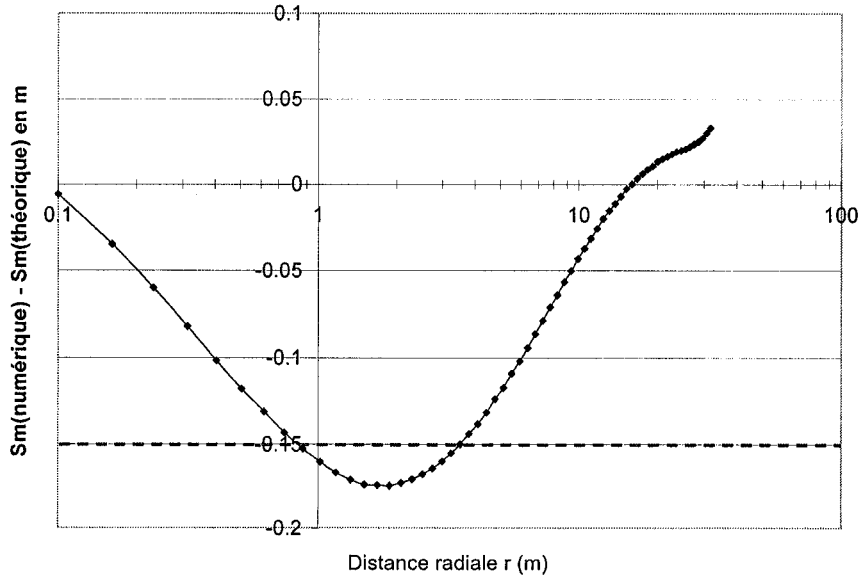


Figure 16 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 6; b=1m et b'=16m.

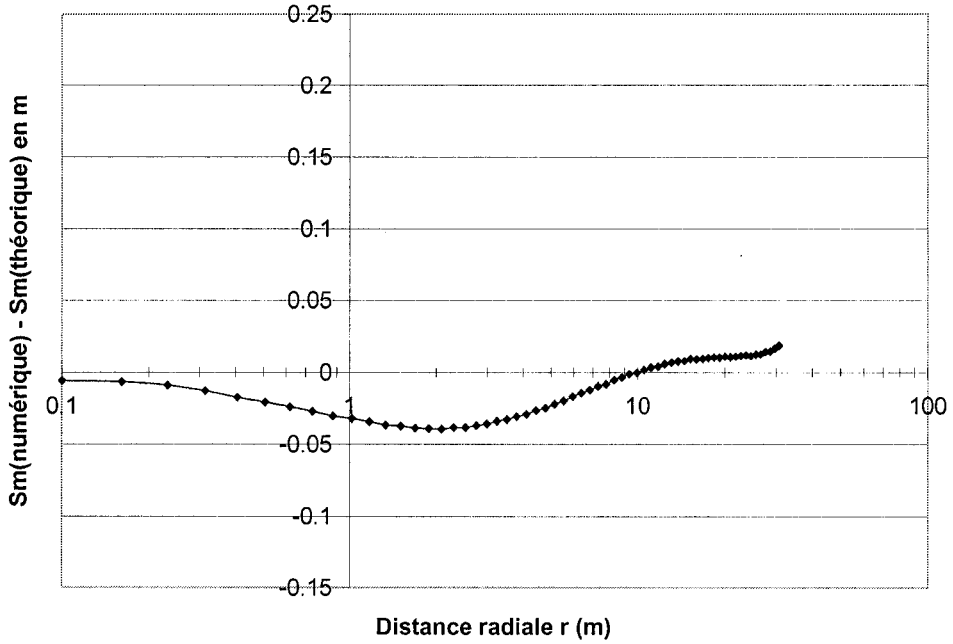


Figure 17 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 7; b=2m et b'=8m.

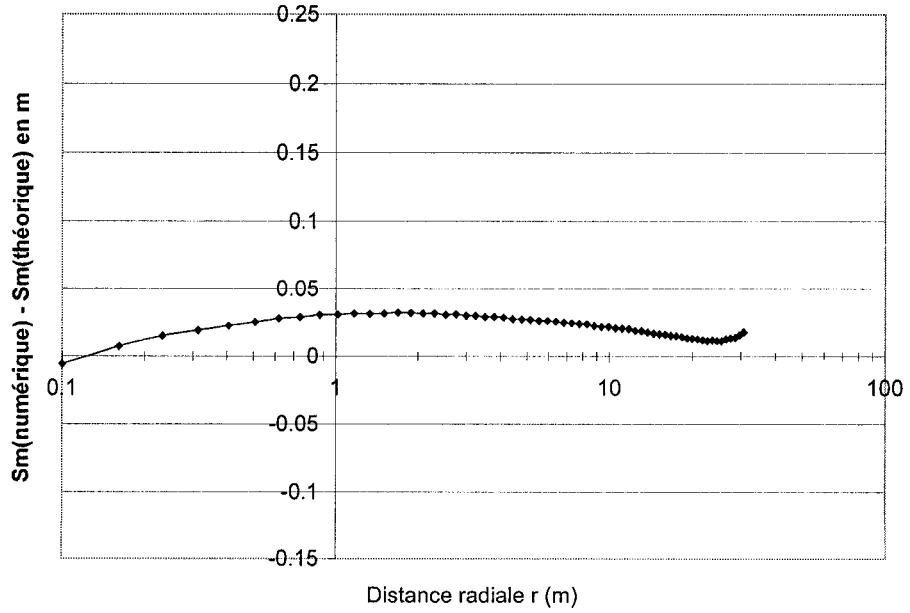


Figure 18 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 8; b=b'=4m.

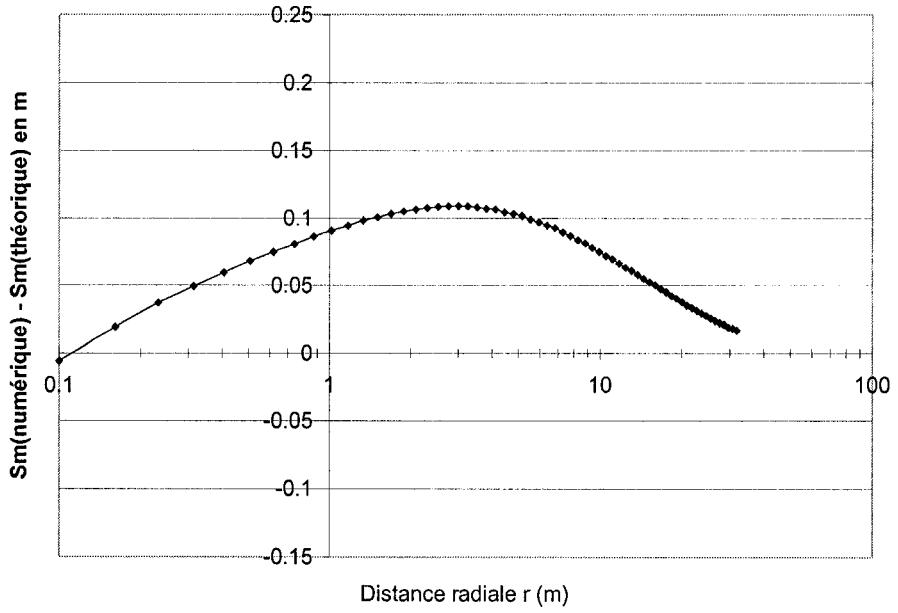


Figure 19 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 9; b=8m et b'=2m.

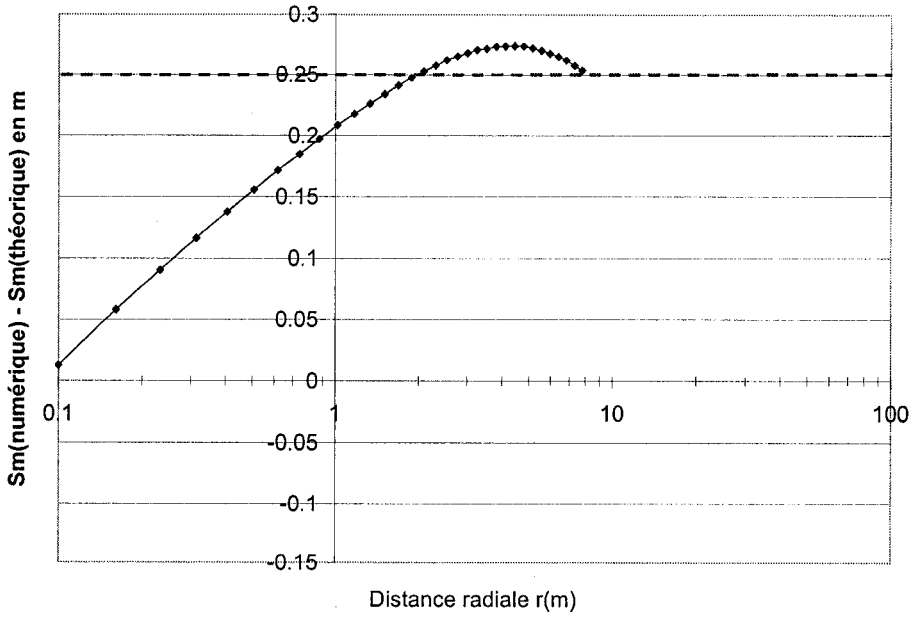


Figure 20 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 10; b=16m et b'=1m.

ANNEXE 6

(K/K'=100)

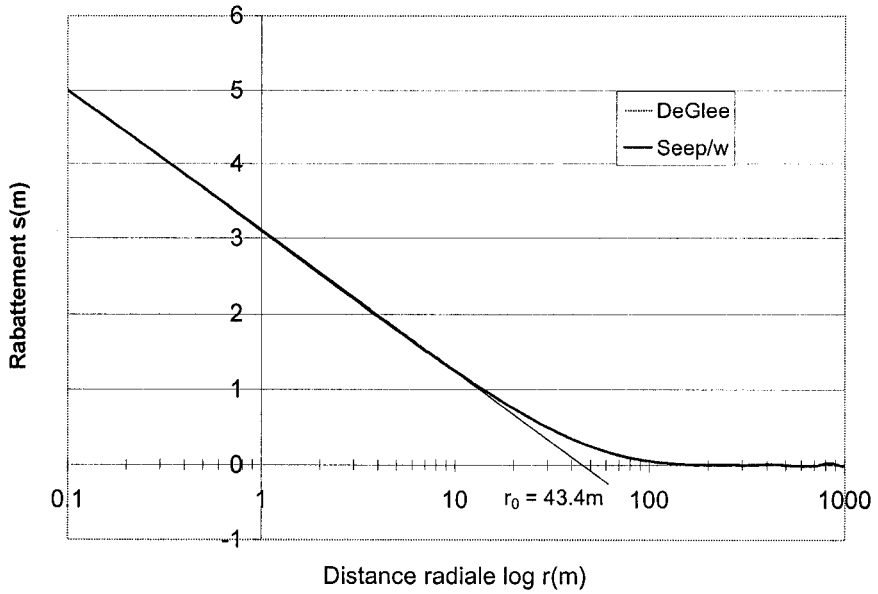


Figure 21 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 11; b=1m et b'=16m.

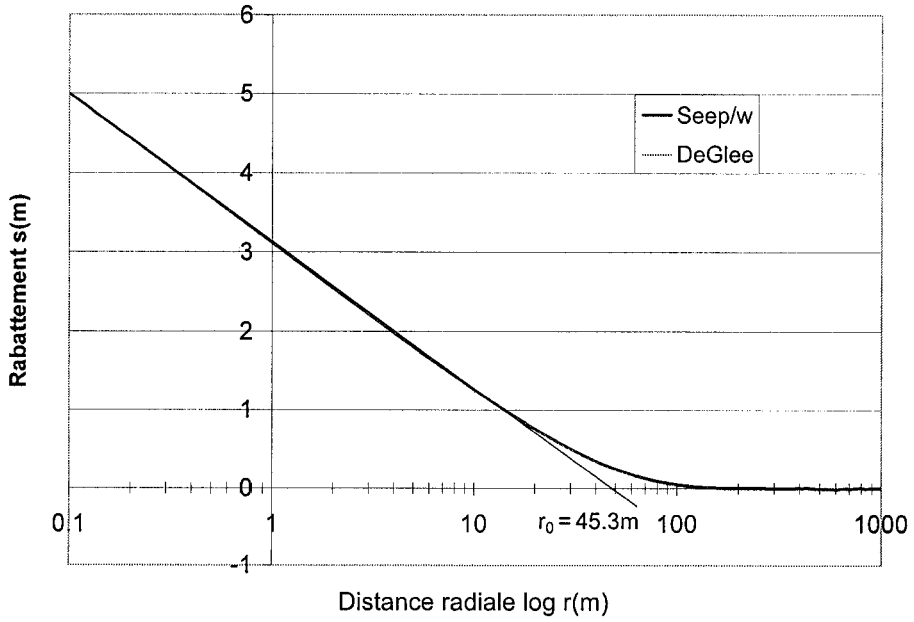


Figure 22 : Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 12; b=2m et b'=8m.

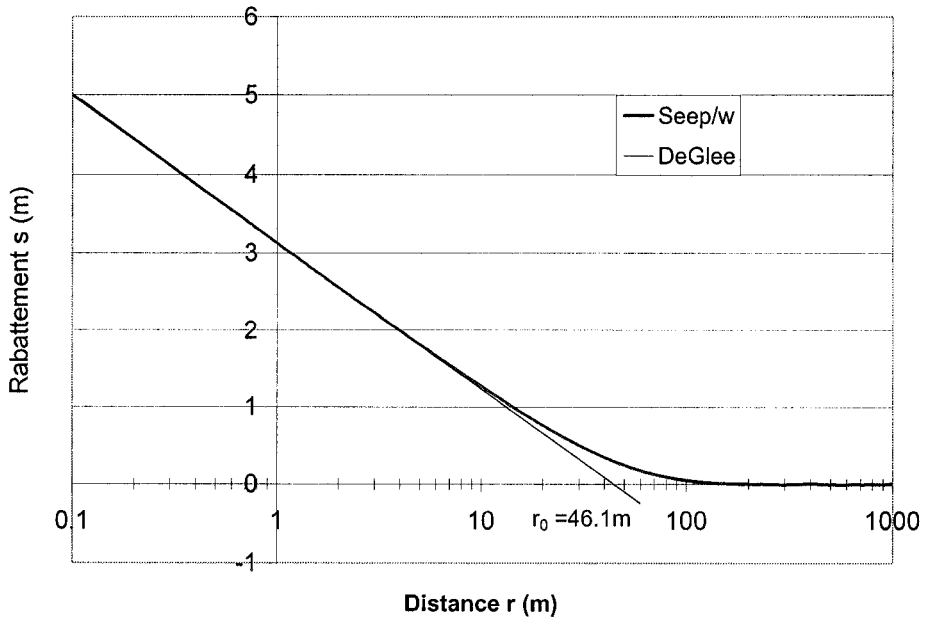


Figure 23: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 13; b=4m et b'=4m.

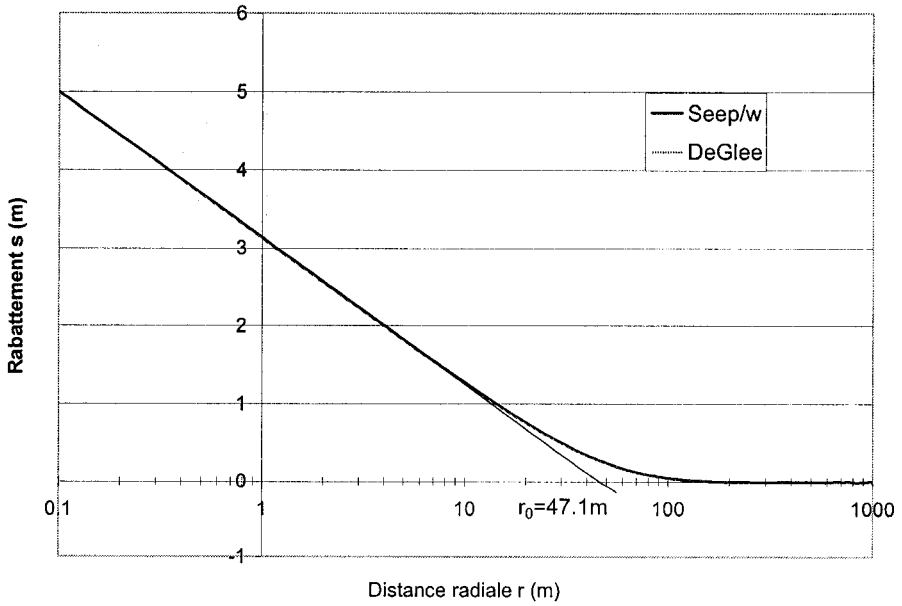


Figure 24: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 14; b=8m et b'=2m.

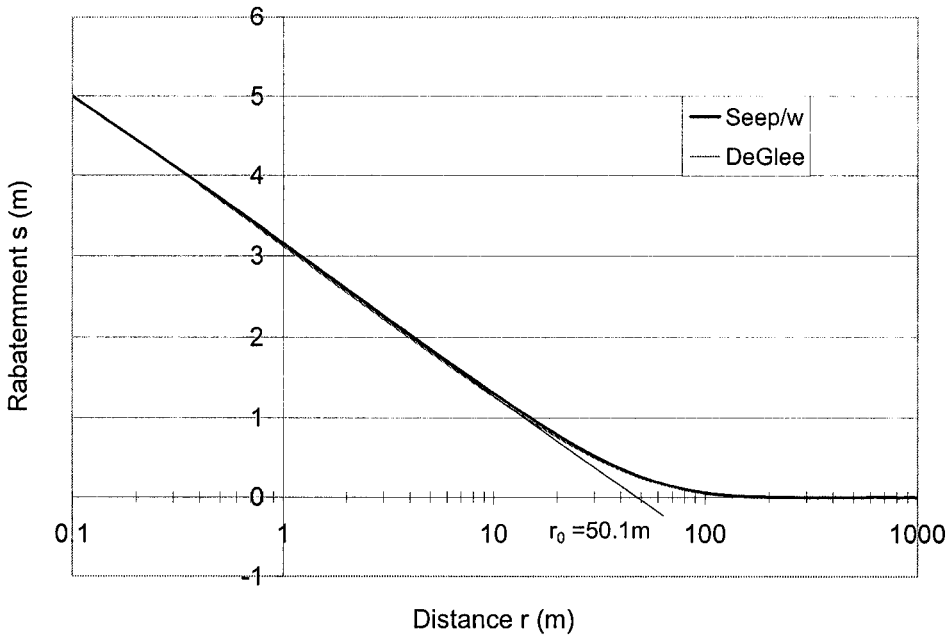


Figure 25: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 15; b=16m et b'=1m.

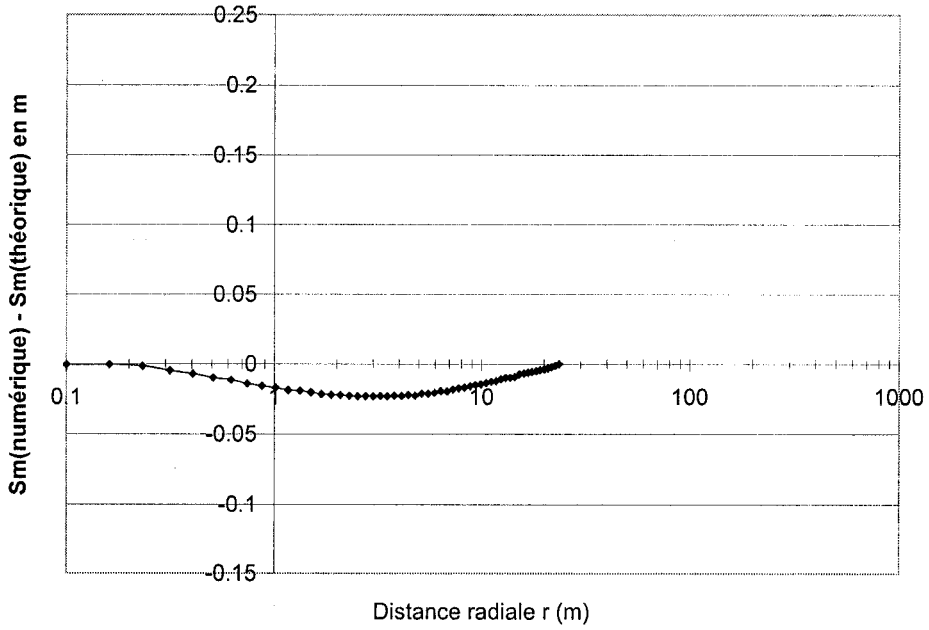


Figure 26 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 11; b=1m et b'=16m.

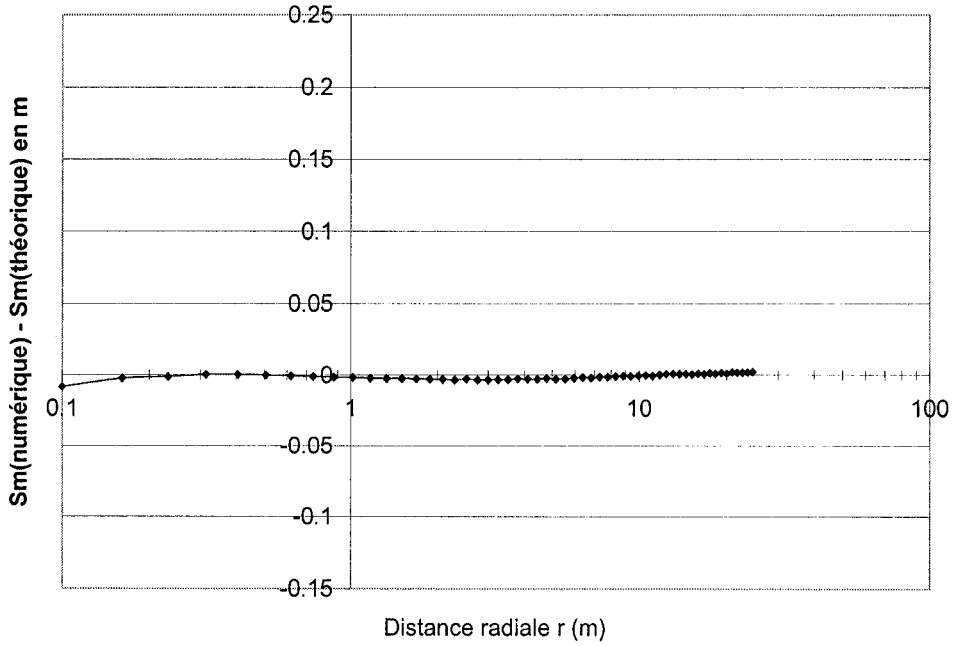


Figure 27 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 12; b=2m et b'=8m.

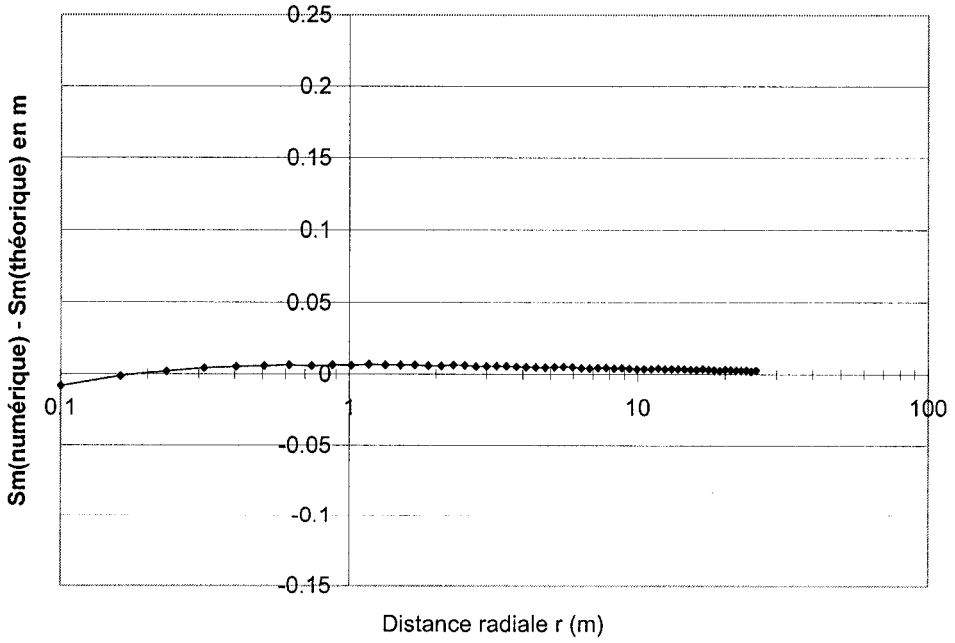


Figure 28 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 13; b=b'=4m.

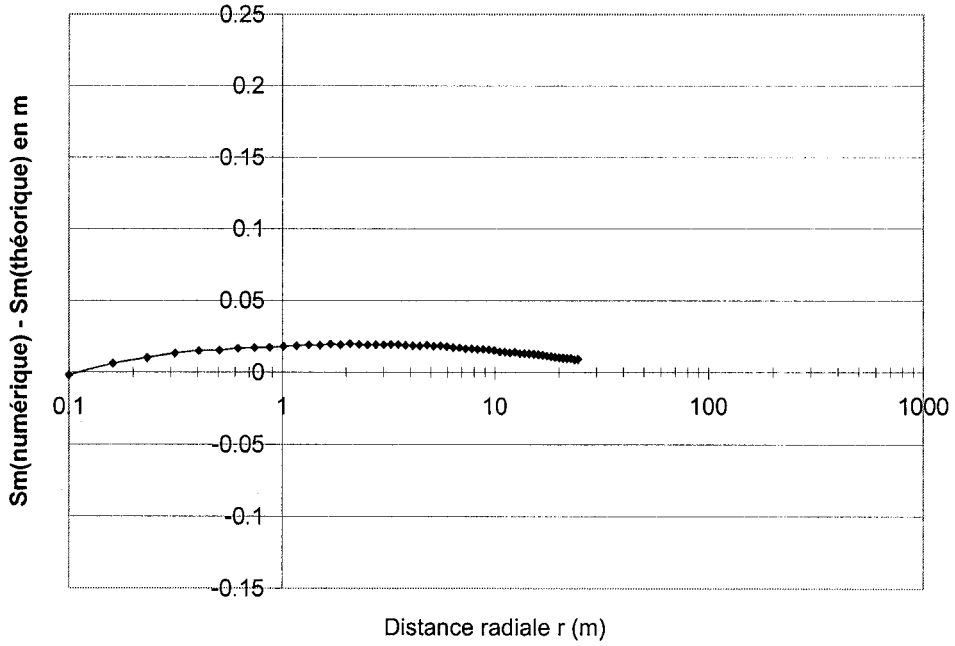


Figure 29 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 14; b=8m et b'=2m.

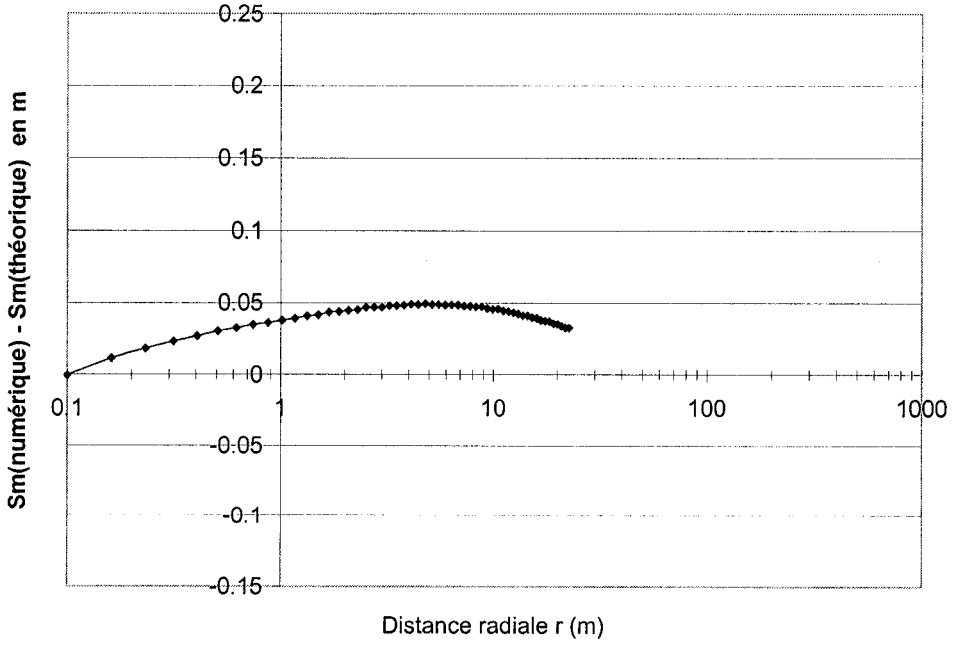


Figure 30 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 15; b=16m et b'=1m.

ANNEXE 7

(K/K'=1 000)

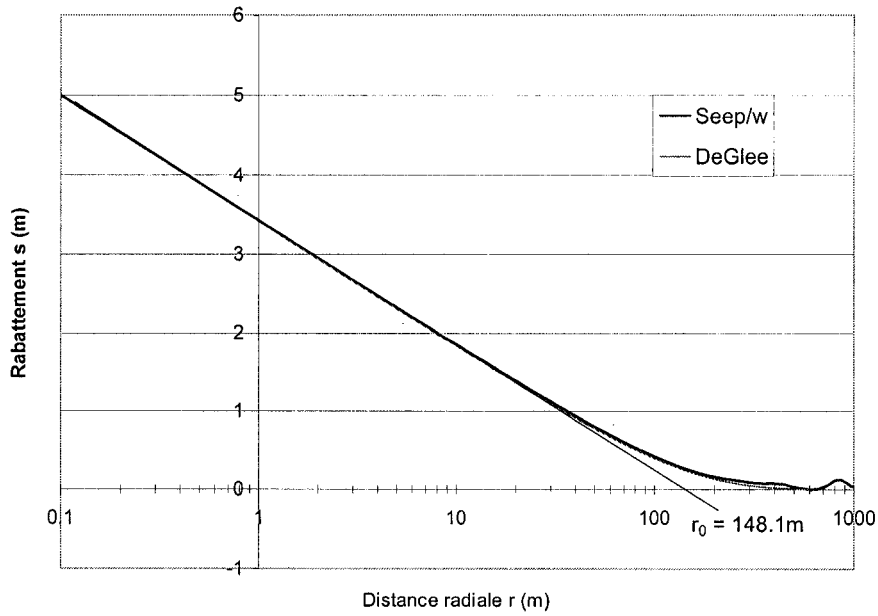


Figure 31: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 16; b=1m et b'=16m.

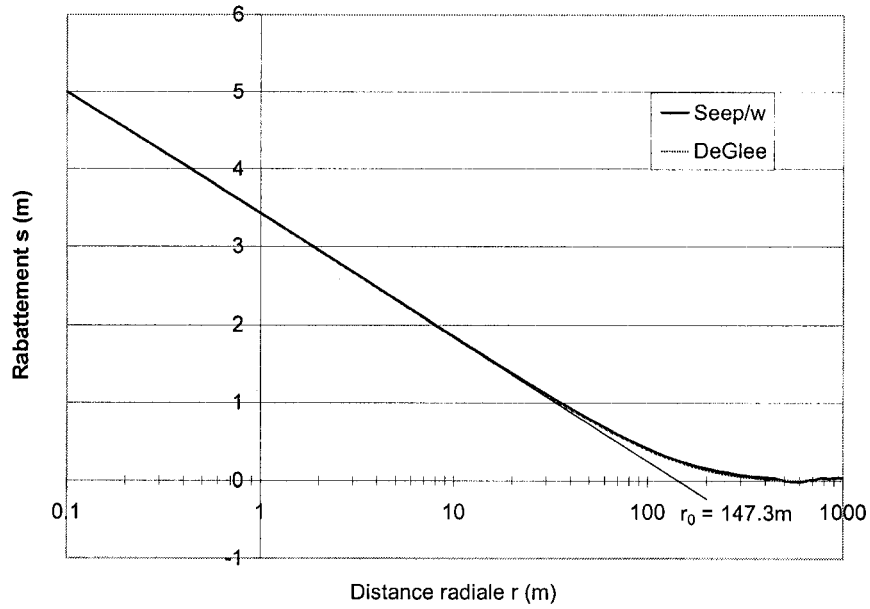


Figure 32: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 17; b=2m et b'=8m.

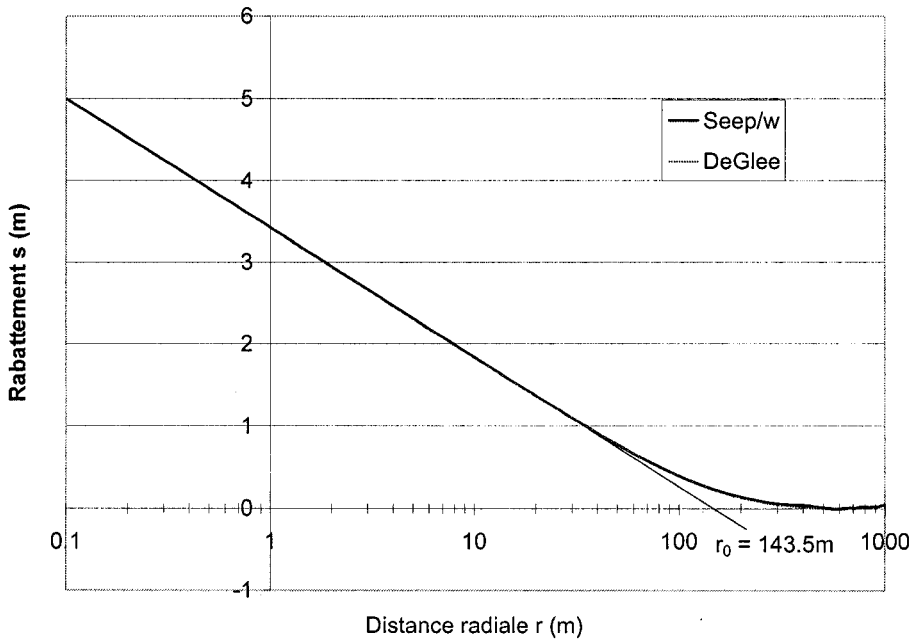


Figure 33: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 18; b=4m et b'=4m.

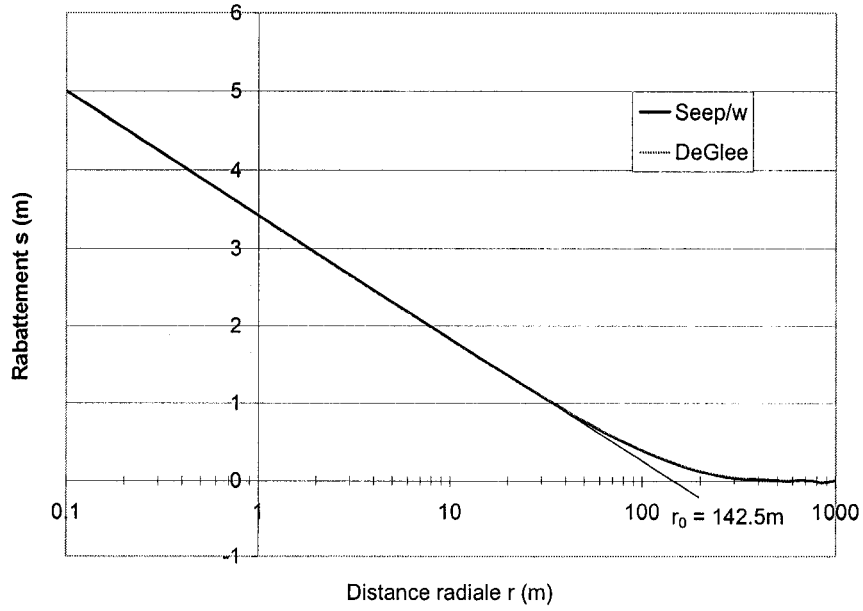


Figure 34: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 19; b=8m et b'=2m.

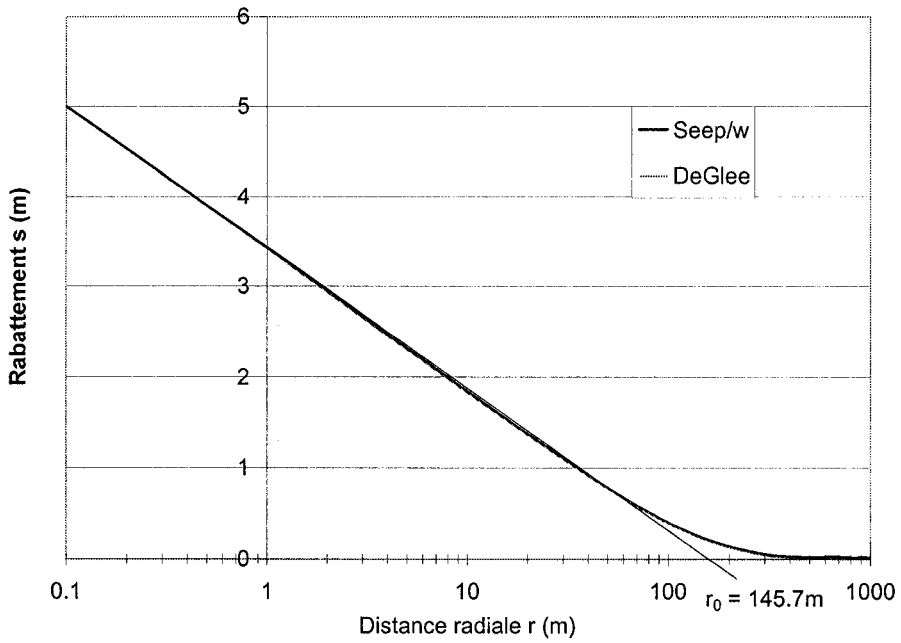


Figure 35: Comparaison entre les courbes de rabattement numérique et théorique pour le cas 20; b=16m et b'=1m.

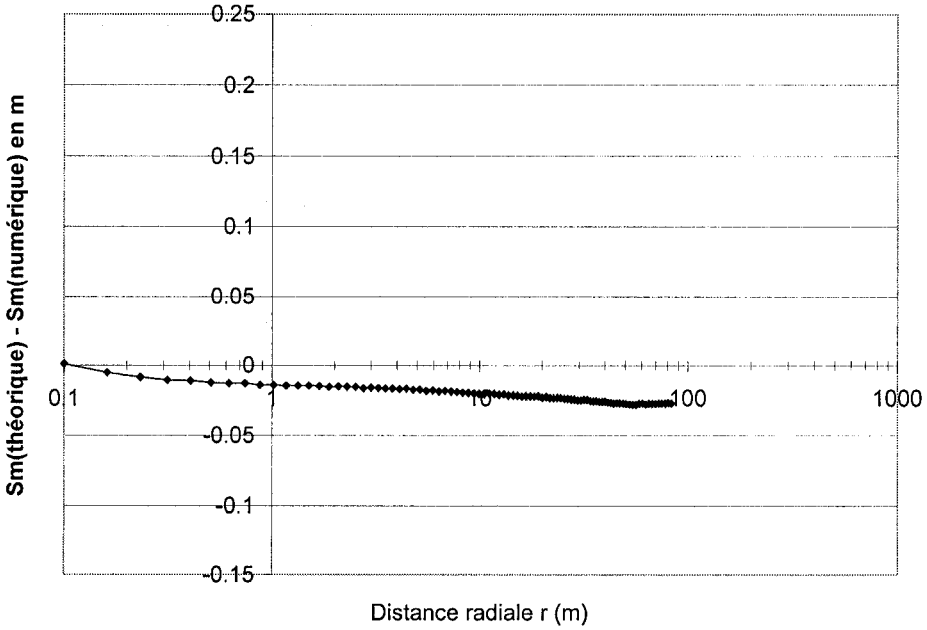


Figure 36 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 16; b=1m et b'=16m.

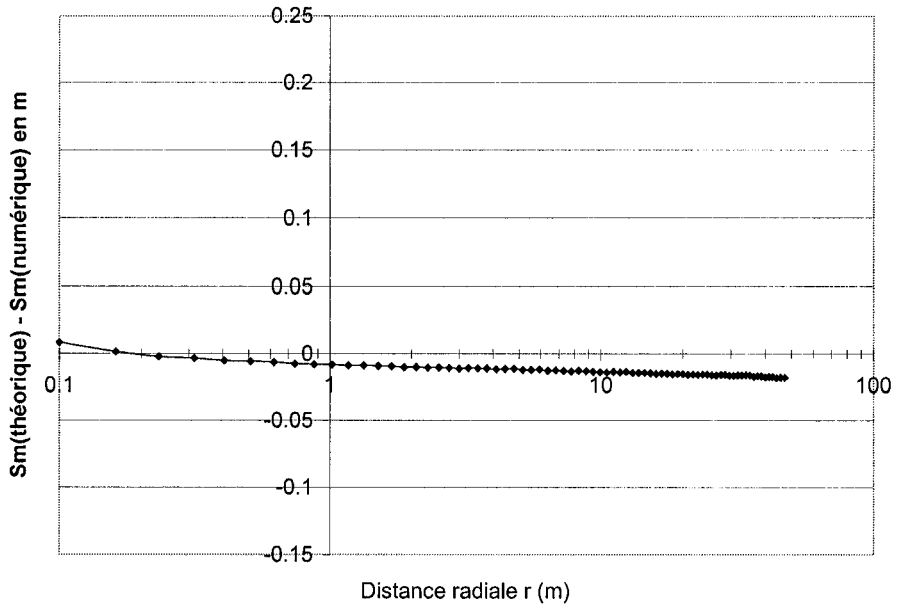


Figure 37 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 17; b=2m et b'=8m.

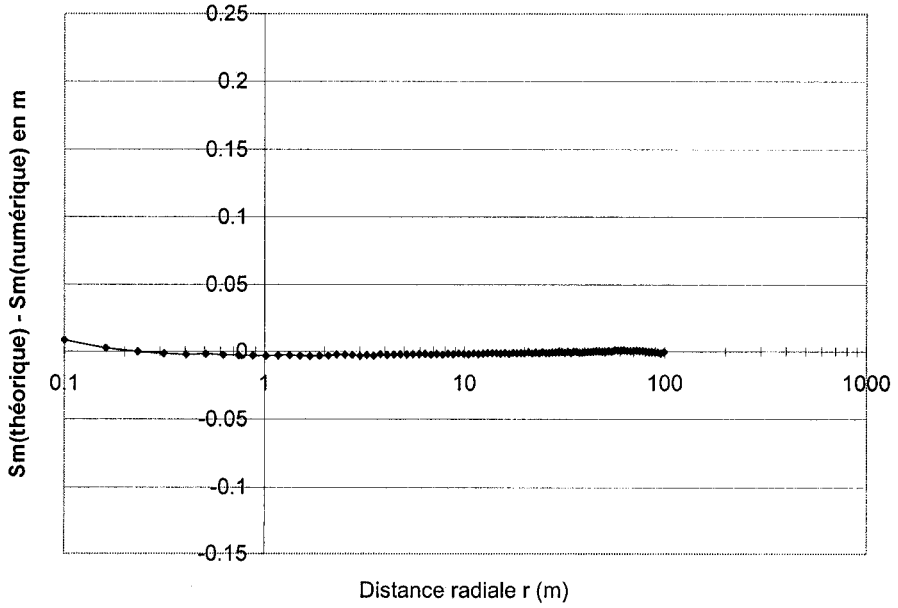


Figure 38 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 18; b=b'=4m.

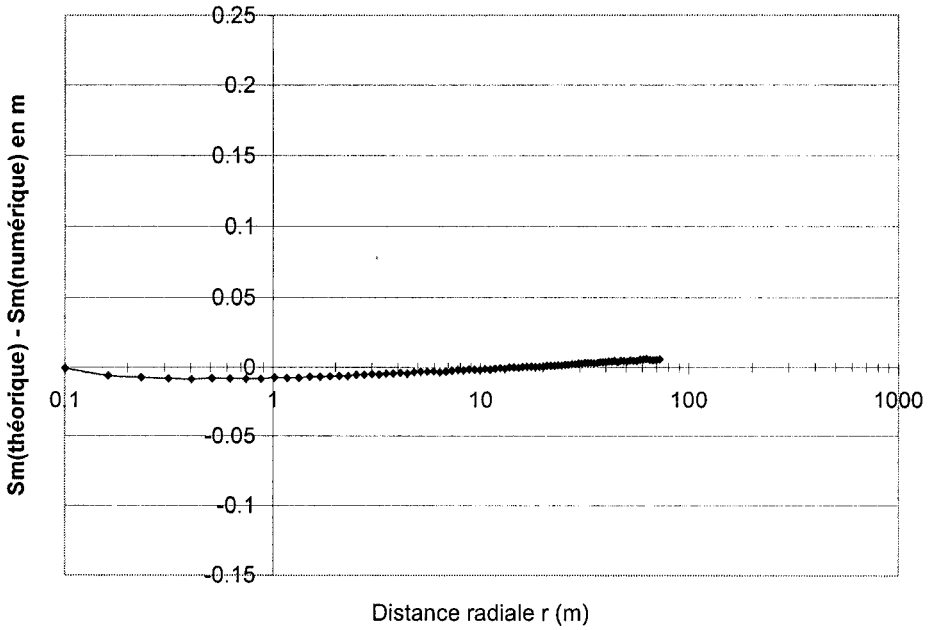


Figure 39 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 19; b=8m et b'=2m.

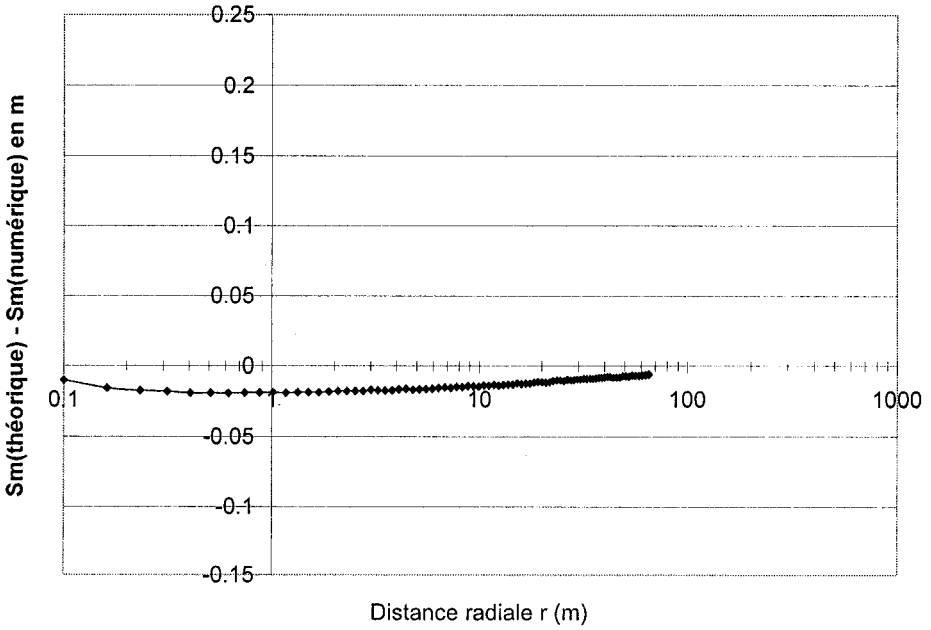


Figure 40 : Écart entre la valeur du rabattement obtenue avec Seep/w et la valeur obtenue théoriquement (DeGlee) pour le cas 20; b=16m et b'=1m.