UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉTECTION DES FRONTIÈRES PENDANT LA PHASE REMONTÉE DES ESSAIS D'AQUIFÈRES

DJAOUIDA CHENAF
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE MINÉRAL)
MARS 1997

© Djaouida Chenaf, 1997

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
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.

0-612-26416-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

DÉTECTION DES FRONTIÈRES
PENDANT LA PHASE REMONTÉE DES ESSAIS D'AQUIFÈRES

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

M. KAHAWITA René , Ph.D., président
M. CHAPUIS P. Robert, D.Sc.A., membre et directeur de recherche
M. MILLETTE Denis, Ph.D., membre
M. ROULEAU Alain, Ph.D., membre

A la mémoire de ma très chère soeur ainée. Dr Djamila B. Chenaf.

A mon pays natal l'Algérie qu'il retrouve paix et stabilité.

A eux qui m'ont offert leur jeunesse, leur amour et leur soutien continuels sans relâche: mes adorables parents.

A mon frère et mes petites soeurs.

A tous ceux qui me sont chers ...

REMERCIEMENTS

Cette thèse fut élaborée au département de Génie Minéral, Section mines, à l'École Polytechnique de Montréal. De là, je tiens à remercier la direction, le corps professoral, le personnel technique et administratif pour leur aimable accueil.

Je m'adresserais plus particulièrement à mon directeur de thèse, le docteur Robert P. Chapuis pour la confiance qu'il a placée en moi en m'accueillant dans ce département et en dirigeant ce travail. Ses compétences scientifiques, l'excellence des rapports humains qu'il a su entretenir et les fructueuses et amicales discussions que nous avons eues ont permis de le mener à bien. Je ne saurais comment le remercier de n'avoir épargné ni son temps, ni sa patience, ni ses judicieux conseils dont l'importance et la qualité sont pour une grande part sans égal. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de mon admiration.

Ce travail est redevable à tous mes enseignants qui surent éveiller en moi le goût et la rigueur de la recherche à travers un enseignement de qualités principalement les professeurs Laid Baghdadi et Ménad H. Chenaf de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Alger ainsi que le docteur Michel Massiéra de l'École de génie de l'Université de Moncton.

Je ne saurais oublier de remercier tous mes amis pour leur aide discrète mais efficace et la sympathie que j'ai toujours trouvée auprès d'eux, qui m'ont grandement aidé à mener à bien ce travail. Je leur souhaite plein succès.

Que tous mes camarades de l'École et du Département soient associés à ces remerciements pour la bonne ambiance qu'ils ont su créer durant ces années.

Pour l'aide financière fournie, je remercie le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

RÉSUMÉ

Le problème de l'estimation du coefficient d'emmagasinement à partir des données de la remontée a été mis de côté pour très longtemps. Depuis les travaux de Theis en 1935, le nombre de publications qui proposent une méthode pour déterminer ce paramètre est très limité. Ce nombre se résume, à notre connaissance à quatre publications. Toutes ces méthodes quoiqu'elles constituent une progression dans l'interprétation des données de la remontée (s', t'), demeurent limitées au cas où le coefficient d'emmagasinement durant cette phase reste égale à celui de la phase de pompage (S' = S) qui précède et au cas particulier où l'aquifère est infini. Ainsi :

1. lorsque la première hypothèse (S = S') n'est pas vérifiée, l'utilisation de ces méthodes conduit à des interprétations très erronées.
2. lorsque la deuxième hypothèse (aquifère infini) n'est pas vérifiée, on est alors confronté à un problème pour lequel aucune solution n'est disponible.

Dans le cas d'un aquifère infini, cette thèse propose deux méthodes pour la détermination directe de S' et la vérification de la valeur de S par la seule interprétation des rabattements résiduels, dans le cas général où $S \neq S'$. Dans le cas d'un aquifère limité par une frontière linéaire de recharge ou imperméable, l'influence du choix du temps d'arrêt de la pompe sur la courbe de remontée est examinée. A partir de là trois méthodes sont présentées qui nous permettent de déterminer les coefficients d'emmagasinement S et S' et la position et l'orientation de la frontière (r_i). La transmissivité de l'aquifère est également

déterminée par ces méthodes lesquelles se basent sur la solution de Theis et l'approximation de Cooper-Jacob dans les conditions d'un aquifère confiné. Plusieurs exemples de cas synthétiques et de cas réels sont utilisés pour fin d'illustration. Les exemples synthétiques sont construits en considérant les 30 premiers termes des fonctions de puits, W(u) et W(u'). Les exemples confirment la validité des équations et des méthodes proposées. Dans chaque cas d'aquifère à nappe captive (infini, à frontière imperméable ou à frontière de recharge), un organigramme est proposé pour une utilisation efficace des méthodes et un contrôle de la qualité des paramètres tirés des phases de pompage et de remontée.

ABSTRACT

The problem of determining the storage coefficient using the interpretation of recovery data has been neglected for a very long time. Since the work of Theis (1935), the number of publications which propose a method to evaluate this parameter is very limited: There are, to our knowledge, only four. Despite the fact that these methods represent a progress in the interpretation of recovery data (s', t'), they are still limited to the case where the storage coefficient during the recovery phase remains equal to that of the pumping phase (S' = S) and to the particular case of an infinite aquifer. When:

1. The first assumption (S' = S) is not satisfied, the use of these methods yields a completely erroneous interpretation.
2. The second assumption (infinite aquifer) is not satisfied, there is no solution available.

For the case of an infinite aquifer, this thesis proposes two methods to make a direct determination of S' and to verify S from the analysis of residual drawdown, in the general condition where $S \neq S'$. In the case of recharge or impervious linear boundary conditions, the influence of the choice of the time recovery origin on the residual drawdown curve shape is examined. Three methods are then proposed to make the evaluation of S, S' and r_i possible from each residual data set.

The transmissivity of the aquifer is also determined by these methods which are based on the Theis solution and Cooper-Jacob approximation in confined aquifer

conditions. Several examples of synthetic and real cases are used for illustration. The synthetic examples are constructed considering the first 30 terms of the well functions W(u) and W(u'). These examples confirm the validity of proposed equations and methods. For each case of confined aquifer (infinite, with an impervious boundary or a recharge boundary), a flow chart is given for the efficient use of the methods and to control the quality of parameters derived from pumping and recovery phases.

TABLE DES MATIÈRES

Page

DEDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES TABLEAUX xx

LISTE DES FIGURES xxv

LISTE DES SYMBOLES xli

CHAPITRE I - INTRODUCTION

1.1 Définition du problème et objectifs de l'étude 1

1.2 Méthodologie 3

CHAPITRE II - LES AQUIFÈRES ET LEURS PARAMÈTRES DÉFINITIONS GÉNÉRALES

2.1 INTRODUCTION 5

2.2 HYDROGÉOLOGIE: SCIENCE DES

DES EAUX SOUTERRAINES 5

2.3 LES AQUIFÈRES: RÉSERVOIRS D'EAU SOUTERRAINS 6

2.4 PARAMÈTRES DES AQUIFÈRES 6

2.4.1 Débit spécifique, S_y 7

2.4.2 Porosité et indice des vides 8

2.4.3 Teneur en eau volumique 9

2.4.4 Perméabilité et conductivité hydraulique 12

2.4.5 Transmissivité 13

2.4.6 Coefficient d'emmagasinement 14

CHAPITRE III - ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN POMPAGE ET EN REMONTÉE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACTUELLES

3.1 INTRODUCTION 25

3.2 DÉFINITION ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE POMPAGE 25

3.2.1 AQUIFERE CONFINÉ INFINI 27

3.2.2 AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIERE 32

3.2.2.1 Frontière imperméable 32

3.2.2.2 Frontière de recharge 34

3.3 INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE REMONTÉE 35

3.3.1 AQUIFERE CONFINÉ INFINI 36

3.3.2 AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIERE 40

3.4 LA TRANSMISSIVITÉ ET LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT EN POMPAGE ET EN REMONTÉE 41

3.4.1 TRANSMISSIVITÉ 41

3.4.2 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT 42

3.4.3 ÉCARTS ENTRE T ET T', S ET S' 43

CHAPITRE IV - APPLICATIONS DES MÉTHODES NUMÉRIQUES A LA SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES - CAS PARTICULIER DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ET DU LOGICIEL SEEP/W

4.1 INTRODUCTION 45

4.2 LES MÉTHODES NUMÉRIQUES EN HYDROGÉOLOGIE CAS PARTICULIER DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS. 45

4.3 LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DANS SEEP/W 48

4.3.1 FORMULATION DE LA SOLUTION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'E.D.P. 53

4.3.2 REMARQUES ET CONCLUSIONS 59

CHAPITRE V - SEEP/W: VÉRIFICATION ET UTILISATION

5.1 INTRODUCTION 60

5.2 SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRE EN PHASE DE POMPAGE 61

5.2.1 Essai d'aquifère en pompage dans un aquifère confiné limité par une frontière de recharge circulaire 62

5.2.1.1 Analyse axisymétrique 63

5.2.1.1.1 Caractéristiques générales de calcul 63

i. Régime permanent 63

i.1 Maillage 64

i.2 Conditions aux limites 64

i.3 Interprétation des résultats 64

ii. Régime transitoire 67

ii.1 Maillage 67

ii.2 Conditions aux limites 67

ii.3 Conditions initiales 68

ii.4 Discrétisation du temps 69

ii.5 Interprétation des résultats 69

5.2.1.2 Analyse en plan 71

5.2.1.2.1 Caractéristiques générales de calcul 71

i. Régime permanent 72

i.1 Maillage 72

i.2 Conditions aux limites 72

i.3 Interprétation des résultats 73

ii. Régime transitoire 74

ii.1 Maillage 74

ii.2 Conditions aux limites 74

ii.3 Conditions initiales 75

ii.4 Discrétisation du temps 75

ii.5 Interprétation des résultats 75

5.3 SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE REMONTÉE 77

5.3.1 Essai d'aquifère en remontée dans un aquifère confiné limité par une frontière de recharge circulaire 78

5.3.1.1 Analyse axisymétrique 79

5.3.1.1.1 Maillage 79

5.3.1.1.2 Conditions aux limites 79

5.3.1.1.3 Conditions initiales 81

5.3.1.1.4 Discrétisation du temps 82

5.3.1.1.5 Interprétation des résultats 83

5.3.1.2 Analyse en plan 86

5.3.1.2.1 Maillage et conditions aux limites 87

5.3.1.2.2 Conditions initiales et discrétisation du temps 87

5.3.1.2.3 Interprétation des résultats 87

5.4 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION 88

CHAPITRE VI - NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DE LA TRANSMISSIVITÉ ET DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DANS LE CAS D'UN AQUIFÈRE INFINI

6.1 INTRODUCTION 154

6.2 ESTIMATION DE T ET S: ÉQUATIONS EXISTANTES ET NOUVELLES 155

6.2.1 Discussion des équations existantes 158

6.2.2 1ère nouvelle méthode: méthode des rabattements résiduels normalisés 159

6.2.3 2ème nouvelle méthode: méthode des écarts des rabattements résiduels 161

6.2.4 Discussion des équations nouvelles 162

6.3 EXEMPLES NUMÉRIQUES 163

- Exemple No.1 (cas synthétique) 163
- Exemple No.2 (Todd, 1980, pp.127 ET 134) 166
- Exemple No.3 : Cas réel (S = S')
  (USDI Ground Water Manual, pp. 120) 167

- Exemple No.4 : Cas réel (S ≠ S')

(Forkasiewicz, 1972) 168

6.4 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS 169

CHAPITRE VII - NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET DE LA TRANSMISSIVITÉ DANS LE CAS D'UN AQUIFÈRE LIMITÉ PAR UNE FRONTIÈRE DE RECHARGE LINÉAIRE.

7.1 INTRODUCTION 205

7.2 ANALYSE DE LA COURBE DES RABATTEMENTS: NOUVELLE APPROCHE 206

7.3 INTERPRÉTATION DES DONNÉES DE LA REMONTÉE: ÉQUATIONS NOUVELLES 211

7.3.1 Remontée dans la ZONE B 211

7.3.2 Remontée dans la ZONE D 211

7.3.2.1 Courbe des données corrigées de remontée (s_{MAX} -s') vs logt' 213

7.3.2.2 Courbe des rabattements résiduels corrigés: s' vs log(t_{cor}/t' - 1) 213

7.3.3 Remontée dans la ZONE C 215

7.4 EXEMPLE NUMÉRIQUE 217

- Exemple No.1 (cas synthétique) 217

- Exemple No.2: cas réel (Forkasiewicz, 1972) 223

7.5 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS 226

CHAPITRE VIII - NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET DE LA TRANSMISSIVITÉ DANS LE CAS D'UN AQUIFÈRE LIMITÉ PAR UNE FRONTIÈRE IMPERMÉABLE LINÉAIRE

8.1 INTRODUCTION 266

8.2 ANALYSE DE LA COURBE DES RABATTEMENTS: NOUVELLE APPROCHE 267

8.3 INTERPRÉTATION DES DONNÉES DE LA REMONTÉE: ÉQUATIONS NOUVELLES 269

8.3.1 Remontée dans la ZONE B 270

8.3.2 Remontée dans la ZONE D 271

8.3.2.1 Méthode de (s_{P2} - s') vs logt' 273

8.3.2.2 Méthode de (s'_{ini} - s') vs logt/t' 274

8.3.2.3 Méthode de s'/s'_{ini} vs logt' 275

8.3.3 Remontée dans la ZONE C 277

8.4 Exemple numérique (cas synthétique) 278

8.5 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS 286

CHAPITRE IX - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES 319

RÉFÉRENCES 322

LISTE DES TABLEAUX

Tableau **Page**

2.1 Quelques valeurs types du débit spécifique (Todd, 1980) 23

2.2 Quelques intervalles des valeurs de la porosité (Freeze and Cherry, 1979) 23

2.3 limites des intervalles de variation de l'indice des vides pour certains sols types (McCarthy, 1988) 24

2.4 intervalles des valeurs types de conductivité hydraulique 24

6.1 Essai de pompage (cas synthétique, r = 2 m) 171

6.2 Essai de remontée (cas synthétique, r = 2 m, S = S' = 2,25E-4) $t_{arrêt}$ = 3000 s, et $s_{arrêt}$ = 2,679 m 172

6.3 Essai de remontée (cas synthétique, r = 2 m, S = 2S' = 2,25E-4) $t_{arrêt}$ = 3000 s, et $s_{arrêt}$ = 2,679 m 173

6.4 Essai de pompage (Todd, 1980, pp.127) 174

6.5 Essai de remontée (todd, 1980, pp. 134) 175

6.6 Essai de pompage (USDI, 1977, pp. 119) 176

6.7 Essai de remontée (USDI, 1977, pp. 120) 177

6.8 Essai de pompage à Ivry-sur-Seine (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre situé à r = 110 m 178

6.9 Essai de remontée à Ivry-sur-Seine (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre situé à r = 110 m 179

6.10 Valeurs des paramètres T, S et S' déterminées par la phase de pompage et de remontée de l'exemple No.4 (Ivry-sur-Seine) (Forkasiewicz, 1972) au piézomètre P11, situé à r = 110 m 180

7.1 Essai de pompage (essai synthétique) 227

7.2 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P1, ß = 100) 228

7.3 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60) 229

7.4 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P3, ß = 40) 230

7.5 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P1, ß = 100) 231

7.6 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60) 232

7.7 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P3, ß = 40) 233

7.8 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P1, ß = 100) 234

7.9 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P2, ß = 60) 235

7.10 Remontée en ZONE B, $t_{arrêt}$ = 50 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P3, ß = 40) 236

7.11 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P1, ß = 100) 237

7.12 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P2, ß = 60) 238

7.13 Remontée en ZONE D, $t_{arrêt}$ = 100 000 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P3, ß = 40) 239

7.14 Essai de pompage: essai réel (Forkasiewicz, 1972) (Piézomètre P11, r_r = 151,5 m) 240

7.15 Essai de remontée: essai réel (Forkasiewicz, 1972) (Piézomètre P11, r_r = 151,5 m) 241

7.16 Valeurs des paramètres T, S, S' et r_i déterminées par la phase de pompage et de remontée de l'exemple No.2 (essai réel) au piézomètre P11 (r_r = 151,5 m) 242

8.1 Essai de pompage dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique) 287

8.2 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100) 288

8.3 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60) 289

8.4 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40) 290

8.5 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100) 291

8.6 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60) 292

8.7 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40) 293

8.8 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100) 294

8.9 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60) 295

8.10 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40) 296

8.11 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100) 297

8.12 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60) 298

8.13 Essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable. (Essai synthétique). Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40) 299

LISTE DES FIGURES

Figure **Page**

5.1 Essai d'aquifère au centre d'un aquifère confiné limité par une recharge circulaire: modèle physique 90

5.2 Variations en fonction de la pression d'eau de: (a) la conductivité hydraulique et (b) teneur en eau volumique du sol formant l'aquifère testé 91

5.3 Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés 92

5.4 Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles 93

5.5 Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs log r 94

5.6 Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs log r 95

5.7 Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage

d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis avec noeuds secondaires et conditions aux limites 96

5.8 Analyse axisymétrique avec noeuds secondaires en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles 97

5.9 Analyse axisymétrique avec noeuds secondaires en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs log r 98

5.10 Analyse axisymétrique avec noeuds secondaires en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs log r 99

5.11 Comparaison des charges trouvées par l'analyse des deux modèles sans et avec noeuds secondaires 100

5.12 Comparaison des rabattements trouvés par l'analyse des deux modèles sans et avec noeuds secondaires 101

5.13 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés 102

5.14 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage

d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. les fonctions de conditions aux limites utilisées 103

5.15 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés comme conditions initiales 104

5.16 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Discrétisation du temps utilisée 105

5.17 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des charges en fonction du temps pour différents piézomètres, h(r,t) vs logt 106

5.18 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des rabattements en fonction du temps pour différents piézomètres, s(r,t) vs logt 107

5.19 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des charges en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, h(r,t) vs logr 108

5.20 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des rabattements en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, s(r, t) vs logr 109

5.21 Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation du rayon d'action, R, du puits en fonction de la racine carrée du temps, $t^{1/2}$, et sa comparaison avec la solution théorique comme si l'aquifère était infini 110

5.22 Analyse axisymétrique de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme de la charge hydraulique en fonction de la distance radiale 111

5.23 Analyse axisymétrique de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme du rabattement en fonction de la distance radiale 112

5.24 Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés 113

5.25 Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles 114

5.26 Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs log r 115

5.27 Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs log r 116

5.28 Analyse en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs log r, obtenue selon l'analyse axysimétrique et l'analyse en plan 117

5.29 Analyse en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs log r, obtenue selon l'analyse axysimétrique et l'analyse en plan 118

5.30 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés 119

5.31 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées 120

5.32 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés comme conditions initiales 121

5.33 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob de la charge en fonction du temps pour différents piézomètres, h(r,t) vs logt 122

5.34 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob du rabattement en fonction du temps pour différents piézomètres, s(r,t) vs logt 123

5.35 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob de la charge en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, h(r,t) vs logr 124

5.36 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des rabattements en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, s(r, t) vs logr 125

5.37 Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation du rayon d'action, R, du puits en fonction de la racine carrée du temps, $t^{1/2}$, et sa comparaison avec la solution théorique comme si l'aquifère était infini et avec la solution par le modèle axisymétrique 126

5.38 Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme de la charge hydraulique en fonction de la distance radiale 127

5.39 Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme du rabattement en fonction de la distance radiale 128

5.40 Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs log r, obtenue selon l'analyse axysimétrique et l'analyse en plan 129

5.41 Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs log r, obtenue selon l'analyse axysimétrique et l'analyse en plan 130

5.42 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites 131

5.43 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées . . 132

5.44 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées . . 133

5.45 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. (a) arrêt de la pompe en 1 secondes, (b) arrêt de la pompe en 10 secondes 134

5.46 Analyse de la phase de remontée selon le schéma direct, après 30000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Discrétisation du temps utilisée 135

5.47 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 1 seconde. Représentation du rabattement résiduel en fonction de t/t' 136

5.48 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 10 seconde. Représentation du rabattement résiduel en fonction de t/t' 137

5.49 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour une femeture de la pompe en 1 seconde et en 10 secondes 138

5.50 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 1 seconde. Courbes de remontée pour le nouveau choix de l'origine du temps t' 139

5.51 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 10 secondes. Courbes de remontée pour le nouveau choix de l'origine du temps t' 140

5.52 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de remontée avec le nouveau choix de l'origine du temps t' pour une femeture de la pompe en1 seconde et en 10 secondes 141

5.53 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattements résiduel en fonction de t/t' 142

5.54 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 0,1 m (au puits) obtenus par les deux schémas de remontée et la droite théorique 143

5.55 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison avec la droite théorique des courbes de remontée avec le nouveau origine du temps t' à r = 0,1 m (au puits) obtenus par les deux schémas d'analyse 144

5.56 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 0,8 m obtenus par les deux schémas de remontée et la droite théorique 145

5.57 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison avec la droite théorique des courbes de remontée avec le nouveau origine du temps t' à r = 0,8 m obtenus par les deux schémas d'analyse 146

5.58 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 5,4 m et r = 21 m obtenus par les deux schémas de remontée et la droite théorique 147

5.59 Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma indirect après 100 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattement résiduel en fonction de t/t' 148

5.60 Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites 149

5.61 Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabttement résiduel en fonction de t/t' 150

5.62 Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 100 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabttement résiduel en fonction de t/t' 151

5.63 Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Comparaison des courbes de remontée au puits obtenues par les deux analyses 152

5.64 Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 100 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Comparaison des courbes de remontée au puits obtenues par les deux analyses 153

6.1 Rabattements en fonction du temps 181

6.2 Rabattements résiduels en fonction de t/t' 182

6.3 (s_P - s') en fonction de t/t' 183

6.4 s'/s'_{ini} en fonction de t/t' 184

6.5 (s'_{ini} - s') en fonction de t/t' 185

6.6 rabattements résiduels en fonction de t/t'. 186

6.7 (s_P - s') en fonction de t' 187

6.8 s'/s'_{ini} en fonction de t/t'. 188

6.9 (s'_{ini} - s') en fonction de t/t' 189

6.10 Interprétation de s vs logt pour l'exemple de Todd 190

6.11 Interprétation de s' vs logt/t' pour l'exemple de Todd 191

6.12 (s_P - s') vs logt' pour l'exemple de Todd 192

6.13 s'/s'_{ini} vs logt/t' pour l'exemple de Todd 193

6.14 (s'_{ini} - s') vs logt/t' pour l'exemple de Todd 194

6.15 Interprétation de s(r,t) vs logt pour l'exemple de l'USDI Groundwater Manual 195

6.16 Interprétation de s'vs logt/t' pour l'exemple de l'USDI Groundwater Manual 196

6.17 (s_P - s') vs logt' pour l'exemple de l'USDI Groundwater Manual 197

6.18 s'/s'_{ini} vs logt/t' pour l'exemple de l'USDI Groundwater Manual 198

6.19 (s'_{ini} - s') vs logt/t' pour l'exemple de l'USDI Groundwater Manual 199

6.20 Rabattements en fonction du temps 200

6.21 Rabattements résiduels en fonction de t/t' 201

6.22 s'/s'_{ini} vs log (t/t') 202

6.23 $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t' 203

6.24 Méthode d'interprétation des données de remontée dans le cas d'un aquifère infini 204

7.1 Analyse de la courbe de rabattements: nouvelle approche 243

7.2 Courbes de rabattements en fonction du temps, s vs logt 244

7.3 Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'. Cas où S = S' 245

7.4 Remontée en ZONE B, $(s_P - s')$ vs logt'. Cas où S = S' 246

7.5 Remontée en ZONE B, (s'/s'_{ini}) vs logt/t'. Cas où S = S' 247

7.6 Remontée en ZONE B, $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t'. Cas où S = S' 248

7.7 Remontée en ZONE D, s' vs logt'. Cas où S = S' 249

7.8 Remontée en ZONE D, $(s_{MAX} - s')$ et $(s_P - s')$ vs logt'. Cas où S = S'. 250

7.9 Remontée en ZONE D, s' vs logt/t' et $\log(t_{cor}/t' - 1)$. Cas où S = S' 251

7.10 Remontée en ZONE D, s' vs $\log t_{cor}/t'$ et s' vs $\log(t_{cor}/t'-1)$ Cas où S = S' 252

7.11 Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'. Cas où S ¹ S' 253

7.12 Remontée en ZONE B, $(s_P - s')$ vs logt'. Cas où S= S' 254

7.13 Remontée en ZONE B, (s'/s'_{ini}) vs logt/t'. Cas où S = S'. 255

7.14 Remontée en ZONE B, (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Cas où S = S' 256

7.15 Remontée en ZONE D, s' vs logt'. Cas où S = S' 257

7.16 Remontée en ZONE D, (s_{MAX} - s') et (s_P - s') vs logt'. Cas où S = S' 258

7.17 Remontée en ZONE D, s' vs logt/t' et log(t_{cor}/t' - 1) . Cas où S = S' 259

7.18 Remontée en ZONE D, s' vs logt_{cor}/t' et s' vs log(t_{cor}/t'-1)
Cas où S = S' 260

7.19 Rabattements en fonction du temps, s vs logt 261

7.20 Rabattements résiduels en fonction du temps, s' vs logt' 262

7.21 Rabattements résiduels, s' vs log(t/t') et log(t_{cor}/t' -1) 263

7.22 (s_{max} - s') vs logt' 264

7.23 Méthodes d'interprétation des données de remontée dans
la cas d'un aquifère confiné limité par une frontière de
recharge 265

8.1 Analyse de la courbe de rabattements. Définitions des zones A à D 300

8.2 Courbes de rabattements en fonction du temps, s vs logt 301

8.3 Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'. Cas où S = S' 302

8.4 Remontée en ZONE B, (s_{P1} -s') vs logt'. Cas où S = S' 303

8.5 Remontée en ZONE B, (s'/s'_{ini}) vs logt/t'. Cas où S = S' 304

8.6 Remontée en ZONE B, (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Cas où S = S' 305

8.7 Remontée en ZONE D, s' vs logt'. Cas où S = S' 306

8.8 Remontée en ZONE D, (s_{P2} - s') vs logt'. Cas où S = S'. 307

8.9 Remontée en ZONE D, s'/s'_{ini} . Cas où S = S' 308

8.10 Remontée en ZONE D, (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Cas où S = S' 309

8.11 Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'. Cas où S = 2S' 310

8.12 Remontée en ZONE B, (s_{P1} -s') vs logt'. Cas où S= 2S' 311

8.13 Remontée en ZONE B, (s'/s'_{ini}) vs logt/t'. Cas où S = 2S'. 312

8.14 Remontée en ZONE B, (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Cas où S = 2S' 313

8.15 Remontée en ZONE D, s' vs logt/t'. Cas où S = 2S' 314

8.16 Remontée en ZONE D, (s_{P2} - s') vs logt'. Cas où S = 2S' 315

8.17 Remontée en ZONE D, s'/s'_{ini} vs logt/t'. Cas où S = 2S' 316

8.18 Remontée en ZONE D, (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Cas où S = 2S' 317

8.19 Méthodes d'interprétation des données de remontée dans la cas d'un aquifère confiné limité par une frontière imperéable. 318

LISTE DES SYMBOLES

Cette liste est indispensable pour la définition de tous les symboles qui apparaissent dans les équations du texte.

LETTRES ROMAINES

b	épaisseur de l'aquifère, [L]
E_w	module de déformation volumique du fluide, [$ML^{-1}T^{-2}$]
E_s	module de déformation élastique du solide de l'aquifère, [$ML^{-1}T^{-2}$]
g	accélération de la pesanteur, [LT^{-2}]
i	gradient hydraulique, [-]
k	conductivité hydraulique, [LT^{-1}]
k_x	conductivité hydraulique dans la direction x, [LT^{-1}]
k_y	conductivité hydraulique dans la direction y, [LT^{-1}]
k_z	conductivité hydraulique dans la direction z, [LT^{-1}]
K_s	perméabilité intrinsèque, [L^2]
n	porosité, [-]
n_e	porosité effective, [-]

Q	débit de pompage, $[L^3T^{-1}]$
r	distance du centre du puits au piézomètre, [L]
r_i	distance du piézomètre au puits image, [L]
r_r	distance du piézomètre au puits réel, [L]
r_w	rayon du puits de pompage, [L]
s	rabattement à la distance r et au temps t, [L]
s'	rabattement résiduel à la distance r et au temps t', [L]
s_w	rabattement dans le puits au temps t, [L]
S	coefficient d'emmagasinement durant le pompage, [-]
S'	coefficient d'emmagasinement durant la remontée, [-]
S_s	emmagasinement spécifique, $[L^{-1}]$
S_r	degré de saturation, [-]
S_r	rétention spécifique, [-]
S_y	débit spécifique, [-]
t	temps compté depuis le début du pompage, [T]
t'	temps compté depuis l'arrêt du pompage, [T]
$t_{arrêt}$	temps à l'arrêt de la pompe, correspond à t' = 0, [T]
T	transmissivité hydraulique de l'aquifère durant le pompage, $[L^2T^{-1}]$
T'	transmissivité hydraulique de l'aquifère durant la remontée, $[L^2T^{-1}]$
T/S	diffusivité hydraulique de l'aquifère en pompage, $[L^2T^{-1}]$
T'/S'	diffusivité hydraulique de l'aquifère en remonteé, $[L^2T^{-1}]$
u	argument de la fonction de puits en pompage, [-]
u'	argument de la fonction de puits en remontée, [-]

u_a	pression d'air intestitiel, $[ML^{-1}T^{-2}]$
u_w	pression d'eau intestitielle, $[ML^{-1}T^{-2}]$
V	volume total, $[L^3]$
V_s	volume des grains solides, $[L^3]$
V_v	volume des vides, $[L^3]$
V_w	volume d'eau, $[L^3]$
V_{wg}	volume d'eau gravitaire, $[L^3]$
V_{wr}	volume d'eau de rétention, $[L^3]$
V_v	volume des vides, $[L^3]$
$W(u)$	Fonction de puits de Theis, fonction exponentielle intégrale, [-]

LETTRES GRECQUES

$\alpha = 1/E_s$	compressibilité verticale du solide de l'aquifère, $[M^{-1}LT^2]$
$\theta(u)$	teneur en eau volumique en fonction de la pression interstitielle, [-]
$\beta = 1/E_w$	coefficient de compressibilité de l'eau, $[M^{-1}LT^2]$
Δh	variation de la charge hydraulique, [L]
Δu_w	variation de la pression d'eau interstitielle, $[ML^{-1}T^{-2}]$
ΔV	variation de volume due à la perte de charge, $[L^3]$
γ_w	poids volumique de l'eau, $[ML^{-2}T^{-2}]$
ρ	masse volumique, $[ML^{-3}]$

$\Delta\rho$	variation de la masse volumique, $[ML^{-3}]$
σ	contrainte totale dans la direction x et/ou y, $[ML^{-1}T^{-2}]$
σ'	contrainte effective, $[ML^{-1}T^{-2}]$

ACRONYMES

SEEP/W : un logiciel d'analyse de l'écoulement souterrain

INDICES

a	air
arrêt	arrêt de la pompe
c	capillaire
e	effectif
g	gravitaire
i	image
I	intersection
ini	initial
max	maximal
r	réel
s	saturé, spécifique
w	eau

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Depuis des millénaires, l'homme a appris à exploiter les ressources en eaux souterraines. Il a réussi à les localiser et à en déterminer certaines limites grâce à des moyens d'exploitation de plus en plus perfectionnés (Brémond, 1965).

La théorie de l'écoulement vers un puits d'une nappe d'eau souterraine constitue l'un des chapitres les plus importants de l'hydraulique souterraine. Il demeure aussi l'un des plus anciens comme en témoignent le mémoire de Darcy et les travaux de Dupuit publiés respectivement en 1856 et en 1863 (Schneebeli, 1956).

1.1 Définition du problème et objectifs de l'étude

L'analyse des écoulements des eaux souterraines dans une formation géologique permet de déterminer sa productivité et ses ressources hydrauliques, ainsi que sa vulnérabilité vis-à-vis des agents de contamination extérieure. Cependant, toute analyse rigoureuse et complète n'est possible que:

1. par une connaissance adéquate à la fois des paramètres physiques et hydrodynamiques qui caractérisent cette formation;

2. par l'identification des limites géologiques et hydrauliques de la réserve des eaux souterraines qui y circulent.

Pour cela des techniques d'essai et d'instrumentation ont été développées durant les six dernières décennies. Les plus classiques sont les essais d'aquifères qui consistent à créer un rabattement dans un puits d'exploitation en phase de pompage. L'évolution de ces rabattements est suivie dans des puits d'observation ou des piézomètres préalablement installés à certaines distances autour de ce puits. Les données de ces rabattements peuvent être exploitées pour estimer la transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement en utilisant différentes méthodes telles que : la méthode de Theis, la méthode de Cooper-Jacob, etc. Lorsque l'essai est de durée suffisante, on peut déterminer également la position et l'orientation des frontières imperméables ou de recharge qui existent. Ces frontières ont une influence considérable sur le volume des ressources en eaux souterraines disponibles et sur leur aménagement à grande échelle.

La deuxième phase de l'essai d'aquifère, la phase de remontée, est entamée une fois la pompe fermée (débit de pompage annulé). Les rabattements relevés sont appelés rabattements résiduels. On ne sait les interpréter que pour le cas d'un aquifère infini dont les paramètres sont invariables dans l'espace et le temps, et donc indépendants de l'état de contrainte. Pour le cas général, aucune solution n'est disponible. Le développement de solutions pour cette phase complémentaire et indissociable de la phase de pompage présente plusieurs avantages dans la mesure où :

- d'une part c'est une phase moins coûteuse que la phase de pompage;

- d'autre part, elle fournit des données plus fiables étant donné que l'on ne se préoccupe plus de la constance du débit;
- enfin, c'est une méthode de vérification des paramètres d'aquifères permettant de ;
    - fournir une vérification de la distance et de la position des frontières détectées par la phase pompage (il n'existe actuellement aucune méthode de vérification de l'interprétation);
    - déterminer le coefficient d'emmagasinement en remontée S' d'une part et la compressibilité de l'aquifère d'autre part.

Ainsi, le principal objectif de cette présente recherche est de développer des méthodes d'interprétation des données de remontée pour la détermination de T' et S' pour le cas d'un aquifère confiné. De plus, cette étude permet de déterminer pour un aquifère limité par une frontière simple la position et l'orientation de cette frontière.

1.2 Méthodologie

La présente thèse comprend neuf chapitres. Dans le chapitre 2, suivant cette introduction, nous rappelerons la définition des aquifères et des paramètres importants qui les caractérisent. Dans le chapitre 3, nous passerons en revue les quelques méthodes d'interprétation des essais d'aquifère pour l'évaluation des paramètres hydrodynamiques, T et S. Nous remarquerons dans ce chapitre que l'interprétation de la phase de remontée d'un essai d'aquifère est bien préliminaire et incomplète.

La méthode des éléments finis est de plus en plus utilisée pour l'étude en détail des problèmes reliés aux écoulements souterrains. Nous l'exploiterons dans cette étude par le biais du logiciel « SEEP/W » que nous présenterons en résumé dans le chapitre 4. Les résultats des analyses réalisées sont présentés au chapitre 5. Elles sont effectuées selon deux grandes parties. En première partie un ensemble d'analyses et de vérifications des cas d'écoulement variés est réalisé afin de s'assurer de la performance de l'outil d'analyse numérique SEEP/W. En deuxième partie ce logiciel nous a permis de mettre en évidence les différentes réponses d'un aquifère confiné aux effets de pompage et de remontée durant un essai d'aquifère. En particulier les effets sur la courbe de remontée à la fois du temps mis pour fermer la pompe et du moment choisi pour procéder à cette fermeture.

Aux chapitres 6, 7 et 8 des méthodes d'interprétation des données de remontée sont développées respectivement pour un aquifère infini, avec une frontière de recharge et avec une frontière imperméable. Ces méthodes nous permettent à la fois de déterminer les paramètres de l'aquifère en remontée T' et S' et de vérifier ceux en phase de pompage, soit T et S. En utilisant la solution de Theis et le principe de superposition pour la remontée, nous avons pu générer synthétiquement des données à l'aide du programme SUPTHEIS qui nous ont permis l'application de ces méthodes. Ce programme, a été écrit dans le cadre de cette étude, en Fortran 77. Des cas d'essai réels ont également été interprétés par ces nouvelles méthodes.

Au chapitre 9, dernière partie de ce rapport, on passe en revue les principaux résultats et les conclusions qui se dégagent de cette étude.

CHAPITRE II

LES AQUIFÈRES ET LEURS PARAMÈTRES

DÉFINITIONS GÉNÉRALES

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons, après une définition sommaire des aquifères, les différents importants paramètres qui les caractérisent.

2.2 HYDROGÉOLOGIE: SCIENCE DES EAUX SOUTERRAINES

L'hydrogéologie est la science des eaux qui se trouvent à l'intérieur du sol. Elle a pour but l'étude de la situation, la détermination de la quantité disponible ainsi que les qualités. Elle doit indiquer en même temps les moyens appropriés pour faire servir ces eaux aux besoins de l'humanité (Imbeaux, 1930). L'hydrogéologie est une science récente qui est restée depuis trop longtemps soit confondue avec l'hydraulique soit annexée à l'hydrologie. Elle était connue sous le nom de « l'hydrologie des eaux souterraines » ou encore sous le nom de « l'hydraulique des eaux souterraines ».

2.3 LES AQUIFÈRES: RÉSERVOIRS D'EAU SOUTERRAINS

L'aquifère est la formation géologique saturée d'eau et qui peut fournir ou emmagasiner un volume considérable de celle-ci. On distingue des aquifères à nappes libres et des aquifères confinés. Dans le cas des dépôts non consolidés (des alluvions), ils sont généralement formés de sables, graviers ou d'un mélange des deux. Dans le cas des roches l'eau circule par les interstices, les fissures ou un réseau de celles-ci.

L'eau souterraine est soumise aux tensions capillaires, à la gravité et aux forces d'attraction entre les molécules d'eau et la surface des solides. Les théories générales s'appliquant au mouvement de l'eau souterraine et les lois générales de circulation qui s'y appliquent peuvent être trouvées dans plusieurs références de base parmi lesquelles citons: Schneebeli (1966), Castany (1967, 1982), Todd (1980), etc.

2.4 PARAMÈTRES DES AQUIFÈRES

L'étude des écoulements souterrains est fondée sur l'application des lois de l'hydraulique. De ce fait, il est nécessaire de connaître les caractéristiques physiques du milieu dont dépendent ces écoulements. Parmi les paramètres les plus importants qui caractérisent un aquifère, on peut considérer les paramètres transmissifs (conductivité hydraulique, transmissivité) et les paramètres capacitifs (emmagasinement, porosité, débit spécifique) que nous définirons ci-après:

2.4.1 Débit spécifique, S_y

C'est le rapport du volume d'eau qu'un aquifère peut fournir par gravité après saturation V_{wg}, au volume total de l'aquifère exprimé en pourcentage (Meinzer, 1923, p.28).

$$S_y = \frac{V_{wg}}{V} \quad \ldots\ldots (2.1)$$

La différence entre le volume d'eau total V_w contenu dans un volume d'aquifère V saturé et le volume d'eau écoulé par gravité V_{wg} est le volume d'eau de rétention exprimé par V_{wr}, soit;

$$V_{wr} = V_w - V_{wg} \quad \ldots\ldots (2.2)$$

Rapporté au volume total de l'aquifère, il définit la rétention spécifique S_r, comme :

$$S_r = \frac{V_{wr}}{V} \quad \ldots\ldots (2.3)$$

Le tableau 2.1 regroupe quelques valeurs représentatives usuelles du débit spécifique. D'après ce tableau, on note une variation de ce paramètre comprise entre 0.01 et 0.30 (Freeze and Cherry, 1979). La valeur de ce paramètre se situe autour de 30% pour le sable uniforme (Raghunath, 1982).

Pour les formations épaisses non consolidées, les valeurs du débit spécifique chutent généralement jusqu'à 7 - 15%. Ces valeurs diminuent de plus en plus avec la profondeur sous l'effet du compactage.

Le débit spécifique peut être mesuré au laboratoire mais aussi in-situ par les essais d'aquifère (Raghunath, 1982; Todd, 1980)

2.4.2 Porosité et indice des vides

La plupart des sols et roches naturels comportent un certain pourcentage de vides qui peuvent être remplis d'eau ou de fluide. Ainsi, on donne le nom de porosité au pourcentage du volume de l'aquifère occupé par ces vides y compris les communicants et les non communicants.

$$n = \frac{V_V}{V} \qquad (2.4)$$

Dans la définition de la porosité, il convient de distinguer la porosité totale qui définit les vides avec leur propre géométrie et la porosité effective notée n_e, qui définit les vides disponibles pour l'écoulement saturé. Cette porosité effective est une fraction de la porosité totale. Elle peut être déterminée par les essais de traceurs non réactifs.

Pour les formations saturées (degré de saturation, S_r = 100%), la porosité totale exprime la somme du débit spécifique S_y, et de la rétention spécifique S_r:

$$n = S_y + S_r \qquad (2.5)$$

Le tableau 2.2 donne les ordres de grandeur de la porosité totale (De Marsily, 1986).

De même l'indice des vides est défini par:

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad \ldots\ldots (2.6)$$

L'indice des vides est relié à la porosité par:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{ou} \quad n = \frac{e}{1-e} \quad \ldots\ldots (2.7)$$

Il est relié à la teneur en eau massique, w, ($w = W_W/W_S$) par:

$$e = \frac{wG_S}{S_r} \quad \ldots\ldots (2.8)$$

Où: w = teneur en eau

G_S= densité des particules solides

S_r = degré de saturation = V_w/V_v

W_W , W_S = respectivement le poids de l'eau et le poids des grains solides contenus dans un volume de sol, V, de poids, $W = W_S + W_W$.

Le tableau 2.3 rassemble quelques valeurs extrêmes types de l'indice des vides, e .

2.4.3 Teneur en eau volumique

Quand l'eau s'écoule à travers le sol, une quantité d'eau est emmagasinée et retenue à l'intérieur du sol. Cette quantité est fonction de la pression d'eau interstitielle et des caractéristiques de ce sol. Rapportée au volume total, elle définit la teneur en eau volumétrique θ :

$$\theta = \frac{V_W}{V} = n\, S_r \quad \ldots\ldots (2.9)$$

Où: θ = teneur en eau volumique

V = volume total

V_W = volume d'eau contenu dans le volume total de sol ou de roc V

n = porosité

S_r = degré de saturation

La succion représente le déficit de pression qui apparaît dans les pores d'un matériau à la suite des forces de liaison entre l'eau et le squelette solide; dans le cas des sols sablonneux non-saturés, ces forces sont de nature capillaire, alors que dans le cas des sols argileux, l'effet des forces d'adsorption peut prédominer.

La variation de la teneur en eau volumique dépend de la variation de l'état de contrainte et des propriétés du sol. L'état de contrainte peut être décrit par deux variables d'état pour les conditions saturées et non saturées. Ces variables sont $(\sigma - u_a)$ et $(u_a - u_w)$ où σ est la contrainte totale et u_a et u_w sont les pressions interstitielles, respectivement, de l'air et de l'eau (Fredlund et Morgenstern, 1976). On écrit:

$$d\theta_w = m_1^w d(\sigma - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w) \quad \text{(2.10)}$$

Où

m_1^w = pente du graphe $(\sigma - u_a)$ versus θ_w à $d(u_a - u_w)$ nul,

m_2^w = pente du graphe$(u_a - u_w)$ versus θ_w à $d(\sigma - u_a)$ nul,

σ = contrainte totale dans la direction de x et/ou y,

u_a = pression d'air interstitiel

u_w = pression d'eau interstitielle

Comme m_1^w et m_2^w peuvent être considérées constantes pour une étape de temps durant le processus transitoire, la dérivée par rapport au temps de l'équation constitutive peut être exprimée comme;

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = m_1^w \frac{\partial(\sigma - u_a)}{\partial t} + m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \qquad \text{.....(2.11)}$$

Il convient de noter toutefois deux points importants, durant toute la phase transitoire:

1. On suppose qu'il n'y a aucun chargement ou déchargement extérieurs de la masse de sol. Par conséquent la contrainte totale demeure constante (i.e., $\Delta\sigma/\Delta t = 0$)

2. On suppose que la pression interstitielle de l'air reste égale à la pression atmosphérique (i.e., $\Delta u_a / \Delta t = 0$)

Des deux points (1) et (2) on aura (σ - u_a) qui reste constante et n'a donc aucune influence sur la variation de la teneur volumique. Par conséquent la variation de cette dernière ne dépend que de la variation de (u_a - u_w) donc de la variation de la pression d'eau interstitielle u_w étant donné que u_a est constante. Ainsi,

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \qquad \text{.....(2.12)}$$

où m_w est la pente de la courbe d'emmagasinement.

2.4.4 Perméabilité et conductivité hydraulique

La perméabilité k est la propriété d'une formation aquifère de se laisser traverser par un fluide. La conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité K, intègre tout à la fois les caractéristiques du sol k et celles du fluide y circulant (densité et viscosité). Elle a la dimension d'une vitesse, soit unité de longueur sur unité de temps.

Dans le cas d'un aquifère à nappe libre le conductivité hydraulique varie en fonction de la pression interstitielle. Ainsi la conductivité hydraulique décrit une courbe K(u) dont la valeur maximale est à la saturation ($u \geq 0$).

La conductivité hydraulique d'un aquifère est assez élevée. Elle varie à l'intérieur de l'intervalle 10^{-5} à 10^{-2} m/s. Le tableau 2.4 présente quelques valeurs typiques de conductivité hydraulique. Par comparaison, les argiles demeurent imperméables ($K = 10^{-9}$ m/s) malgré leur porosité totale élevée. La petite taille de leur pores leur attribue une très faible valeur de la porosité effective (De Marsily, 1986).

Une des relations populaires pour la conductivité hydraulique des sables (Chapuis et Montour, 1992) est celle proposée par Kozeny (1927) et modifiée par Carman (1937, 1956). Cette équation, connue sous le nom de « équation de Kozeny-Carman » s'exprime comme:

$$K = C\frac{e^3}{1+e} \qquad (2.13)$$

Où C est une constante qui dépend de la forme et de la tortuosité des canaux formés par les pores, de la surface spécifique S et de la densité du solide ainsi que de la viscosité et de la masse volumique de l'eau.

2.4.5 Transmissivité

La transmissivité d'un aquifère, notée T, correspond au débit de l'écoulement de l'eau, à une viscosité cinématique donnée, à travers une section, sous un gradient hydraulique unitaire. Cette section est caractérisée par une largeur égale à l'unité et une hauteur égale à l'épaisseur totale saturée de l'aquifère. Ses dimensions sont $[L^3/T].L^{-1}$. Si b est l'épaisseur saturée de la couche aquifère (épaisseur de la nappe), alors :

$$T = K\,b \qquad (2.14)$$

Ce paramètre hydrodynamique caractérise à la fois la nappe et l'aquifère. Il illustre l'aptitude d'une formation aquifère à véhiculer l'eau. Ainsi, comme l'a mentionné Castany (1982), ce paramètre ne différencie pas une nappe épaisse circulant dans un matériau peu perméable d'une nappe plus réduite contenue dans un horizon plus perméable. Comme pour la conductivité hydraulique, la transmissivité varie avec la température.

Une transmissivité supérieure à 0.015 m^2/s (0.16 pi^2/s) caractérise un bon aquifère à exploiter par puits (Freeze and Cherry, 1979, pp.60)

2.4.6 Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement est une des caractéristiques hydrauliques les plus importantes d'un aquifère. La quantité d'eau qui recharge ou qui décharge un aquifère représente la variation du volume d'eau emmagasiné. En effet, comme il sera montré au chapitre 3 section 3.2, l'écoulement forcé de l'eau dans un aquifère en régime transitoire dépend non seulement de sa conductivité hydraulique mais aussi de la quantité d'eau qu'il peut soit libérer soit prendre.

Si nous examinons le cas d'un pompage (libération d'eau), ce coefficient, nombre sans dimension, caractérise l'aptitude du sol à libérer de l'eau. Toute l'eau contenue dans les vides d'un milieu aquifère n'est cependant pas récupérable. Une partie y reste fixée malgré l'effet de la gravité; elle est retenue par des forces moléculaires, ou des tensions capillaires, ou encore par des affinités chimiques. La porosité d'une roche ne mesure donc pas la quantité d'eau que la roche peut libérer. La quantité d'eau disponible est inférieure à la quantité totale des vides remplis d'eau.

Dans un aquifère à nappe confinée, auquel nous nous intéressons à travers cette étude, le coefficient d'emmagasinement est lié à la fois aux caractéristiques de compressibilité du sol et de l'eau. Le départ de l'eau entraîne une baisse de pression et le liquide contenu dans les pores se dilate par détente élastique fournissant ainsi une certaine quantité d'eau. La pression hydrostatique dans le terrain diminue et les assises superposées, détendues, pèsent sur la trame solide du matériau de l'aquifère, diminuant le

volume des vides. C'est le phénomène représenté par le schéma de Terzaghi (1950) . La diminution de la charge hydraulique Δh est accompagnée d'une diminution de la pression interstitielle Δu. Comme la contrainte totale en tout point dans l'aquifère demeure constante (variation négligeable des masses volumiques saturées):

$$\sigma_v = \sigma' + u = \text{constante} \quad \ldots\ldots (2.15)$$

alors, cette diminution est traduite par une augmentation de la contrainte effective $\Delta\sigma'$, soit:

$$\Delta u = -\Delta\sigma' = -\gamma_w \Delta h(z,t) \quad \ldots\ldots (2.16)$$

Ainsi, l'extraction de l'eau emmagasinée par abaissement de la charge (pompage) est produite selon deux mécanismes:

1. le tassement de l'aquifère causé par l'augmentation de la contrainte effective;
2. l'expansion de l'eau causée par la diminution de la pression interstitielle.

Les travaux de Jacob (1940, 1950) ont permis de formuler la contribution de chacun des deux effets ci-dessus.

1. Tassement de l'aquifère

Le poids total de l'eau W_w dans un aquifère de porosité n, d'épaisseur b et de surface A est : $W_w = \gamma_w n A b$ ..... (2.17)

d'où une masse totale d'eau de: $M_w = \rho_w n Ab$ ..... (2.18)

La masse d'eau ΔM_w contenue dans un petit volume d'aquifère saturé, $\Delta V_0 = \Delta x \Delta y \Delta z$, est exprimée par:

$\Delta M_w = \rho_w n \Delta x \Delta y \Delta z$ ..... (2.19)

la dérivée par rapport au temps de cette dernière équation est:

$$\frac{\partial(\Delta M_w)}{\partial t} = \frac{\partial(n\rho_w \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} \quad \text{..... (2.20)}$$

Comme l'on ne considère aucun mouvement solide suivant les directions x et y, ($\frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} = 0$ et $\frac{\partial(\Delta y)}{\partial t} = 0$), alors:

$$\frac{\partial(\Delta M_w)}{\partial t} = \left(\rho_w n \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} + \rho_w \Delta z \frac{\partial n}{\partial t} + n \Delta z \frac{\partial \rho_w}{\partial t}\right) \Delta x \Delta y \quad \text{..... (2.21)}$$

Le premier terme du membre droit de (2.21) est relié à la compressibilité verticale du solide de l'aquifère, α, définie par:

$$\alpha = \frac{1}{E_s} \quad \text{..... (2.22)}$$

L'aquifère est incompressible si $\alpha = 0$.

Le module de déformation élastique E_S est défini par la loi de contrainte-déformation (loi de Hooke):

$$E_S = -\frac{\Delta\sigma'}{\Delta V / V_0} = \frac{\Delta u}{\Delta V / V_0} \quad \ldots\ldots (2.23)$$

ΔV est la variation du volume élémentaire original, ΔV_0 .

$$E_S = \frac{1}{\alpha} = \frac{d\sigma'}{-d(\Delta z) / \Delta z} \quad \ldots\ldots (2.24)$$

qui peut s'écrire comme

$$d(\Delta z) = -\alpha \Delta z d\sigma' \quad \ldots\ldots (2.25)$$

exprimé sous forme d'une dérivée dans le temps:

$$\frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} = -\alpha \Delta z \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.26)$$

$$\rho_w n \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} = -\rho_w n \alpha \Delta z \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.27)$$

Le second terme du membre droit de l'équation (2.21) exprime la compression verticale. En effet,

$$V_S = (1 - n)\Delta x \Delta y \Delta z \quad \ldots\ldots (2.28)$$

Comme V_S est invariable dans le temps alors,

$$dV_S = d\left[(1 - n)\Delta x \Delta y \Delta z\right] = 0 \quad \ldots\ldots (2.29)$$

et comme ($\Delta x = \Delta y = 0$) alors

$$d\left[(1 - n)\Delta z\right] = 0 \quad \ldots\ldots (2.30)$$

qui s'écrit comme:

$$\Delta z\, d(1-n) + (1-n)d(\Delta z) = -\Delta z\, dn + (1-n)d(\Delta z) = 0 \quad \ldots\ldots (2.31)$$

La dérivée de la porosité s'exprime par:

$$dn = \frac{1-n}{\Delta z} d(\Delta z) \quad \ldots\ldots (2.32)$$

En dérivant l'expression ci-dessus terme à terme par rapport au temps,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1-n}{\Delta z} \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.33)$$

de (2.26) et (2.33) nous avons:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1-n)\left(-\alpha \frac{\partial \sigma'}{\partial t}\right) \quad \ldots\ldots (2.34)$$

$$\rho_W \Delta z \frac{\partial n}{\partial t} = -\rho_W \Delta z \alpha (1-n) \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.35)$$

2. Expansion de l'eau

Le 3eme terme de l'équation (2.21) est relié à l'expansion de l'eau qui est contrôlée par sa compressibilité, β:

$$\beta = \frac{1}{E_w} \quad \ldots\ldots (2.36)$$

Où E_w est le module de déformation volumique du fluide, qui exprime la déformation volumique du fluide en fonction de la variation de la pression interstitielle par:

$$E_w = \frac{1}{\beta} = \frac{du}{-d(\Delta V) / \Delta V} \quad \ldots\ldots (2.37)$$

soit:

$$d(\Delta V) = -\beta \Delta V du \quad \ldots\ldots (2.38)$$

qui représente le volume d'eau produit par expansion de l'eau. En utilisant le principe de conservation de la masse;

$$\rho_w \Delta V = \text{constante} \quad \ldots\ldots (2.39)$$

d'où;

$$\rho_w d(\Delta V) + \Delta V d\rho_w = 0 \quad \ldots\ldots (2.40)$$

$$\rho_w \beta du = d\rho_w \quad \ldots\ldots (2.41)$$

La dérivée par rapport au temps de l'équation ci-dessus donne:

$$\rho_w \beta \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.42)$$

Ce qui permet de retrouver le 3eme terme de l'équation (2.21).

$$\Delta z\, n \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \Delta z\, n\, \rho_w \beta \frac{\partial u}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.43)$$

On a donc exprimé (2.21) en termes de ($\partial\sigma'/\partial t$) et ($\partial u/\partial t$) sous la forme:

$$\frac{\partial(\Delta M_W)}{\partial t} = \left(-\rho_w n \alpha \Delta z \frac{\partial \sigma'}{\partial t} - \rho_w \Delta z \alpha (1-n) \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \rho_w \Delta z n \beta \frac{\partial u}{\partial t}\right) \Delta x \Delta y \quad \ldots\ldots (2.44)$$

En utilisant l'équation ($d\sigma' = - du$) et en réarrangeant les termes elle devient :

$$\frac{\partial(\Delta M_W)}{\partial t} = \rho_w (\alpha + n\beta) \frac{\partial u}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \ldots\ldots (2.45)$$

Pour exprimer la variation de la pression en fonction de la variation de la charge dans le temps, nous dérivons l'équation de Bernouilli simplifiée (sans le terme de vitesse, $v^2 \equiv 0$),

$h = z + \frac{u}{\rho_w g}$, membre à membre par rapport au temps, ce qui donne;

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad \ldots\ldots (2.46)$$

comme z ne varie pas avec le temps, $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$, l'équation ci-dessus se simplifie à:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{(2.47)}$$

En utilisant ce dernier résultat, l'équation (2.45) devient:

$$\frac{\partial(\Delta M_W)}{\partial t} = \rho_w g(\alpha + n\beta)\rho_w \frac{\partial h}{\partial t}\Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{(2.48)}$$

Ce qui nous mène à introduire l'emmagasinement spécifique, S_S, par:

$$S_S = \rho_w g(\alpha + n\beta) \quad \text{(2.49)}$$

Défini par Hantush (1964) comme le volume de l'eau qu'un volume unitaire d'aquifère relâche de l'emmagasinement par expansion de l'eau et compression des solides avec un abaissement unitaire de la charge hydraulique. S_S et S sont reliés par:

$$S = S_s b \quad \text{(2.50)}$$

Pour les aquifères à nappe captive le coefficient d'emmagasinement est très faible, généralement de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} ou , selon Strausberg (1967), ce coefficient varie dans un intervalle plus restreint de 10^{-4} à $5x10^{-3}$. De là, il est évident, que dans le but d'obtenir des débits importants d'eau à partir de S, une grande variation de pression à travers une étendue importante d'aquifère est nécessaire.

Le coefficient d'emmagasinement peut varier directement avec l'épaisseur de l'aquifère selon l'équation (2.50). Une expression empirique de cette corrélation est

donnée par Lohman en 1972 (cité par Todd, 1980; Bowen, 1986), comme:

$S = 3.10^{-6} b \Rightarrow S_S = 3x10^{-6}$ ..... (2.51)

où, b est l'épaisseur saturée de l'aquifère exprimée en mètres.

L'ordre de grandeur du coefficient S, mesuré sur le terrain par des essais de pompage, permet donc de déterminer le type de nappe, captive ou libre, dans le cas de stratigraphie mal connue. Pour les aquifères à nappes libres, la valeur du coefficient d'emmagasinement varie généralement entre 0.005 et 0.3 (Strausberg, 1967). La définition de S dans ce cas inclu un autre terme qui est le débit spécifique:

$S = S_s b + S_y$ ..... (2.52)

et c'est la valeur du débit spécifique qui l'emporte sur la valeur de l'emmagasinement élastique.

Pour terminer, il est possible de définir un autre paramètre qui représente le rapport de la transmissivité au coefficient d'emmagasinement. C'est la diffusivité hydraulique qui s'exprime par:

$$D = \frac{T}{S} = \frac{K}{S_s} \quad \text{..... (2.53)}$$

Si nous travaillons avec un problème tridimensionnel, il est alors plus rigoureux de travailler avec les conductivités hydrauliques K et l'emmagasinement spécifique S_s ou encore mieux

avec les paramètres fondamentaux, comme le tenseur de perméabilité k, la porosité n et la compressibilité α .

Tableau 2.1: Quelques valeurs types du débit spécifique (Todd, 1980)

Type de sol	Sy(%)
Gravier grossier	23
Gravier moyen	24
Gravier fin	25
Sable grossier	27
Sable moyen	28
Sable fin	23
Silt	8
Argile	3
Grès à grains fins	21
Grès à grains moyens	27
Pierre calcaire	14
Sable de dune	38
Loess	18
Tourbe	44
Schiste	26
Grès fin	12
Moraine silteuse	6
Moraine sableuse	16
Moraine graveleuse	16

Tableau 2.2: Quelques intervalles des valeurs de la porosité (Freeze and Cherry, 1979)

Type de sol	n(%)
Dépôts non consolidés	
gravier	25 - 40
Sable	25 - 50
Silt	35 - 50
Argile	40 - 70
Roc	
Basalt fracturé	5 - 50
Karst calcaire	5 - 50
Grés	5 - 30
Calcaire dolomie	0 - 20
Shale	0 - 10
Roc cristallin fracturé	0 - 10
Roc cristallin dense	0 - 5

Tableau 2.3: limites des intervalles de variation de l'indice des vides pour certains sols types (McCarthy, 1988)

Type de sol	emax	emin
sable bien calibré grossier à fin	0,70	0,35
Sable uniforme fin à moyen	0,85	0,50
Sable silteux et gravier	0,80	0,25

Tableau 2.4: intervalles des valeurs types de conductivité hydraulique

Sols	coef. de cond. hydr., k en cm/s	
Gravier propre	élevé	1 à 10
Sable propre, mélange de sable et gravier	moyen	1 à 10E-3
Sables fins, silts	faible	10E-3 à 10E-5
Mélange de sable-silt-argile et de till glacier	très faible	1E-4 à 1E-7
Argiles homogènes	très faible, pratiquement imperméable	< 10 E-7

CHAPITRE III

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN POMPAGE ET EN REMONTÉE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACTUELLES

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on passera en revue les différentes méthodes d'interprétation des essais d'aquifère. Les deux phases de pompage et de remontée sont présentées. On s'intéressera particulièrement à l'aquifère confiné soit infini soit limité par une frontière.

3.2 DÉFINITION ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE POMPAGE

Les essais d'aquifères consistent à:

1. installer un puits de pompage et des puits d'observations ou piézomètres autour de ce puits;
2. appliquer un certain débit au puits de pompage (phase de pompage)

3. relever les rabattements dans le puits de pompage (s_w) et les piézomètres ou puits d'observations (s) en fonction de t;
4. fermer la pompe (phase de remontée);
5. relever les rabattements résiduels dans le puits de pompage (s'_w) et les piézomètres ou puits d'observation (s') en tout instant t' mesuré depuis la fermeture de la pompe.

Dans le cas des aquifères confinés, on utilise surtout la phase de pompage pour déterminer les paramètres hydrodynamiques: la transmissivité (chapitre 2, section 2.4.5) et le coefficient d'emmagasinement (chapitre 2, section 2.4.6). La détermination de ces paramètres à partir des données de rabattement a fait le sujet de plusieurs études. Les méthodes résultantes sont différentes selon les auteurs: Theis (1935), Cooper and Jacob (1946), Chow (1952), Rai (1985), Yeh (1987a, 1987b), El-Katib (1987), pour les milieux poreux (dépôts d'alluvions), milieux non consolidés ou fissurés si la densité de fractures est élevée et Kazemy et al. (1969) Gringarten et Witherspoon (1972) pour les milieux fissurés (roc fracturé). Ces méthodes se partagent entre celles de type graphique et celles de type purement numérique, d'origine récente (Srivastava and Guzman, 1994) plus particulièrement pour les milieux poreux. Ces dernières ne demandent aucune représentation graphique pour la détermination de S et T. Il est recommandé de les utiliser avec précaution (Chenaf et Chapuis, 1994).

3.2.1 AQUIFÈRE CONFINÉ INFINI

Les équations qui décrivent l'écoulement radial vers un puits en régime permanent (régime d'équilibre) ont été proposées par Dupuit en 1863 et Thiem en 1906. Cependant, l'écoulement des eaux souterraines vers les puits (ouvrages de captage) n'atteint généralement pas ce régime d'équilibre. Le débit est prélevé sur la réserve de la nappe, de sorte que le cône de rabattement devra nécessairement s'étendre au fur et à mesure du fonctionnement du puits. L'adoption de la loi de Darcy conduit pour le mouvement de l'eau souterraine à un problème semblable à celui du transport de la chaleur ou de l'électricité, c'est à dire à une fonction potentielle. En 1935, C.V. Theis utilisa cette analogie entre l'écoulement de la chaleur et de l'eau pour présenter pour la première fois, dans le domaine des écoulements souterrains de l'aquifère à nappe captive vers les ouvrages de captage, la solution en régime transitoire de l'équation de diffusion. En coordonnées polaires, cette équation s'exprime par :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{(3.1)}$$

avec les conditions initiales et de frontières:

$$h(r,0) = h_0$$

$$h(\infty, t) = h_0 \qquad \text{(3.2)}$$

$$\lim_{r \to 0}\left(r\frac{\partial h}{\partial r}\right) = \frac{Q}{2\pi T} \qquad \text{pour t > 0}$$

Il écrivait que cette solution de l'équation (3.1) est

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.3)$$

qui définit l'expression analytique du rabattement, s(r) = h_0 - h(r), au puits d'observation situé à la distance r de l'axe du puits de pompage. Avec u, paramètre adimensionnel, argument de la fonction de puits W(u), défini comme:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.4)$$

S est le coefficient d'emmagasinement, T est la transmissivité et W(u) est la fonction de puits définie par:

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\gamma - \ln u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \ldots \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.5)$$

Que l'on peut également écrire sous la forme:

$$W(u) = -\gamma - \ln u + \sum_{i=2}^{\infty} (-1)^{i+1} \frac{u^i}{i.i!} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.6)$$

où γ est la constante d'Euler, $\gamma = \lim_{k \to \infty} \left\{ \sum_{j}^{k} \left(\frac{1}{j} \right) - \ln k \right\} = 0.577215665 \ldots$ ..... (3.7)

Mais, comme toute formulation n'est valable qu'à l'intérieur des hypothèses qui auraient servi à son développement, il est important de revoir les hypothèses et leurs interprétations qui constituent les conditions de validité de la formule de Theis. La solution de Theis est pour un modèle d'aquifère idéal, très peu attendu en pratique. Ainsi, la formule de Theis s'applique si les conditions suivantes sont réunies:

1. L'aquifère est infini et la nappe n'est pas réalimentée. Ce qui veut dire d'une part que le cône de dépression s'étendra indéfiniment et ne rencontrera jamais de frontière, ni de

recharge ni imperméable, et d'autre part une quantité infinie d'eau est emmagasinée dans l'aquifère. La première peut être vérifiée pour les essais de courte durée dans des aquifères très étendus formés de matériau uniforme. La deuxième condition montre que le niveau de l'eau retrouvera sa valeur initiale avant pompage après l'arrêt de celui-ci.

2. Le puits est de diamètre infinitésimal et pénètre complètement l'aquifère. Ce qui veut dire que l'emmagasinement du puits est négligé. L'eau pompée provient uniquement de la couche aquifère et les surfaces équipotentielles sont assimilées à des cylindres droits à génératrices verticales. Les méthodes qui traitent les essais dans les puits partiels sont présentées dans plusieurs articles (Muskat, 1937; Hantush and Jacob, 1955; Hantush, 1957). L'effet de l'emmagasinement du puits (effet de la capacité des puits à grand diamètres) sur la courbe des rabattements a été étudié par Papadopulos et Cooper (1967).

3. L'eau est prélevée instantanément avec la diminution de la charge hydraulique. Cette hypothèse est plus ou moins vrai dans le cas où l'eau est expulsée par compression de l'aquifère et expansion de l'eau, comme c'est le cas dans les aquifères confinés. Cependant, elle n'est pas vérifiée dans le cas des écoulements gravitaires, caractéristiques des aquifères libres.

4. L'aquifère est homogène et isotrope. Ainsi, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement sont considérés constants dans le temps et dans l'espace. L'influence de la variabilité spatiale de ces paramètres sur les rabattements a été abordée par certains chercheurs parmi lesquels citons: Oliver (1993), Vanden Berg (1977), Vela et McKinley (1970), etc.

5. Le débit prélevé dans le puits est constant. L'effet du débit variable a été traité dans certains articles (Birsoy and Summers, 1980; Earlougher, 1977; Lennox, 1966; Rorabaugh, 1953)

6. La nappe est captive, d'épaisseur constante, à substratum horizontal. Ces hypothèses limitent la validité de la méthode pour l'écoulement dans un aquifère à géométrie variable. Dans ce cas particulier , elles excluent toutes mesures effectuées au voisinage du puits.

En pratique, on admet la validité des hypothèses et l'applicabilité de l'équation de base établies pour les nappes captives aux écoulements non permanents en nappe libre, si l'emmagasinement est mobilisé instantanément et si les variations relatives (dh/h) de l'épaisseur de la nappe restent inférieures à 2%, pendant toute la durée de l'essai. Autrement dit, si le rabattement reste petit comparé à l'épaisseur de la nappe. Lorsque ces variations dépassent 2% mais restent inférieures à 25%, on peut utiliser la méthode de Theis pour l'interprétation de l'essai en ajoutant à chaque rabattement mesuré s le terme correctif ($-s^2/2h_0$) où h_0 est l'épaisseur initiale de la nappe supposée connue (Todd, 1980).

Comme la fonction de puits est une fonction intégrale de S et T (éq. 3.5), ce problème est difficile à résoudre. Il n'est pas possible de déterminer explicitement les paramètres de l'aquifère S et T à partir d'un ensemble de valeurs de rabattement s et de temps t mesurées au puits d'observation. La méthode graphique proposée par Theis et connue sous le nom: « la méthode de la courbe universelle de Theis », est utilisée pour résoudre le problème inverse. La fonction W(u) est tracée pour un large intervalle de valeur de l'argument u, sur une base log-log. Les données de l'essai sont aussi tracées sur

un papier log-log de même taille en terme de s(r, t) vs r^2/t. Il est alors superposé au premier tout en gardant les axes des deux graphes bien parallèles. La meilleure position est celle pour laquelle tous les points de l'essai se superposent sur la courbe type. Par la suite un point est choisi. Les coordonnées de ce points (u, W(u)) et (r^2/t, s) vérifient, en même temps, les deux équations (3.3 et 3.4). Connaissant le débit de pompage, il est alors possible de déterminer les paramètres, S et T.

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \quad \ldots\ldots (3.8)$$

$$S = \frac{4}{\left(r^2/t\right)} . u . T \quad \ldots\ldots (3.9)$$

Par ailleurs, Cooper et Jacob (1946) montraient que lorsque l'argument de la fonction du puits devient petit, $u \leq 0{,}01$, la fonction de puits s'approxime par ses 3 premiers termes et le rabattement peut alors s'exprimer par:

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad \ldots\ldots (3.10)$$

Cette méthode est connue comme la méthode d'approximation logarithmique ou aussi la méthode de Cooper-Jacob. Elle consiste à représenter graphiquement les données d'essai (s, t) sur une échelle semi-log (log en abscisse). Dans les hypothèses de Theis et de Cooper-Jacob ces données vérifient l'équation (3.10) et la transmissivité est tirée de la pente Δs et l'emmagasinement de l'intercept à l'origine, t_0

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi(\Delta s/cycle - \log)} \quad \ldots\ldots (3.11)$$

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \qquad (3.12)$$

3.2.2 AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIERE

Lorsque une ou plusieurs frontières, soit de recharge soit imperméable, sont rencontrées, il est nécessaire de déterminer la position et l'orientation de ces frontières en plus de d'estimer les paramètres de l'aquifère qu'elles limitent.

Les frontières de recharge (rivières, fleuves, etc...) sont généralement visibles à proximité du puits de pompage. Cependant, les frontières imperméables, généralement souterraines (par exemple les intrusions de dykes), ne sont que rarement apparentes. Lorsqu'une telle situation est rencontrée, la position et l'orientation de la frontière imperméable peuvent être définies par une analyse judicieuse des données d'un essai d'aquifère (Todd, 1980; Driscoll, 1986) en faisant appel à la théorie des images.

3.2.2.1 Frontière imperméable

L'effet de la frontière imperméable sur un pompage est identique à celui d'un autre puits de pompage de même débit. Ce dernier, appelé puits image, est le symétrique du puits de pompage par rapport à la limite étanche. La théorie des

images ne peut s'appliquer avec toute rigueur que si cette frontière est parfaitement verticale et descend jusqu'au substratum. L'équation de Theis est:

$$s(u_r,u_i) = \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_r) + W(u_i)\right] \quad \ldots\ldots (3.13)$$

u_r et u_i sont les arguments du puits réel et du puits image définis respectivement par:

$$u_r = \frac{r_r^2 S}{4Tt} \quad \ldots\ldots (3.14)$$

$$u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt} \quad \ldots\ldots (3.15)$$

Dans la représentation des rabattements mesurés par la méthode de Cooper-Jacob, la pente de la ligne droite sur le papier semi-logarithmique dépend seulement du débit de pompage Q et de la transmissivité T. Si une frontière imperméable est présente, le rabattement dans le puits d'observation doublera sous l'influence du puits image. Pour déterminer la position du puits image, des lignes droites sont tracées à travers les deux parties de données. Un rabattement arbitraire s_A est sélectionné et un temps t_r est mesuré pour que ce rabattement se produise sous l'influence du puits réel. De même, un temps t_i est définie comme étant le temps nécessaire pour que le même rabattement se produise au puits image. Connaissant la distance r_r entre le puits réel et le puits d'observation, la distance r_i au puits image peut être tirée de la loi des temps définie par:

$$\frac{r_i^2}{t_i} = \frac{r_r^2}{t_r} \quad \ldots\ldots (3.16)$$

La distance r_i définit seulement le rayon du cercle qui constitue toutes les positions possibles du puits image. Des mesures doivent être effectuées dans au moins deux autres puits d'observation pour pouvoir localiser par l'intersection des trois arcs la position

unique du puits image. La frontière est alors la médiatrice du segment reliant le puits réel et le puits image (Todd, 1980).

3.2.2.2 Frontière de recharge

L'effet de la recharge rectiligne sur un pompage est identique à celui d'un puits d'injection de même débit (égal mais négatif). Ce dernier appelé puits image est le symétrique du puits de pompage par rapport à la limite de réalimentation. Comme pour la frontière imperméable, la théorie des images ne peut s'appliquer en toute rigueur que si la frontière de recharge est parfaitement verticale, descend jusqu'au substratum et n'est pas colmatée (rarement le cas dans la réalité). L'équation de Theis est:

$$s(u_r, u_i) = \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_r) - W(u_i)\right] \quad \text{(3.17)}$$

avec u_r et u_i définis en (3.15 et 3.16).

L'effet d'une frontière de recharge sur le graphe de rabattement vs temps est opposé à celui de la frontière imperméable.

Il apparaît important de souligner l'effet de la durée de l'essai de pompage. L'élargissement du cône de dépression pendant 24 heures de pompage se fait d'une faon assez rapide pour rencontrer les frontières qui peuvent affecter les prédictions à partir des diagrammes semi-log. Les essais de pompage doivent durer au moins 24 heures dans l'aquifère confiné. Alors que dans l'aquifère à nappe libre, le cône de depression s'étend

plus lentement surtout quand le drainage gravitaire est lent, impliquant une période de pompage plus longue généralement d'au moins 72 heures (Driscoll, 1986).

3.3 INTERPRÉTATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE REMONTÉE

Les données de remontée sont intéressantes pour plusieurs raisons. D'une part c'est une phase moins coûteuse que la phase de pompage. D'autre part elle fournit des données plus fiables étant donné que l'on ne se préoccupe plus de la constance du débit. Le développement de méthodes d'interprétation de ces données permettra :

1. de vérifier les paramètres d'aquifère, la distance et la position des frontières détectées par la phase de pompage (il n'existe actuellement aucune méthode de vérification de l'interprétation);

2. de déterminer le coefficient d'emmagasinement en remontée S' d'une part et la fraction de déformation résiduelle de l'aquifère par (1 - S'/S) d'autre part.

Par conséquent, même si l'interprétation ne permet jusqu'à une certaine limite, dans l'état actuel des connaissances, la détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement que dans le cas d'un aquifère infini, comme montré ci -après, plusieurs auteurs recommandent de relever ces données à chaque fois que c'est possible (Driscoll, 1986, p. 554). La fréquence des relevés des rabattements résiduels devrait être similaire à celle de la phase de pompage de l'essai d'aquifère.

L'équation de la remontée est basée sur la méthode de superposition de Theis (1935) laquelle se base sur le principe de superposition des images. Cette méthode s'applique dans le cas idéal des hypothèses de Theis présentées au paragraphe 3.2.1 de la section 3.2. En particulier, pour le cas où le débit durant la phase de pompage reste constant. On trouve dans Sternberg (1967), Earlougher (1977), Birsoy et Summers (1980), Kruseman et De Ridder (1991) ainsi que dans Kawecki (1993) des formulations différentes, que nous ne présenterons pas dans le cadre de cette étude, de l'équation de remontée de Theis dans le cas où le débit de la phase de pompage varie.

3.3.1 AQUIFERE CONFINÉ INFINI

Le rabattement résiduel s' à un puits d'observation au temps t compté à partir du début de la phase de pompage et au temps t' compté à partir du début de la phase de remontée est donné par:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W(u) - \frac{Q}{4\pi T'} W(u') \quad \text{(3.18)}$$

$$u' = \frac{r^2 S'}{4T't'} \quad \text{(3.19)}$$

L'approximation de Cooper-Jacob peut être utilisée pour les faibles valeurs de u et u', explicitement tous deux inférieurs à 0.01. On peut alors écrire que:

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T}\left[\log\frac{2.25Tt}{r^2 S} - \log\frac{2.25Tt'}{r^2 S'}\right] \quad \text{(3.20)}$$

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{S't}{St'} \qquad (3.21)$$

Le graphe de s' vs logt/t' est donc une droite log-linéaire dont la pente est Δs'/cycle et l'intercept à l'origine est $(t/t')_0$ tous deux définis par:

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta s'}{cycle - \log} = \dfrac{2,3Q}{4\pi T} \\ \left(\dfrac{t}{t'}\right)_0 = \dfrac{S}{S'} \end{cases} \qquad (3.22)$$

La pente nous fournit la valeur de la transmissivité T et l'intercept à l'origine la valeur du rapport S/S' des coefficients d'emmagasinement. De nombreux auteurs ont conclu que lorsque ce rapport est égal à 1 (S = S') le coefficient d'emmagasinement ne peut être déterminé par la seule considération des rabattements résiduels de même que la position et l'orientation des frontières lorsqu'elles existent (Todd, 1980, Raghunath, 1982).

Cependant, en plus de la transmissivité, le coefficient d'emmagasinnement peut être estimé à partir de l'interprétation des données de remontée combinés aux données de pompage en reportant la différence de rabattement (s_P - s') versus le temps de remontée t' et en utilisant la méthode de Cooper-Jacob (U.S.D.I., 1977; Driscoll, 1986). La démonstration de l'expression du coefficient d'emmagasinement qui en découle a été présentée par Chapuis (1992).

Ainsi, si s_P est le prolongement du rabattement défini par:

$$s_P = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right) \qquad (3.23)$$

alors en considérant (3.18) et (3.23)

$$\left(s_P - s'\right) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u'\right) \quad \text{(3.24)}$$

Cette dernière équation est similaire à celle qui représente le rabattement provoqué par un puits de pompage dans un aquifère homogène d'épaisseur constante et d'étendue infinie (paragraphe 3.2.1, section 3.2). Par conséquent, les paramètres T et S sont donnés par les expressions (3.11) et (3.12) respectivement, en remplaçant Δs/cycle par $\Delta(s_P$ -s')/cycle.

Le problème de l'estimation de l'emmagasinement à partir seulement des données de la remontée a été mis de côté pendant très longtemps. Depuis les travaux de Theis (1935), le nombre de publications qui proposent de nouvelles approches pour déterminer ce paramètre est très limité. Ce nombre se résume, à notre connaissance, à ces cinq travaux de Case et al. (1974); Vanden Berg (1975), Bardsley et al. (1985); Ballukraya et Sharma (1991) et récemment Banton et Bangoy (1996). Toutes ces méthodes quoiqu'elles constituent une progression dans l'interprétation des rabattements résiduels, demeurent limitées à l'aquifère infini et au cas particulier où le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère est constant durant les deux phases de l'essai (S = S').
A l'exception de la méthode de Vanden Berg qui s'applique pour un aquifère à nappe libre, les autres supposent un aquifère confiné. Case et al. (1974) utilisent un développement en fonction puissance du rapport S/T qui nécessite la connaissance de deux points de mesure (t', s') pour déterminer T et S. Vanden Berg (1975) et Bardsley et al. (1985) utilisent une méthode améliorée des moindres carrés pour l'estimation de T et S. Par ailleurs, Ballukraya et Sharma (1991) proposent l'équation suivante du coefficient d'emmagasinement :

$$S\left(\frac{S'}{S}\right)^n = \frac{2.25Tt_0}{r^2\left(\frac{t_2}{t'_2}\right)^n} \quad \text{.....(3.25)}$$

avec $n = s_{max}/s'(t_2)$.

Les discussions de cette méthode sont présentées par Bardsley (1992) et Chapuis (1992). Enfin, Banton et Bangoy (1996) proposent une approximation de la fonction de puits par ses trois premiers termes sans erreur appréciable pour un temps 400 fois plus faible que celui de Cooper-Jacob qui correspond à $u \leq 0.01$. L'expression du rabattement résiduel obtenue est alors de la forme:

$$s'(r,\ t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{t}{t'} + \frac{Qr^2S}{16\pi T^2}\left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t'}\right) \quad \text{.....(3.26)}$$

La représentation de s' vs r^2 (au moins avec deux points) pour chaque ensemble (t, t') fixé est une droite dont la pente est $\Delta s' = B(t, t')$ et l'intercept pour $(r^2)_0 = 0$ est noté A(t, t') définis comme:

$$\begin{cases} A(t,\ t') = \dfrac{2,3Q}{4\pi T}\log\dfrac{t}{t'} \\ B(t,\ t') = \dfrac{QS}{16\pi T^2}\left(\dfrac{1}{t} - \dfrac{1}{t'}\right) \end{cases} \quad \text{.....(3.27)}$$

La représentation de A(t, t') vs logt/t' et B(t, t') vs (1/t -1/t') sur une échelle arithmétique en abscisses et en ordonnées sont des droites qui passent théoriquement par le point (0, 0)

(ce qui n'est pas le cas pour les figures présentées), et de pentes C et D définies respectivement comme:

$$\begin{cases} C = \dfrac{2{,}3Q}{4\pi T} \\ D = \dfrac{QS}{16\pi T^2} \end{cases} \qquad \text{(3.28)}$$

qui fournissent les paramètres T et S.

3.3.2 AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIERE

Si des tentatives d'évaluation du coefficient d'emmagasinement ont été réalisées dans le cas d'un aquifère infini, aucune méthode n'existe pour le cas d'un aquifère limité par des frontières simples ou multiples, de recharges ou imperméables, en phase de remontée. Une analyse visuelle du graphe de remontée permet la confirmation de l'existence d'une frontière (Raghunath, 1982, p. 139). Cependant, cette façon de procéder crée des confusions vu que ce cas n'est que particulier, en remontée. C'est le développement de cette partie qui va faire l'objet des chapitres 5 à 8 qui suivront.

3.4 LA TRANSMISSIVITÉ ET LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT EN POMPAGE ET EN REMONTÉE

Avant de compléter cette partie de l'étude, il serait intéressant d'examiner la variation de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement durant un cycle de pompage-remontée. Ce cycle représente un cycle de chargement-déchargement pour les solides de l'aquifère.

3.4.1 TRANSMISSIVITÉ

Comme définie au chapitre 2, section 2.4.5, la transmissivité relie la conductivité hydraulique à l'épaisseur de l'aquifère. De l'équation 2.1, nous avons:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta b}{b} \qquad \text{(3.26)}$$

Or,

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta e}{(1+e)} \qquad \text{(3.27)}$$

et de l'équation de Kozeny-Carman (2.13) nous pouvons écrire que:

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta e(3+2e)}{e(1+e)} \qquad \text{(3.28)}$$

ainsi de (3.27) et (3.28) on a:

$$\frac{\Delta T}{T} = 3\frac{\Delta e}{e} \quad \text{(3.29)}$$

3.4.2 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

L'emmagasinement S est plus grand durant la phase de pompage que durant la remontée (Jacob, 1963). Dans les aquifères libres ou semi-confinés, la différence dans ces valeurs de S résulte de l'hystérésis de la frange capillaire. Dans l'aquifère confiné, la différence est due à la consolidation des dépôts durant le pompage, en particulier dans les aquifères de formation récente. Cette variation est moins prononcée que dans les aquifères libres ou semi-confinés.

Du chapitre 2, nous avons l'équation (2.49) de Jacob :

$$S = \gamma_w(\alpha + n\beta)b \quad \text{(3.30)}$$

d'où, en considérant que $\Delta E_W/E_W$ est négligeable:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta E_s}{E_s} + \frac{\Delta b}{b} \quad \text{(3.31)}$$

3.4.3 ÉCARTS ENTRE T ET T', S ET S'

Cas No. 1: aquifère surconsolidé, comme c'est toujours le cas dans les massifs rocheux

$E_{S\ chargement} = E_{S\ déchargement}$ soit $\Delta E_s \approx 0$ ..... (3.32)

et

$\frac{\Delta b}{b}$ est très faible et donc aussi $\frac{\Delta e}{e}$ ..... (3.33)

En remplaçant (3.32) et (3.33) dans (3.29) et (3.31) on a:

$\frac{\Delta S}{S} \approx 0$ soit $S' \approx S$ et $\frac{\Delta T}{T} \approx 0$ soit $T' \approx T$ ..... (3.34)

Cas No. 2: aquifère normalement consolidé, comme c'est le cas des alluvions de sable, sable et graviers, etc.

$E_{S\ chargement} \neq E_{S\ déchargement}$ ..... (3.35)

et

$\frac{\Delta b}{b}$ est faible ..... (3.36)

En remplacent (3.35) et (3.36) dans (3.29) et (3.31) on a:

$\frac{\Delta S}{S} \neq 0$ soit $S' \neq S$ et $\frac{\Delta T}{T} \approx 0$ soit $T' \approx T$ ..... (3.37)

Si un essai de pompage préliminaire est effectué, le sol passera d'une condition normalement consolidée à surconsolidée pour l'essai suivant et ainsi S' = S et T' = T.

Application numérique:

Considérons un essai où $\Delta u = -\Delta\sigma' \cong 50$ à 500 kPa au maximum et où

$E'_S = 1{,}3\, E_S$, $e = 0.80$ et $\Delta e = 0.05$

L'application de (3.27) donne : $\frac{\Delta b}{b} = \frac{0{,}05}{(1+0{,}80)} = 2{,}78\%$

L'application de (3.26) donne : $\frac{\Delta T}{T} = 3\frac{0{,}05}{0{,}8} = 18{,}75\%$

L'application de (3.31) donne : $\frac{\Delta S}{S} = 30\% + 2{,}78\% = 32{,}78\%$

Même si généralement, ces variations sont considérées faibles, il n'en demeure pas moins qu'elles peuvent influencer considérablement les données des premiers cycles de pompage/remontée.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS DES MÉTHODES NUMÉRIQUES A LA SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES: CAS PARTICULIER DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ET DU LOGICIEL SEEP/W

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on rappelera l'importance de l'utilisation des méthodes numériques dans l'analyse de l'écoulement des eaux souterraines, en particulier, la méthode des éléments finis. On introduira également le logiciel SEEP/W qui sera utilisé pour les simulations des essais d'aquifères. Ce logiciel, on présentera un résumé de sa théorie et de ses principales caractéristiques, même s'il est assez bien décrit dans le manuel d'utilisation Geo-Slope (1992).

4.2 LES MÉTHODES NUMÉRIQUES EN HYDROGÉOLOGIE. CAS PARTICULIER DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Certains problèmes simples d'écoulement de l'eau dans les milieux poreux peuvent être résolus par des méthodes graphiques et/ou analytiques (Strack, 1989) ainsi que par des modèles basés sur des montages physiques (Holtz et Kovacs, 1991). Cependant, les

problèmes plus complexes nécessitent l'utilisation de méthodes adaptées à leur complexité. En effet, l'application des principes de la physique (mécanique): équilibre, continuité, équations d'Euler, principe d'Hamilton, loi de Newton, etc (Scheidegger, 1960) permet d'établir les équations aux dérivées partielles (E.D.P.). La résolution de ces équations avec les conditions aux limites et les conditions initiales qui peuvent être très compliquées nécessitent l'utilisation des méthodes numériques: différences finies (Forsythe and Wasow, 1960), éléments finis (Zienckiewicz and Taylor, 1991, etc)

Les analyses numériques font appel à un modèle mathématique. Le modèle mathématique représente une description simple et fidèle d'un système physique existant. Un modèle se définit essentiellement comme un instrument intermédiaire permettant de rendre plus facilement intelligible un champ d'étude complexe. Il permet de réduire la complexité naturelle et se base sur une représentation conceptuelle du système physique à l'étude. En particulier, la modélisation informatisée appliquée à l'hydrogéologie a accéléré l'avancement des connaissances et a ouvert aux ingénieurs une nouvelle ère leur permettant de réaliser des simulations des plus simples aux plus complexes (Chapuis et al. 1993) et à diverses étapes du projet notamment la conception, la réalisation et le suivi ou contrôle. Ces simulations effectuées par différents modèles interprètent le phénomène simulé en le reliant à la théorie qui le définit. L'utilisation des modèles mathématiques sur ordinateur pour traiter les problèmes d'écoulement à été particulièrement recommandée par Walton (1962), Freeze et Witherspoon (1966, 1967, 1968).

Les méthodes numériques ont été introduites dans la littérature des eaux souterraines par Stallman (1956) pour l'analyse de l'écoulement régional. Fayers et Sheldon (1962) et Tyson et Weber (1964) ont été parmi les premiers à utiliser les solutions numériques calculées par ordinateur pour les modèles mathématiques d'aquifères.

L'approche fondamentale des deux méthodes de différences finies et d'éléments finis pour la résolution des équations aux dérivées partielles (qui représentent le système physique) est le concept de discrétisation. Le domaine continu D est représenté par un certain nombre d'aires de subdivision. Dans les différences finies la solution approchée de la solution réelle continue est définie à des points isolés. Dans les éléments finis la solution approchée est définie à travers tout le domaine D. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'utiliser des schémas d'interpolations additionnels pour obtenir la solution à un point arbitraire dans D (Zienkiewicz and Taylor, 1991).

La méthode des éléments finis (M.E.F.) constitue aujourd'hui une des méthodes numériques les plus utilisées. Son introduction dans la littérature des études de l'écoulement des eaux souterraines remonte au milieu des années soixante (Pinder and Gray, 1977). Depuis, elle n'a cessé d'être développée comme un outil numérique très puissant pour l'analyse d'une grande variété de problèmes, en particulier les plus complexes en géométrie et en conditions aux frontières, reliés à l'hydrogéologie (Duguid et Abel, 1974; Bathe, 1982; Huyakorn et al., 1983). Narasimhan et al. (1982) présentent une revue de la littérature sur l'utilisation de la méthode des éléments finis dans ce qu'ils appelaient " l'hydrologie des eaux souterraines". Une des premières

applications de la méthode des éléments finis dans le domaine est l'analyse de l'écoulement radial vers un puits de captage (Neuman and Witherspoon, 1969, Javandel and Witherspoon, 1968a, 1968b).

La MEF est devenue, en très peu de temps, très populaire. Cette popularité est de plus en plus grande grâce à l'arrivée des ordinateurs personnels puissants qui permettent de considérer les cas de plus en plus complexes sans coût majeur. En effet, les ordinateurs ont permis le passage en toute élégance des méthodes classiques (graphiques, analytiques et montages physiques) aux méthodes numériques (résidus pondérés, différences finies, éléments finis, etc). Aujourd'hui, la modélisation par ordinateur est nécessaire voire indispensable à l'ingénieur. La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) crée une synergie entre l'ingénieur et l'ordinateur en mettant au mieux à profit leurs qualités complémentaires. L'ingénieur assure la fonction de synthèse créatrice, de jugement et d'appréhension qualitative des structures et résultats que l'ordinateur lui fournit, lui permettant ainsi de faire une bonne évaluation de ses connaissances.

4.3 LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DANS SEEP/W

SEEP/W est l'un des quatre logiciels d'éléments finis mis au point par la compagnie canadienne Geoslope Int. Il permet de traiter les cas d'écoulement unidimensionnel et bidimensionnel des eaux souterraines dans les plans (x, y), (x, z) et (r, z). Les trois autres logiciels qui lui sont complémentaires sont: CTRAN/W qui permet la modélisation de l'évolution du panache de contamination, SIGMA/W qui permet le calcul des contraintes,

et enfin SLOPE/W pour la stabilité des pentes. Tout ces logiciels d'éléments finis s'opèrent dans l'environnement windows.

L'équation générale aux dérivées partielles (E.D.P.) de l'écoulement utilisée dans la formulation de SEEP/W dans le plan (x, y) est:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(u)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{y}\left(K_y(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q=\frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.1)$$

avec:

$K_x(u)$: 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 entre le débit qui rentre et le débit qui sort d'un volume élémentaire autour d'un point donné de l'aquifère, est égale à la variation de la teneur en eau volumique en fonction du temps.

Comme montré à la section 2.4.3 du chapitre 2, ce changement dans la teneur en eau volumique dépend du changement dans l'état de contrainte et dans les propriétés du sol. Il s'exprime par l'équation 2.11 reprise ci dessous:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = m_1^w \frac{\partial(\sigma - u_a)}{\partial t} + m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.2)$$

où m_1^w représente le taux auquel un sol va absorber ou relâcher de l'eau lorsque la succion matricielle varie. Il définie la pente de rétention capillaire (chapitre 2, section 2.4.3). La valeur de m_1^w est équivalente au coefficient de changement de volume m_v bien connu en mécanique des sols classique (Lambe and Whitman, 1969). m_2^w est la pente de la courbe d'emmagasinement, notée aussi m_w.

La combinaison de (4.1) et (4.2) donne:

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = m_1^w \frac{\partial(\sigma - u_a)}{\partial t} + m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.3)$$

Les deux principales hypothèses utilisées dans la formulation de SEEP/W, sur l'état de contrainte sont:

1. Aucun chargement ou déchargement extérieurs de la masse de sol. Par conséquent la contrainte totale demeure constante (i.e., $\partial\sigma/\partial t = 0$)

2. Durant toute la phase transitoire, la pression interstitielle de l'air est égale à la pression atmosphérique qui est constante (i.e., $\partial u_a / \partial t = 0$)

De ces deux hypothèses (1) et (2) on aura (σ - u_a) qui reste constante et n'a donc aucune influence sur la variation de la teneur en eau volumique. Par conséquent la variation de

cette dernière ne dépend que de la variation de (u_a - u_w) donc de la variation de la pression d'eau interstitielle u_w, étant donné que u_a est constante.

Ainsi,

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \quad \text{(4.4)}$$

Dans les conditions d'un régime d'écoulement permanent, les débits entrant et sortant d'un volume unitaire ne changent pas dans le temps, ce qui rend l'équation aux dérivées partielles (4.1) sans second membre ($\frac{\partial\theta}{\partial t} = 0$).

De l'équation (4.4) nous avons:

$$\frac{\partial\theta}{\partial u_w} = m_w \quad \text{(4.5)}$$

D'un autre côté, en un point donné (z = constante):

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = m_w \left(\frac{\partial u}{\partial h}\right)\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad \text{(4.6)}$$

Comme $u = \gamma_w (h - z)$, nous avons $\frac{\partial u}{\partial h} = \gamma_w$ (4.7)

En utilisant (4.7) l'expression (4.6) devient;

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = m_w \gamma_w \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad \text{(4.8)}$$

de (4.1) et (4.8), on a:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(u)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{y}\left(K_y(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q = \quad m_w\gamma_w\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.9)$$

La solution de cette équation est la fonction h (x, y, t) qui représente en tout temps t la charge hydraulique au point (x, y) de l'aquifère. La connaissance des courbes caractéristiques K(u) et θ(u) est nécessaire. Dans le cas général, nous avons un sol partiellement saturé, donc des pressions d'eau négatives. Une variation de cette pression négative est toujours accompagnée d'une variation de la teneur en eau volumique θ et de la conductivité hydraulique K. Lorsque la saturation est atteinte, la teneur en eau volumique est égale à la porosité du sol n (Figure 2.3).

L'équation (4.9) est formulée dans le cas où les deux directions orthogonales x, y sont les deux directions principales d'anisotropie. Dans le cas où la première direction principale du coefficient de conductivité hydraulique fait un angle arbitraire α par rapport à l'axe des x, l'équation (4.9) devient;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}(u)\frac{\partial h}{\partial x}+K_{xy}(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{y}\left(K_{yx}(u)\frac{\partial h}{\partial x}+K_{yy}(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q = \quad \gamma_w\, m_w\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad \ldots . \quad (4.10)$$

avec $K_{xx} = K_1\cos^2\alpha + K_2\sin^2\alpha$

$K_{yy} = K_1\sin^2\alpha + K_2\cos^2\alpha$

$K_{xy} = K_{yx} = (K_1 - K_2)\sin\alpha\cos\alpha$

K_1 et K_2 sont respectivement les conductivités hydrauliques principales maximum et minimum. L'angle α définie la direction principale majeure par rapport à l'axe x.

On peut, dans le cas général plan considérer un tenseur de conductivité hydraulique anisotrope de :

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \quad \text{(4.11)}$$

Lorsque l'angle α devient nul, la direction x devient la première direction principale alors que la direction y devient la deuxième direction principale. Ainsi [K] se réduit à:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad \text{(4.12)}$$

et le rapport d'anisotropie est $R_K = K_x/K_y$.

4.3.1 FORMULATION DE LA SOLUTION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'E.D.P.

La solution de l'équation est la fonction h(x, y, t) qui représente la charge hydraulique en tout point (x, y) de l'aquifère en tout temps t. Des solutions numériques par éléments finis de l'équation 4.9 figure dans plusieurs références de bases (Pinder and Gray, 1977; Zienkiewicz and Taylor, 1991). Dans SEEP/W, la méthode de Galerkin est utilisée. Cette méthode introduite au début du siècle, précisément en 1915 (Pinder and Gray, 1977) par B.G. Galerkin, un ingénieur russe, est bien adaptée aux problèmes

impliquant des équations aux dérivées partielles d'ordre impair. Elle constitue un cas particulier de la méthode des résidus pondérés.

Pour introduire la méthode générale, considérons l'équation suivante:

$L\{u(x, y)\} = 0 \qquad \forall (x, y)$ dans D ..... (4.13)

où D est le domaine et L un opérateur qui agit sur la fonction inconnue u(x, y, t). Considérons $\hat{u}(x, y, t)$ une approximation de u(x, y, t) constituée d'une combinaison linéaire telle que:

$$u(x, y, t) \approx \hat{u}(x, y, t) = \sum_{j=1}^{M} a_j(t)\Phi_j(x,y) \quad \ldots\ldots (4.14)$$

M est le nombre d'éléments. Le résidu R(x,. y, t) est défini par:

$$R(x, y, t) = L\{\hat{u}(x, y, t)\} \quad \text{soit} \quad R(x, y, t) = L\{\sum_{j=1}^{M} a_j(t)\Phi_j(x,y)\} \quad \ldots\ldots (4.15)$$

Lorsque la solution approchée est égale à la solution exacte, le résidu est nul. La meilleure approximation de la solution correspond à la plus petite valeur possible du résidu. L'équation de cette méthode est donc:

$$\int_D RW_i dD = 0 \qquad \text{avec } i = 1,M \quad \ldots\ldots (4.16)$$

où W_i est la fonction de pondération. Il y a plusieurs façons de définir cette fonction. Les méthodes les plus connues sont: la collocation par sous-domaines où la fonction peut seulement prendre les valeurs 0 ou 1, la collocation par points qui utilise une fonction de Dirac, la méthode des moindres carrés et la méthode de Galerkin. Dans la méthode de Galerkin la fonction de pondération W_i est la fonction Φ_i. L'équation (4.16) devient:

$$\int_D R\Phi_i dD = 0 \qquad \text{avec } i = 1,M \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.17)$$

soit

$$\int_D L\left\{\sum_{j=1}^{M} a_j(t)\Phi_j(x,y)\right\}\Phi_i dD = 0 \qquad \text{avec } i = 1,M \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.18)$$

$$L\{h\} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(u)\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(u)\frac{\partial h}{\partial y}\right) + Q - \mathbf{m}_w\gamma_w\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.19)$$

$$h(x, y, t) = \sum_{j=1}^{M} h_j(t)\Phi_j(x,y) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.20)$$

En exprimant L{h} par l'équation (4.19) dans l'équation (4.18) on obtient:

$$\int_D\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right) + Q - m_w\gamma_w\frac{\partial h}{\partial t}\right]\Phi_i dD = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.21)$$

Et en considérant l'équation (4.20), l'équation ci-dessus devient:

$$\int_D\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial\left(\sum_{j=1}^{n} h_j\Phi_j\right)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial\left(\sum_{j=1}^{n} h_j\Phi_j\right)}{\partial y}\right) + Q - m_w\gamma_w\frac{\partial\left(\sum_{j=1}^{n} h_j\Phi_j\right)}{\partial t}\right]\Phi_i dD = 0 \quad (4.22)$$

$$\int_D\left[\sum_{j=1}^{n} h_j\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial\Phi_j}{\partial x}\right) + \sum_{j=1}^{n} h_j\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial\Phi_j}{\partial y}\right) + Q - m_w\gamma_w\sum_{j=1}^{n}\Phi_j\frac{\partial h_j}{\partial t}\right]\Phi_i dD = 0 \ldots\ldots (4.23)$$

$$[C]\{H\} + [S]\{H\},t = \{Q\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.24)$$

où

[C] : matrice caractéristique élémentaire, $[C] = \int_D [B]^T[K][B]dD$ ..... (4.25)

dont les coefficients sont définis comme: $c_{ij} = \int_D \left[K_x \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x} + K_y \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} \frac{\partial \Phi_j}{\partial y} \right] dD$.

[S] : matrice massique (stockage), $[S] = \int_D [N]^T \lambda [N] dD$ ..... (4.26)

dont les coefficients sont définis comme: $s_{ij} = \int_D m_w \gamma_w \Phi_i \Phi_j dD$.

{Q} : vecteur de débit (pompé ou injecté), $\{Q\} = q \int_A [N]^T dA$ ..... (4.27)

dont les coefficients sont définis comme: $q_{ij} = \int_D Q \Phi_i dD$.

{H} :vecteur $\{h_1, h_2, ..., h_n\}$

{H},t : vecteur dérivée $\{dh_1/dt, dh_2/dt, ..., dh_n/dt\}$

[B] : matrice des dérivées des fonctions de forme (fonctions d'interpolation, $\Phi_j(x,y)$)

[N] : matrice des fonctions de forme

λ : produit $m_w\gamma_w$ qui représente l'emmagasinement spécifique

q : débit par unité de surface appliqué sur la surface extérieure de l'élément

L'équation (4.23) s'écrit alors:

$$\int_V \left([B]^T [K][B] \right) dV \{H\} + \int_V \lambda [N]^T [N] dV \{H\}_{,t} = q \int_A [N]^T dA \quad \text{..... (4.28)}$$

Dans le cas 2D, l'épaisseur b est considérée constante à travers tout l'élément. Ainsi, l'intégrale de volume devient une intégrale de surface.

$$b \int_A \left([B]^T [K][B] \right) dA \{H\} + b \int_A \lambda [N]^T [N] dA \{H\}_{,t} = qb \int_L [N]^T dL \quad \text{..... (4.29)}$$

Dans le cas axisymétrique, l'épaisseur constante b est remplacée par la distance radiale R à l'axe de symétrie. Cette distance est variable. L'équation d'élément finis pour le cas axisymétrique devient alors:

$$\int_A \left([B]^T[K][B]R\right)dA\{H\} + \int_A \lambda[N]^T[N]RdA\{H\}_{,t} = q\int_L [N]^T RdL \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4.30)$$

L'utilisation de l'intégration numérique de Gauss permet de former la matrice caractéristique [C] et la matrice de stockage [S]. Les intégrales sont définies en certains points de l'élément (points d'intégration) et par la suite pour tous les points. Le choix du nombre de points d'intégration (l'ordre d'intégration) est fonction de la forme de l'élément et de la présence des noeuds secondaires. En effet, pour un élément quadrilatère on peut avoir 4 ou 9 noeuds d'intégration alors que pour un élément triangulaire on a seulement 1 ou 3 noeuds d'intégration. Pour un élément triangulaire à un seul point d'intégration il en résulte un gradient constant à travers l'élément. En plus, lorsque des noeuds secondaires sont présents dans un élément, les fonctions d'interpolation sont non linéaires, par conséquent un ordre d'intégration élevé est requis.

$$[A]\left(\varepsilon\{H\}_{t-\Delta t} + (1-\varepsilon)\{H\}_t\right) + \frac{1}{\Delta t}[B]\left(\{H\}_{t-\Delta t} - \{H\}_t\right) = \varepsilon\{Q\}_{t-\Delta t} + (1-\varepsilon)\{Q\}_t \quad \ldots (4.31)$$

Où ε est un coefficient positif et inférieur à 1 de pondération. Il est généralement défini dans l'ensemble {0, 1/2, 1}. Le schéma d'intégration est alors soit explicite, implicite ou implicite de Crank-Nicolson selon que ε =0, 1 ou ½ respectivement. Dans SEEP/W, la méthode implicite (ε = 1) est utilisée. L'équation (4.31) devient:

$$\left([A]+\frac{1}{\Delta t}[B]\right)\{H\}_{t+\Delta t}-\frac{1}{\Delta t}[B]\{H\}_{t}=\{Q\}_{t+\Delta t} \quad \text{(4.32)}$$

La technique d'élimination de Gauss est utilisée pour résoudre les équations d'éléments finis, pour déterminer la variable de champ (charge hydraulique) à chaque noeud. Comme la conductivité hydraulique et les propriétés d'emmagasinement sont fonction de la charge, les équations sont donc non linéaires. Par conséquent, les propriétés exactes du milieu ne sont pas connues au début de l'analyse. Une procédure itérative est requise pour résoudre les équations.

Dans SEEP/W la norme Euclidienne du vecteur de pression sert à mesurer la précision. Celle-ci est définie comme:

$$\|H\|=\left(\sum_{j=1}^{n}|H_j|^2\right)^{1/2}+1.0 \quad \text{(4.33)}$$

avec n = nombre de noeuds

H_j = charge totale moins l'élévation du noeud j

La solution converge lorsque l'écart entre deux normes successives est inférieur ou égal à la tolérance numérique fixée dans l'analyse.

Une fois que la solution a convergé et que toutes les charges nodales sont calculées, les vecteurs gradient et vitesse de Darcy sont calculés en chaque points d'intégration comme:

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix}=[B][H] \quad \text{(4.34)}$$

et l'équation de Darcy donne:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [K][B]\{H\} \quad \text{(4.35)}$$

avec :

i_x : gradient dans la direction des x

i_y : gradient dans la direction des y

v_x : vitesse dans la direction des x

v_y : vitesse dans la direction des y

4.3.2 REMARQUES ET CONCLUSIONS

La qualité d'un modèle numérique par éléments finis se mesure par les résultats qu'il fournit. Cependant, la précision des résultats dépend de plusieurs paramètres: le maillage, le choix des éléments, le calcul à l'ordinateur, etc... . En effet, Le choix des éléments implique le choix du degré des fonctions d'interpolation. Les éléments quadratiques sont suffisamment précis. Le maillage doit être construit avec précaution, les éléments allongés sont à éviter. On doit augmenter le nombre des éléments en diminuant leurs tailles dans les zones où la dérivée première de la variable de champs est supposée prendre des valeurs importantes. Dans notre cas les zones où les gradients sont élevés.

Toutefois, seule l'application du logiciel pourrait témoigner et confirmer ses capacités et sa fiabilité. Ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V

SEEP/W: VÉRIFICATION ET UTILISATION

5.1 INTRODUCTION

Dans la plupart des cas, la modélisation numérique est utilisée à des fins de prédiction. Cependant le degré de fiabilité de ces prédictions dépend de leur sensibilité aux paramètres imposés du modèle. Par conséquent, une vérification préliminaire de l'outil informatique adopté pour toute étude de prédiction, dans notre cas le logiciel Seep/W, s'avère très importante.

La vérification d'un logiciel consiste à comparer la solution théorique ou expérimentale avec la solution fournie par ce dernier pour un modèle donné. Ce dernier doit correspondre avec la meilleure précision possible au système réel à analyser. L'efficacité du modèle ainsi que la fiabilité du logiciel se mesurent par la différence entre ces deux solutions.

Ce chapitre portera donc essentiellement sur la vérification et l'utilisation du logiciel SEEP/W. Cette étude consiste à simuler un essai d'aquifère en milieu confiné limité par une recharge circulaire. La simulation de la phase de pompage a fait l'objet de la première étape de cette étude. Les résultats obtenus selon les deux modèles étudiés

(axisymétrique et plan), ont permis à travers leur comparaison aux résultats théoriques (Todd, 1980) de mettre en relief les capacités du logiciel.

La deuxième partie de cette étude nous a permis de simuler la phase de la remontée. Plusieurs points ont pu être éclairés:

1. l'influence du temps mis pour fermer la pompe sur les courbes de remontée;
2. l'influence du temps à l'arrêt du pompage sur les courbes de remontée.

5.2 SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE POMPAGE

Comme présenté au chapitre 3, la phase de pompage est la première étape d'un essai d'aquifère. Nous allons analyser un certain nombre de cas de pompages à débit constant. Certains de ces cas sont analysés soit par des modèles axisymétriques soit par des modèles plans. Les autres par les deux.

On rappelle qu'une analyse axisymétrique est possible, lorsque le modèle à analyser, dans sa globalité (géométrie, chargements, conditions initiales, conditions aux limites, etc..) présente:

- Dans le cas 3-D, une symétrie par rapport à une infinité de plans se coupant en un axe fixe appelé axe de symétrie

- Dans le cas 2-D, une symétrie par rapport à une infinité d'axes passant par un centre fixe, appelé centre de symétrie

Dans ce cas l'analyse d'une section portée par un de ces plans ou de ces axes de symétrie est représentative de tout le domaine physique.

D'un autre côté l'analyse en plan est possible, lorsque la solution recherchée ne varie pas avec l'épaisseur du modèle.

5.2.1 Essai d'aquifère en pompage dans un aquifère confiné limité par une frontière de recharge circulaire

On suppose un puits de pompage de 20 cm de diamètre. Ce puits intercepte totalement le centre d'un aquifère circulaire à nappe captive. L'aquifère est considéré horizontal, homogène, isotrope et d'épaisseur constante b = 10 m (figure 5.1). On suppose une charge d'alimentation constante de 30 m sur la frontière périphérique circulaire située à 30 m de l'axe central du puits. La charge au puits est maintenue à h_W = 20m. Le rabattement à ce dernier (rabattement maximal) est alors de 10m. Ce problème peut donc être représenté aussi bien par un modèle axisymétrique que par un modèle plan.

5.2.1.1 Analyse axisymétrique

5.2.1.1.1 Caractéristiques générales de calcul

Pour ce problème, on déterminera le débit d'écoulement, les distributions dans l'espace et dans le temps des charges hydrauliques et des rabattements. Pour cela, des analyses en régime permanent et en régime transitoire sont réalisées. La tolérance sur le résultat numérique est fixée à 0,001%. Comme l'analyse est en milieu confiné et que l'on suppose qu'aucune désaturation ne se produit durant l'essai, les critères de convergence de la solution sur la variation de la conductivité hydraulique n'interviennent pas dans les calculs. La conductivité hydraulique saturée de l'aquifère est de 10^{-4} m/s soit une transmissivité de 10^{-3} m^2/s (Figure 5.2a). La variation de la teneur en eau volumique de l'aquifère (Figure 5.2b) correspond à un coefficient d'emmagasinement S = 3,924 10^{-3}. Par conséquent, la diffusivité T/S est de 2,548 10^{-1} m^2/s.

i. Régime permanent

Pour le régime permanent, il s'agit de comparer les résultats théoriques avec ceux obtenus par SEEP/W. Ces résultats correspondent au débit sortant de la crépine et aux distributions de la charge hydraulique h(r), et du rabattement s(r), en fonction de la distance radiale r, prise à partir de l'axe central du puits.

i.1 Maillage

Dans la génération des éléments suivant la direction radiale (l'axe des r), nous avons choisi des éléments dont les abscisses des sommets (noeuds principaux) vérifient la progression de l'axe logarithmique. Le modèle est alors représenté par 270 éléments quadrilatères à 4 noeuds chacun. Le nombre total de noeuds est de 308. Chaque élément axisymétrique possède une épaisseur de 1 radian, dans le plan (r, θ).

i.2 Conditions aux limites

On imposera comme conditions aux frontières des valeurs constantes dans le temps. Un débit total nul (Q = 0) est imposé sur le toit et la base de l'aquifère (les deux horizontaux) pour une représentation de l'étanchéité parfaite des aquitards limites. Une charge constante de H = 30 m est imposée sur la section périphérique à r = 30 m pour représenter la frontière de recharge circulaire. Enfin, une charge de h_W = 20 m est imposée sur la paroi du puits (r = 0,1 m) (cf. figure 5.3).

i.3 Interprétation des résultats

La figure 5.4 représente la distribution des charges dans la section axisymétrique (r, z) d'épaisseur θ = 1 rd ainsi que la valeur du débit sortant de la crépine. Cette valeur

donnée par SEEP/W demeure constante à travers l'aquifère et est de 1,7755 10^{-3} m^3/s.rd. Le débit total est donc de:

$Q_W = 1{,}7755\ 10^{-3} \times 2\pi = 11{,}1558\ 10^{-3}\ m^3/s$ ..... (5.1)

En supposant que la nappe aquifère vérifie les conditions présentées à la section 3.2.1, l'équation de la courbe génératrice de la surface piézométrique rabattue (courbe de Dupuit) obtenue par la simulation satisfait donc à la relation:

$$Q = 2\pi Kb \frac{s(r)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{..... (5.2)}$$

appliquée entre le puits et la frontière (méthode de Thiem, 1906), elle s'exprime par;

$$Q = 2\pi Kb \frac{(h_0 - h_w)}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)} \quad \text{..... (5.3)}$$

Pour h_0 = 30 m; R = 30 m; h_w = 20 m; r_w = 0,10 m; K = 10^{-4} m/s et b = 10 m, on obtient:

$Q = 11{,}0158\ 10^{-3}\ m^3/s$ ..... (5.4)

Les charges h, et les rabattements s, à différentes positions r sont représentés en fonction du logarithme de la distance radiale r, à partir de l'axe du puits, respectivement aux figures 5.5 et 5.6. Les distributions de h(r) vs log r et s(r) vs logr sont linéaires.

La différence entre le débit calculé par Seep/W (éq. 5.1) et le débit théorique (éq. 5.4) est de 1,2709% du débit théorique. Cet écart est attribué à la discrétisation en éléments finis du domaine. En effet une deuxième discrétisation de la section axisymétrique (r, z) d'épaisseur θ = 1rd avec le même nombre d'éléments mais avec des noeuds secondaires (figure 5.7) (soit 270 éléments à 801 noeuds au total) à présenté une valeur du débit sortant de la crépine de 1,7538 10^{-3} m^3/s.rd (figure 5.8) déterminée à l'aide de SEEP/W. Ce qui représente un débit total de:

$$Q_W = 1{,}7538\ 10^{-3} \times 2\pi = 11{,}0194\ 10^{-3}\ m^3/s \quad \ldots\ldots (5.5)$$

La différence entre ce demier débit calculé par Seep/W (éq. 5.5) et le débit théorique (éq. 5.4) est de 0,033% du débit théorique. Cette différence est plus faible que celle précédement obtenue avec la première grille (1,2709% du débit théorique) (éq. 5.4).

Les figures 5.9 et 5.10 représentent respectivement les distributions de la charge hydraulique et du rabattement en fonction du logarithme de la distance radiale r.

La comparaison des distributions, en fonction de r, des charges (figure 5.11) et des rabattements (figure 5.12) obtenus par les analyses selon les deux modèles géométriques avec et sans noeuds secondaires, révèle une différence négligeable entre ces deux dernières analyses.

En conclusion, on peut maintenir la première grille (figure 5.3) pour le reste des analyses transitoires, ce qui réduira considérablement le temps d'analyse.

ii. Régime transitoire

Pour le régime transitoire, il s'agit de retrouver la transmissivité T, le coefficient d'emmagasinement S ainsi que les fonctions de charge h(r,t) et de rabattements s(r, t). Pour cela, on déterminera la variation de la charge et du rabattement en fonction de la distance radiale r, à différents temps t, soit $h(r, t) = h_r(t)$ et $s(r, t) = s_r(t)$ et la variation de la charge et du rabattement en fonction des différents temps t , à différentes distances radiales r, soit $h(r, t) = h_t(r)$ et $s(r, t) = s_t(r)$.

ii.1 Maillage

Le maillage adopté (figure 5.13) est le même que celui utilisé dans l'analyse en régime permanent (paragraphe i.1 de la section 5.2.1.1.1).

ii.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont représentées par des fonctions du temps. La recharge, à r = 30 m, est représentée par la fonction 1 qui montre une charge constante de 30 m, $\forall t$. Pour représenter l'effet du pompage on imposera, sur toute la frontière gauche, une fonction 2 qui représente le débit déterminé par l'analyse en régime permanent. Ainsi, le débit par unité de surface à imposer est:

$$q(t) = \frac{-1.,775510^{-3}}{10x0.1} m^3 / s.ml = -1,775510^{-3} m^3 / s.ml \quad \text{..... (5.6)}$$

Le toit et la base aquitards sont représentés par la fonction 3 de Q(t) = 0. Les trois fonctions aux limites sont illustrées par la figure 5.14.

ii.3 Conditions initiales

Initialement, juste avant que l'essai de pompage débute, l'écoulement régional est quasi nul. L'aquifère est alors considéré comme un volume équipotentiel. Sa charge est égale à celle de la frontière circulaire de recharge, soit h = 30 m, $\forall r \in$ [-30 m, +30 m], r étant la distance radiale à l'axe central de l'aquifère.

Numériquement, ces conditions initiales de charge (H ≈ 30 m) sont pour tous les noeuds du modèle à l'exception des noeuds représentant le toit et la base de l'aquifère lesquels sont à débit total nul (Q = 0). Afin de construire le fichier des conditions initiales, considérons le modèle présenté en (i) avec la charge au puits dans ce cas de 29,999 m. L'analyse en régime permanent de ce dernier nous fournit le fichier, d'extension h00, des charges et des débits nodaux (figure 5.15) initiaux.

Pour l'analyse transitoire, outre la fonction de conductivité, la fonction d'emmagasinement est requise pour l'analyse. On introduira donc, dans le fichier principal,

la fonction de teneur en eau volumique qui conduit à un coefficient d'emmagasinement de 3,924E-3 (figure 5.2b).

ii.4 Discrétisation du temps

On supposera que le pompage dure 7.10^5 secondes (194.44 heures). Ce temps est discrétisé en 77 étapes. Chaque étape définit un incrément de temps. La valeur de chaque incrément de temps varie de 0.01 seconde à 10^5 secondes (figure 5.16).

ii.5 Interprétation des résultats des analyses

Les figures 5.17 et 5.18 représentent respectivement la charge hydraulique h(r, t), et le rabattement s(r, t), en fonction du logarithme du temps, logt, pour le puits (r = 0,1 m) et sept piézomètres situés à r = 0,4 m, 0,8 m, 2,2 m, 5,4 m, 10,2 m et 21 m. Pour chaque piézomètre proche du puits, une partie log-linéaire est bien développée. Elle peut s'exprimer par l'équation:

$$s(r,t) = \Delta s \ \log\frac{t}{t_0} \qquad (5.7)$$

Considérons le piézomètre le plus proche du puits. Il est installé à r = 0,4 m . La partie log-linéaire de la courbe de rabattement est de pente Δs et d'intercept à l'origine t_0 (cf. Figure 5.18) respectivement de:

$$\Delta s = 2{,}040 \text{ m} \qquad \text{et} \qquad t_0 = 0{,}279 \text{ s} \qquad (5.8)$$

Or pour un aquifère infini (éq. 3.10), cette pente et cet intercept à l'origine sont tirés respectivement des équations (3.11) et (3.12), soit:

$$\Delta s = \frac{2{,}3Q}{4\pi T} = \frac{2{,}3x1{,}7755x10^{-3}x2\pi}{4\pi x10^{-3}} \approx 2{,}042 \text{ m}$$

..... (5.9)

$$t_0 = \frac{r^2 S}{2{,}25T} = \frac{(0{,}4)^2 x3{,}924.10^{-3}}{2{,}25x10^{-3}} = 0{,}279 \text{ s}$$

Par conséquent, les valeurs des paramètres de la portion log-linéaire (Δs, t_0) déterminées graphiquement (5.8) et analytiquement (5.9) sont semblables. Ainsi, en présence d'une frontière de recharge circulaire, la variation log-linéaire des rabattements de pompage en fonction du temps (5.7) est identique à celle pour l'aquifère infini (éq. 3.10). L'effet de la frontière n'est pas encore mobilisé.

La représentation de la charge hydraulique, h(r, t) vs logr, (figure 5.19) ou du rabattement en fonction du logarithme de la distance radiale, s(r, t) vs logr (figure 5.20) permet de déterminer le rayon d'action du puits R qui correspond au rabattement nul (s = 0) à tout instant t. La figure 5.21 illustre la représentation graphique de ce rayon d'action en fonction de la racine carrée du temps, R vs $t^{1/2}$. Nous remarquons que pour les temps t vérifiant la droite log-linéaire (cf. Figure 5.18), le rayon d'action varie linéairement avec $t^{1/2}$. Cette variation est la même que pour l'aquifère infini, elle s'exprime alors par:

$$R = \left(\sqrt{2{,}25\frac{T}{S}}\right)\sqrt{t} \quad \text{..... (5.10)}$$

Par la suite le rayon d'action croit plus lentement avec la racine carré du temps jusqu'à se stabiliser au niveau du rayon de l'ile, R = 30 m. On peut montrer que le temps moyen t_{IR}:

$$t_{IR} = \frac{R^2 S}{2,25T} \quad \text{.....} \quad (5.11)$$

$$t_{IR} = \frac{(30)^2 (3,924.10^{-3})}{2,25.10^{-3}} = 1569,6 \text{ s} \qquad \text{soit} \qquad \sqrt{t} = 39,62 \text{ s}^{1/2} \quad \text{.....} \quad (5.12)$$

Comme on peut le voir à la figure 5.21.

On s'assure que le régime transitoire converge vers le régime permanent en terme de la charge (figure 5.22) et du rabattement (figure 5.23) tous deux en fonction de la distance radiale r.

5.2.1.2 Analyse en plan

L'analyse en plan n'est possible avec ce logiciel que pour le cas d'un aquifère à nappe captive. Pour des raisons de symétrie, seul le quart de la section plane est analysé.

5.2.1.2.1 Caractéristiques générales de calcul

Tout ce qui a été présenté pour l'analyse axisymétrique (section 5.2.1.1.1) reste valable pour l'analyse en plan. Comme pour l'analyse axisymétrique, le modèle plan est

analysé en régime permanent et en régime transitoire. On veillera à s'assurer que la solution en régime transitoire converge vers la solution en régime permanent. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par les analyses axisymétriques.

i. Régime permanent

i.1 Maillage

Le modèle est représenté par 727 éléments plan quadrilatères. Au voisinage du puits nous avons choisi des éléments de petite taille comportant 8 noeuds chacun. Le nombre total de noeuds est de 826. Chaque élément plan possède une épaisseur de 1 m dans le plan (x, z).

i.2 Conditions aux limites

On imposera comme conditions aux frontières des valeurs constantes dans le temps. Ces conditions aux limites sont telles que spécifiées sur la figure 5.24 soit:

- Les facettes portées par les axes de symétrie limitant la section plane à analyser sont des plans d'écoulement par conséquent, on imposera un débit total nul (Q = 0).

- La section périphérique à r = 30 m, est à charge constante, h_w = 30 m alors que la section au puits à r = 0.1 m est à h_w = 20 m.

i.3 Interprétation des résultats

La figure 5.25 présente les isocontours de charges dans la section plane analysée (r, θ) d'épaisseur z = 1 m . Ces isocontours sont bien des quarts de cercles dont les centres se superposent sur l'axe du puits.

Sur cette même figure la valeur du débit sortant du quart de la section de la crépine est également représentée. Cette valeur déterminée par SEEP/W demeure constante à travers l'aquifère et est de 2,7494 10^{-3} $m^3/s/ml$ de b/(π/2 rd). Le débit total est donc de:

$$Q_W = 2{,}7494\ 10^{-4} \times (b = 10m) \times 4 = 10{,}9976\ 10^{-3}\ m^3/s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5.13)$$

La différence entre ce débit et le débit théorique de Dupuit (éq. 5.4) est de -0,165% du débit théorique, ce qui constitue un écart négligeable.

Les figures 5.26 et 5.27 présentent respectivement les variations de la charge et du rabattement en fonction de la distance radiale au puits. Ces variations sont bien linéaires et se comparent très bien à celles obtenues par le modèle axisymétrique (cf. figures 5.28 et 5.29).

ii. Régime transitoire

ii.1 Maillage

Le maillage (cf. Figure 5.30) est le même que celui utilisé dans l'analyse en régime permanent (paragraphe i.1 section 5.2.1.2.1).

ii.2 Conditions aux limites

La figure 5.31 illustre les trois fonctions aux limites. Pour représenter l'effet du pompage on imposera sur le quart de la paroi du puits, une fonction 2 qui représentera le débit déterminé par l'analyse en régime permanent rapporté au quart du périmètre du puits ($\alpha = \pi/2$):

$$q(t) = \frac{Q(t)}{r_w \alpha} \quad \text{.....(5.14)}$$

Étant donné que les éléments dont les côtés forment la paroi du puits ne sont pas curvilignes, la trace de cette paroi sur le plan est plutôt hexagonale que circulaire. Par conséquent le périmètre du puits est la somme des côtés de ces éléments. Pour le quart de la section plane nous aurons:

$r_w\alpha = 0.1 \times \pi/2 = 0.157\text{m} \neq \Sigma l_i = 0.153$ m

$$q(t) = \frac{Q(t)}{\sum l_i} = \frac{2.7494.10^{-4}}{0.153} = 1.7970x10^{-3} m^3 / s.ml.rd \quad \text{..... (5.15)}$$

ii.3 Conditions initiales

Les conditions initiales (Figure 5.32) sont identiques à celles utilisées pour l'analyse axisymétrique (section ii paragraphe ii.3)

ii.4 Discrétisation du temps

De même que pour l'analyse axisymétrique, on adoptera la discrétisation du temps représentée par la figure 5.16.

ii.5 Interprétation des résultats

Les figures 5.33 et 5.34 représentent respectivement la charge hydraulique, h(r, t) et le rabattement s(r, t), en fonction du logarithme du temps log t, pour le puits (r = 0,1 m) et 7 piézomètres situés à r = 0,3 m, 0,6 m, 2,0 m, 5,0 m, 10,0 m et 20 m. Comme pour l'analyse axisymétrique, les courbes de rabattement aux piézomètres proches du puits présentent une partie log-linéaire bien développée qui s'exprime par l'équation (5.7). Considérons le piézomètre le plus proche du puits. Il est installé à r = 0,3 m . La partie log-linéaire de la courbe de rabattement est de pente Δs et d'intercept à l'origine t_0 (cf. Figure 5.34) respectivement de:

$\Delta s = 2{,}02$ m et $t_0 = 0{,}158$ s ..... (5.16)

Or, si l'aquifère était infini (éq. 2.20) la pente serait $\Delta s = 2{,}042$ m (éq. 5.9) et t_0 de:

$$t_0 = \frac{r^2 S}{2{,}25T} = \frac{(0{,}3)^2 x 3{,}924.10^{-3}}{2{,}25x10^{-3}} = 0{,}157\,\text{s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5.17)$$

Par conséquent, les valeurs des paramètres de la portion log-linéaire (Δs, t_0) déterminées graphiquement (5.16) et analytiquement (5.17) sont très voisins. Ainsi, l'équation (5.7) qui représente la variation log-linéaire des rabattements de pompage en fonction du temps en présence d'une frontière de recharge circulaire est identique à celle pour l'aquifère infini (éq. 3.10).

La représentation de la charge hydraulique h(r, t) vs *log* r, (figure 5.35) ou du rabattement en fonction du logarithme de la distance radiale s(r, t) vs *log* r (figure 5.36) permet de déterminer le rayon d'action du puits R à tout instant t. La représentation graphique de ce rayon d'action en fonction de la racine carrée du temps, R vs $t^{1/2}$, est illustrée à la figure 5.37. Sur cette même figure, nous avons également représenté la courbe du rayon d'action de l'analyse par modèle axisymétrique qui se compare très bien à celle obtenue par l'analyse en plan.

Notons que le régime transitoire converge vers le régime permanent (figures 5.38 et 5.39). Aussi, sur les figures 5.40 et 5.41, nous comparons les courbes h(r, t) et s(r, t) vs *log* r obtenues selon les deux modèles: plan et axisymétriques. Comme nous le constatons ces deux modèles fournissent des résultats analogues.

5.3 SIMULATION DES ESSAIS D'AQUIFÈRES EN PHASE DE REMONTÉE

La phase de remontée est la deuxième étape d'un essai d'aquifère. Nous la modélisons pour chacun des essais d'aquifère dont la phase de pompage à débit constant à déjà été simulée dans la section précédente.

Pour la modélisation numérique de la phase de remontée, deux schémas sont possibles. Chaque schéma est lié à une fonction de débit vs temps et à des conditions initiales qui diffèrent l'une de l'autre.

- **schéma no.1: schéma direct-fermeture réelle de la pompe**

Ce schéma permet de simuler la fermeture de la pompe. On représente un axe commun de temps t et t' avec une fonction de débit. Cette fonction est définie de telle sorte que le débit demeure constant durant la phase de pompage. Après la fermeture complète de la pompe le débit s'annule et conduit entre les deux états à une droite décroissante définit par l'équation ci-dessous:

$$Q(t) = -\frac{Q}{\Delta t}t + \frac{Q}{\Delta t}(t_{arret} + \Delta t), \qquad \forall\, t \in [t_{arrêt}\,,\, t_{arrêt} + \Delta t] \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5.18)$$

avec; Q : débit de pompage

$t_{arrêt}$: temps qui correspond au début de la fermeture de la pompe

Δt : délai de fermeture de la pompe

$(t_{arrêt} + \Delta t)$: temps qui correspond à la fermeture complète de la pompe

$(Q = 0)$

Pour ce schéma nous allons étudier l'influence du temps de fermeture de la pompe Δt sur la courbe de la remontée. Pour cela, nous considérons deux cas de figure: Δt = 1 seconde et Δt = 10 secondes.

- **schéma no.2: schéma indirect-fermeture instantanée de la pompe**

Ce schéma revient à simuler le pompage et la remontée en deux étapes successives, chacune ayant son propre fichier. Le fichier initial de l'analyse de la remontée est celui des charges hydrauliques à l'arrêt du pompage (à $t = t_{arrêt}$).

5.3.1 Essai d'aquifère en remontée dans un aquifère confiné limité par une frontière de recharge circulaire

Nous modélisons l'essai de remontée après l'essai de pompage à débit constant présenté à la section 5.2. Cet essai est réalisé dans le milieu limité par une recharge circulaire tel que décrit à la section 5.2.1. Contrairement à l'aquifère infini, il n'existe aucune théorie pour interpréter l'essai de remontée pour les aquifères limités (finis). L'interprétation de la phase de remontée d'un essai d'aquifère dans un milieu confiné et infini est présentée au chapitre 3 à la section 3.5.2.

Pour mieux comprendre l'influence de la position du temps d'arrêt sur les courbes de remontée, nous considérons deux temps d'arrêt de la pompe. Le premier est pris sur le

palier constant correspondant à s_{max}, soit à $t_{arrêt}$ = 30000s, et le deuxième est pour un rabattement situé sur la droite log-linéaire de Cooper-Jacob soit à $t_{arrêt}$ = 100s.

5.3.1.1 Analyse axisymétrique

5.3.1.1.1 Maillage

Le maillage adopté pour la modélisation axisymétrique de la phase de remontée est représenté par la figure 5.42. Ce maillage est le même que celui utilisé pour l'analyse de la phase de pompage (paragraphe i.1 section 5.2.1.1.1).

5.3.1.1.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont représentées par trois fonctions du temps appliquées sur les limites (figure 5.42). Les deux fonctions 1 et 3 sont identiques pour les deux schémas. Cependant, la fonction 2 considérée au schéma direct est différente de celle considérée au schéma indirect. Une définition de chacune de ces 3 fonctions est présentée ci-dessous:

Fonction 1: Représente la recharge de 30 m à la périphérie (r = 30 m) qui est maintenue constante durant toute l'analyse (pompage - remontée).

Fonction 2:

- **Schéma direct:**

Représente les effets successifs de pompage, de la fermeture de la pompe et de la remontée. On supposera donc un débit de -1.7755 10^{-3} $m^3/s.ml$ (éq. 5.6) appliqué du temps t = 0 à t = $t_{arrêt}$. Par la suite, le débit est supposé décroître de cette dernière valeur jusqu'à s'annuler dans un délai en premier lieu égal à 1 seconde et en deuxième lieu égal à 10 s. Ce délai représente le temps mis pour fermer complètement la valve. Le débit nul est maintenu jusqu'à la fin de l'analyse.

- **Schéma indirect:**

Représente un débit nul appliqué au temps t' = 0 qui correspond à t = $t_{arrêt}$ jusqu'à la fin de l'analyse.

Fonction 3: Le toit et la base, supposés étanches durant toute l'analyse, sont à un débit total nul Q(t) = 0.

En se basant sur les courbes de rabattement vs logt présentées par la figure 5.18, nous considérons deux temps d'arrêt différents. Le premier temps d'arrêt $t_{arrêt}$ = 30000s, est considéré dans le palier du régime permanent. Le deuxième temps d'arrêt, $t_{arrêt}$ = 100s, est considéré dans la partie log-linéaire de Cooper-Jacob.

Pour l'arrêt de la pompe à $t_{arrêt}$ = 30000s les conditions aux limites sont respectivement illustrées par les figures 5.43 pour le schéma direct (schéma 1) et 5.44 pour le schéma indirect (schéma 2). La fonction de débit vs temps (fonction 2) appliquée au puits est représentée par la figure 5.45 selon que l'arrêt complet de la pompe s'effectue en 1 seconde (Figure 5.45a) ou en 10 secondes (Figure 5.45b). Pour $t_{arrêt}$ = 100s, ces figures restent valables. Le débit nul est soit à 101 s soit à 110 s.

5.3.1.1.3 Conditions initiales

Les conditions initiales dépendent du schéma adopté pour la modélisation de la remontée.

- **Schéma direct**:

  Pour le schéma direct, les conditions initiales sont celles définies pour la phase de pompage. Ces conditions sont décrites dans la section 5.2.1.1.1 paragraphe ii.3 et représentées par la figure 5.13.

- **Schéma indirect**:

  Pour le schéma indirect, le fichier initial est celui des charges hydrauliques et de débit nodaux à l'arrêt du pompage (à $t = t_{arrêt}$). Pour la remontée à t = 100s c'est le fichier d'extension h40 et à t = 30000s c'est le fichier d'extension h63.

5.3.1.1.4 Discrétisation du temps

La discrétisation du temps dépend du schéma adopté pour la modélisation de la remontée.

- **Schéma direct**:

La figure 5.46 représente la discrétisation du temps pour l'analyse de la remontée selon le schéma direct. Le temps à l'arrêt de la pompe est de 30000 s.

L'essai d'aquifère dure 10^5 secondes (27,78 heures). Ce temps est discrétisé en 92 étapes. La valeur de chaque incrément de temps varie de 0.01 seconde à 10^4 secondes. La phase de pompage à débit constant dure 30000 s. Ce temps est discrétisé en 63 étapes. La valeur de chaque incrément dans cette phase varie de 0.01s à 10^4 secondes. La phase de transition (fermeture de la pompe) est soit de 1 seconde discrétisée en 1 étape soit de 10 secondes discrétisée en 6 étapes: 5 étapes de 1 seconde chacune et 1 étape de 5 secondes. Par conséquent, la phase de la remontée est modélisée sur 69999 s, si la phase de transition est de 1 seconde et sur 69990 s, si la phase de transition est de 10 secondes. Dans le premier cas elle est discrétisée en 28 étapes de 1 à 10^4 secondes et dans le second en 23 étapes de 5 à 10^4 secondes.

- **Schéma indirect:**

Pour le schéma 2 (schéma indirect), on adoptera la discrétisation du temps présentée à la figure 5.16. On supposera donc que la remontée après pompage dure 7 10^5 secondes (194.44 heures). Ce temps est discrétisé en 77 étapes. La valeur de chaque incrément de temps varie de 0.01 seconde à 10^5 secondes.

5.3.1.1.5 Interprétation des résultats

Pour les deux cas d'analyse selon le schéma direct et le schéma indirect, on représentera les résultats: rabattements résiduels en fonction du temps au puits (r = 0,1 m) et aux 7 piézomètres situés à r = 0,4 m, 0,8 m, 2,2 m, 5,4 m, 10,2 m et 21 m (comme pour la phase de pompage (section ii.5 de l'alinéa 5.2.1.2)).

Considérons le temps du début de la fermeture de la pompe comme étant le temps initial de la phase de la remontée. Dans notre cas, ce temps correspond à t = 30000 secondes. La figure 5.47 représente les rabattements résiduels, s'(r, t, t') en fonction du logarithme de t/t', pour une fermeture de la pompe en 1 seconde. La figure 5.48 représente les rabattements résiduels, s'(r, t, t') en fonction du logarithme de t/t', pour une fermeture en 10 secondes. Nous remarquons que pour une fermeture plus rapide (de 1 s) nous avons moins de perturbation au niveau des piézomètres les plus proches du puits que pour une fermeture plus lente (de 10 s). Cette perturbation se manifeste au niveau

des valeurs élevées de t/t' soit aux valeurs faibles de t' (début de la remontée). La comparaison des courbes de remontée pour une fermeture de la pompe en 1 seconde et en 10 secondes, pour des piézomètres proches du puits et des piézomètres éloignés est représentée par la figure 5.49. Notons toutefois la superposition des courbes pour les piézomètres éloignés. Par conséquent, pour ceux-ci on ne relève aucune incidence de la durée de la phase de transition sur la réponse de l'aquifère.

Considérons cette fois-ci le temps à la fermeture complète de la pompe (à Q = 0) comme étant le temps initial de la phase de la remontée. Dans notre cas, ce temps correspond à t = 30001 s si la fermeture a lieu en 1 s, et à t = 30010 s si la fermeture s'effectue en 10 s. La figure 5.50 représente les rabattements résiduels s'(r, t, t') en fonction du logarithme de t/t', pour une fermeture de la pompe en 1 seconde. La figure 5.51 représente les rabattements résiduels, s'(r, t, t') en fonction du logarithme de t/t', pour une fermeture de la pompe en 10 secondes. Il est important de noter que pour la fermeture plus lente nous avons par cette nouvelle représentation moins de perturbation au début de la remontée que dans la première représentation (fig. 5.48). Il demeure que les courbes de remontée pour les piézomètres proches du puits sont influencées par le temps mis pour fermer la pompe (cf. Fig. 5.52).

La figure 5.53 représente les rabattements résiduels vs le logarithme du temps t/t' pour une fermeture instantanée de la pompe à t = 30000 secondes. Comme on peut le constater, pour le puits et les piézomètres proches du puits les courbes de remontée convergent vers la droite de pente $\Delta s' = 2.042$m qui correspond à la pente théorique :

$$\Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T'} = \frac{2,3x11,1558x10^{-3}}{4\pi 10^{-3}} \cong 2,042m \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5.19)$$

La figure 5.54 représente les courbes comparatives de remontée au puits pour une fermeture instantanée, en 1 s et en 10 s de la pompe à t =30000 s avec la droite de pente théorique. Nous remarquons que plus le délai dans la fermeture de la pompe est long plus la partie log-linéaire de la courbe est courte. Elle n'est alors pas assez développée et donc difficilement interprétable. La fermeture de la pompe en 1s se compare bien à la fermeture instantanée laquelle est presque portée par la droite de pente théorique. Ces remarques demeurent valables pour les courbes de remontée au puits représentées avec un changement de l'origine des temps t' (fig. 5.55).

Une étude comparative des courbes de remontée pour le piézomètre situé à r = 0.8 m de l'axe du puits pour une fermeture instantanée, en 1 s et en 10 s de la pompe à t = 30000 s avec la droite de pente théorique a été réalisée et illustrée à la figure 5.56. Nous remarquons que la fermeture de la pompe en 1s produit le même effet que la fermeture instantanée. Par conséquent, les courbes de remontée correspondant sont presque superposables. Ceci reste valable pour la représentation des courbes de remontée avec changement de l'origine des temps t' (fig. 5.57). Ainsi, plus on s'éloigne du puits plus le délai dans la fermeture de la pompe diminue d'influence. Par conséquent, le schéma direct avec phase de transition converge vers le schéma indirect. La figure 5.58 représente pour les piézomètres éloignés (r = 5,4 m et r = 21 m) les courbes de remontée pour une fermeture instantanée de la pompe et les courbes pour une fermeture de la pompe en 1 s et en 10 s à t= 30000 s confirme ces derniers résultats.

D'un autre côté nous remarquons que toutes les courbes de remontée convergent vers la droite de pente théorique. Cette dernière ne passe pas par l'origine, soit par *log* t/t' = 0 qui correspond à t/t' = 1 comme dans le cas d'un aquifère infini. Elle est décalée vers la droite par rapport à l'origine. Il est à noter que le temps du début de la remontée, soit t = 30000 s, est pris une fois que le régime permanent est atteint. Le niveau d'eau dans chacun des piézomètres ne varie plus avec le temps. Pour examiner l'influence de ce temps sur les courbes de remontée, considérons un autre temps initial de la remontée. Soit t = 100s , le temps du début de la remontée. Ce temps est choisi dans la partie log-linéaire de Cooper-Jacob. La frontière de recharge n'a pas encore d'influence sur les courbes de rabattement des piézomètres. La simulation de la remontée est réalisée en supposant une fermeture instantanée de la pompe. L'analyse est donc effectuée selon le schéma indirect. La figure 5.59 représente les courbes de rabattements résiduels en fonction du temps au puits (r = 0,1m) et aux 7 piézomètres situés à r = 0,4m, 0,8m, 2,2m, 5,4m, 10,2m et 21m. Ces courbes convergent vers la droite de pente théorique. Contrairement au cas précédent, cette droite passe par l'origine, soit par logt/t' = 0 qui correspond à t/t' = 1.

5.3.1.2 Analyse en plan

Tout ce qui a été présenté pour l'analyse axisymétrique (section 5.2.1.1.1) reste valable pour l'analyse en plan. L'analyse en plan n'est effectuée que selon le schéma indirect. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par les analyses axisymétriques

5.3.1.2.1 Maillage et conditions aux limites

Le maillage est le même que celui utilisé dans la simulation de la phase de pompage. Étant donné que la simulation de la remontée est selon le schéma indirect, les trois fonctions aux limites sont celles illustrées par la figure 5.44. Ces fonctions sont appliquées sur le modèle géométrique de la figure 5.60.

5.3.1.2.2 Conditions initiales et discrétisation du temps

Autant les conditions initiales que la discrétisation du temps sont les mêmes que celles pour l'analyse axisymétrique selon le schéma indirect (sections 5.3.2.3 et 5.3.2.4 respectivement).

5.3.1.2.3 Interprétation des résultats

Les figures 5.61 et 5.62 représentent les courbes de rabattements résiduels s' (r, t), en fonction du logarithme du temps *log* t/t' pour une fermeture instantanée de la pompe à $t_{arrêt}$ = 30000 s et $t_{arrêt}$ = 100 s respectivement. Ces courbes sont pour le puits (r = 0,1 m) et 7 piézomètres situés à r = 0,3 m, 0,6 m, 2,0 m, 5,0 m, 10,0 m et 20 m.

Comme pour l'analyse axisymétrique, pour $t_{arrêt}$ = 30000 s, les courbes de remontée aux piézomètres proches du puits convergent vers la droite log-linéaire de pente $\Delta s'$ et d'intercept à l'origine $(t/t')_0$ (cf. Figure 5.61) tels que:

$\Delta s' = 2{,}042$ m et $(t/t')_0 > 1$ ..... (5.20)

De la même facon, pour $t_{arrêt}$ = 100 s, les courbes de remontée aux piézomètres proches du puits convergent vers la droite log-linéaire de pente $\Delta s'$ et d'intercept à l'origine $(t/t')_0$ (cf. Figure 5.62) tels que:

$\Delta s' = 2{,}042$ m et $(t/t')_0 = 1$ ..... (5.21)

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par l'analyse axisymétrique comme montré par les figures 5.63 et 5.64.

5.4 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

La modélisation numérique d'un essai d'aquifère en pompage et en remontée a été réalisée. Les modèles d'analyse sont de deux types: modèle axisymétrique et modèle en plan. Les résultats intéressants de cette étude sont résumés dans ce qui suit:

1. Le logiciel SEEP/W fournit de bons résultats autant pour les analyses en modèles axisymétriques qu'en modèles en plan.

2. Les courbes de remontée dépendent :
   - du temps mis pour fermer la pompe.
   - de la valeur du temps à l'arrêt de la pompe et sa position sur la courbe de pompage

Il en résulte:

- Plus le temps mis pour fermer complètement la pompe est court plus les données sont interprétables.

- L'origine du temps de remontée t'_{ini} , doit toujours être considéré comme le temps qui correspond à la fermeture complète de la pompe.

- Lorsque le temps et le rabattement à l'arrêt de la pompe ne vérifient pas l'équation de Cooper-Jacob, les courbes de remontée sont décalées vers la droite par rapport à l'origine.

Dans les chapitres suivant nous allons exploiter ce dernier résultat pour développer des méthodes d'interprétation des courbes de remontée pour différents cas.

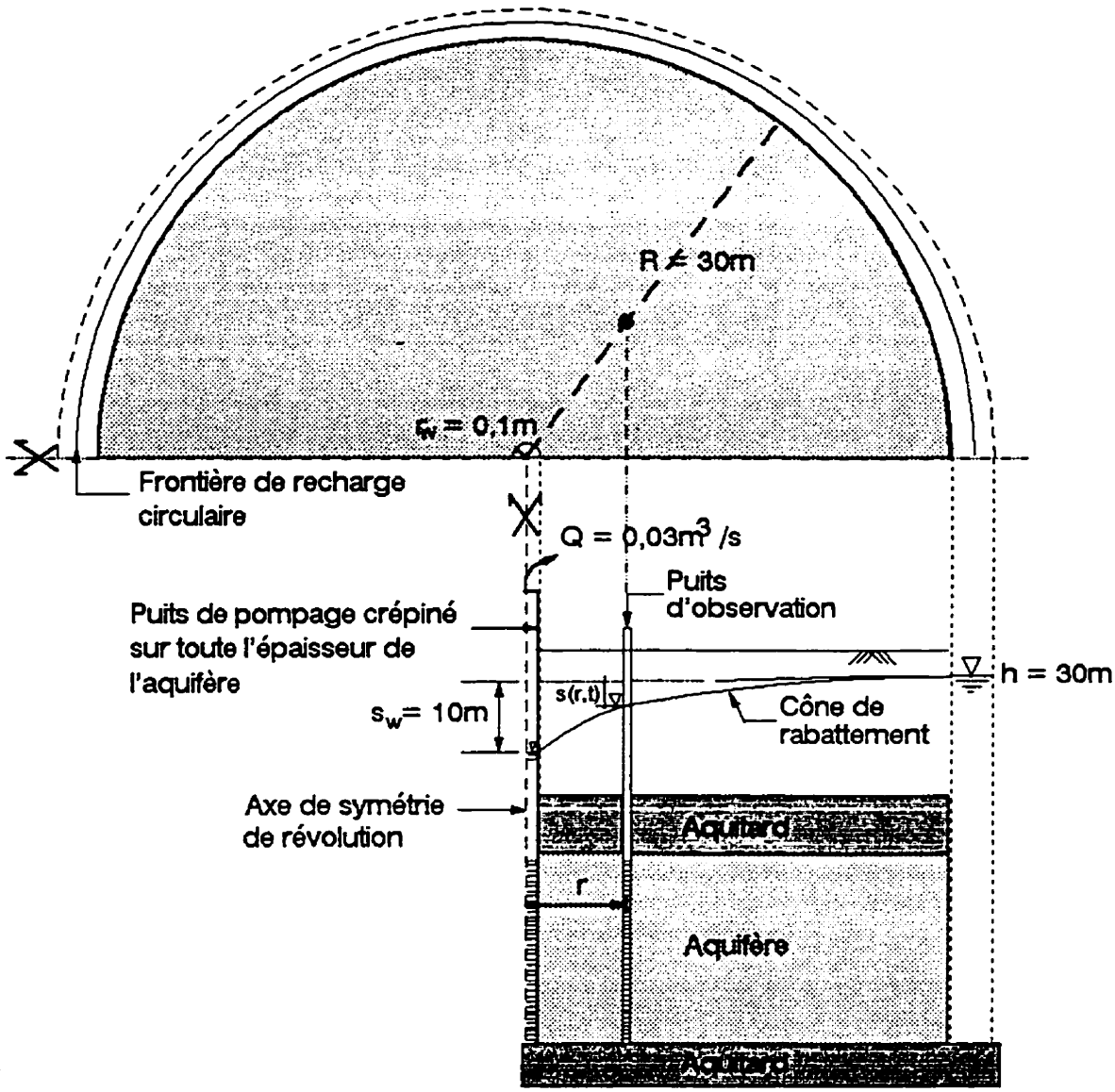
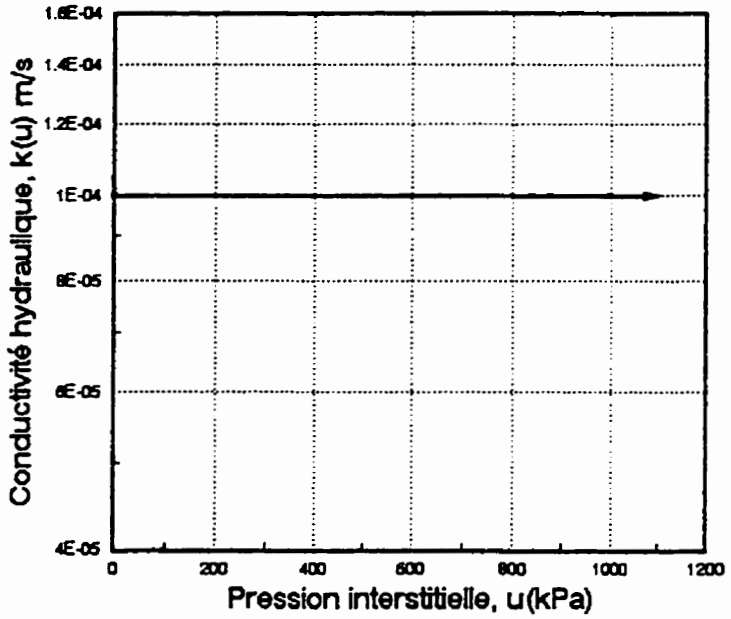
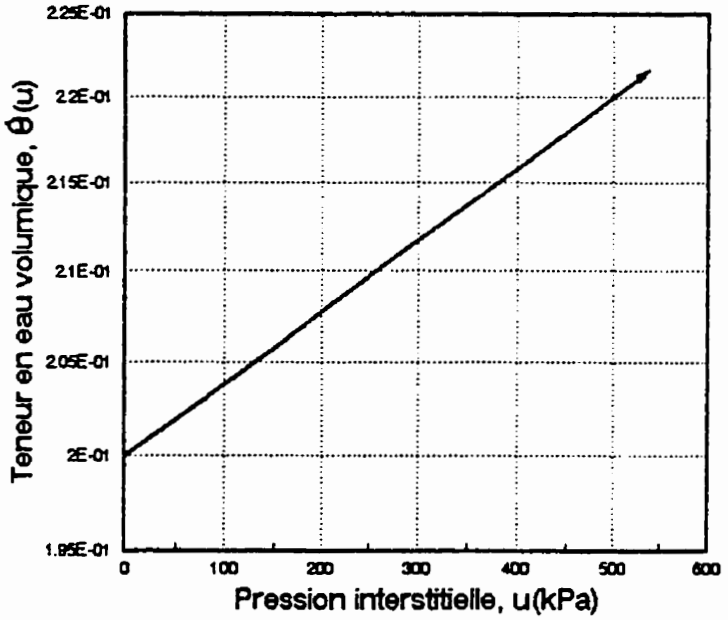


Figure 5.1: Essai d'aquifère au centre d'un aquifère confiné limité par une recharge circulaire: modèle physique



(a)



(b)

Figure 5.2: Variations en fonction de la pression d'eau de:
(a) la conductivité hydraulique et (b) la teneur en eau volumique du matériau formant l'aquifère testé.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 308 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT

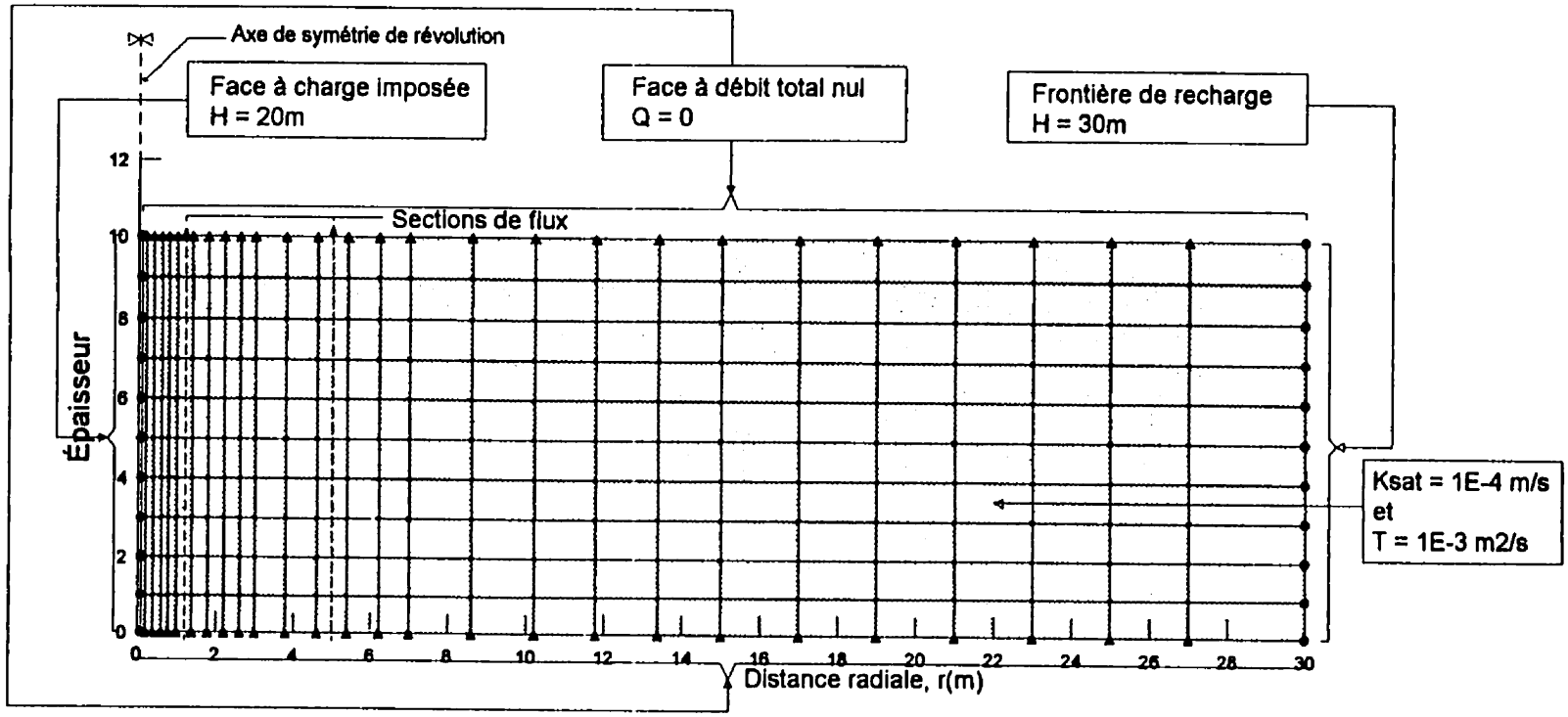


Figure 5.3: Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 308 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT

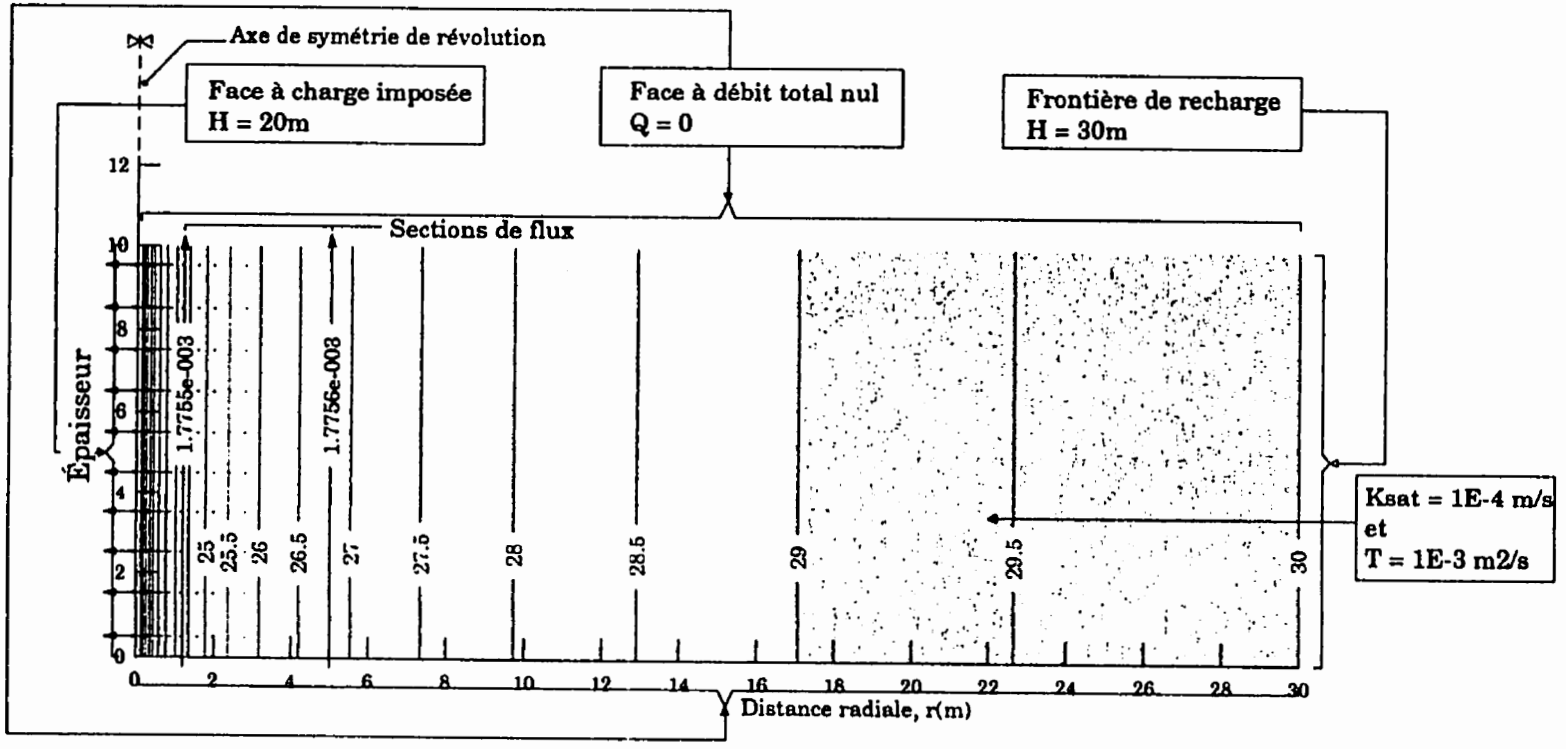


Figure 5.4 : : Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles.

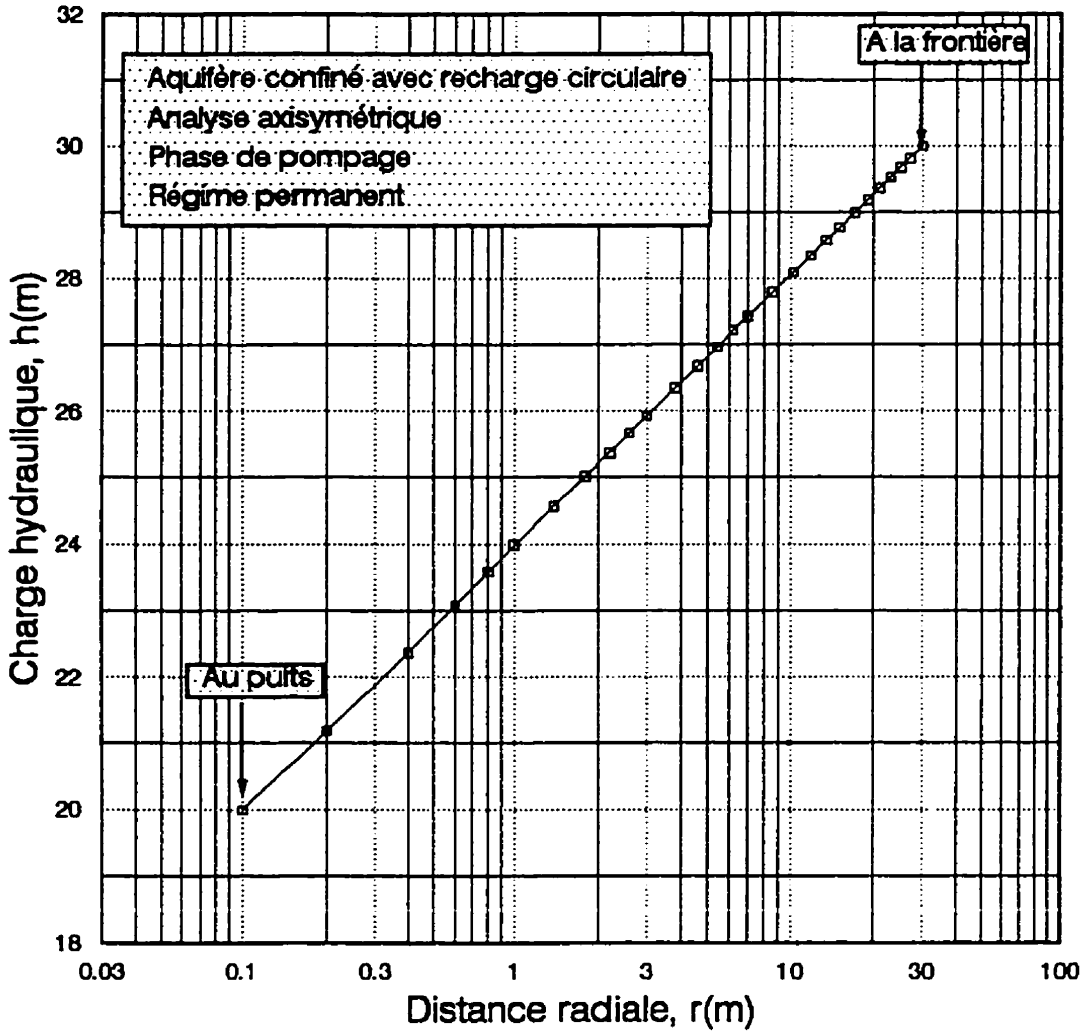


Figure 5.5: Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs logr.

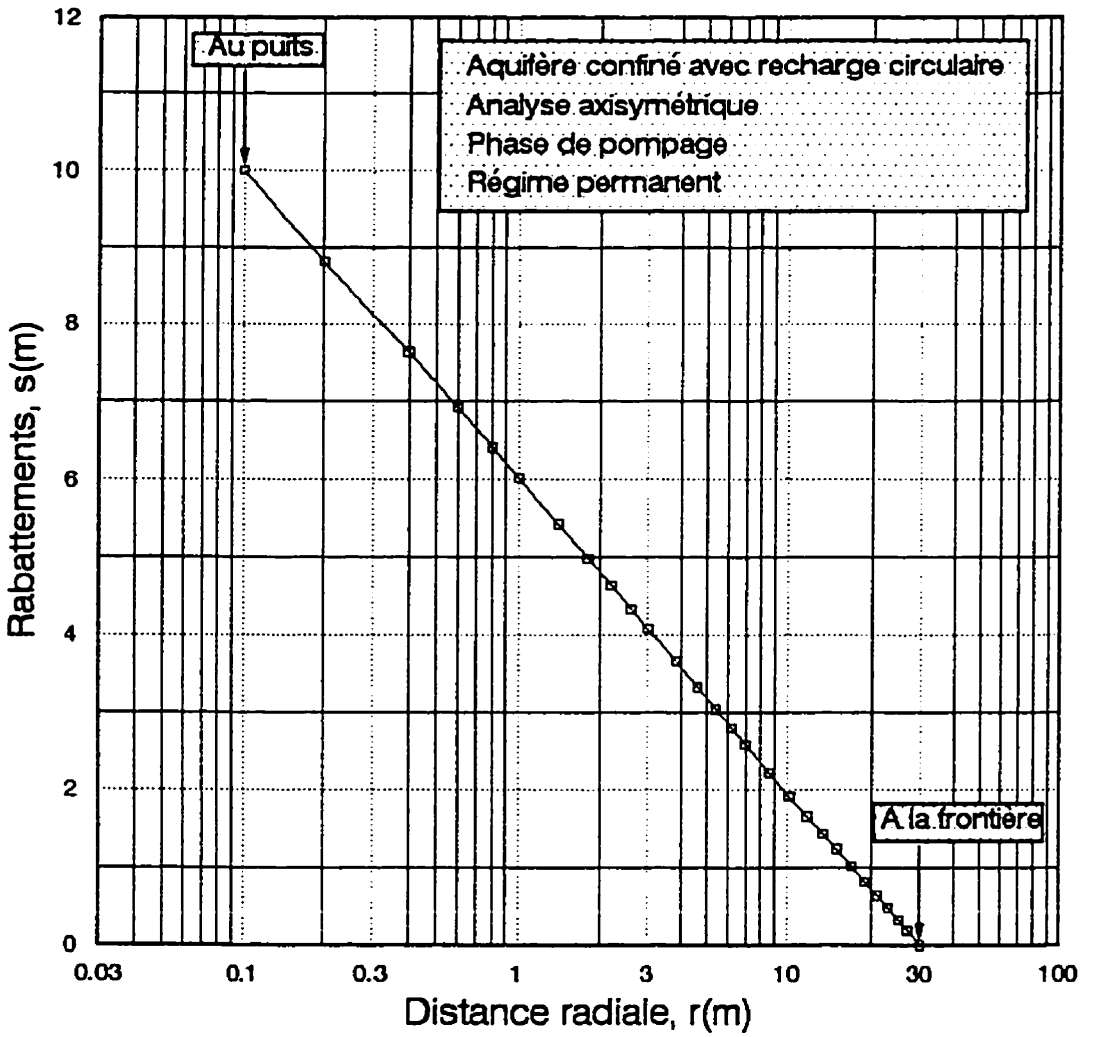


Figure 5.6: Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs logr.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 801 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT

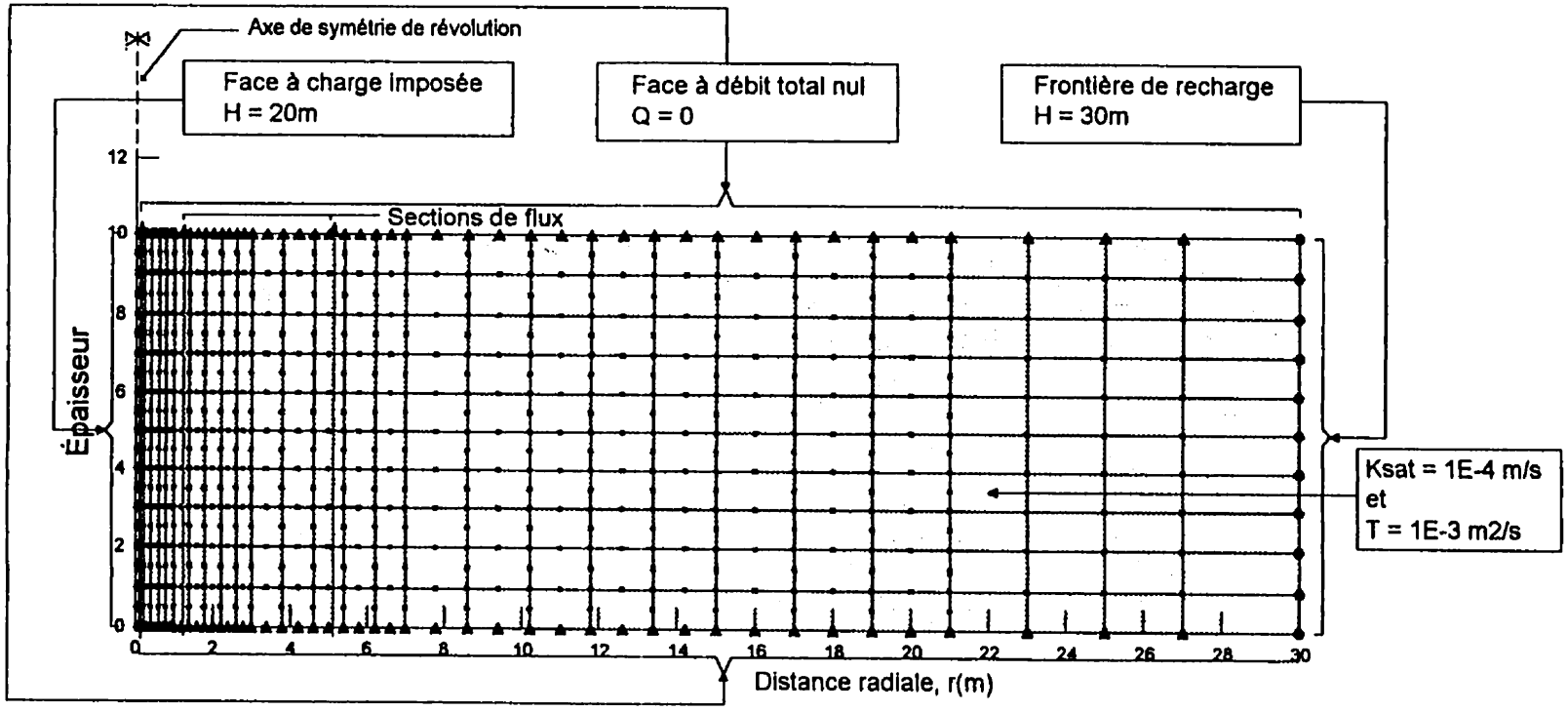


Figure 5.7: Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis avec noeuds secondaires et conditions aux limites.

MODELE AXISYMÉTRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 801 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT

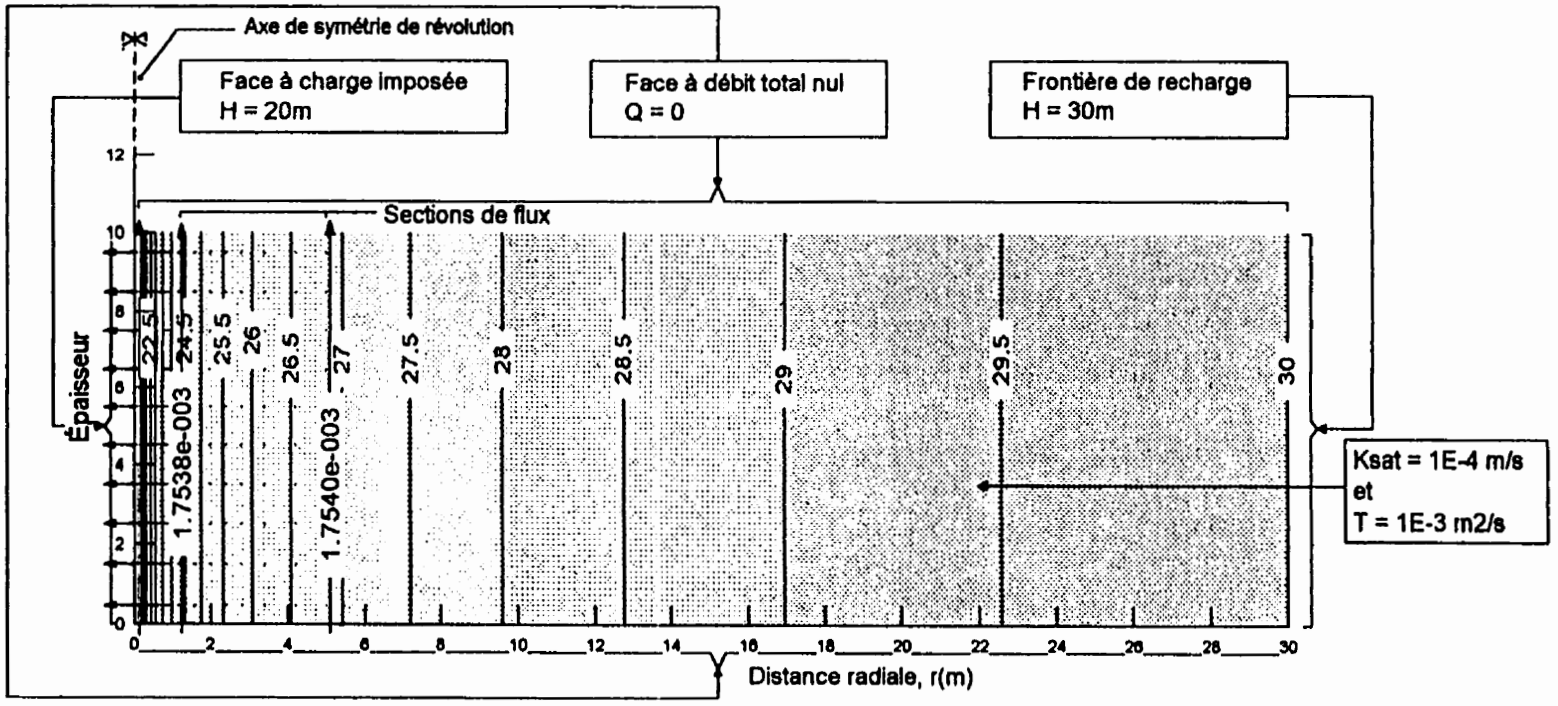


Figure 5.8 : Analyse axisymétrique en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles.

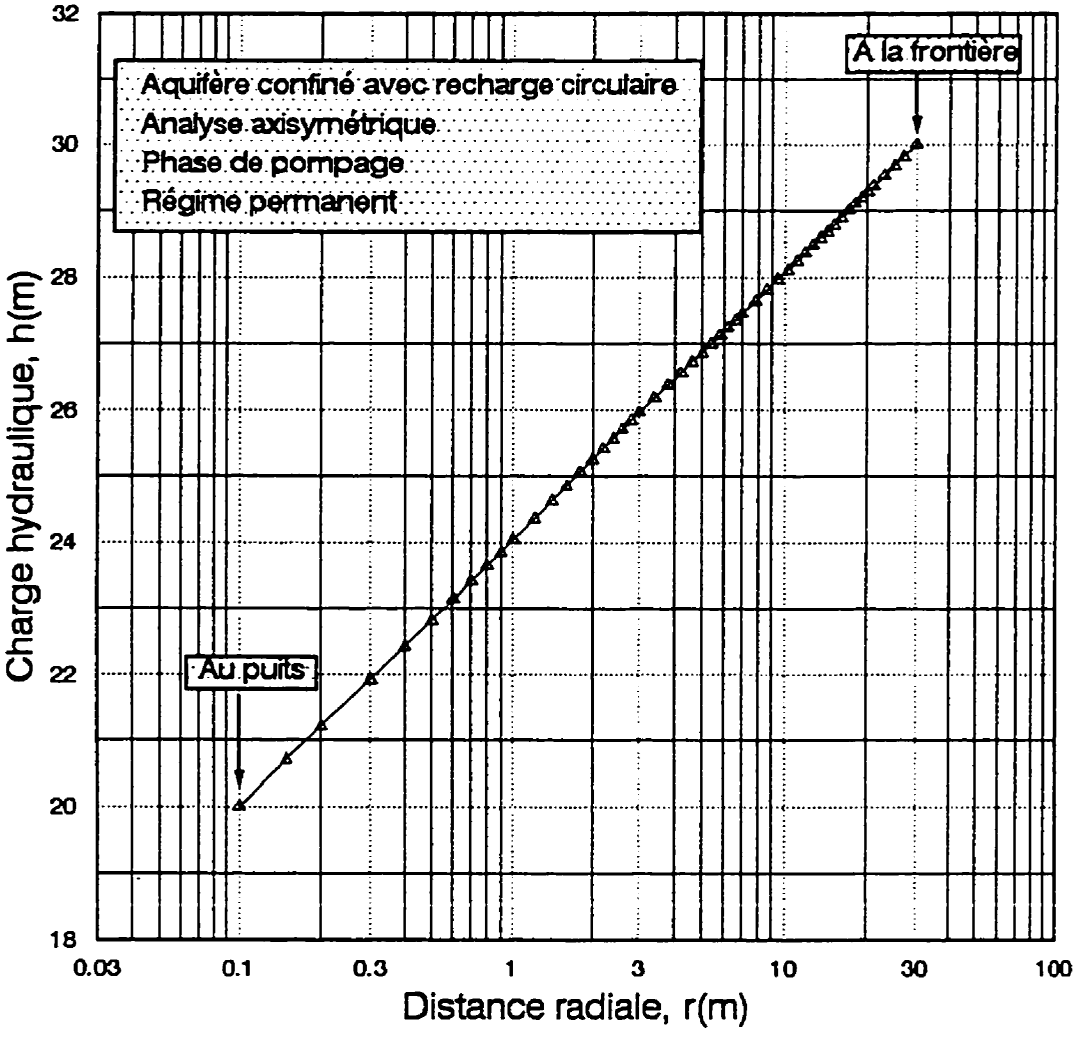


Figure 5.9: Analyse axisymétrique avec noeuds secondaires en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs logr.

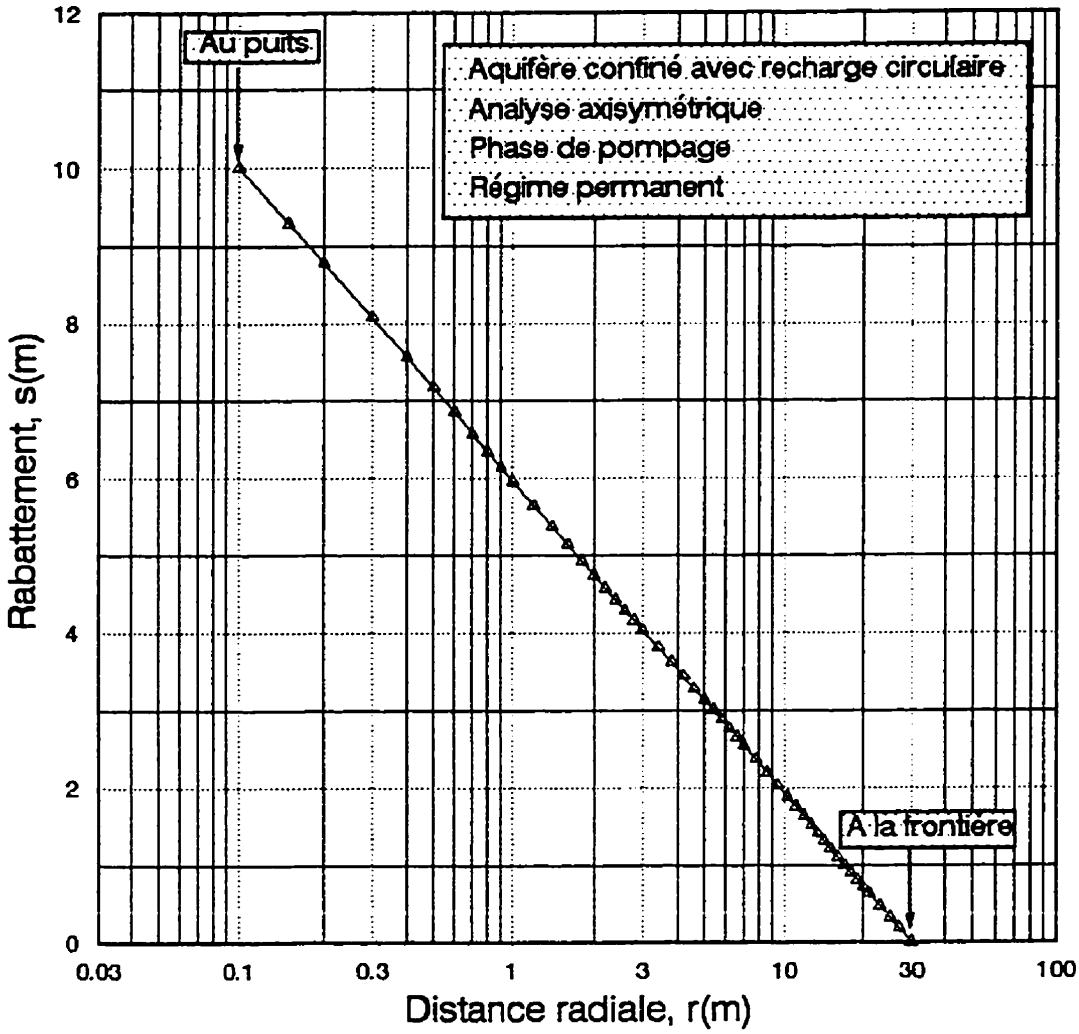


Figure 5.10: Analyse axisymétrique avec noeuds secondaires en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs logr.

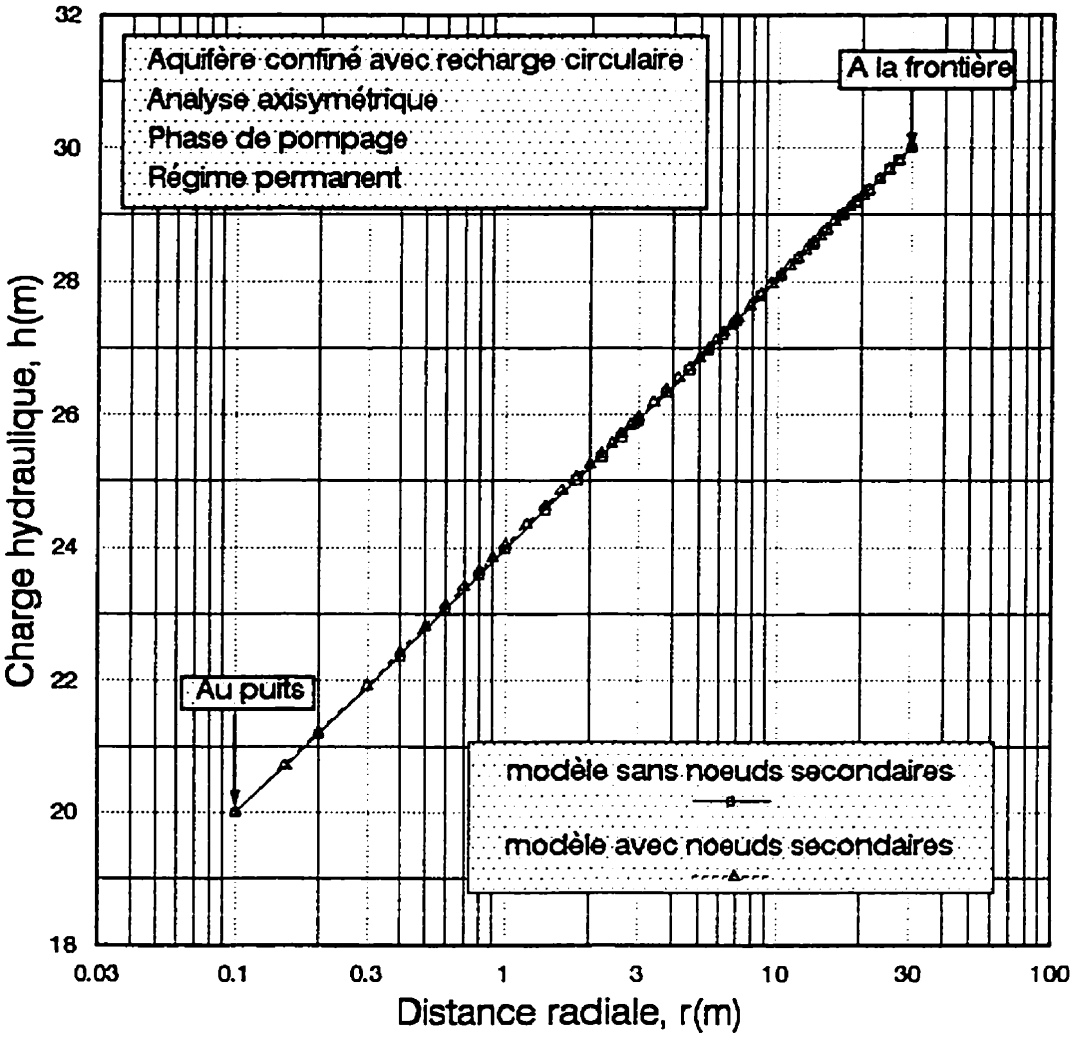


Figure 5.11: Comparaison des charges hydrauliques obtenues par l'analyse des deux modèles sans et avec noeuds secondaires

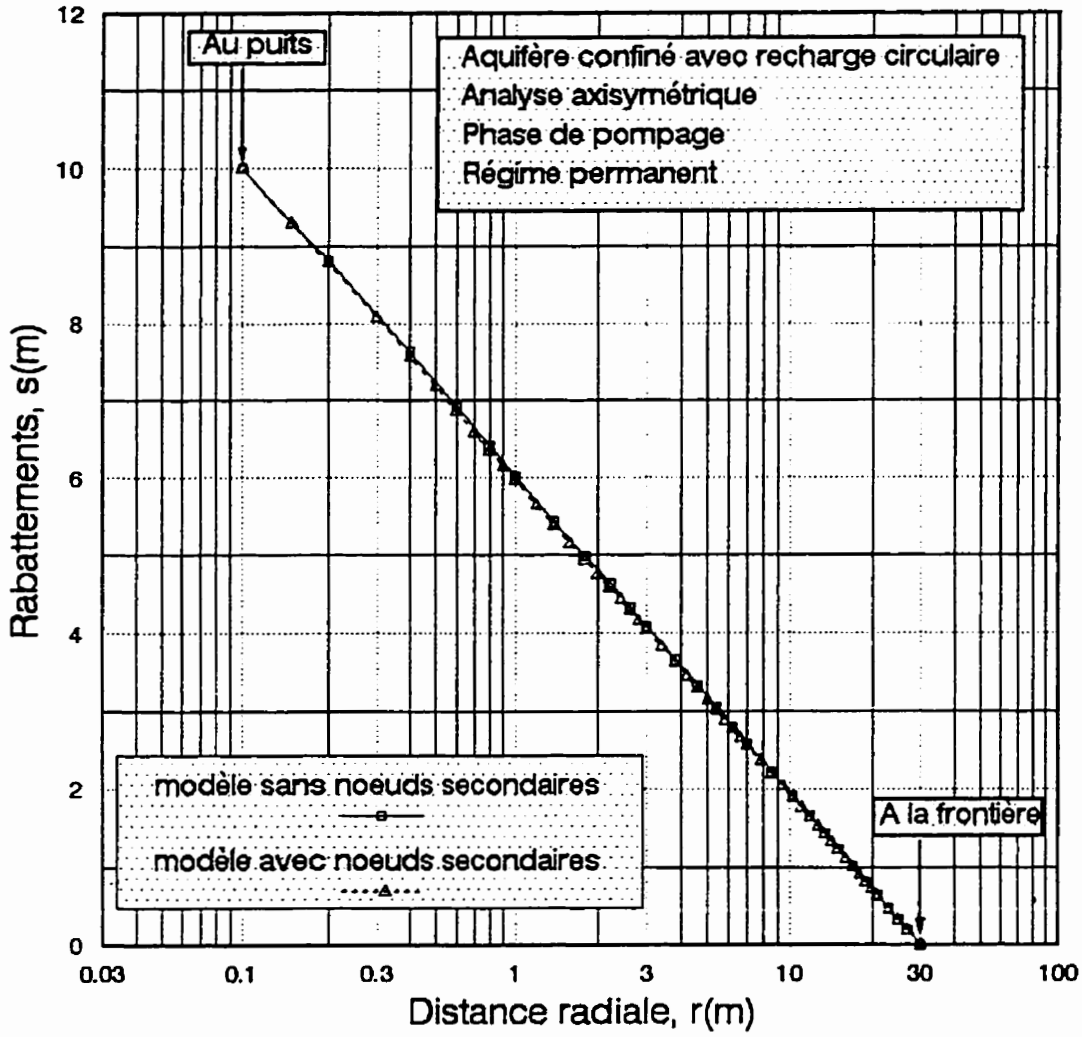


Figure 5.12: Comparaison des rabattements obtenus par l'analyse des deux modèles sans et avec noeuds secondaires.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 308 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME TRANSITOIRE

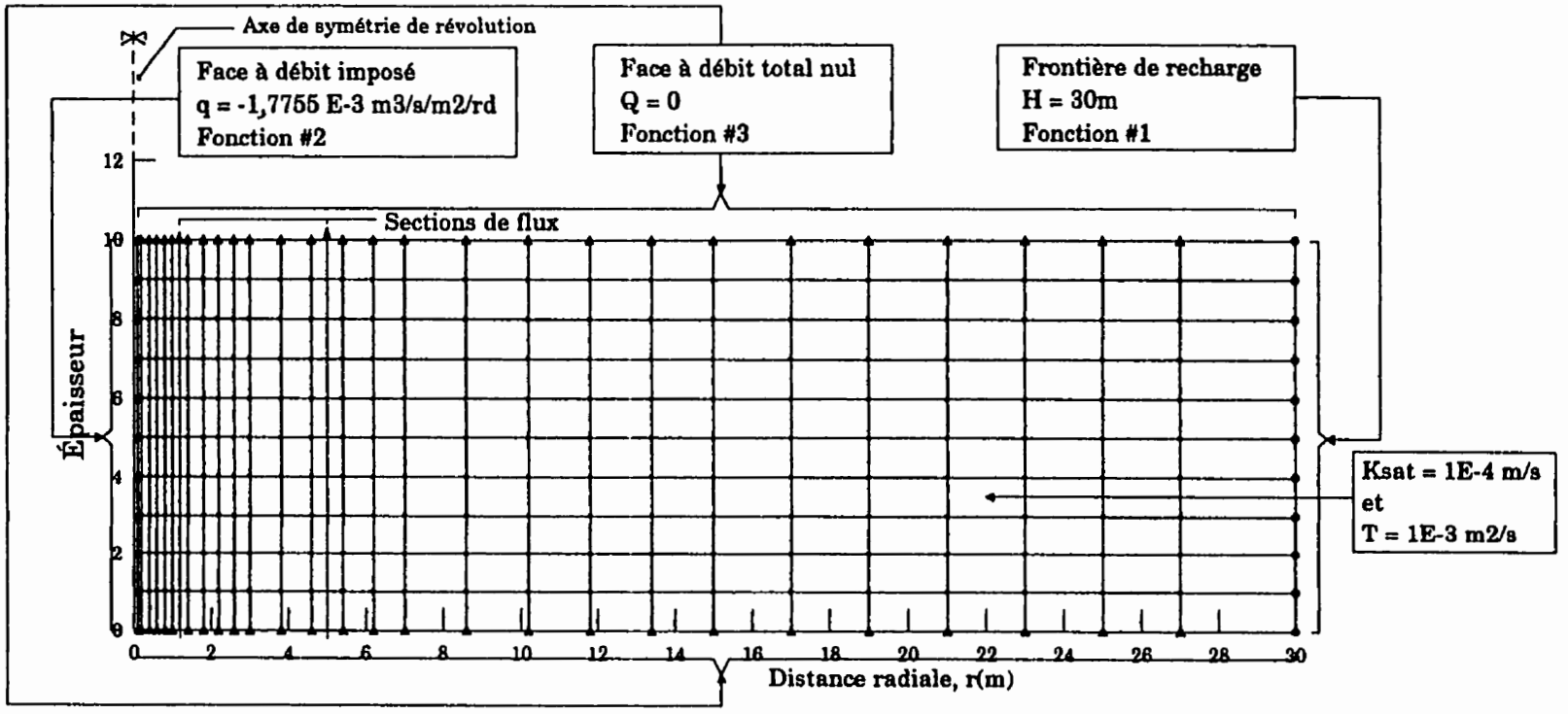


Figure 5.13 : Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés.

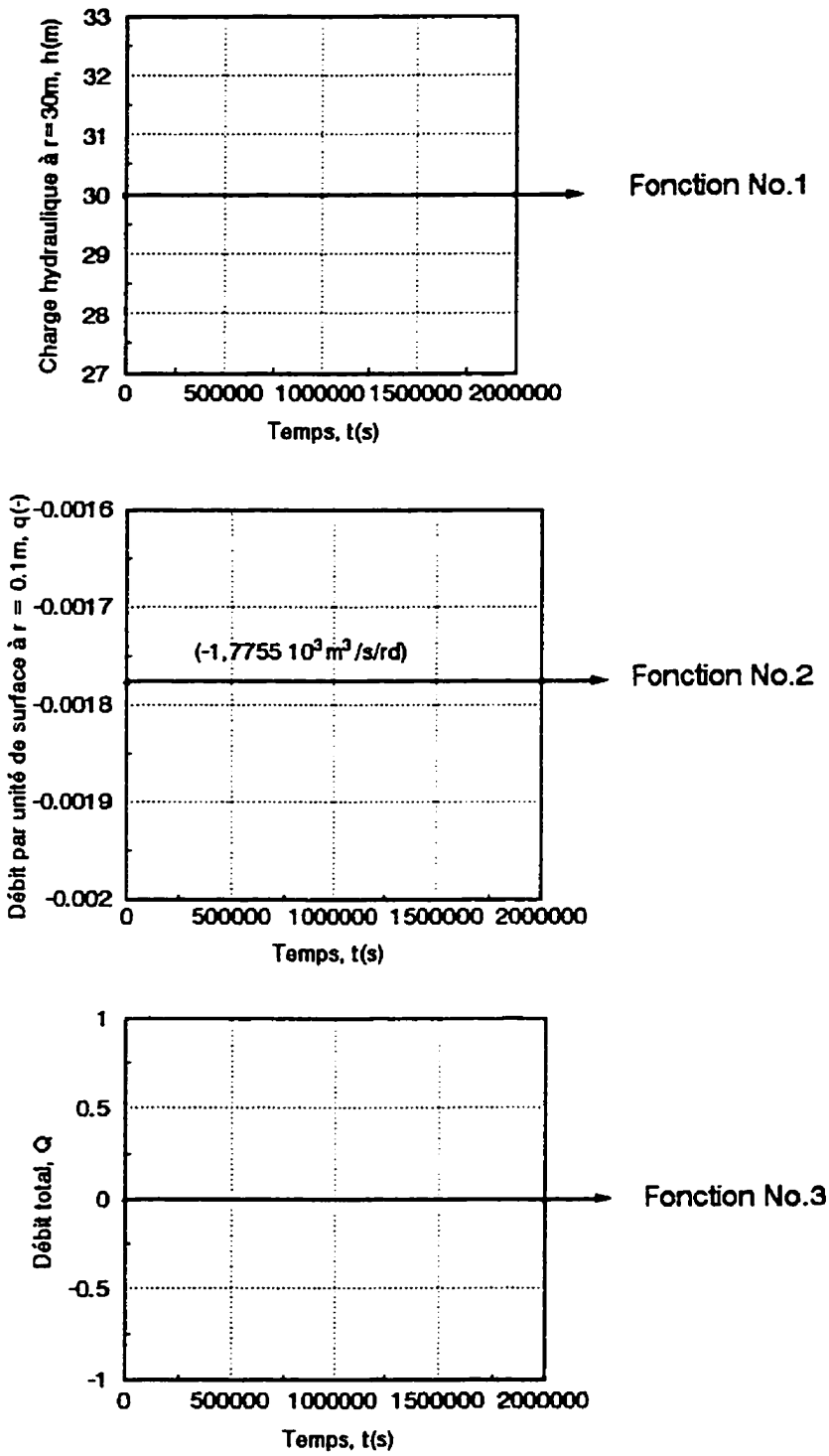


Figure 5.14: Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 308 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT- CONDITIONS INITIALES

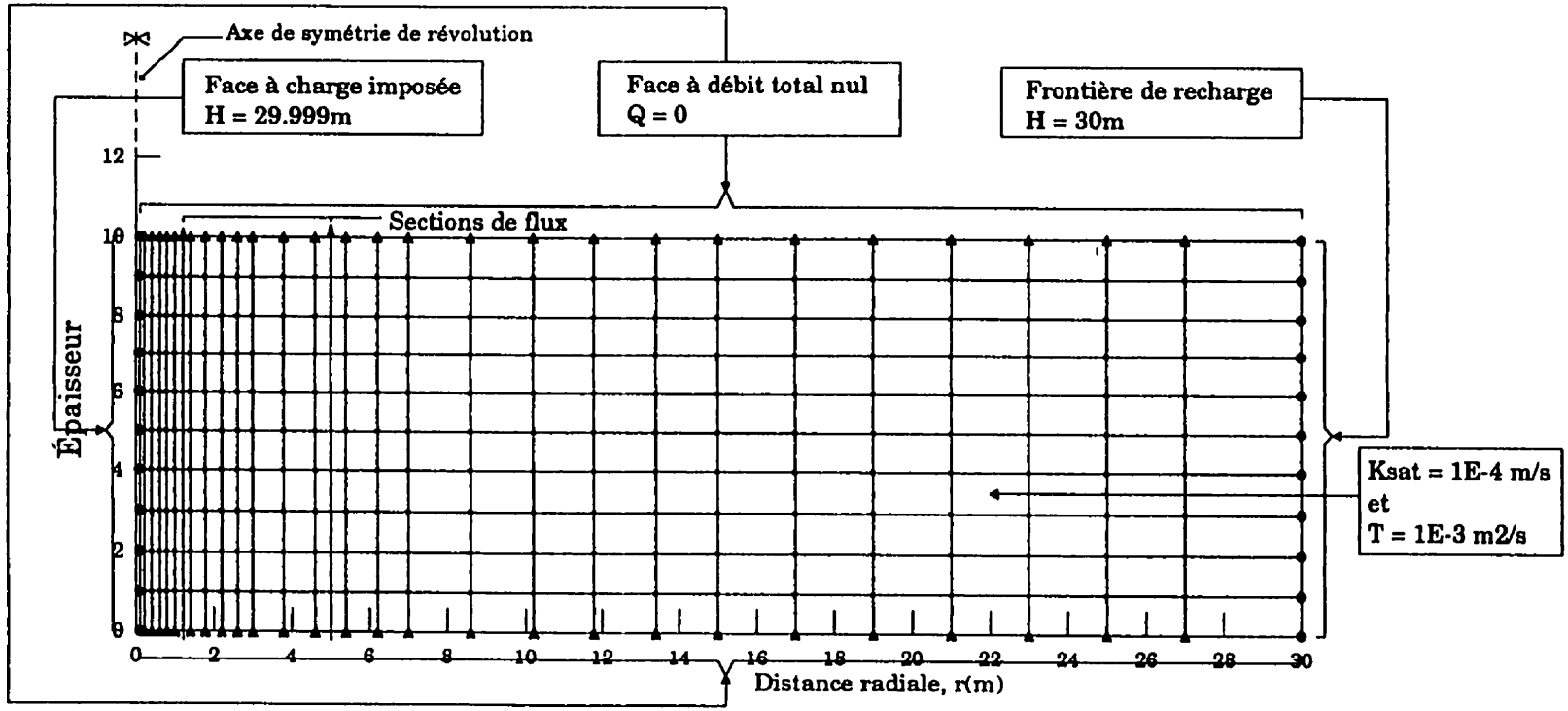


Figure 5.15 : Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés comme conditions initiales.

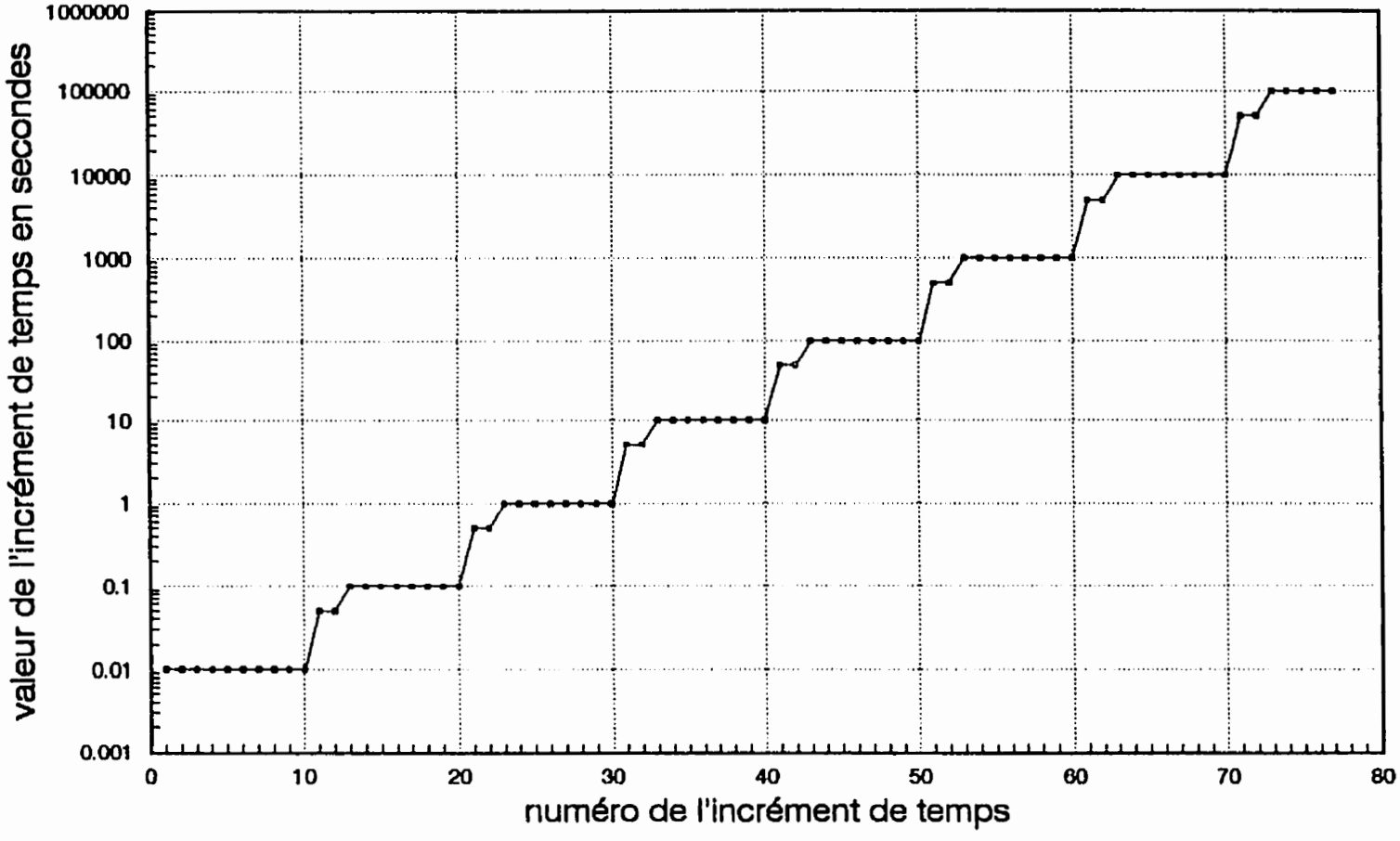


Figure 5.16: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Discrétisation du temps utilisée.

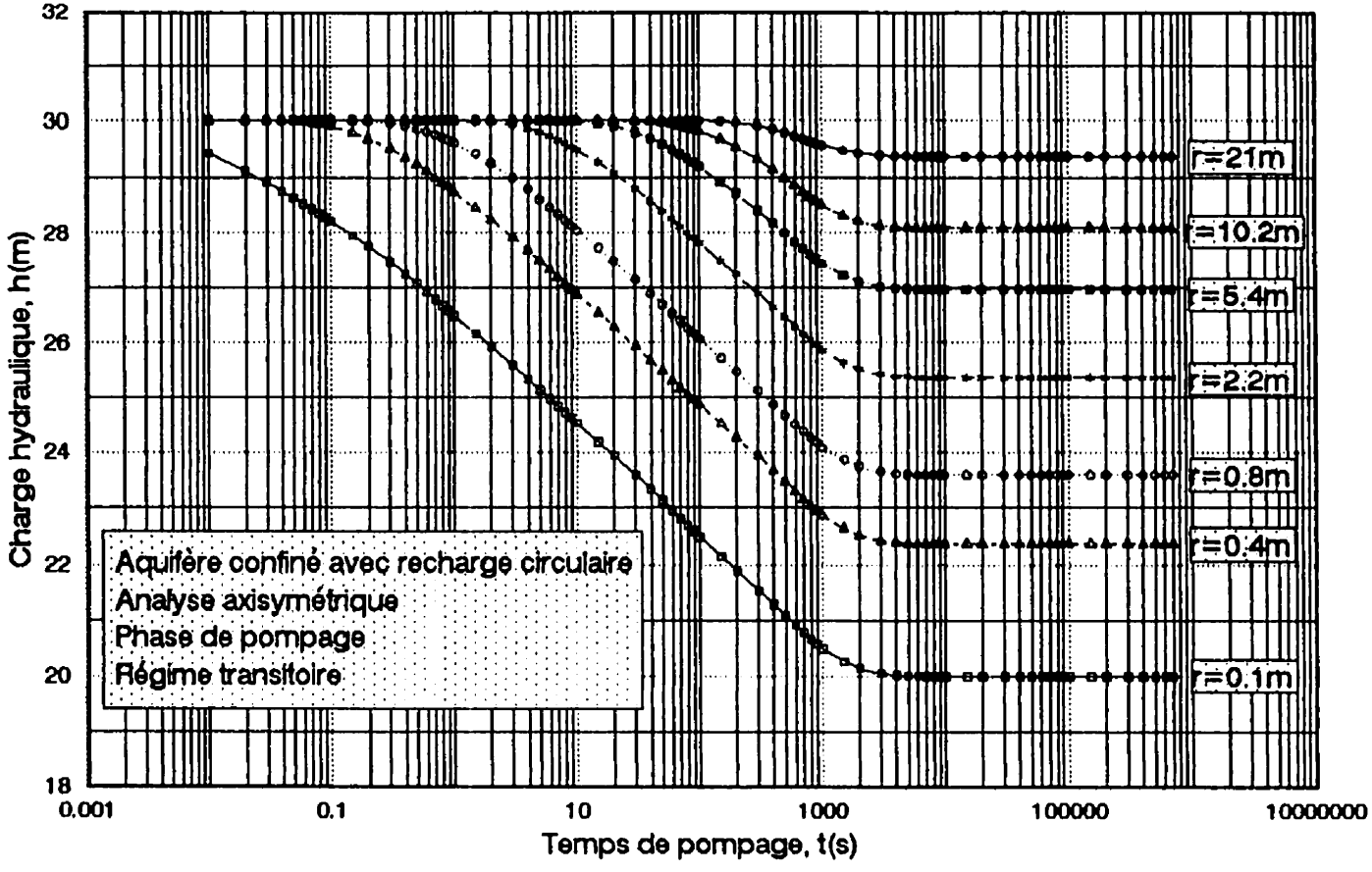


Figure 5.17: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des charges en fonction du temps pour différents piézomètres, h(r, t) vs logt.

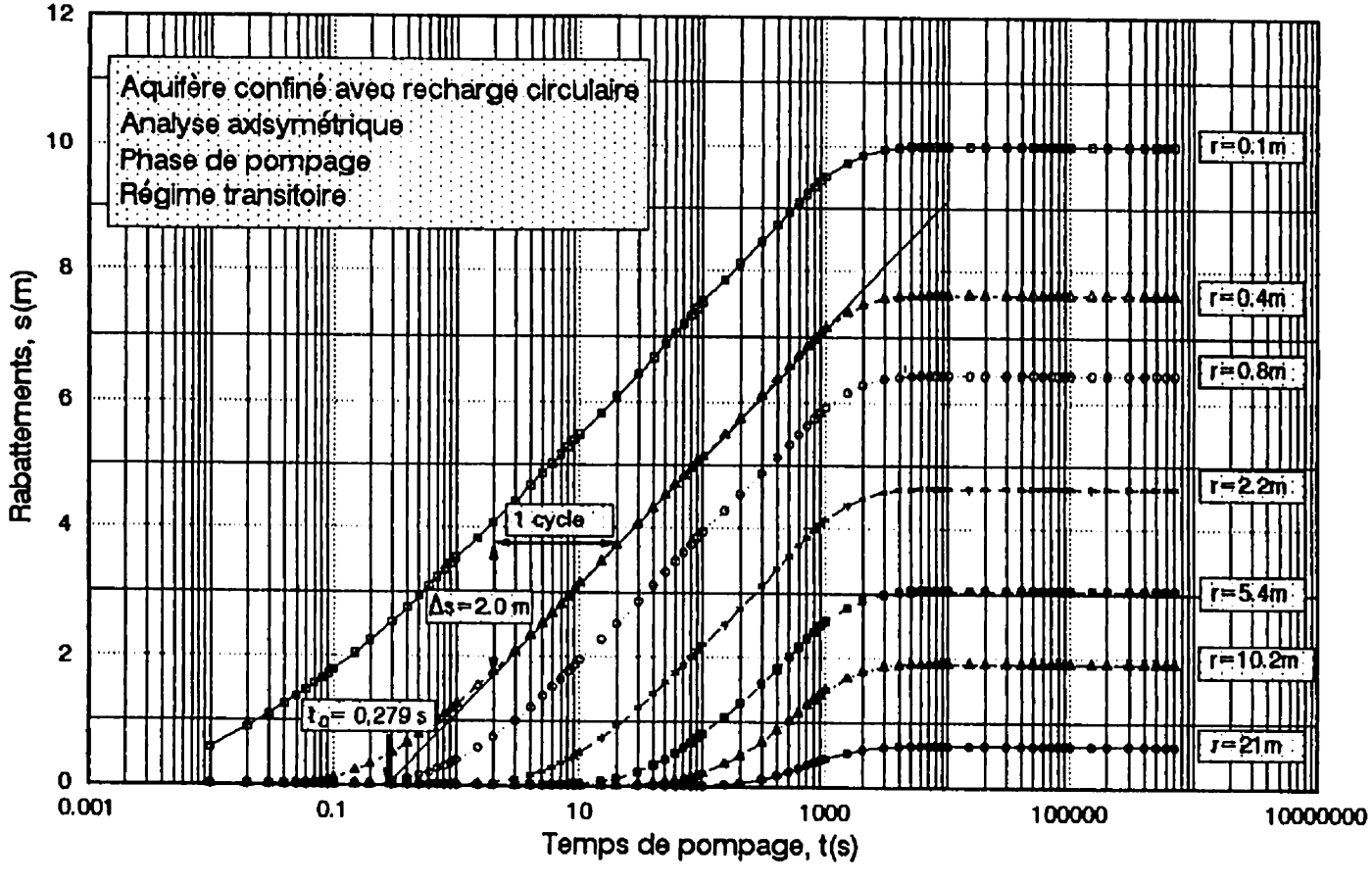


Figure 5.18: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des rabattements en fonction du temps pour différents piézomètres, s(r, t) vs logt.

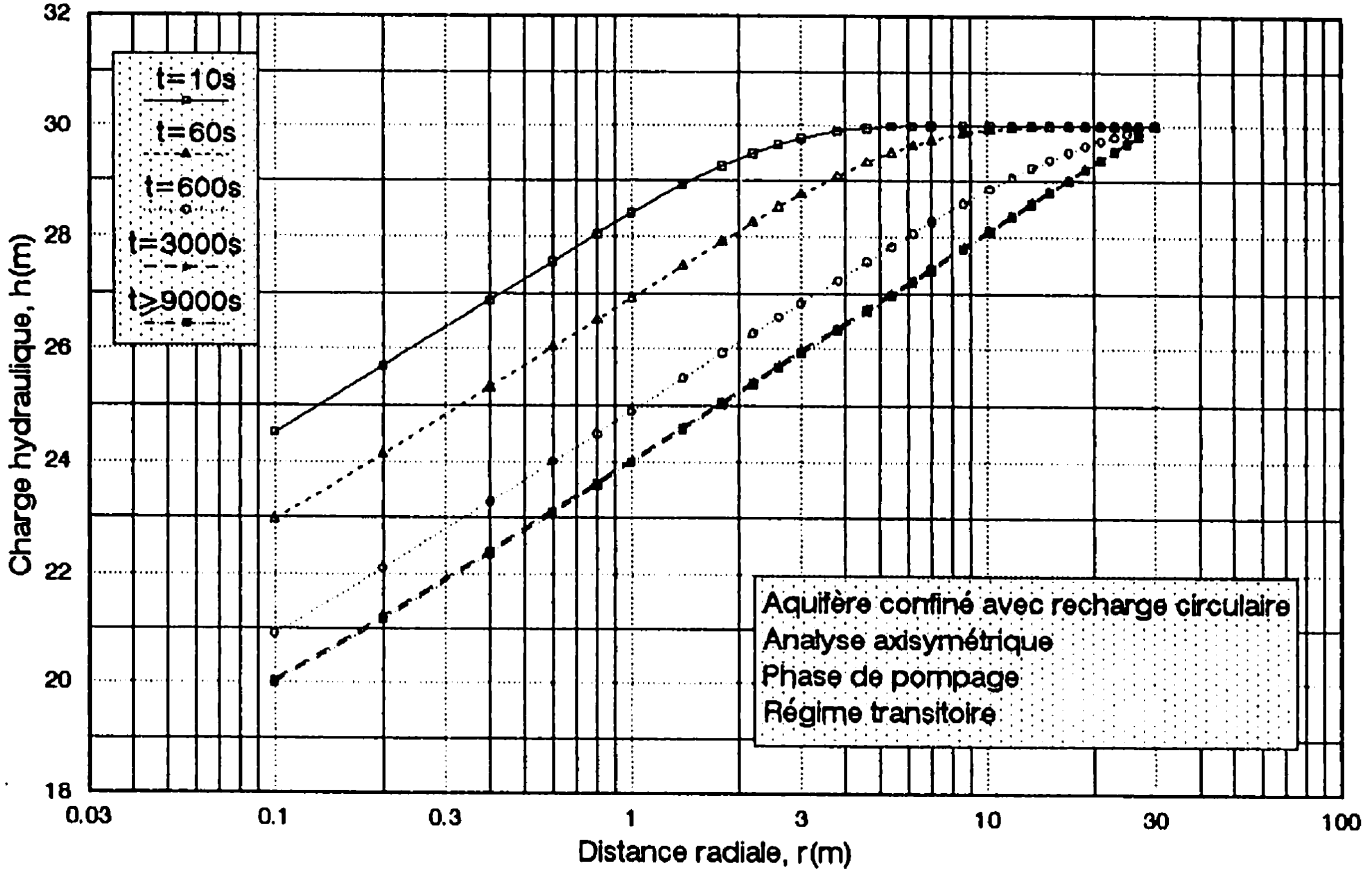


Figure 5.19: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob de la charge en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, h(r, t) vs logr.

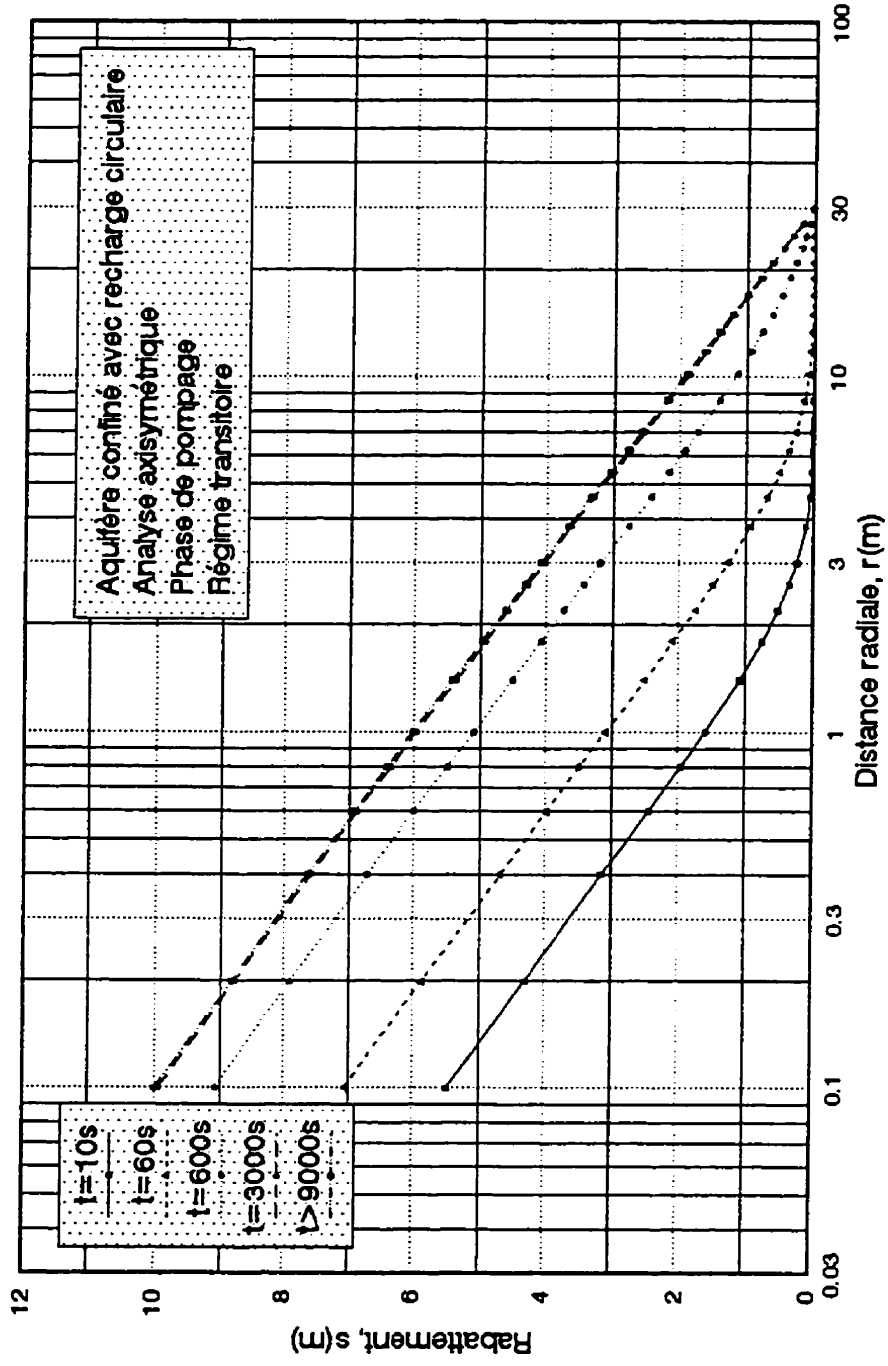


Figure 5.20: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob des rabattements en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, s(r, t) vs logr.

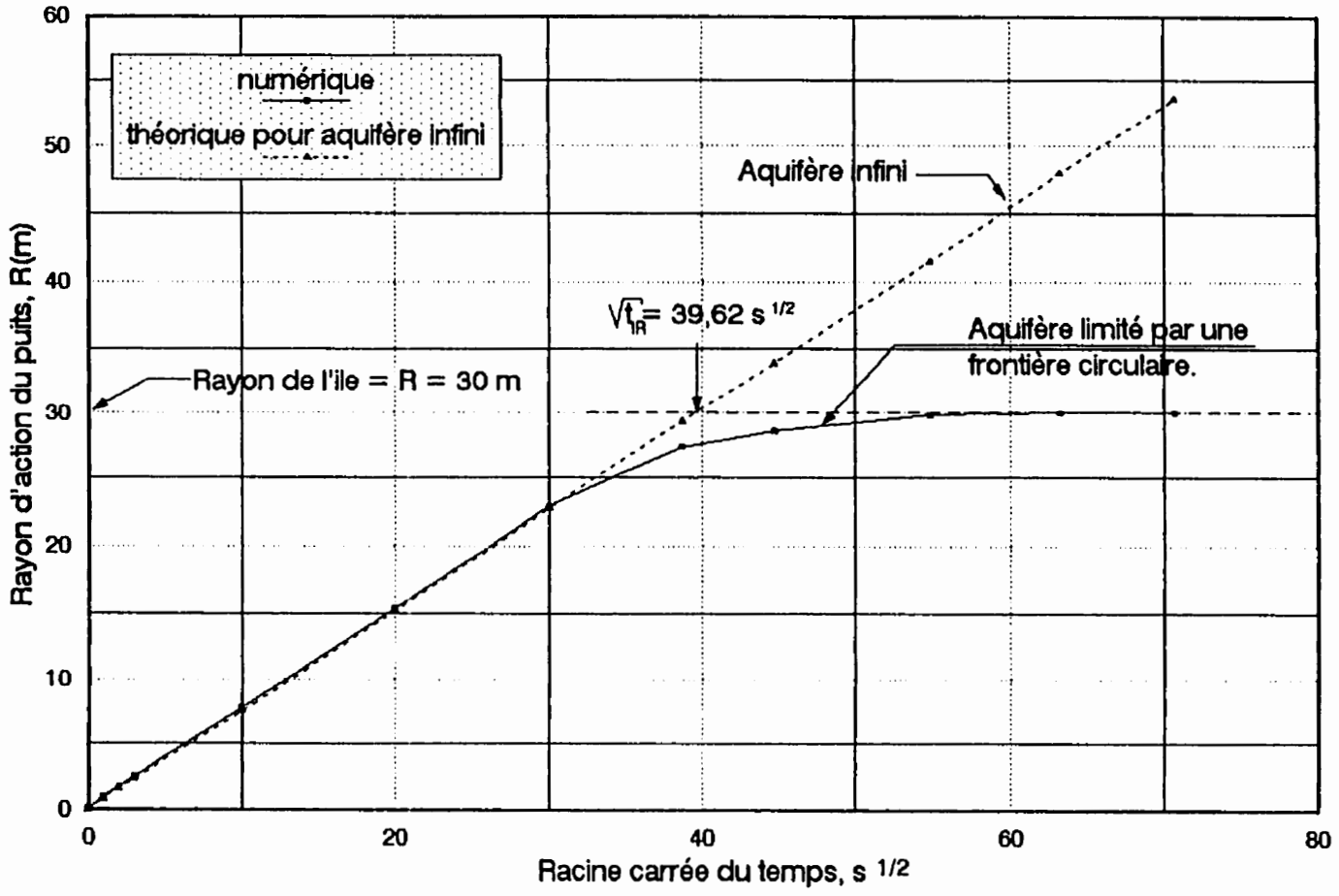


Figure 5.21: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation du rayon d'action du puits en fonction de la racine carrée du temps et sa comparaison avec la solution théorique comme si l'aquifère était infini.

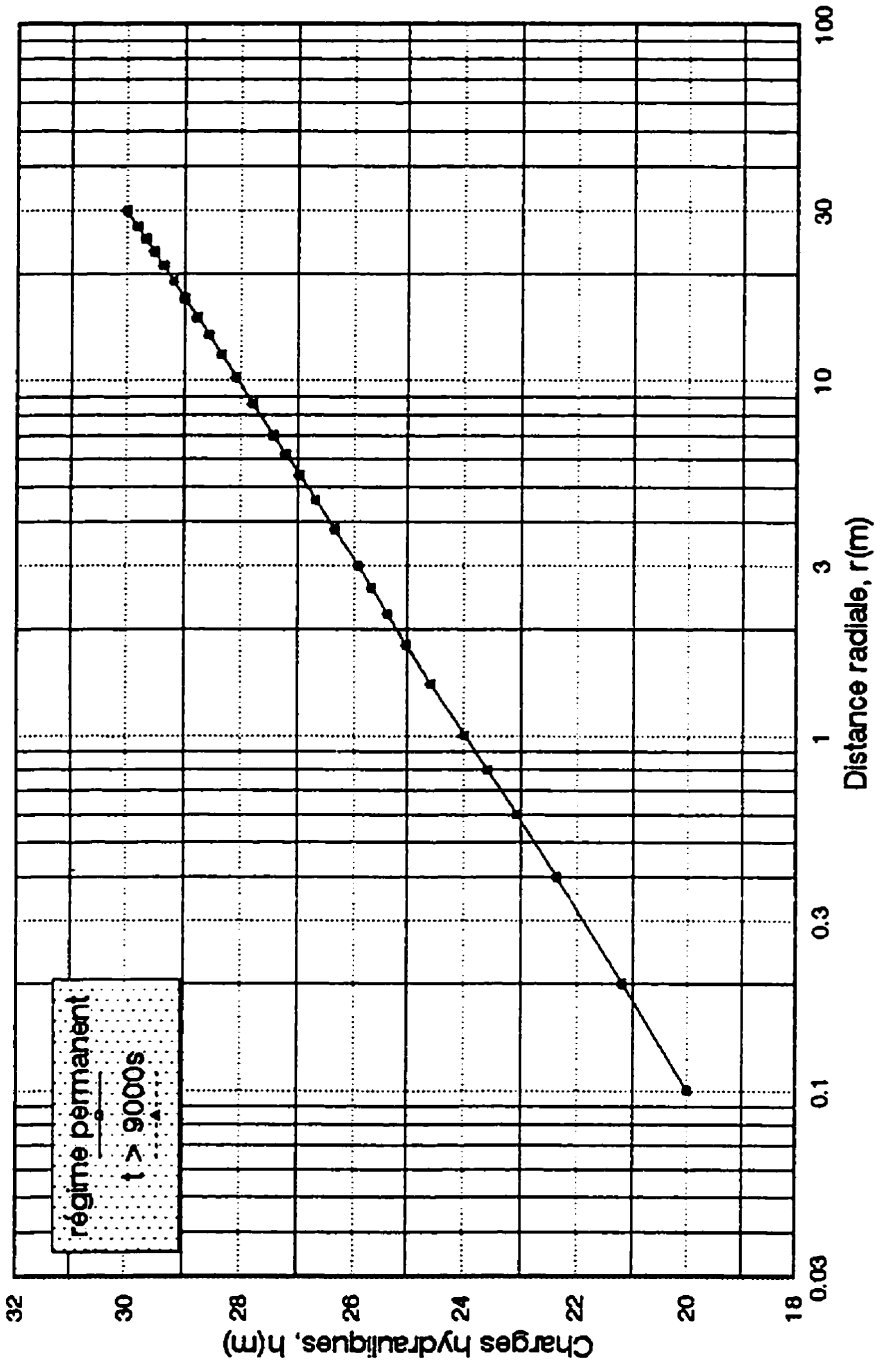


Figure 5.22: Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme de la charge hydraulique en fonction de la distance radiale.

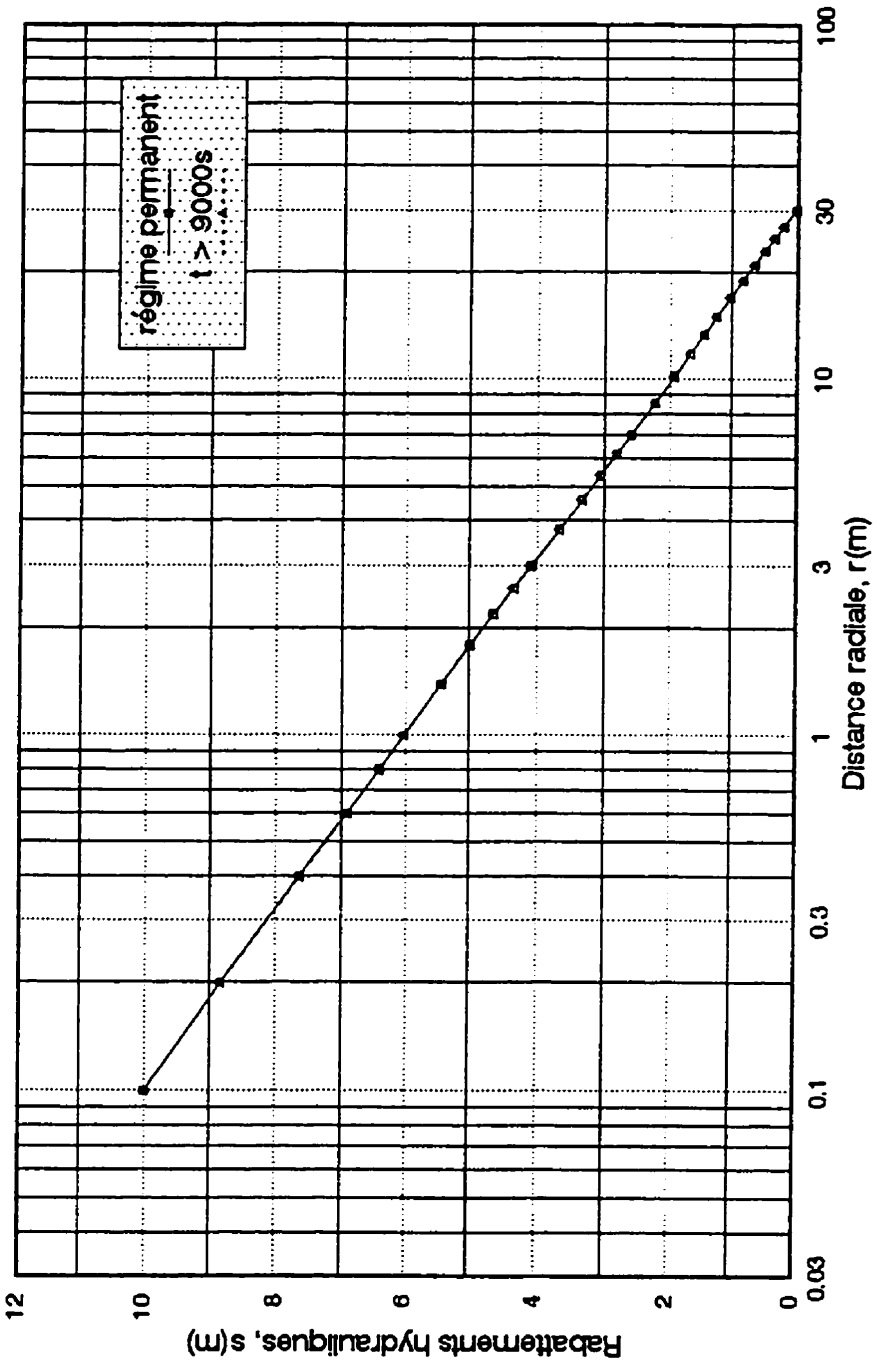


Figure 5.23: Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme du rabattement en fonction de la distance radiale.

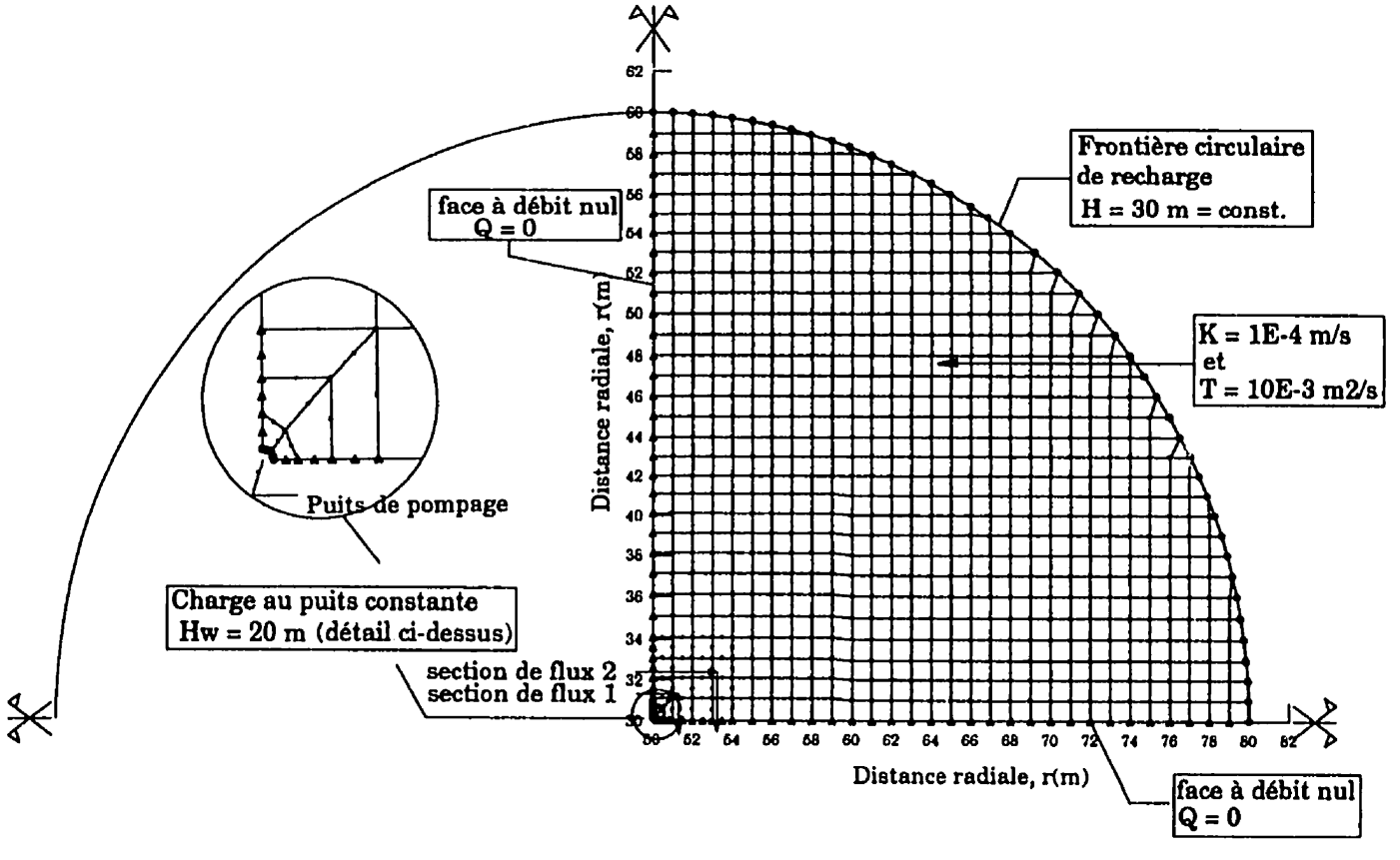


Figure 5.24: Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés.

MODELE PLAN DE 727 ÉLÉMENTS A 826 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT

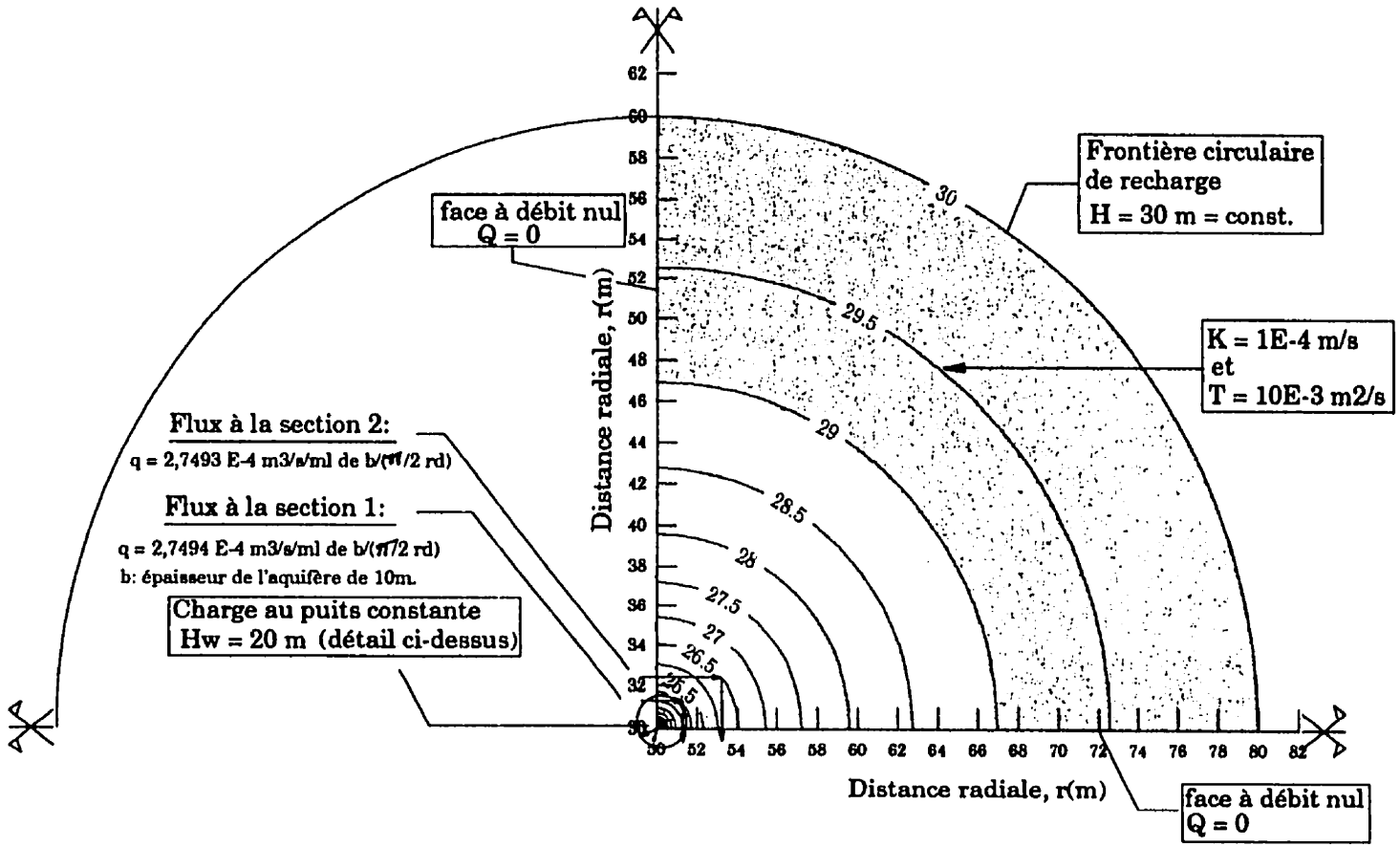


Figure 5.25: Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Valeur du débit et distribution des équipotentielles.

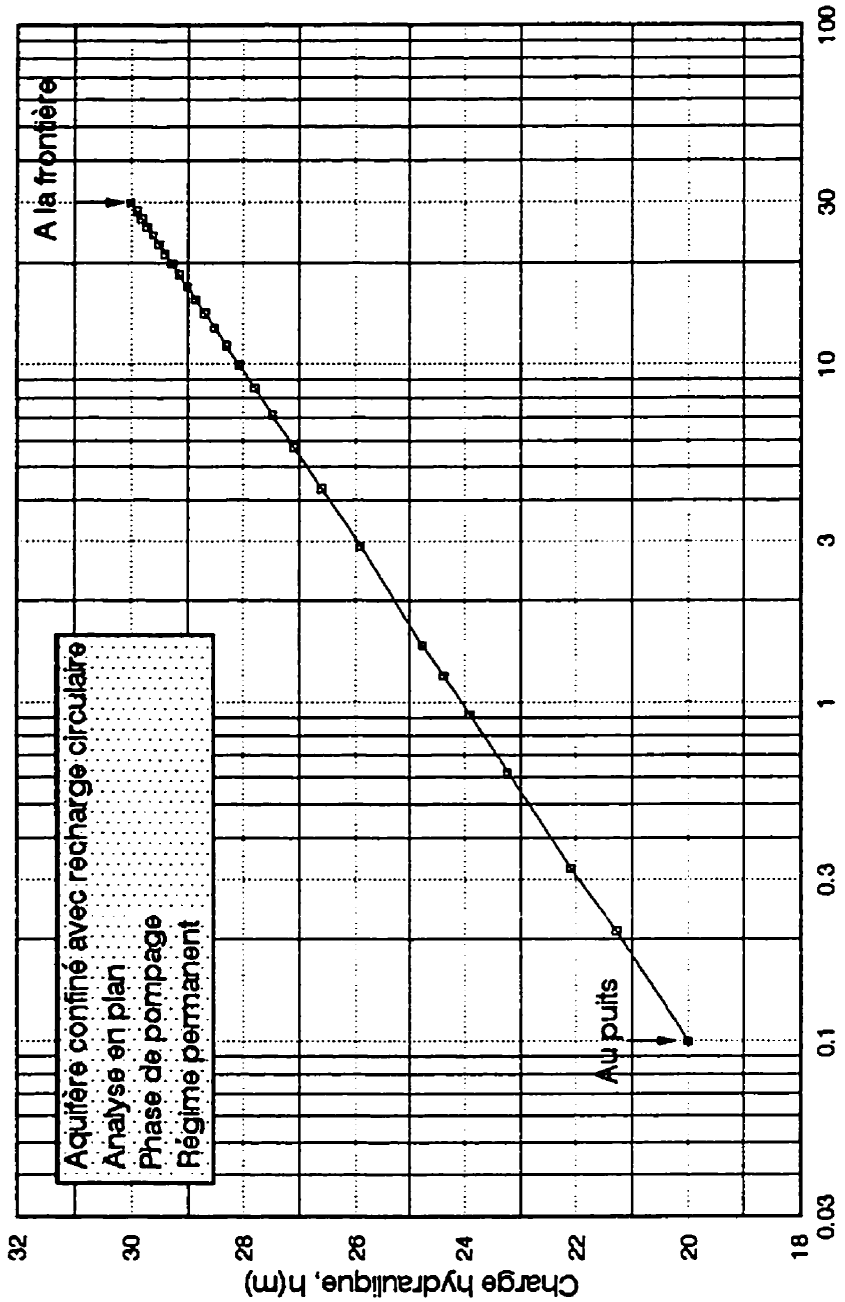


Figure 5.26: Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs logr.

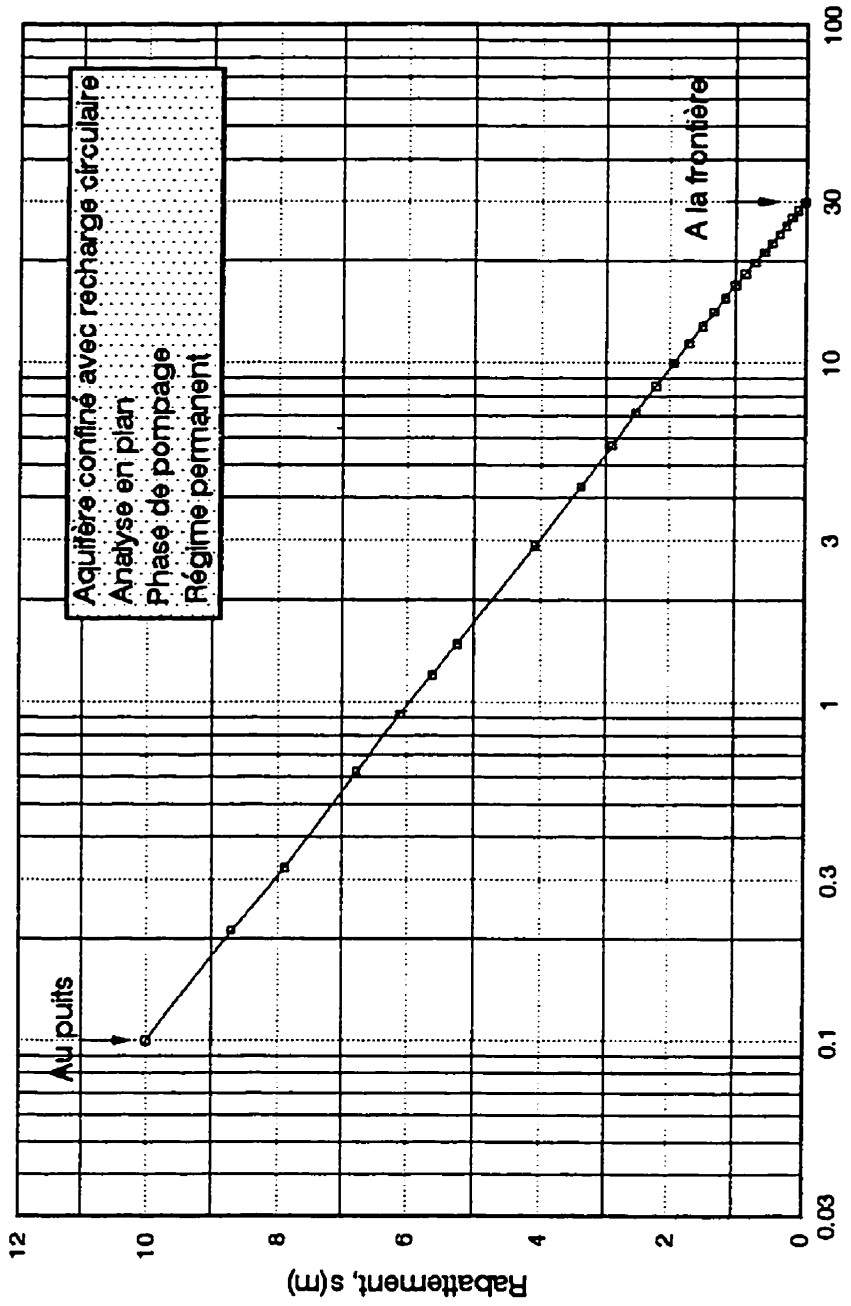


Figure 5.27: Analyse en plan en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Variation du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs logr.

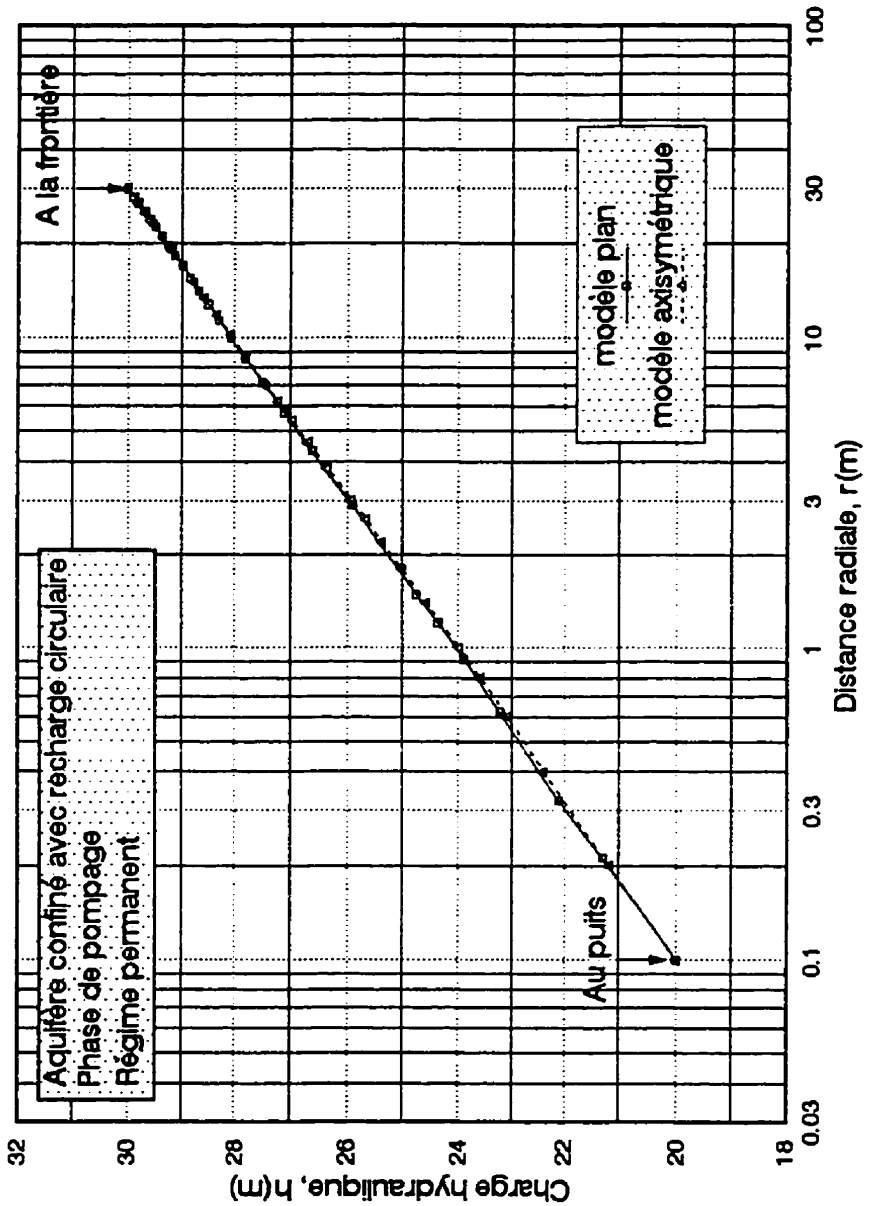


Figure 5.28: Analyse en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison de la charge hydraulique en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs logr, obtenue selon l'analyse axisymétrique et l'analyse en plan.

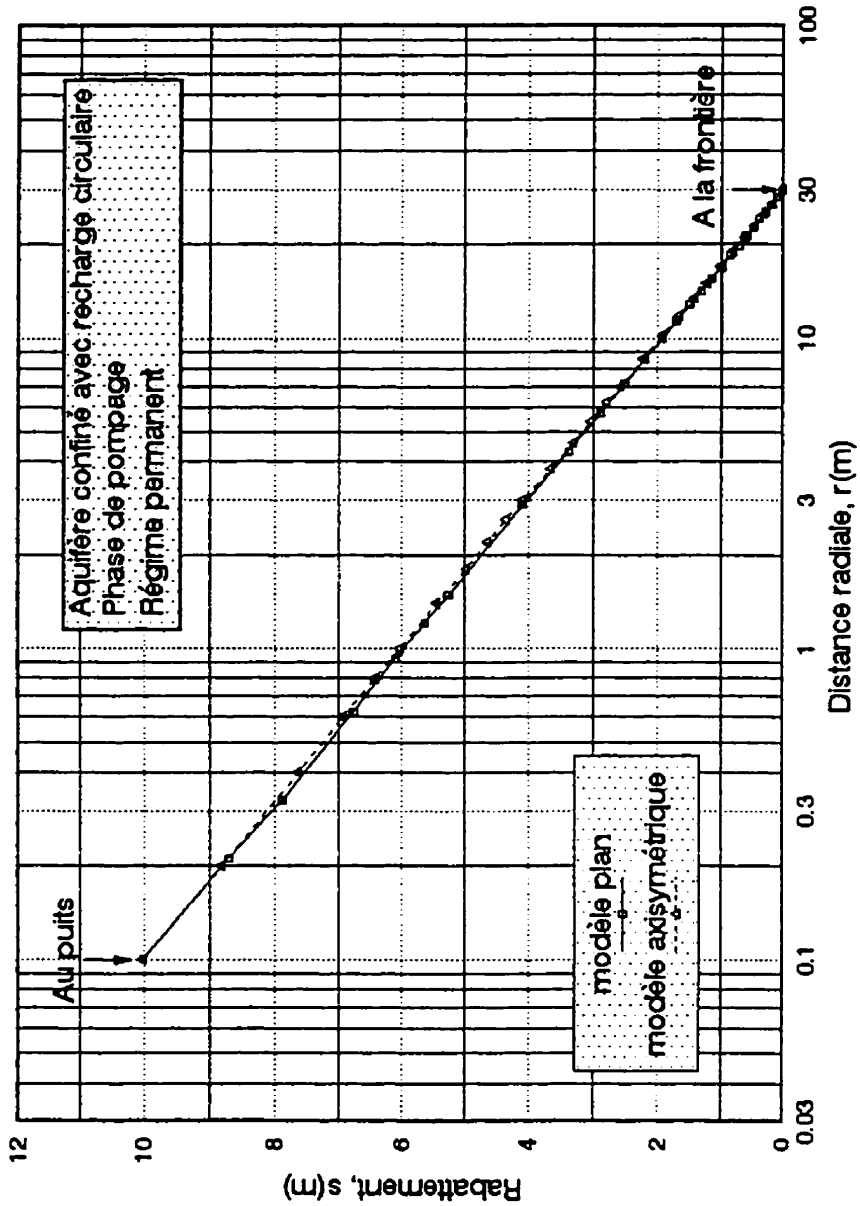


Figure 5.29: Analyse en régime permanent de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs logr, obtenue selon l'analyse axisymétrique et l'analyse en plan.

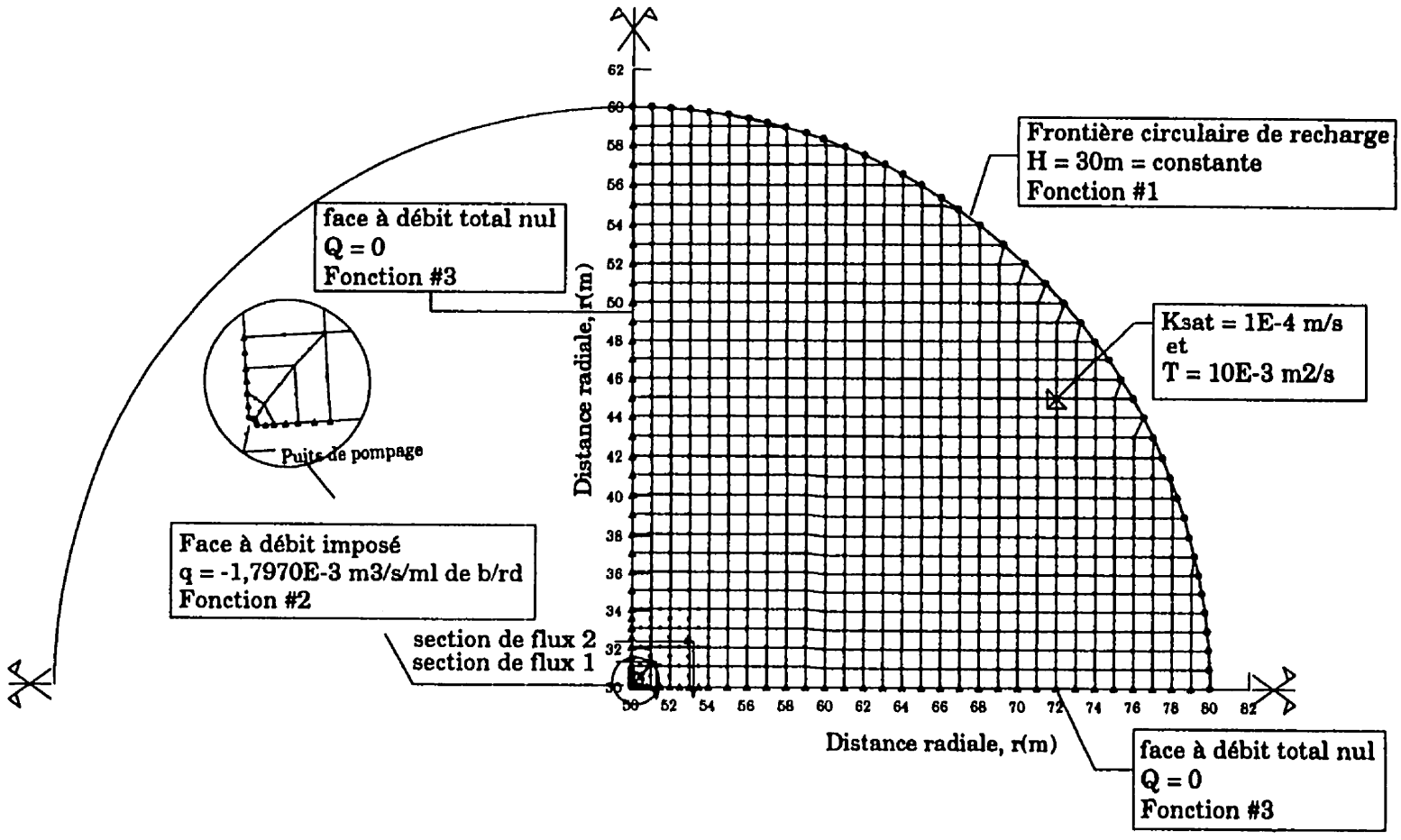


Figure 5.30: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés.

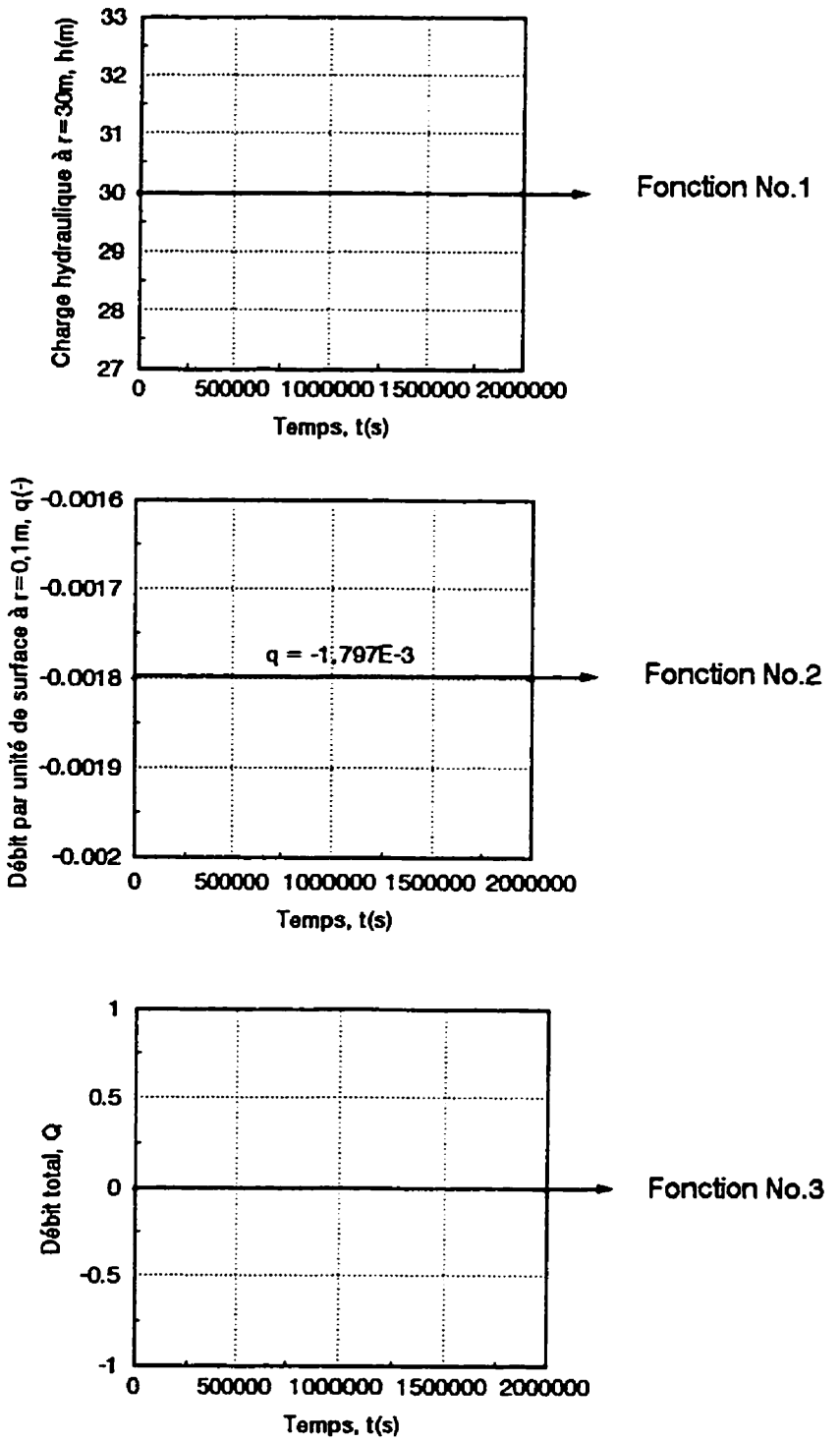


Figure 5.31 : Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées.

MODELE PLAN DE 727 ÉLÉMENTS A 826 NOEUDS AU TOTAL
ANALYSE EN RÉGIME PERMANENT - CONDITIONS INITIALES

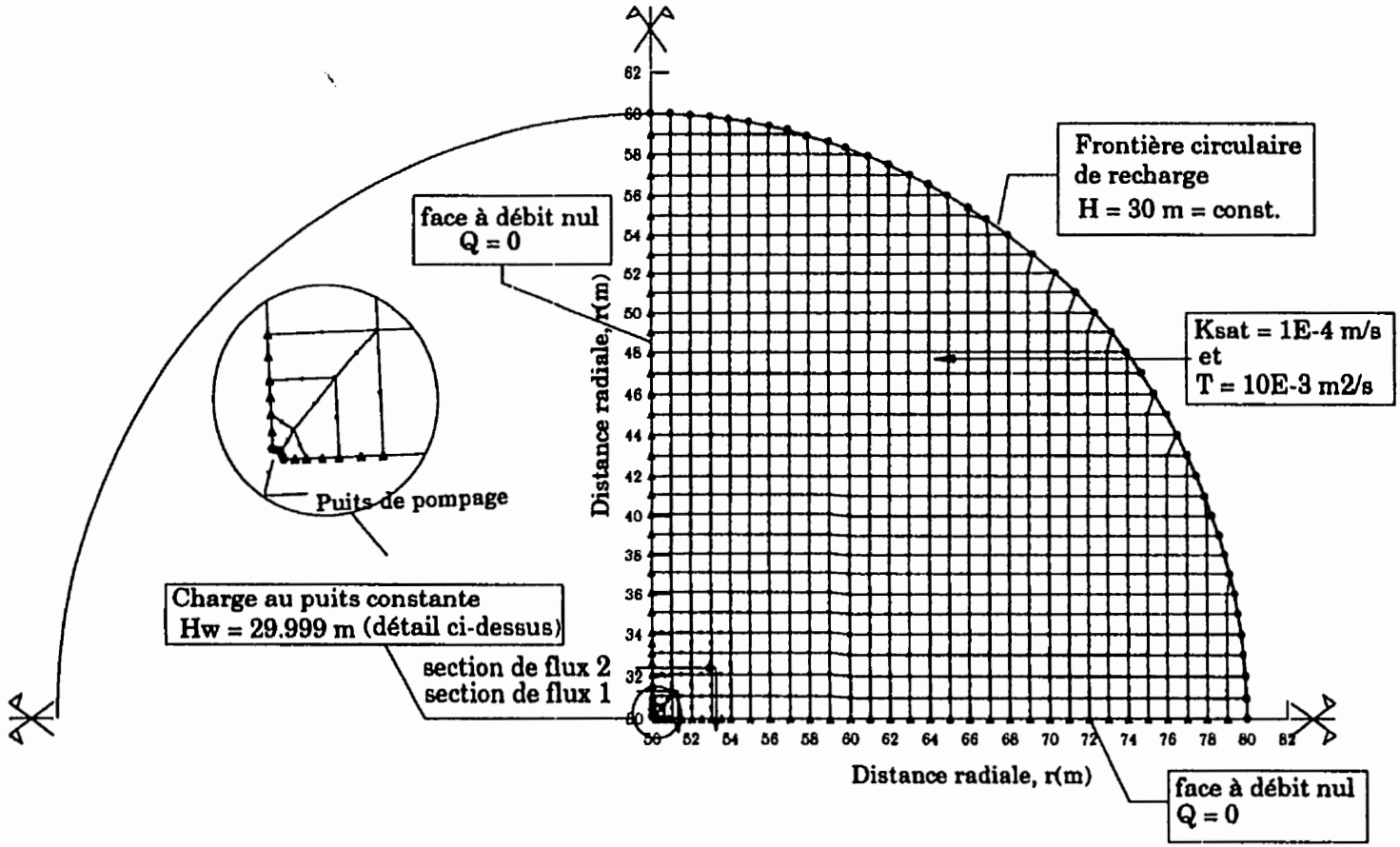


Figure 5.32: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites utilisés comme conditions initiales.

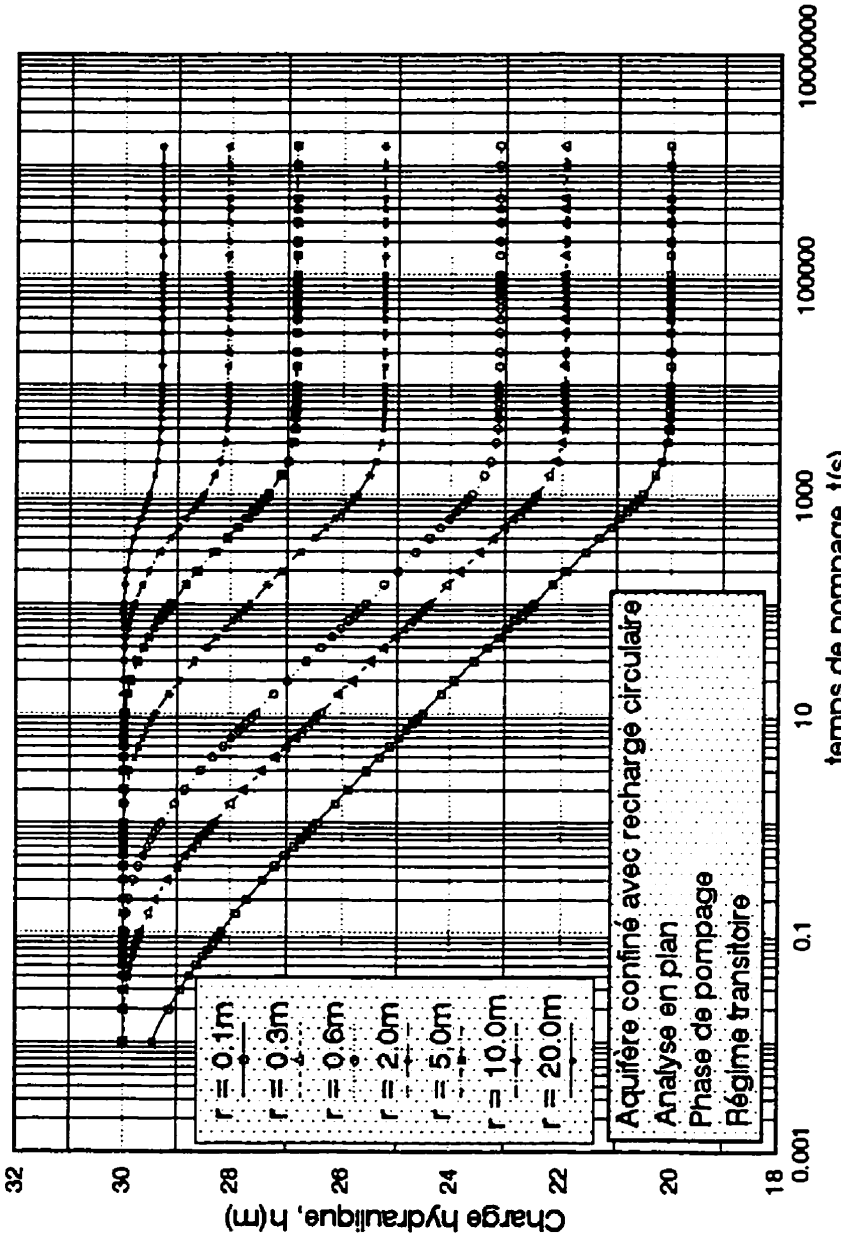


Figure 5.33: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob de la charge hydraulique en fonction du temps pour différents piézomètres, h(r, t) vs logt.

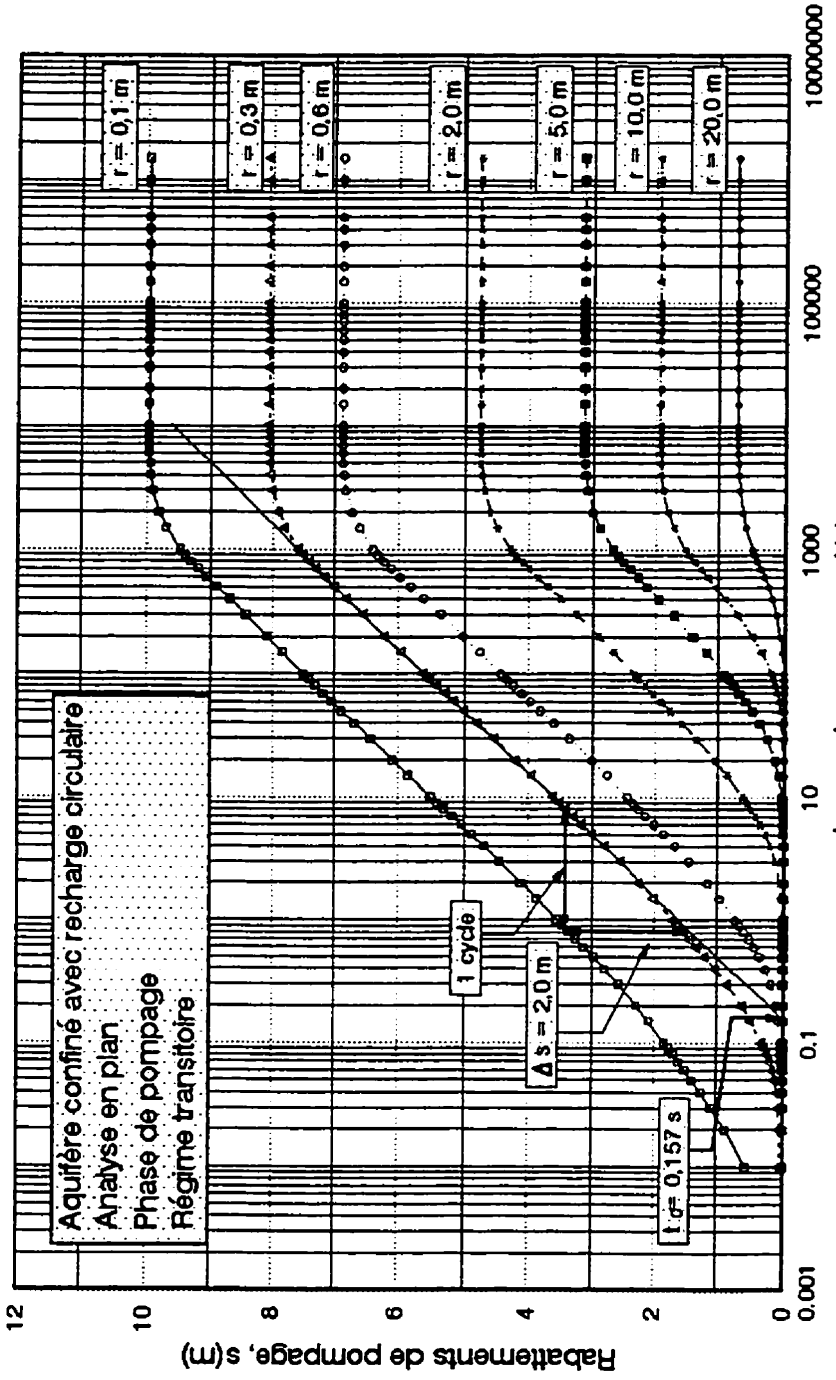


Figure 5.34: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob du rabattement en fonction du temps pour différents piézomètres, s(r, t) vs logt.

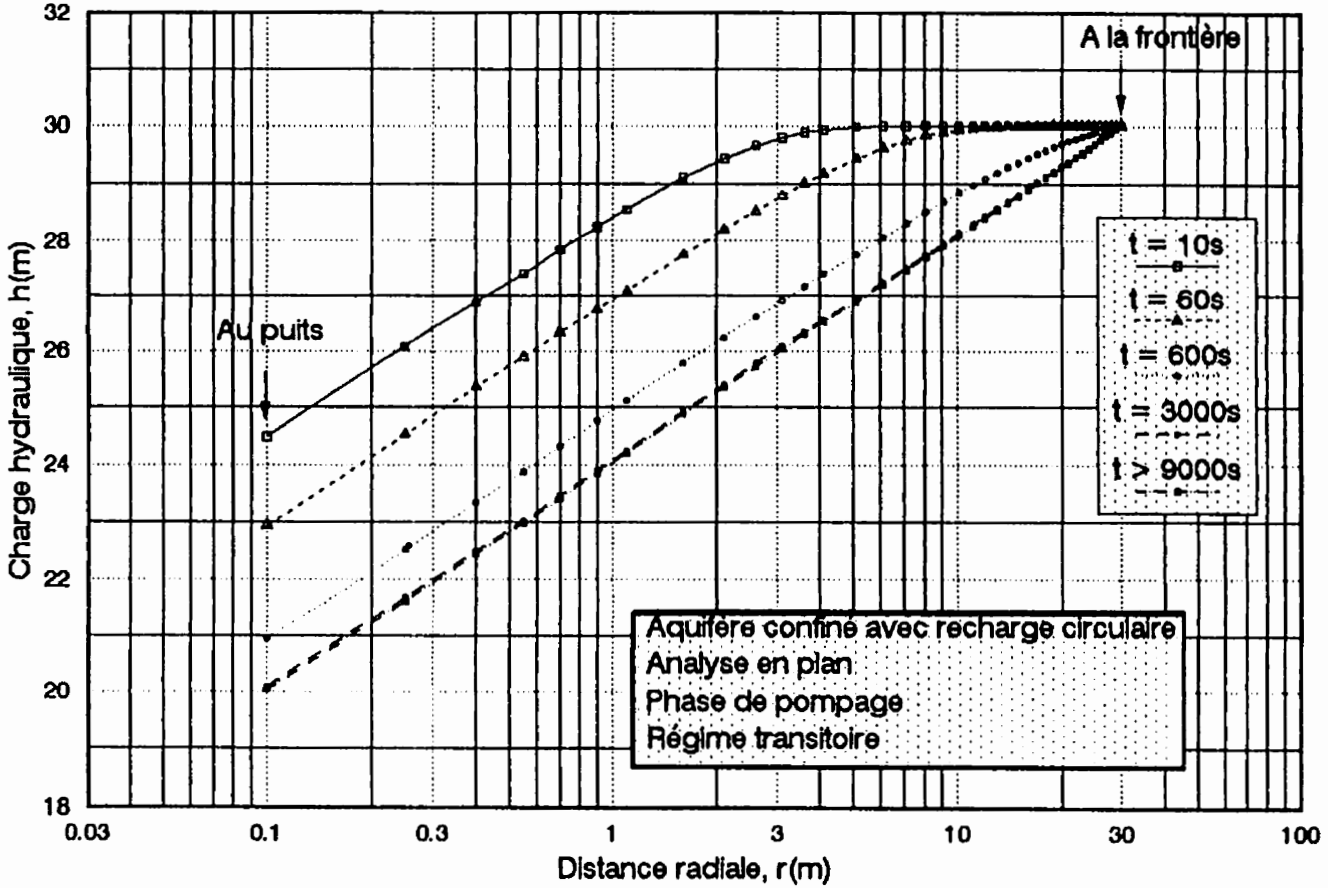


Figure 5.35: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob de la charge hydraulique en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, h(r, t) vs logr.

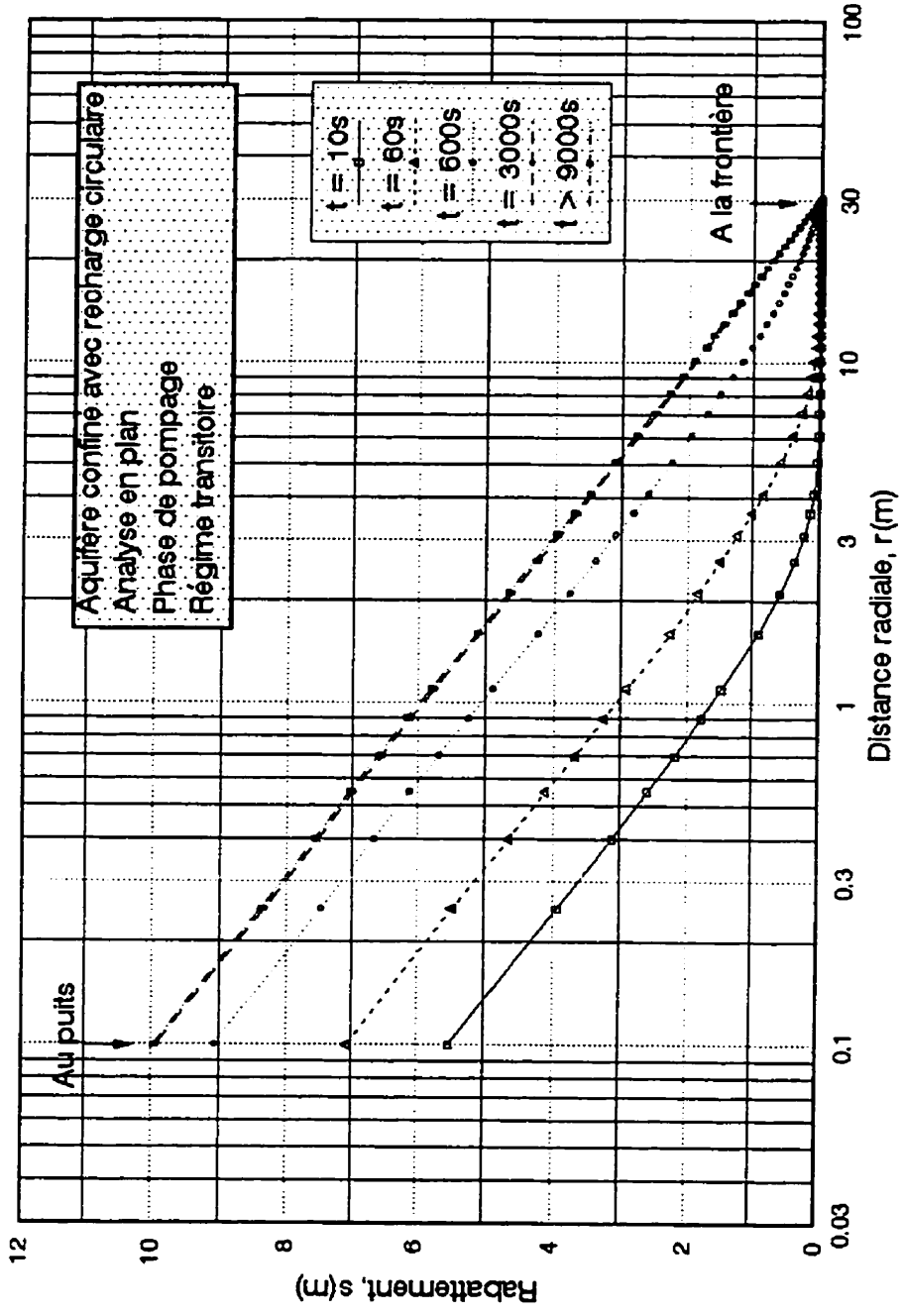


Figure 5.36: Analyse en plan en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation de Cooper-Jacob du rabattement en fonction de la distance radiale à l'axe du puits pour différents temps, s(r, t) vs logr.

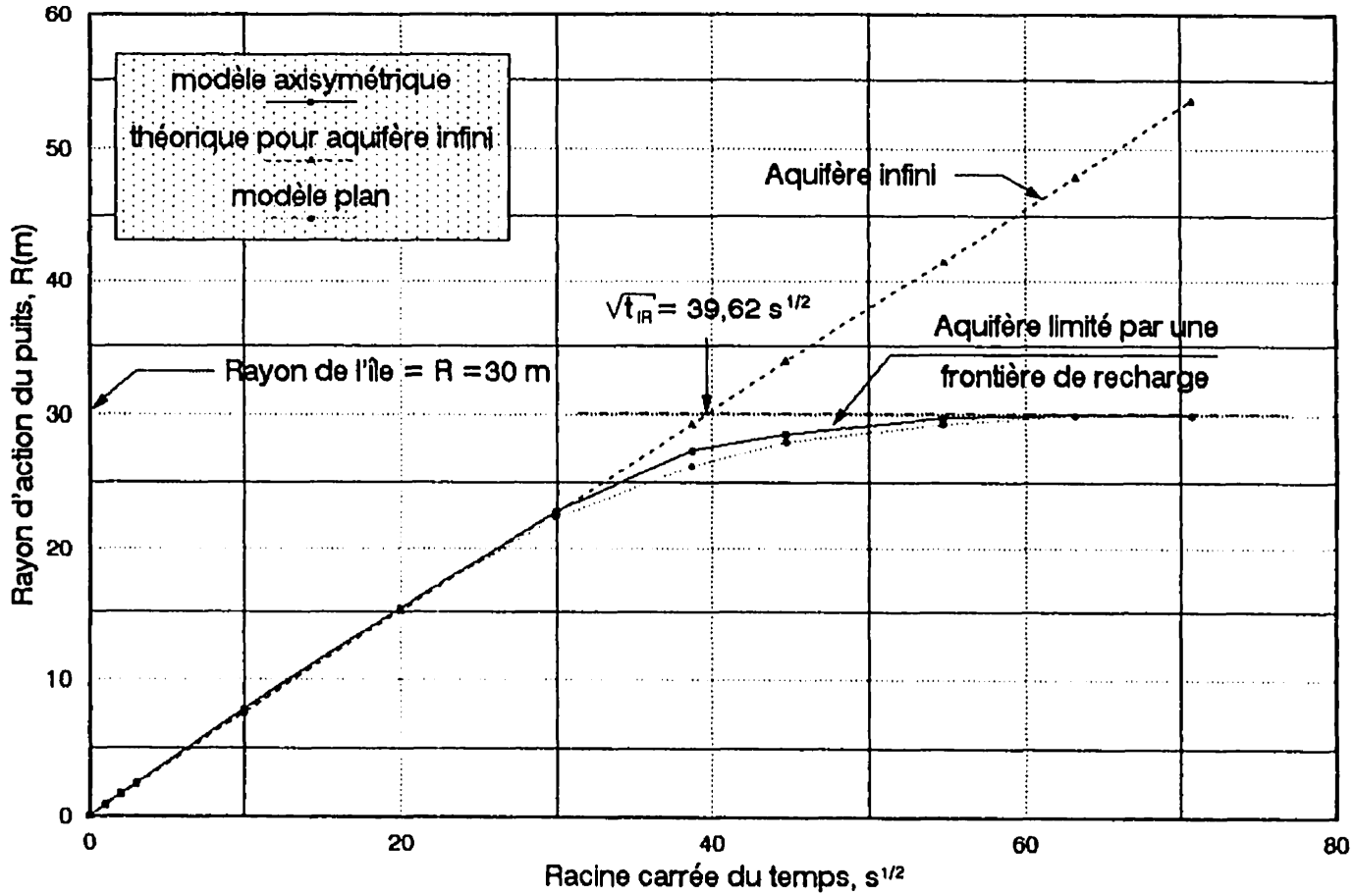


Figure 5.37: Analyse axisymétrique en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Représentation du rayon d'action du puits en fonction de la racine carrée du temps et sa comparaison avec la solution théorique comme si l'aquifère était infini et avec la solution par le modèle axisymétrique.

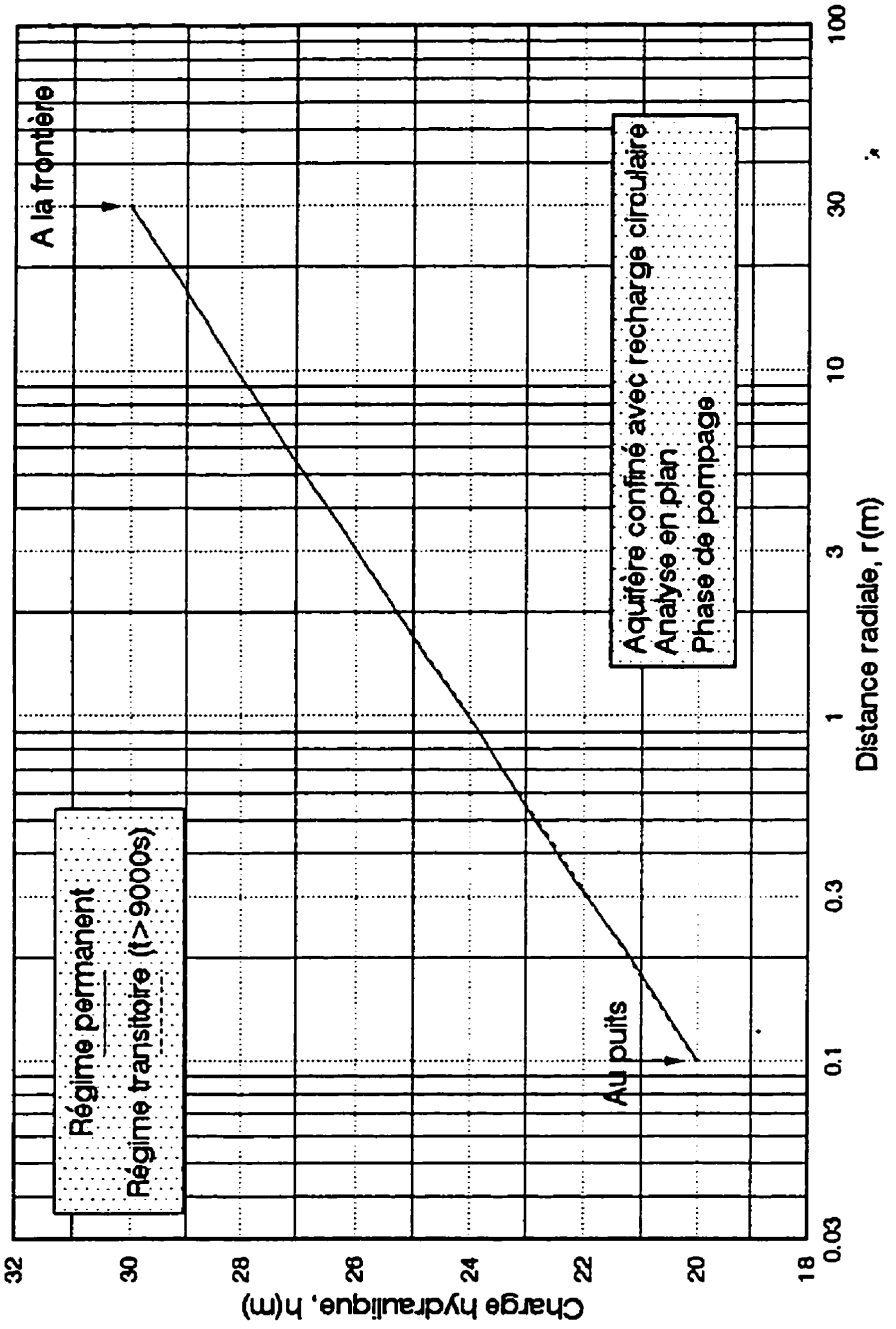


Figure 5.38: Analyse en plan de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme de la charge en fonction de la distance radiale.

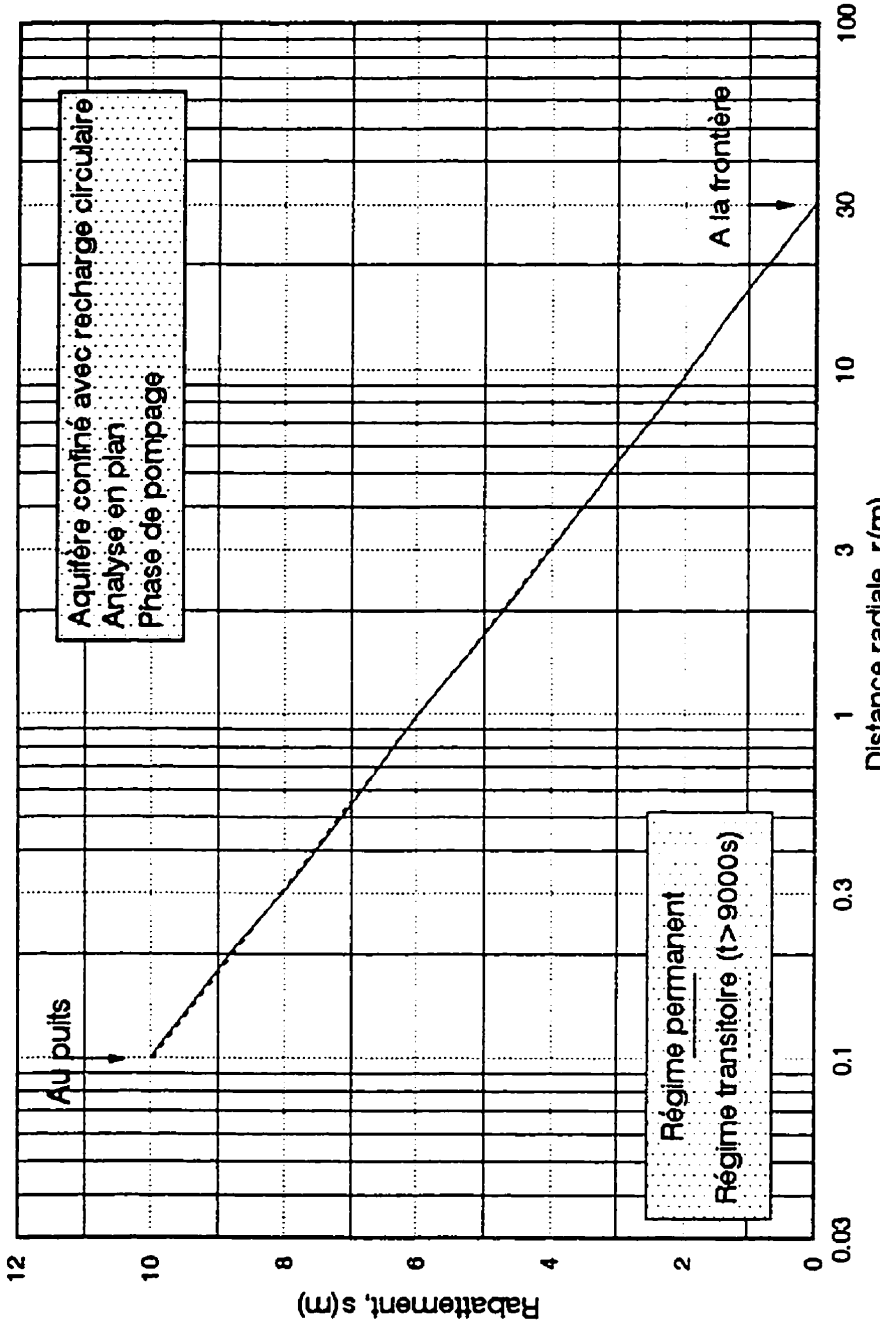


Figure 5.39: Analyse en plan de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Illustration de la convergence parfaite de la solution en régime transitoire vers la solution en régime permanent en terme du rabattement en fonction de la distance radiale.

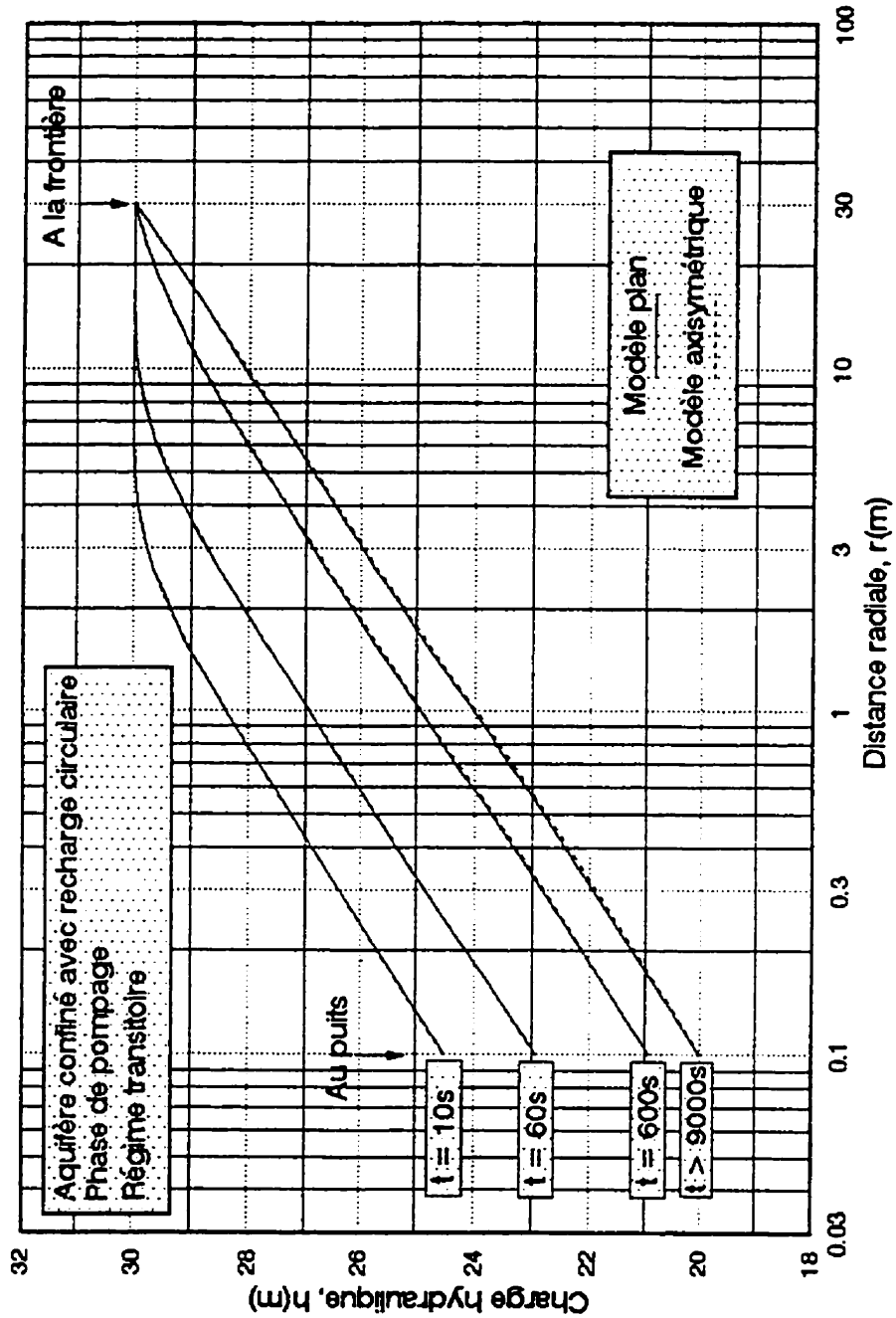


Figure 5.40: Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison de la charge en fonction de la distance à l'axe du puits, h(r) vs logr, obtenue selon l'analyse axisymétrique et l'analyse en plan.

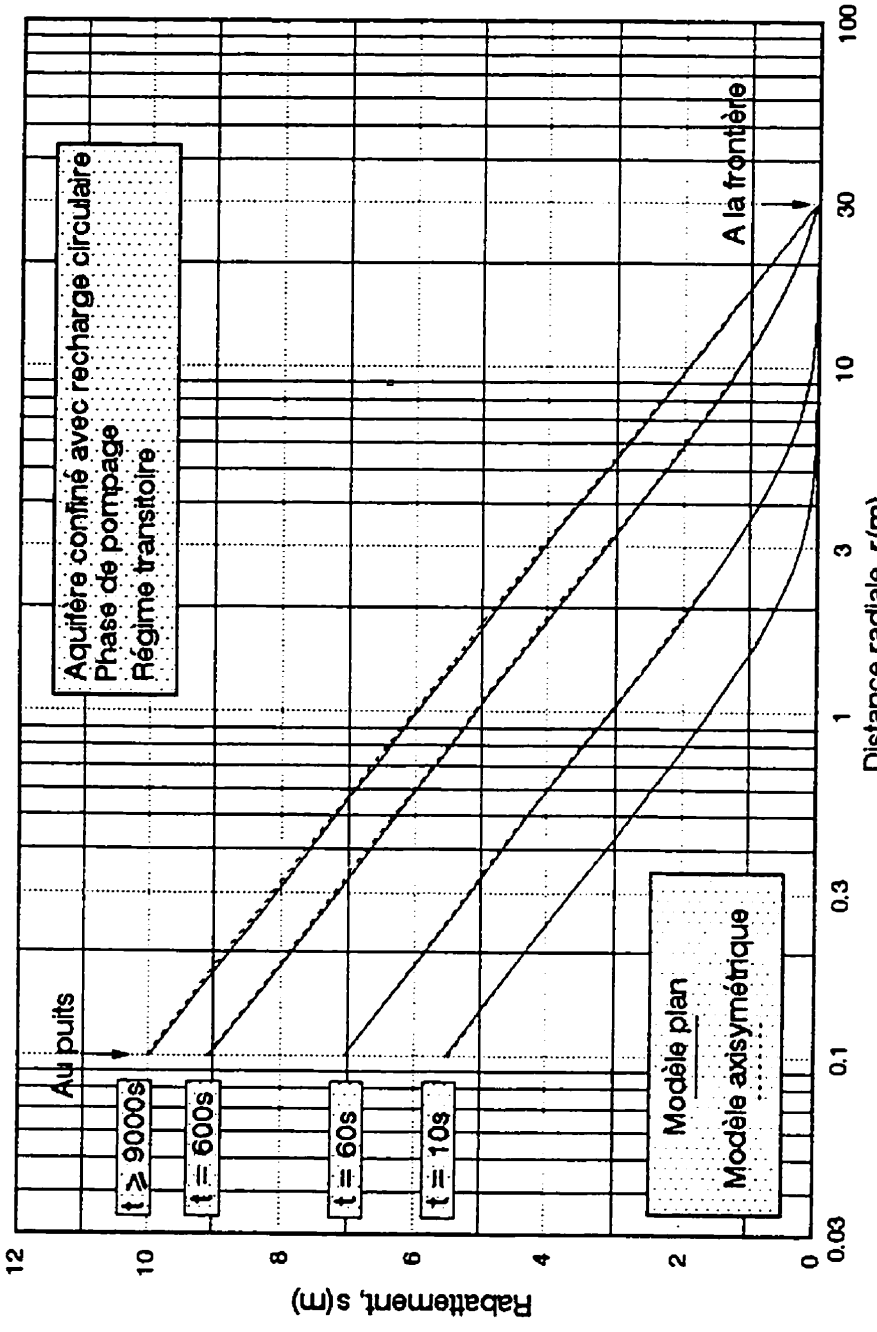


Figure 5.41: Analyse en régime transitoire de la phase de pompage d'un essai d'aquifère dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison du rabattement en fonction de la distance à l'axe du puits, s(r) vs logr, obtenue selon l'analyse axisymétrique et l'analyse en plan.

MODELE AXISYMETRIQUE DE 270 ÉLÉMENTS A 308 NOEUDS AU TOTAL

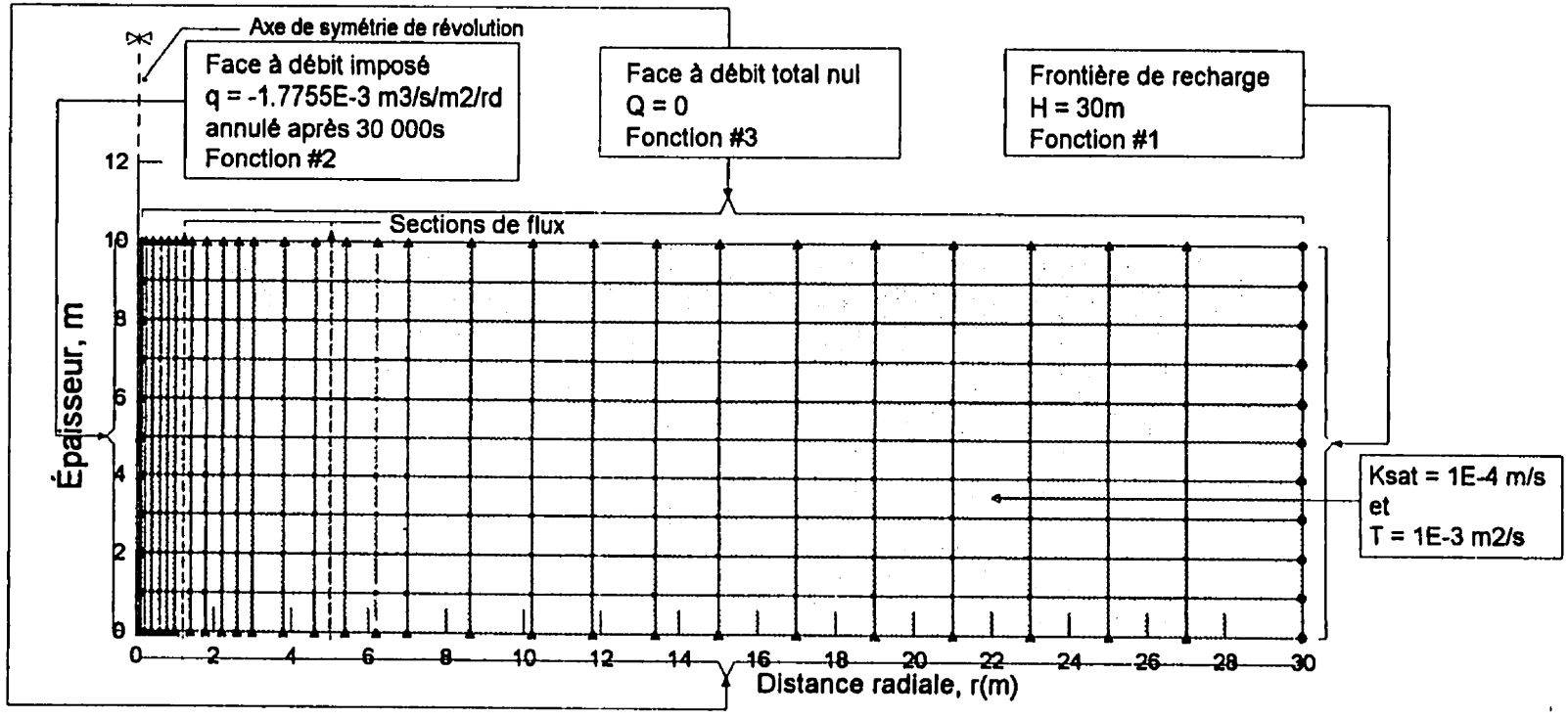


Figure 5.42 : Analyse axisymétrique de la phase de remontée , selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites.

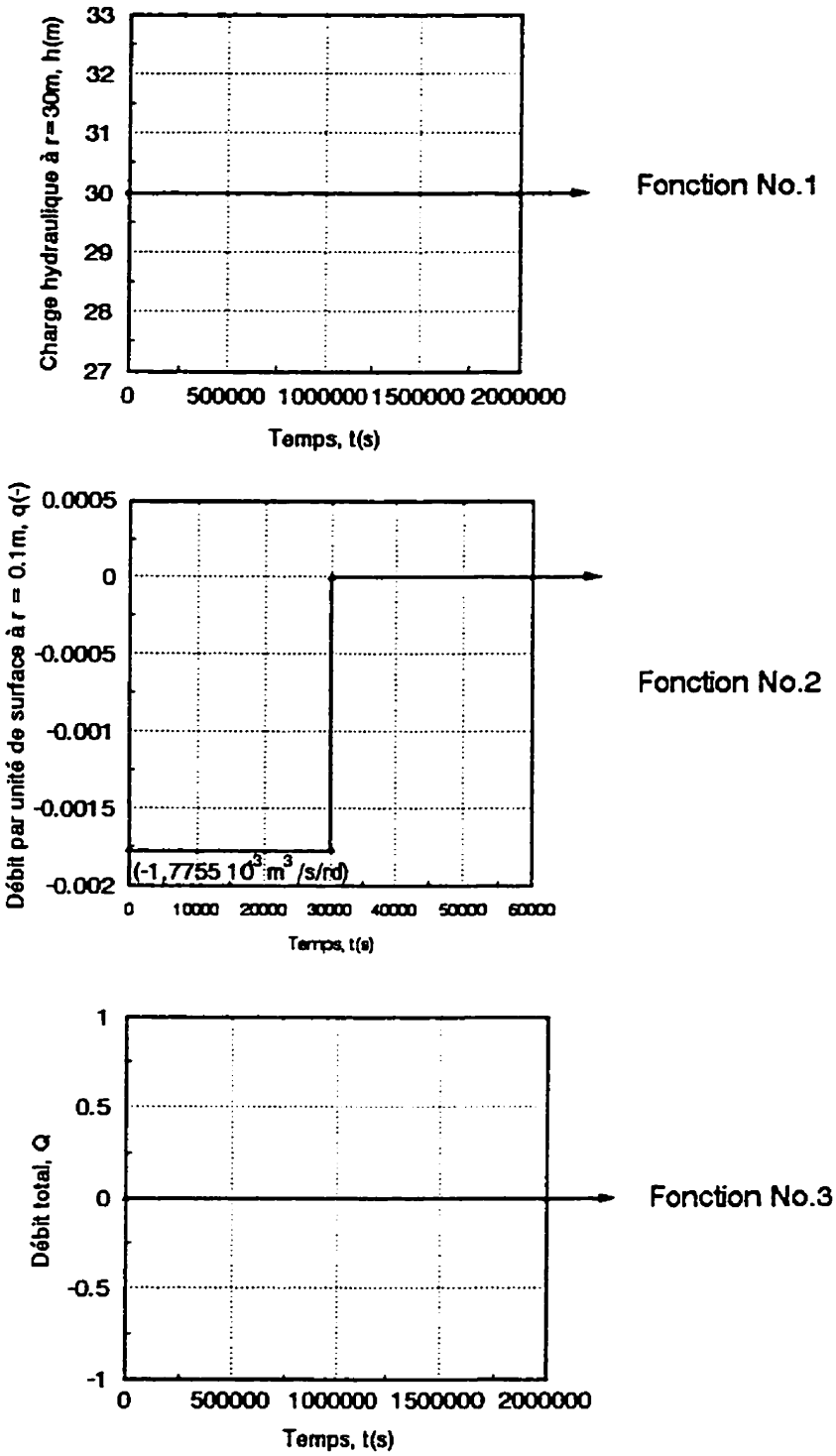


Figure 5.43: Analyse, selon le schéma direct, de la phase de remontée après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées.

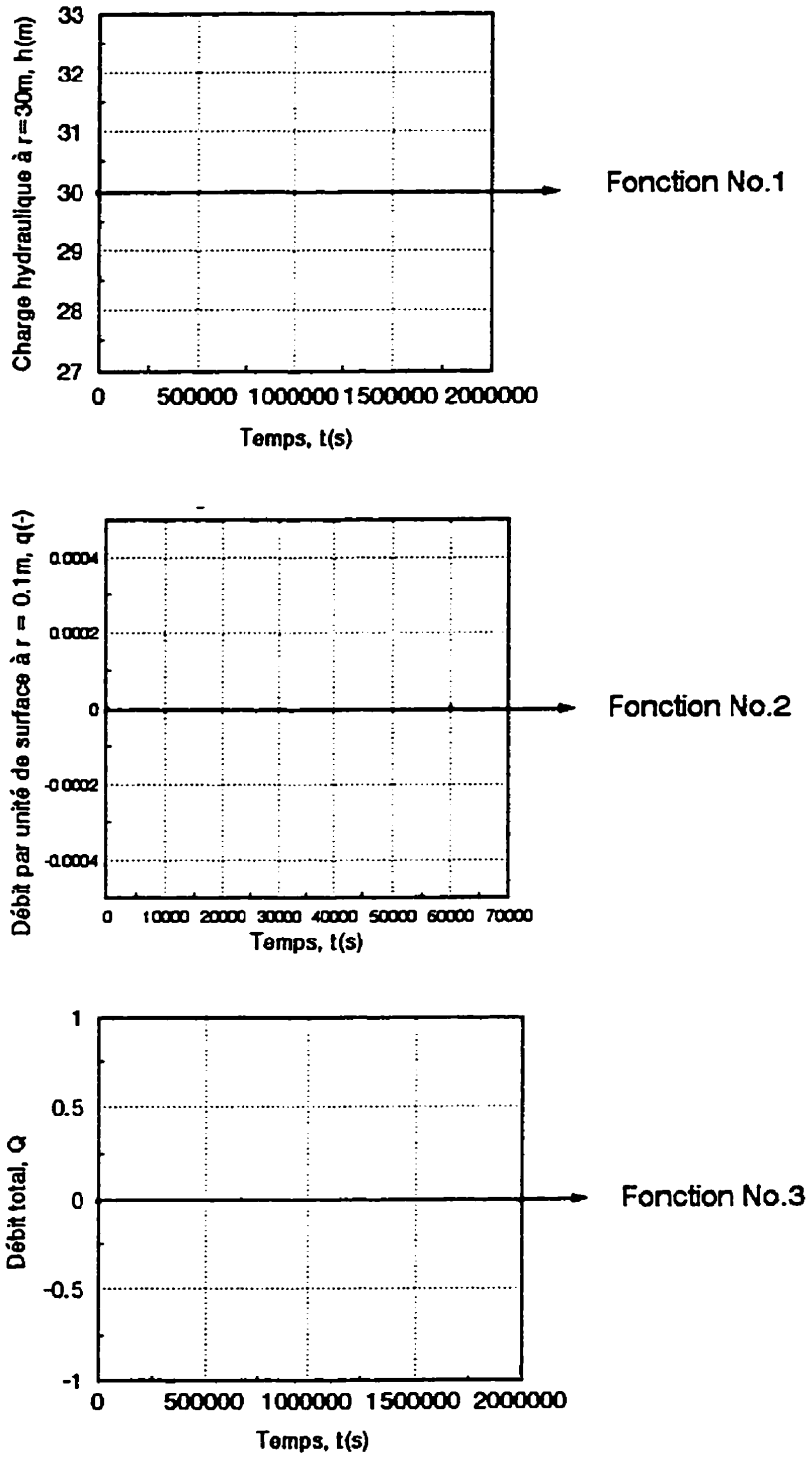


Figure 5.44: Analyse, selon le schéma indirect, de la phase de remontée après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Les fonctions de conditions aux limites utilisées.

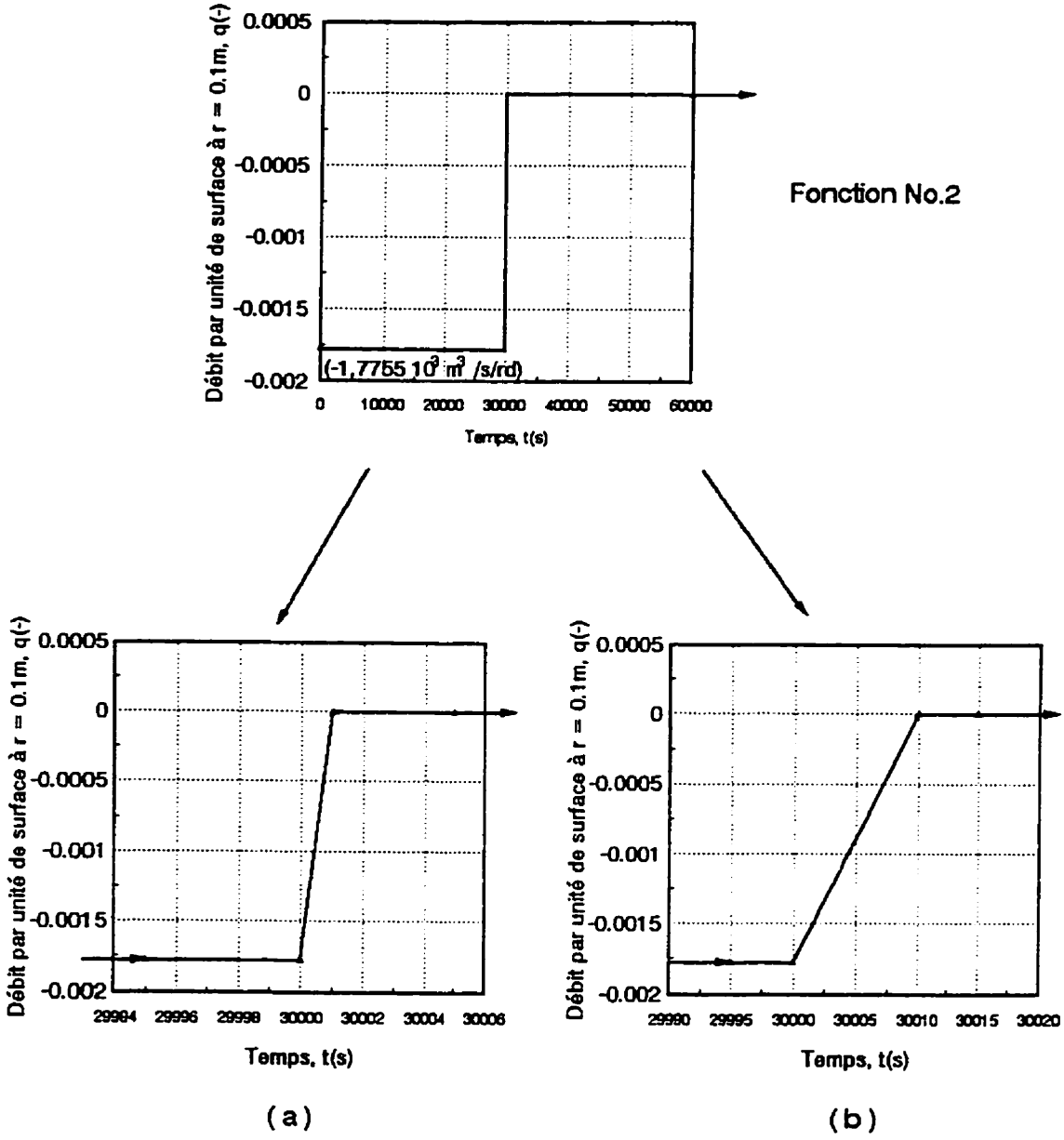


Figure 5.45: Analyse, selon le schéma direct, de la phase de remontée après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire.

(a) arrêt de la pompe en 1 seconde
(b) arrêt de la pompe en 10 secondes

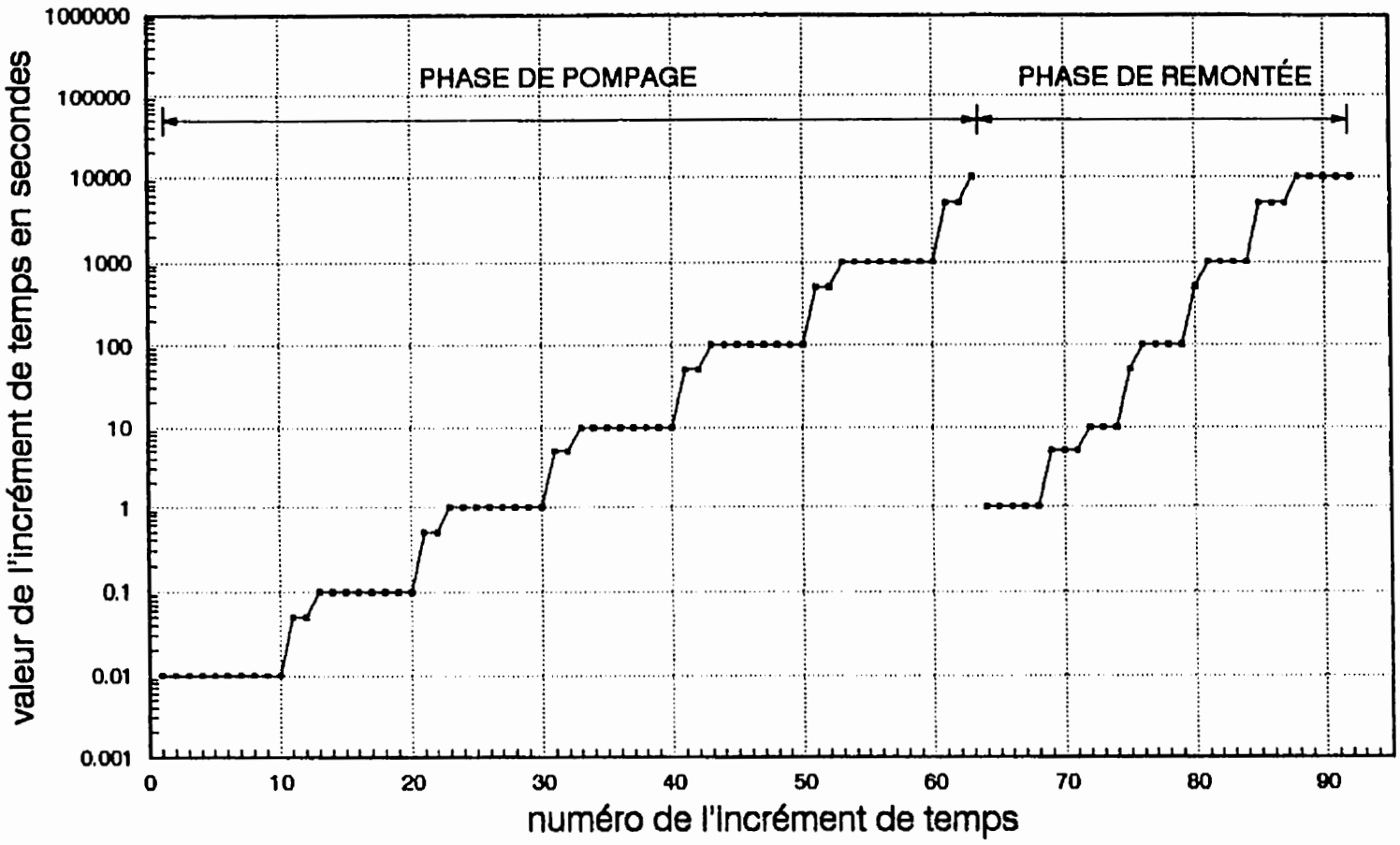


Figure 5.46: Analyse de la phase de remontée selon le schéma direct, après 30000s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire.
Discrétisation du temps utilisée.

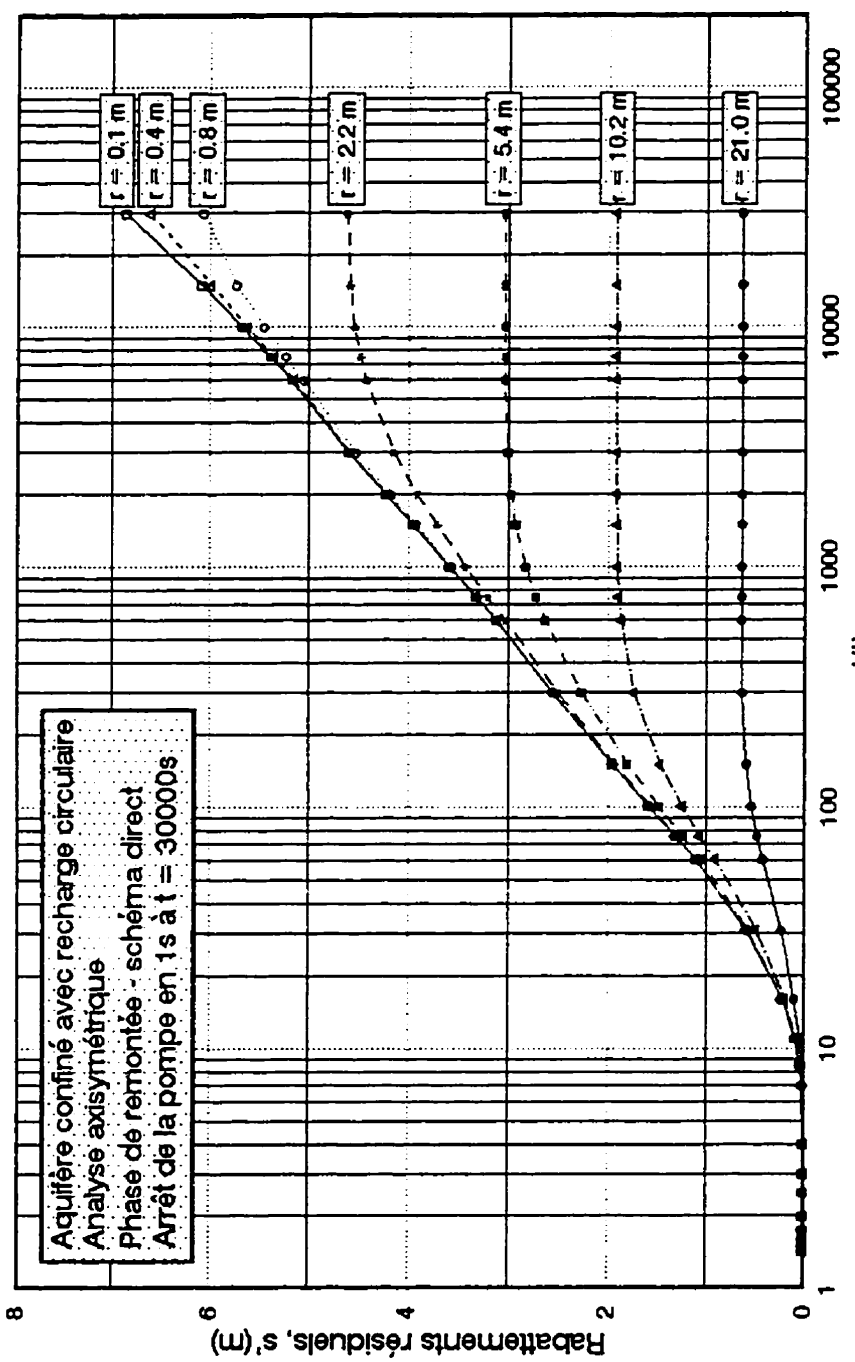


Figure 5.47: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 1 seconde. Représentation du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

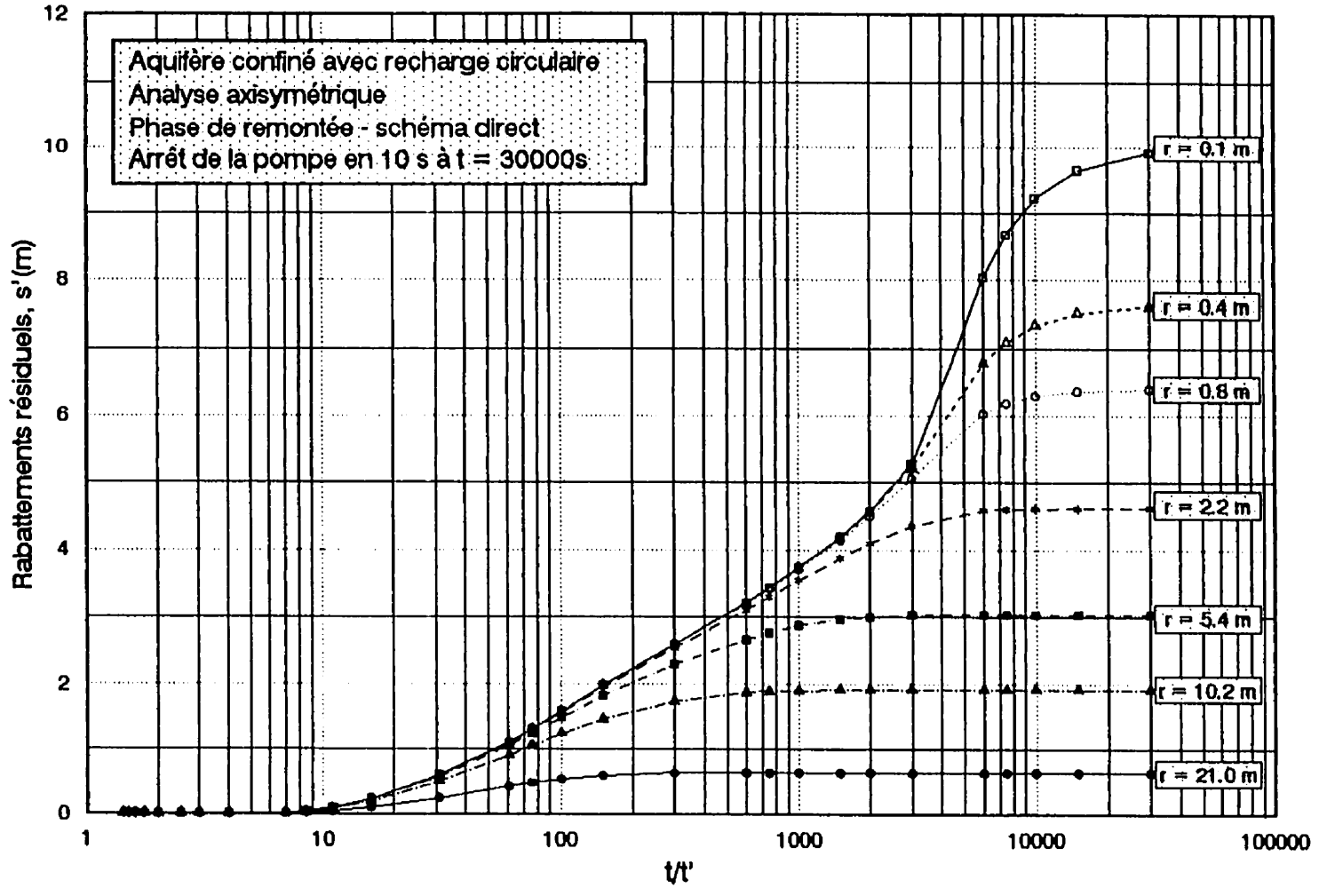


Figure 5.48: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 10 secondes. Représentation du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

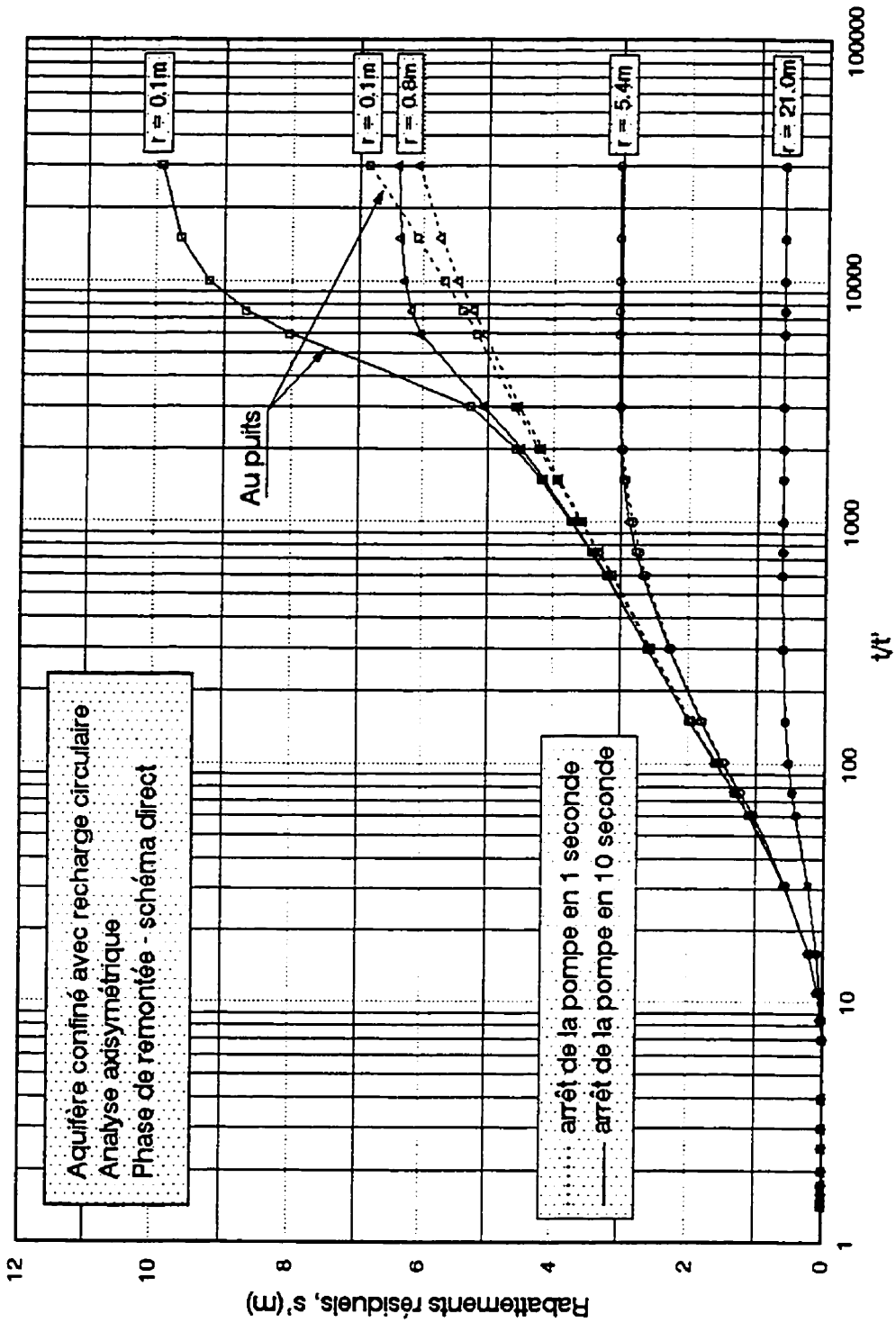


Figure 5.49: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30 000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour une fermeture de la pompe en 1 et en 10 secondes.

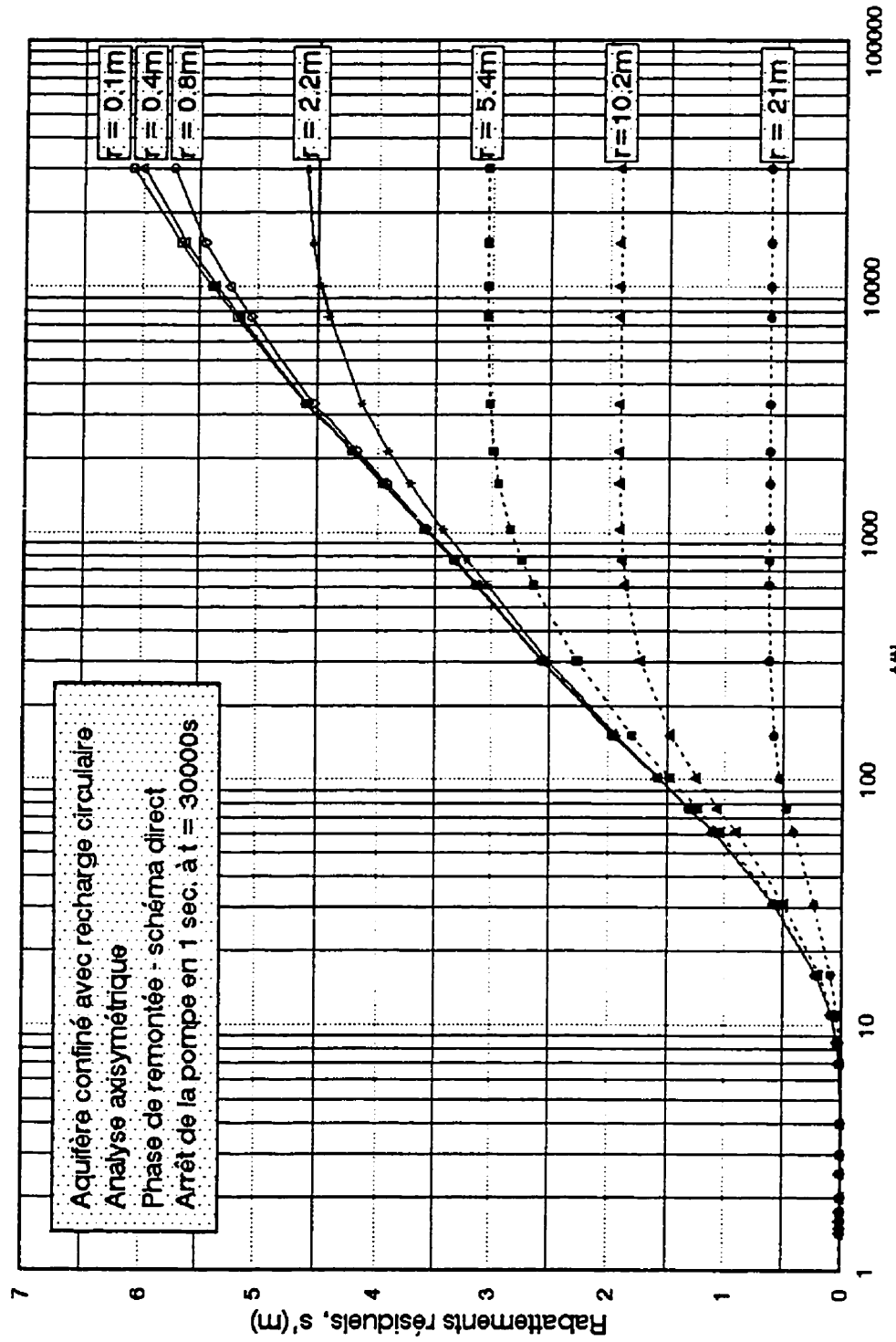


Figure 5.50: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 1 seconde. Courbes de remontée pour le nouveau choix de l'origine du temps t'.

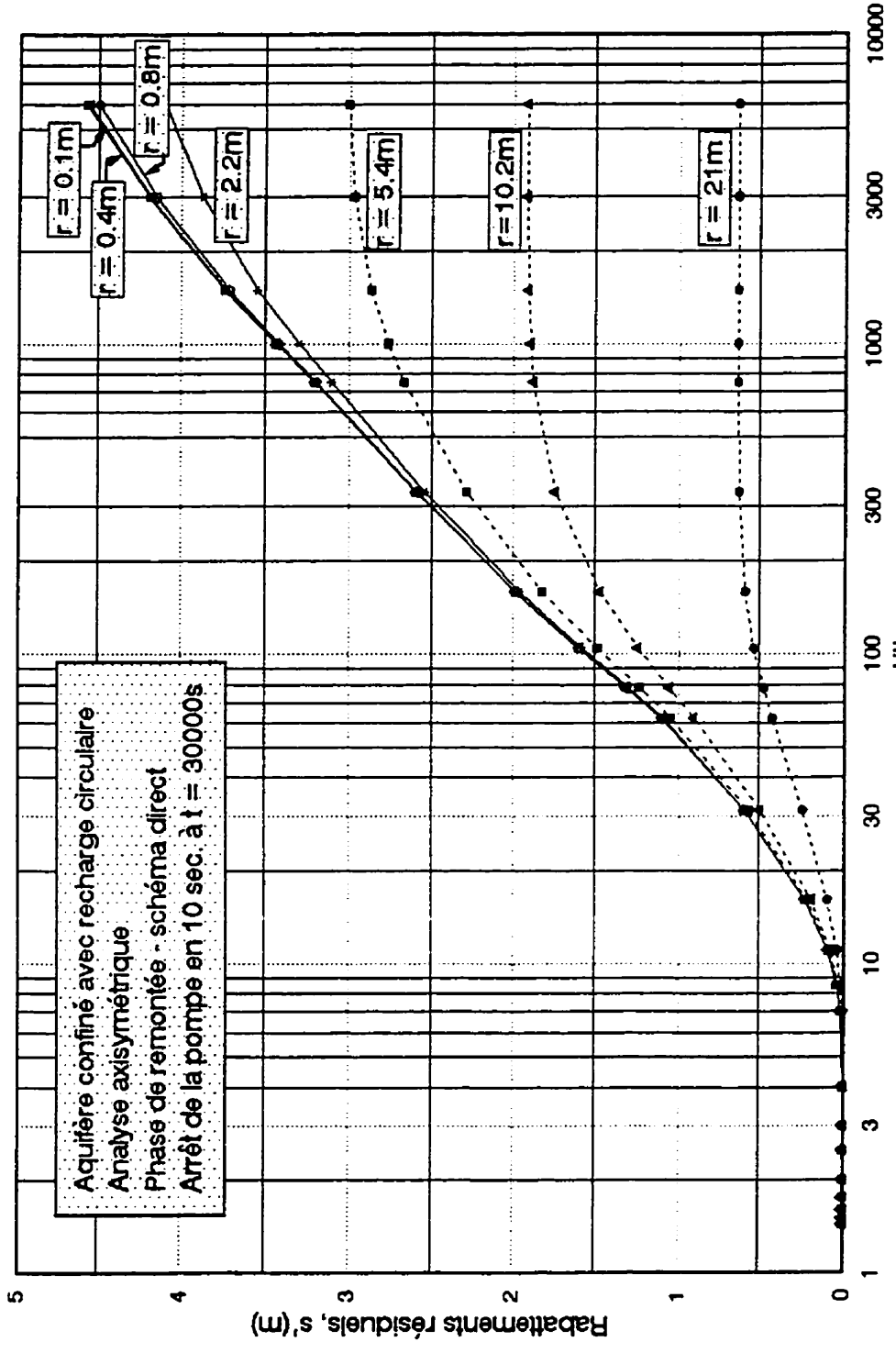


Figure 5.51: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma direct, après 30000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt de la pompe en 10 secondes. Courbes de remontée pour le nouveau choix de l'origine du temps t'.

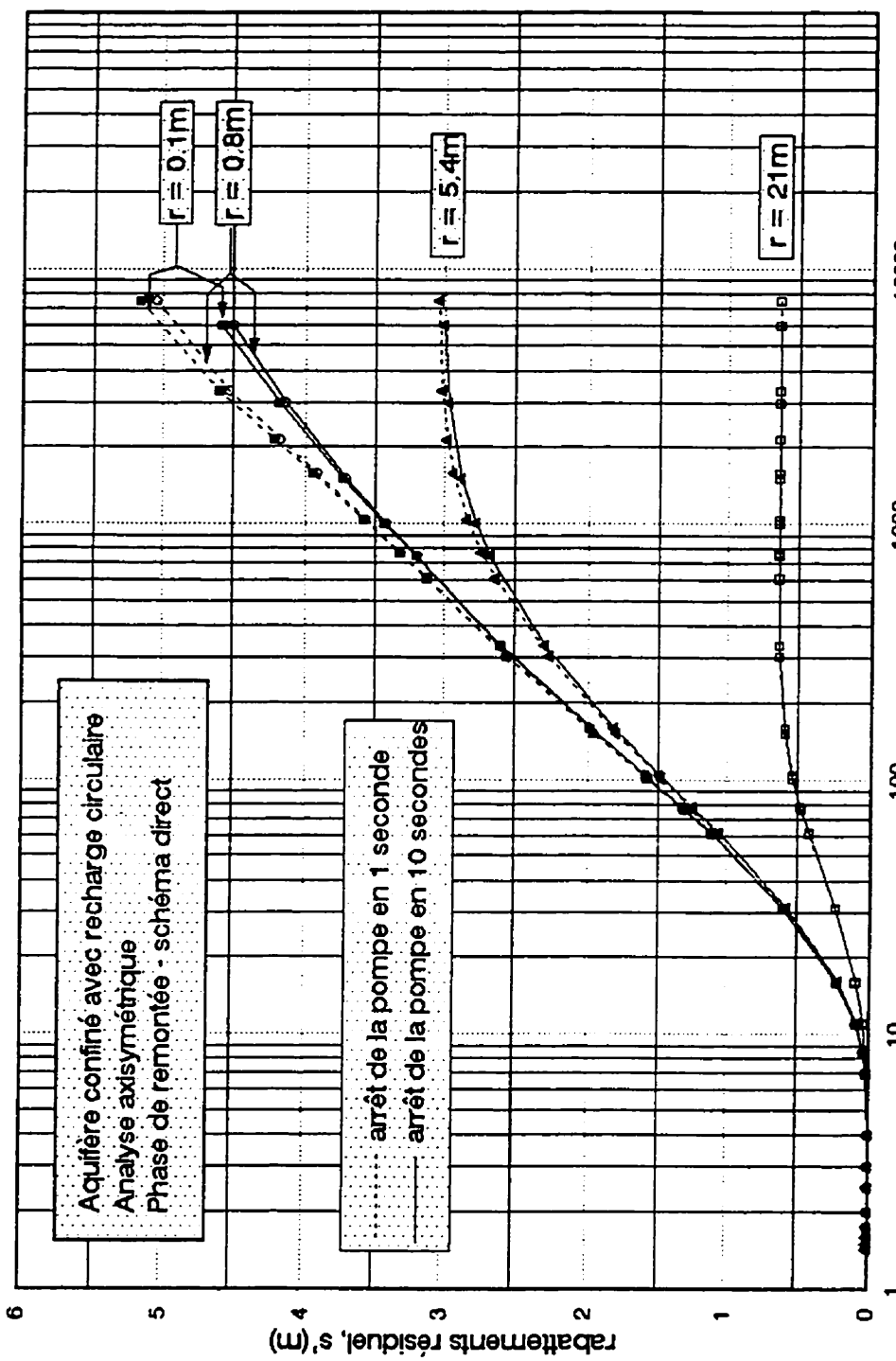


Figure 5.52: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de remontée avec le nouveau choix de l'origine du temps t' pour une fermeture de la pompe en 1s et en 10s.

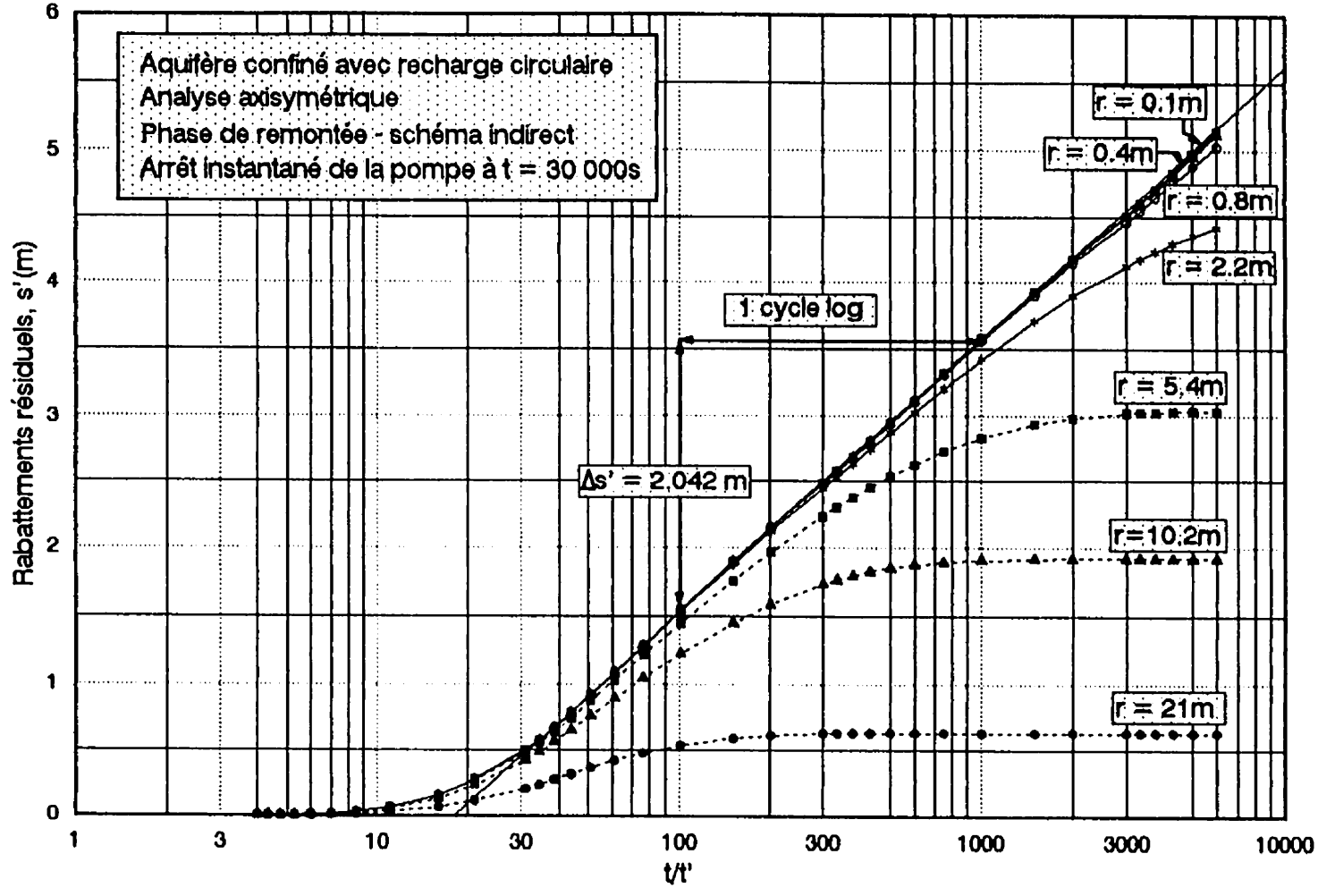


Figure 5.53: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

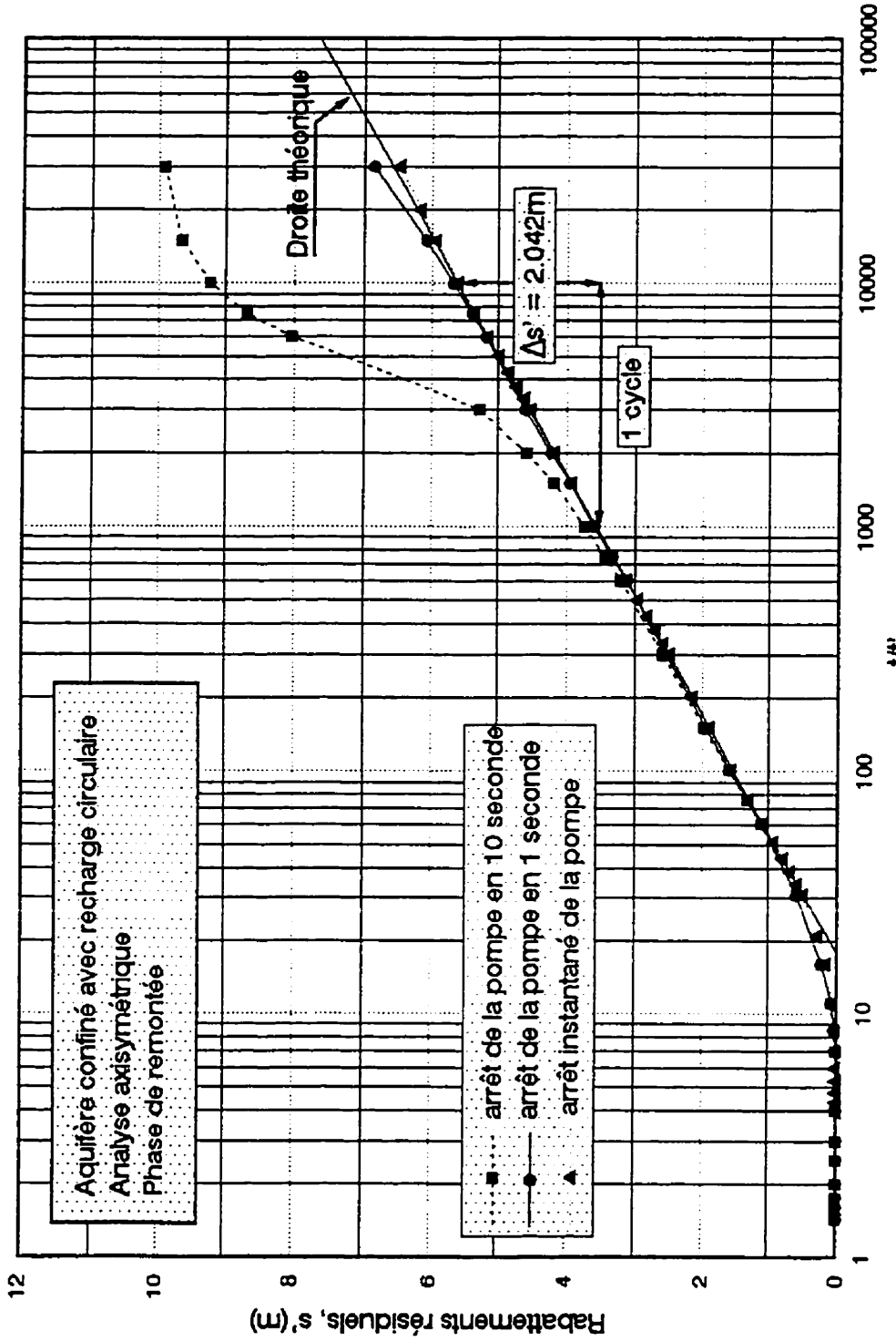


Figure 5.54: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 0.1m (au puits) obtenues par les deux schémas de remontée et la droite théorique.

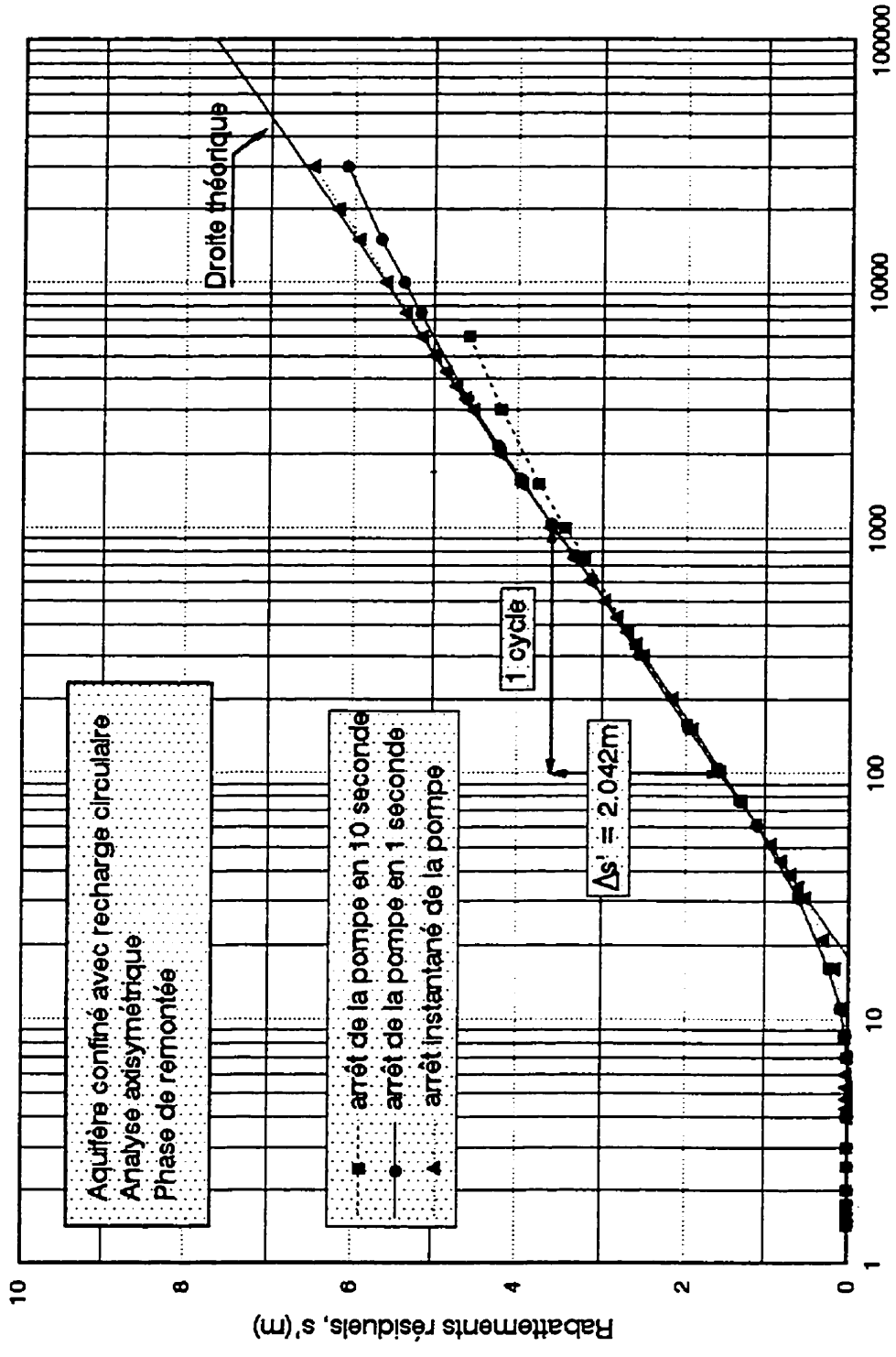


Figure 5.55: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison avec la droite théorique des courbes de remontée avec le nouveau origine du temps t' à r = 0.1m (au puits) obtenues par les deux schémas d'analyse.

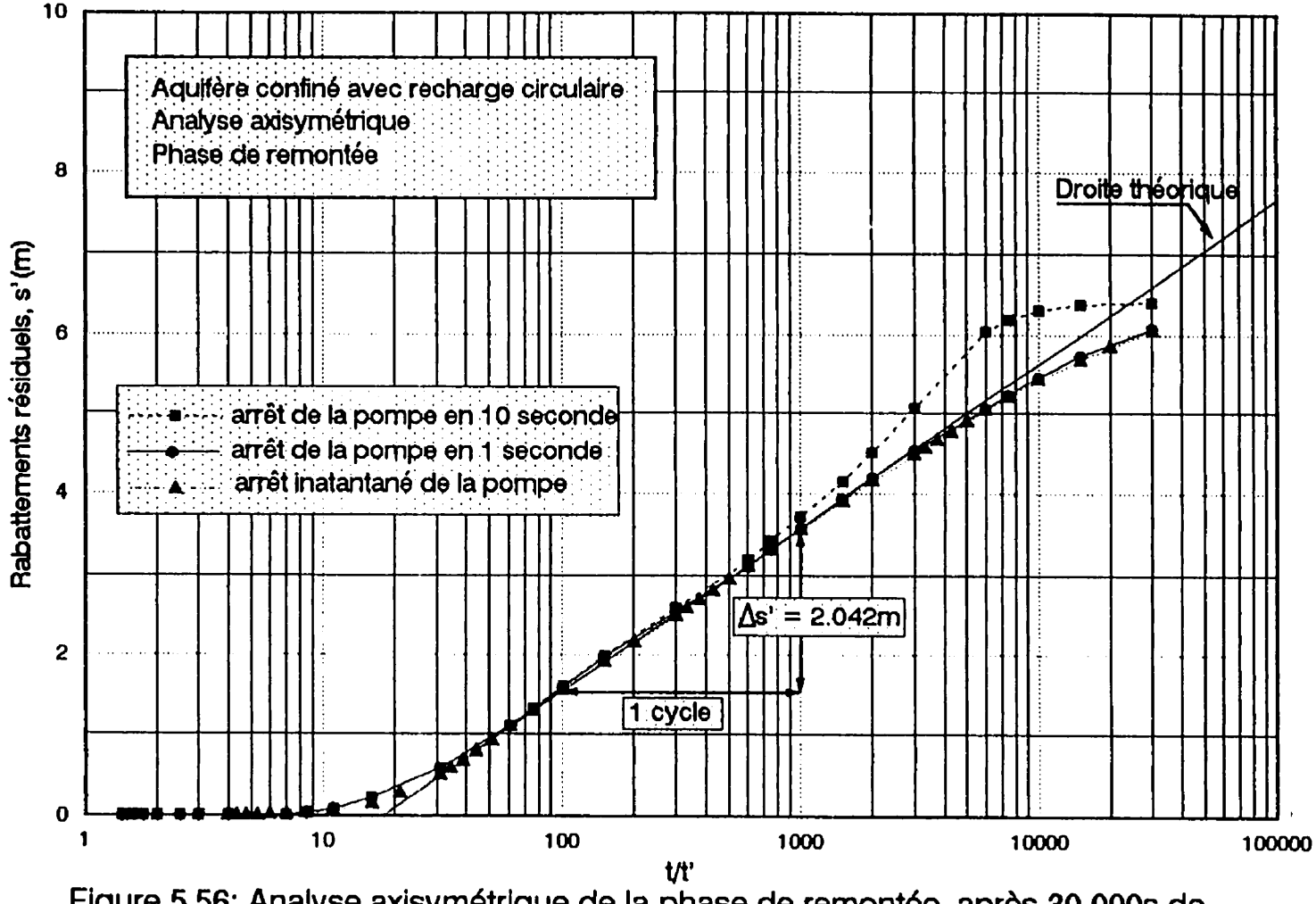


Figure 5.56: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 0.8m obtenues par les deux schémas de remontée et la droite théorique.

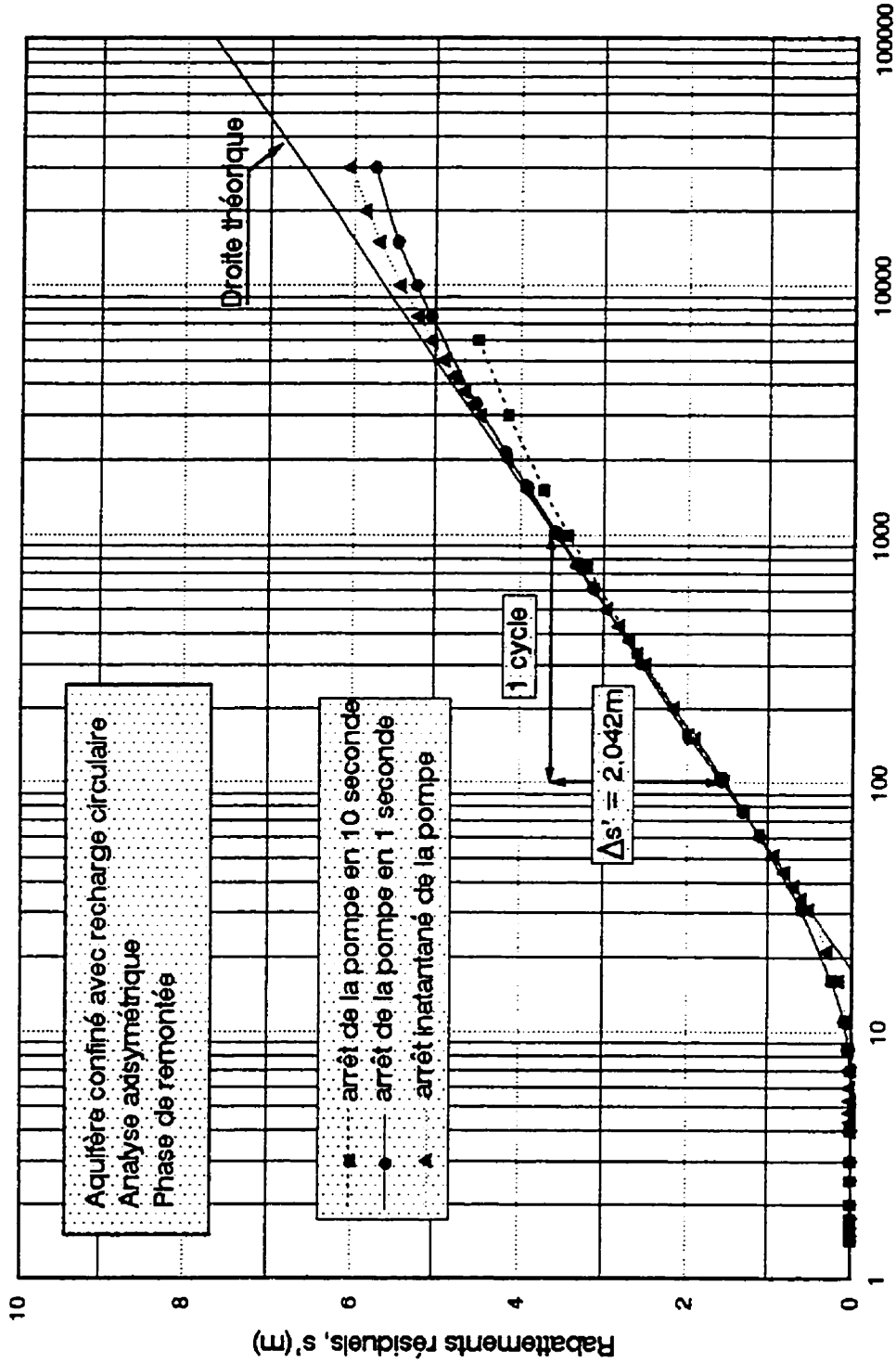


Figure 5.57: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison avecla droite théorique des courbes de remontée avec avec le nouveau origine du temps t' à r = 0.8 m obtenues par les deux schémas d'analyse.

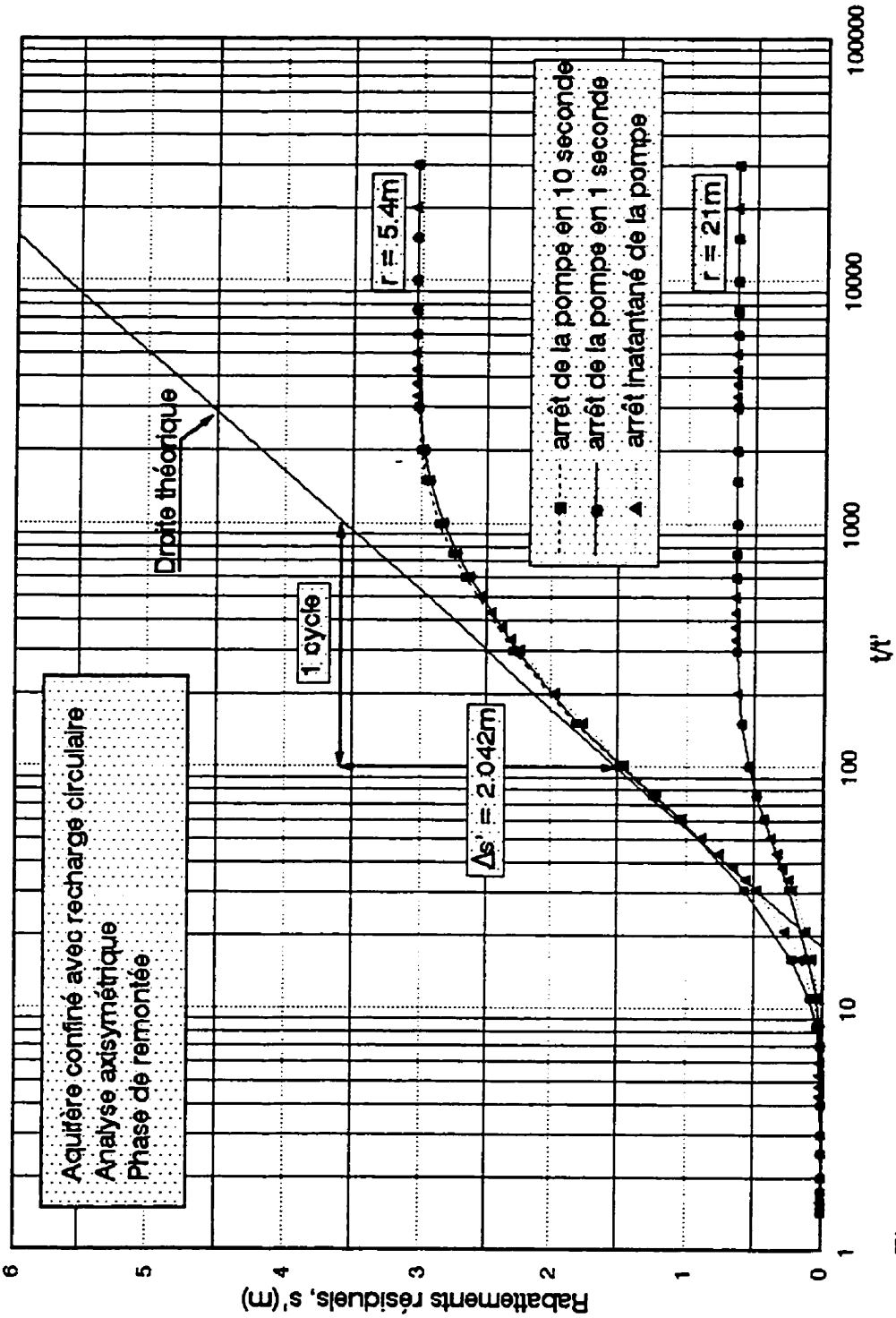


Figure 5.58: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, après 30 000 s de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Comparaison entre les courbes de rabattements en fonction de t/t' pour r = 5.4 m et r = 21 m obtenues par les deux schémas de remontée et la droite théorique.

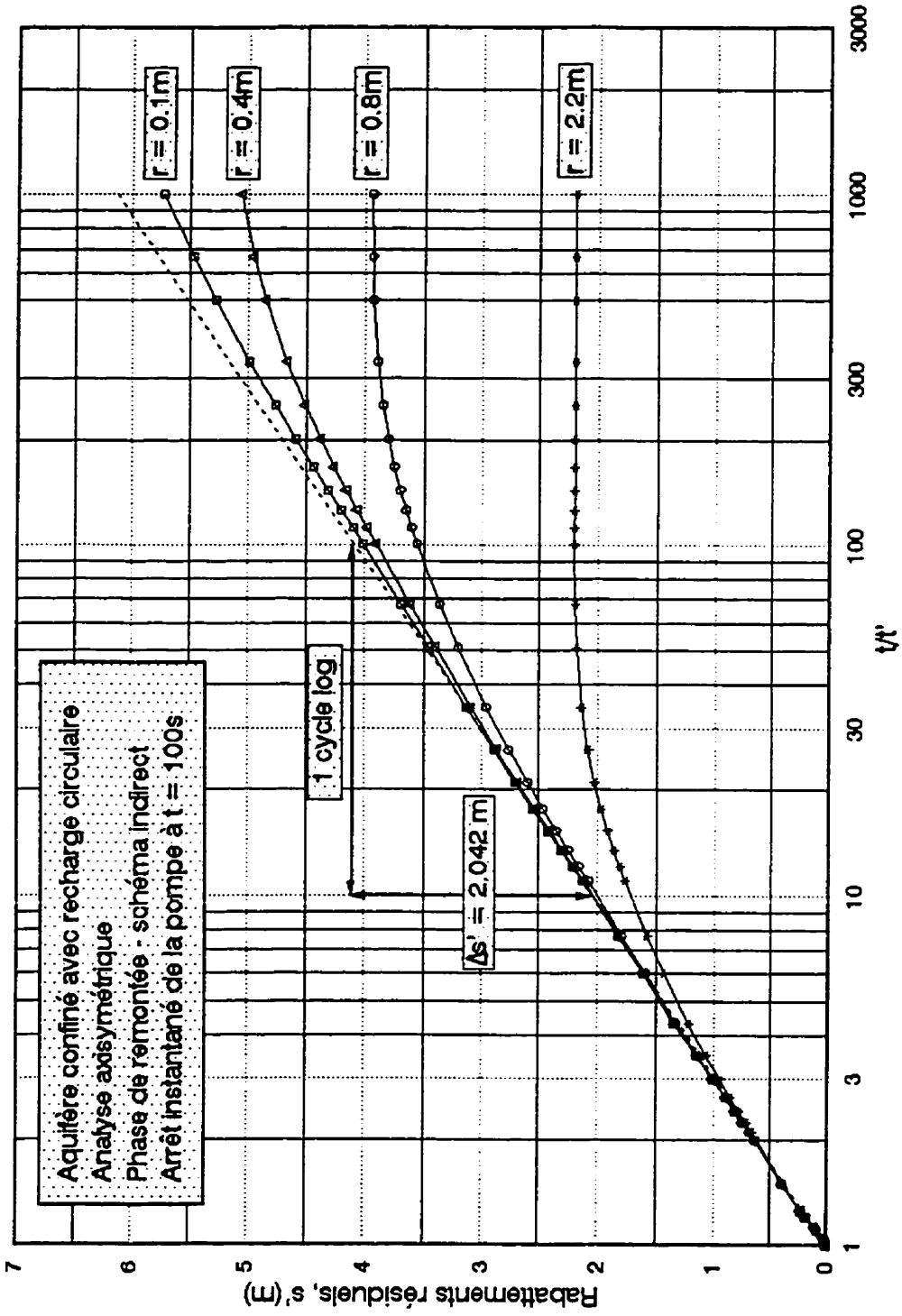


Figure 5.59: Analyse axisymétrique de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 100 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

MODELE PLAN DE 727 ÉLÉMENTS A 826 NOEUDS AU TOTAL

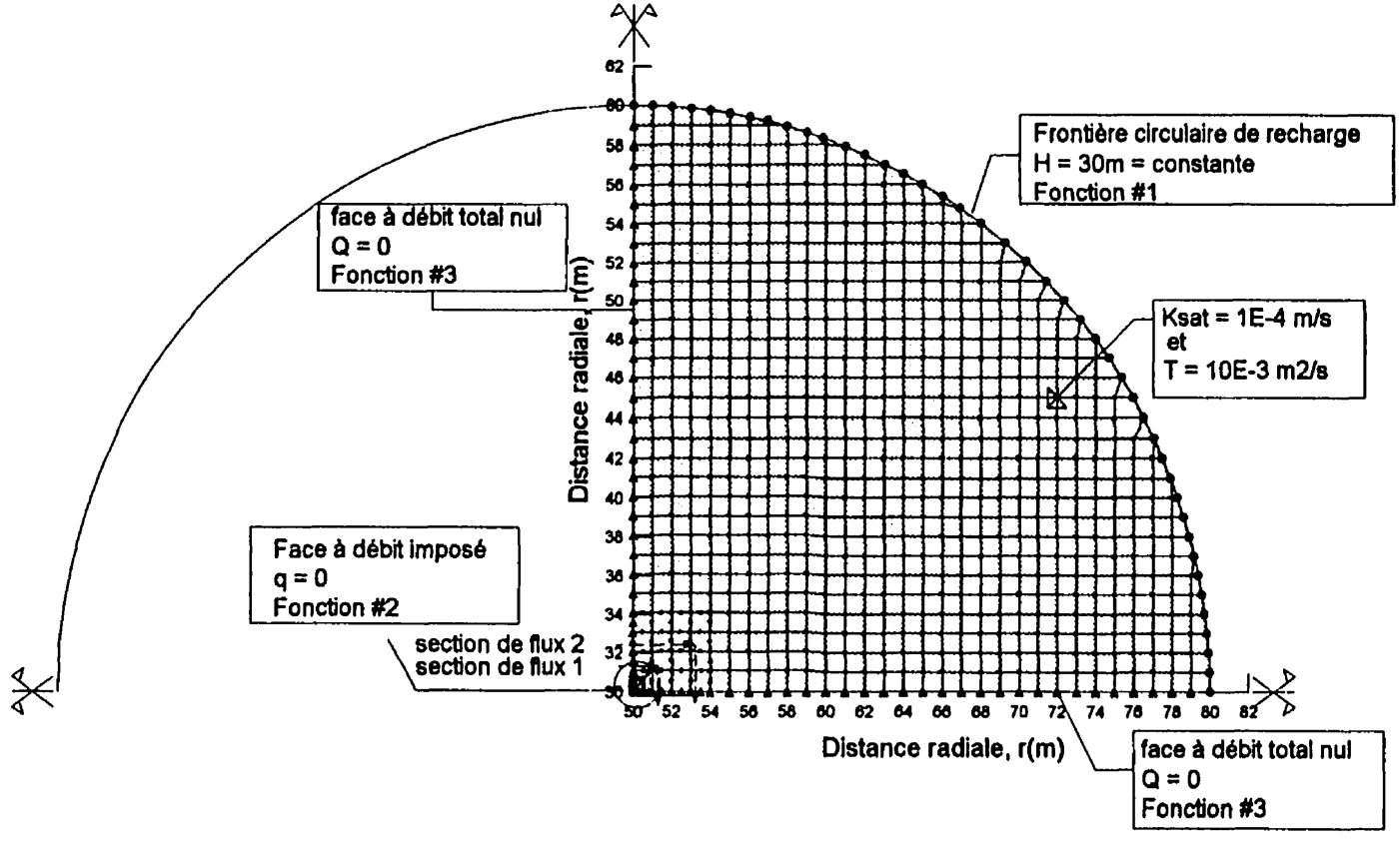


Figure 5.60: Analyse en plan de la phase de remontée selon le schéma indirect dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Maillage d'éléments finis et conditions aux limites.

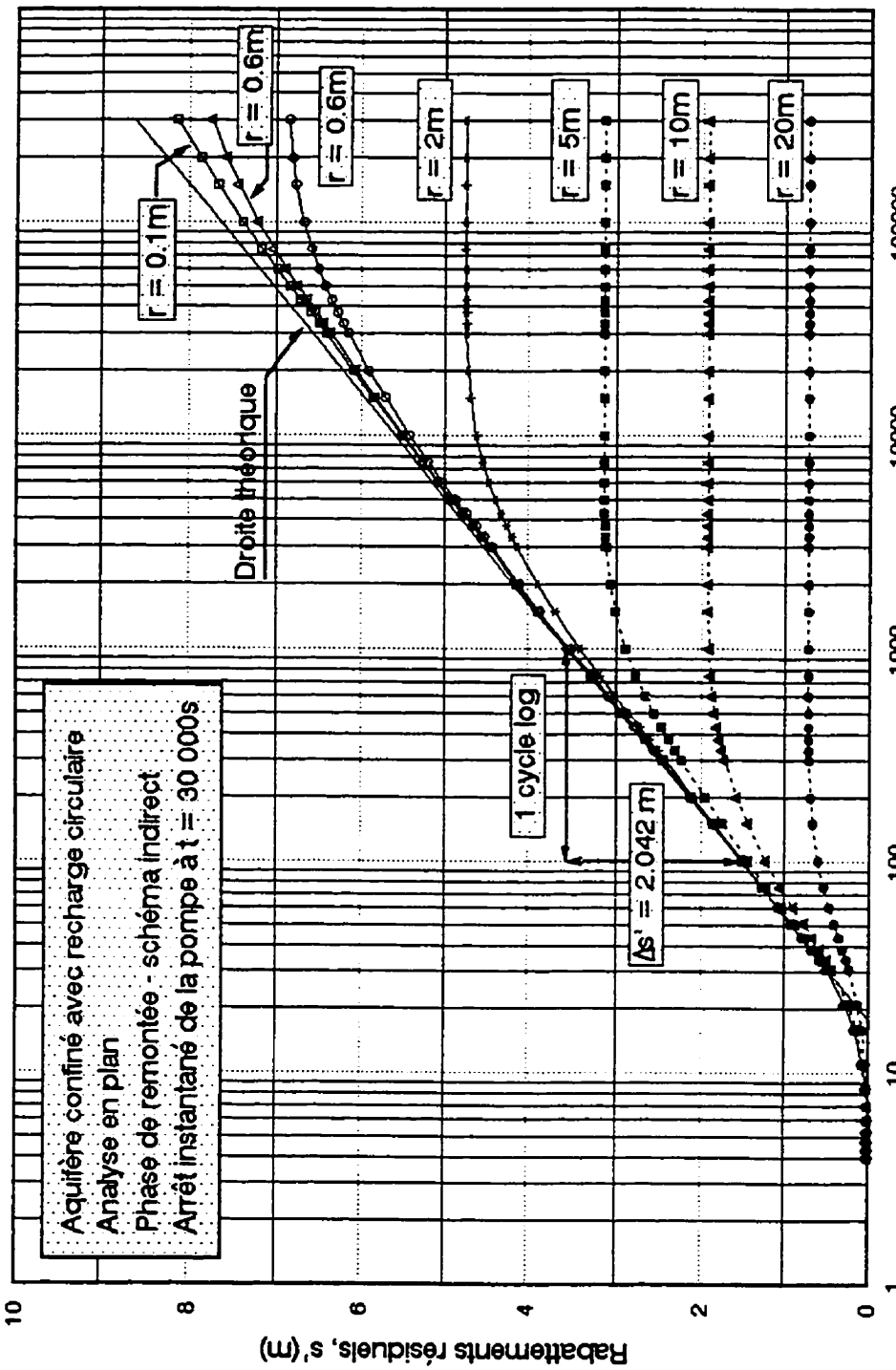


Figure 5.61: Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 30000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

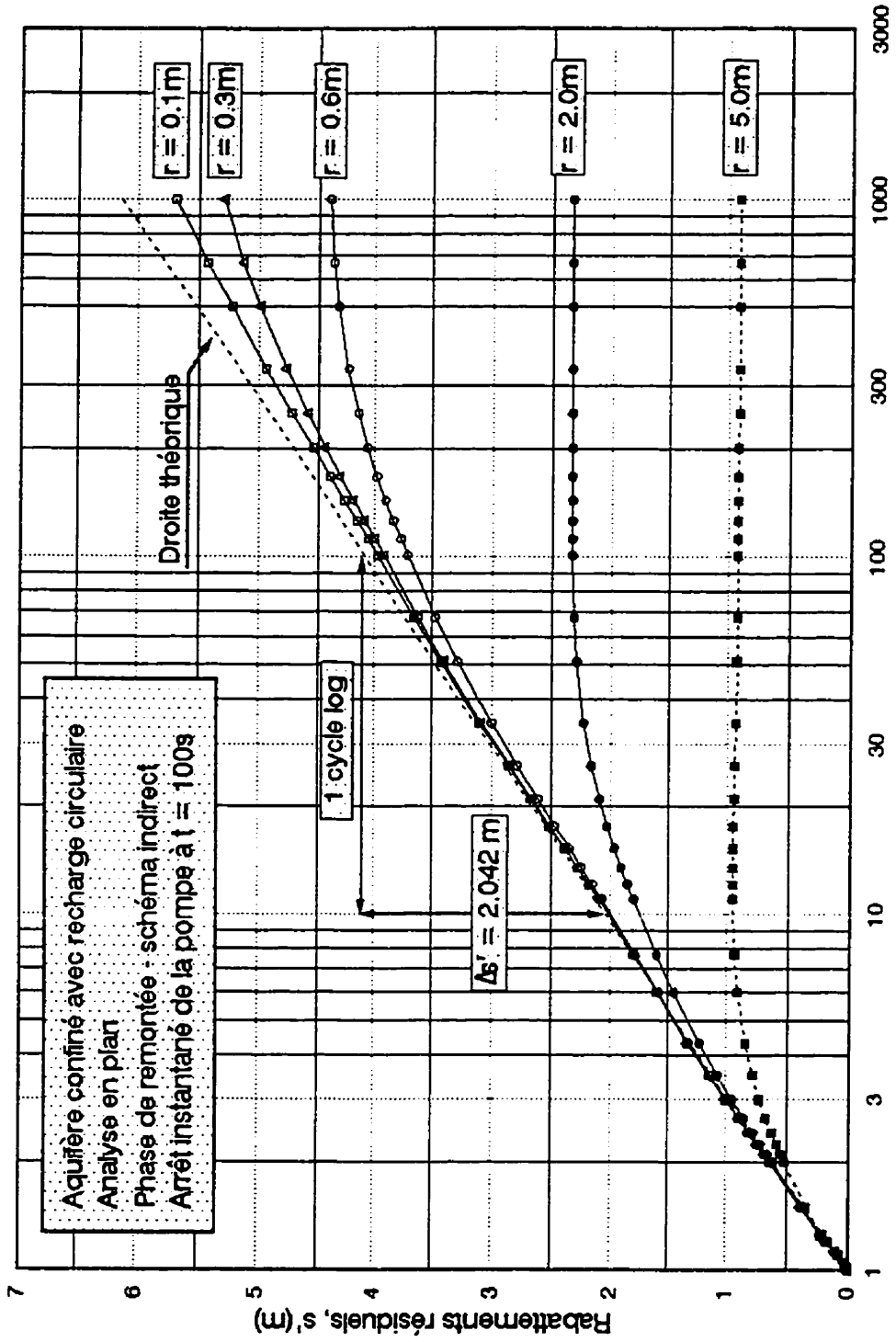


Figure 5.62: Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect, après 100 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Courbes du rabattement résiduel en fonction de t/t'.

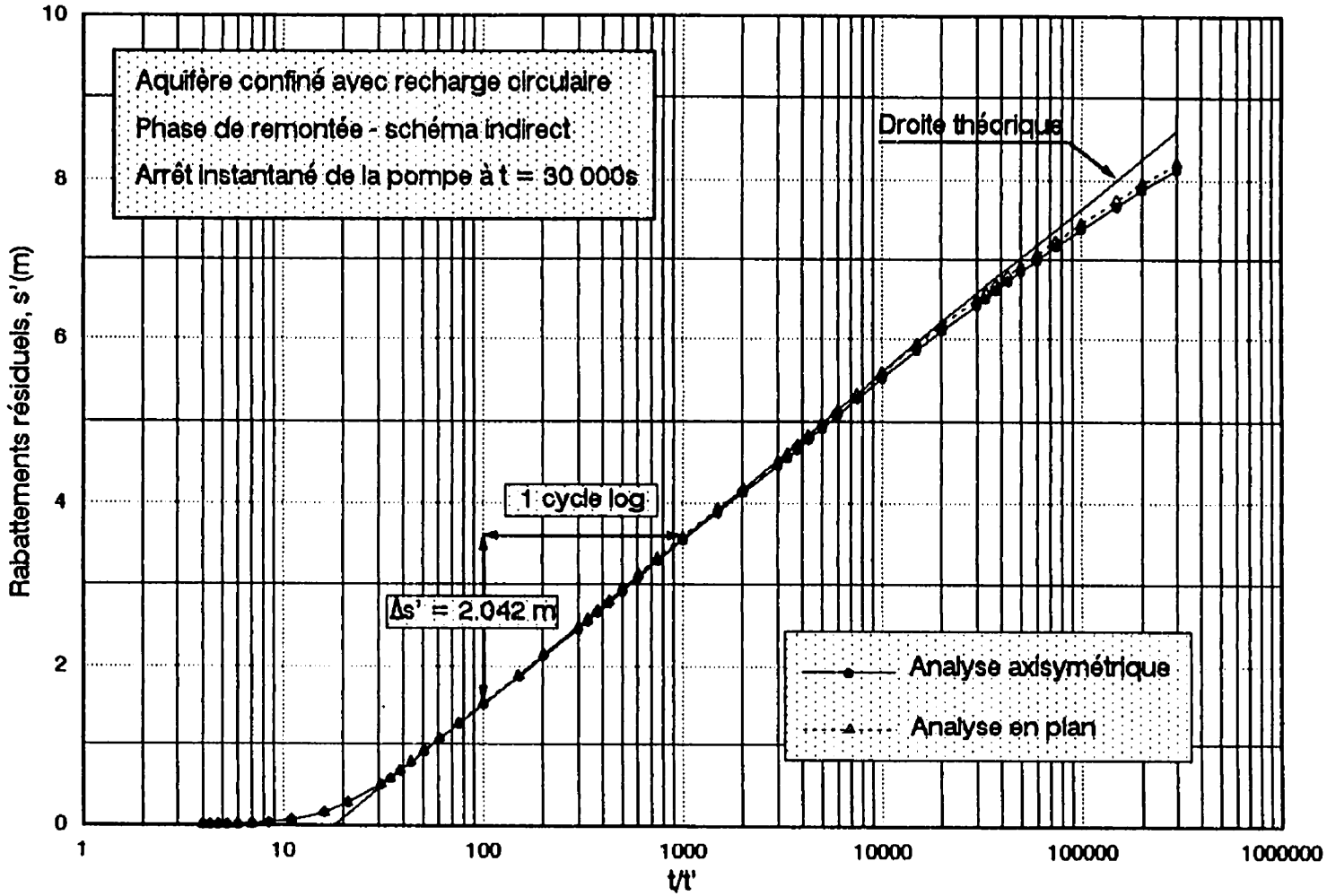


Figure 5.63: Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect après 30000 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Comparaison des Courbes de remontée au puits obtenues par les deux analyses.

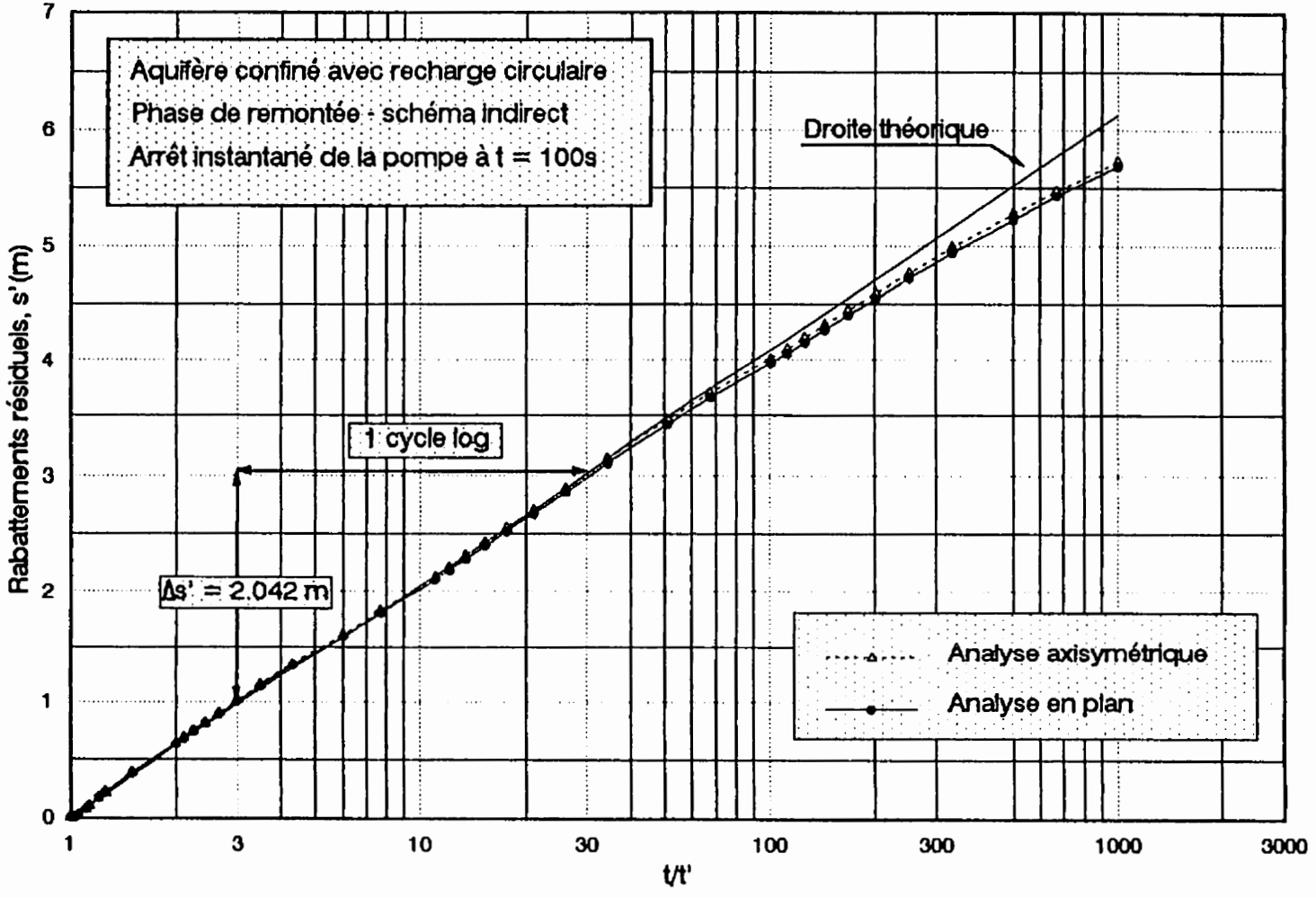


Figure 5.64: Analyse en plan de la phase de remontée, selon le schéma indirect après 100 secondes de pompage dans un aquifère confiné limité par une recharge circulaire. Arrêt instantané de la pompe. Comparaison des courbes de remontée au puits obtenues par les deux analyses.

CHAPITRE VI

NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DE LA TRANSMISSIVITÉ ET DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DANS LE CAS D'UN AQUIFÈRE INFINI

6.1 INTRODUCTION

Après un rappel des équations existantes, ce chapitre propose deux nouvelles méthodes d'interprétation des données de rabattements résiduels dans le cas d'un aquifère infini. Elles permettent de déterminer trois caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sans utiliser les rabattements provoqués par le pompage préalable. Ces caractéristiques hydrodynamiques sont les coefficients d'emmagasinement S et S' et la transmissivité T que l'on supposera égale à T' pour les raisons présentées au paragraphe 3.5.1 de la section 3.5 du chapitre 3. Ces méthodes utilisent la solution de Theis. Cette solution est introduite dans un programme de calcul en Fortran. Le fichier source de ce programme est identifié, à des fins pratiques par « SUPTHEIS.FOR ».

6.2 ESTIMATION DE T ET S: ÉQUATIONS EXISTANTES ET NOUVELLES

Si on suppose que toutes les hypothèses de Theis, citées dans la section 3.3.1 du chapitre 3, sont satisfaites, le rabattement s'exprimera par:

$$s(t,r) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{(6.1)}$$

u est l'argument de la fonction de puits W(u) défini comme: $u = \dfrac{r^2 S}{4Tt}$ .... (6.2)

De plus, comme montré au chapitre 3, si on suppose que l'approximation de Cooper-Jacob est bien développée durant l'essai, dans ces conditions l'expression (6.1) du rabattement devient:

$$s(r,t) = \frac{2{,}3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2{,}25Tt}{r^2 S}\right) \quad \text{(6.3)}$$

L'interprétation graphique de s(r, t) vs logt permet de calculer la transmissivité T, à partir de la pente Δs, et le coefficient d'emmagasinement S, à partir de l'intercept t_0 à l'origine, par:

$$\begin{cases} T = \dfrac{2{,}3Q}{4\pi\left(\Delta s/_{cycle}\right)} \\ S = \dfrac{2{,}25Tt_0}{r^2} \end{cases} \quad \text{(6.4)}$$

et le prolongement de ce rabattement, noté $s_P(r, t)$, au delà de la durée réelle de pompage est défini par le système d'équations:

$$\begin{cases} s_P(r, t) = \dfrac{2{,}3Q}{4\pi T} \log\left(\dfrac{2{,}25Tt}{r^2 S}\right) \\ t \geq t_{arret} \end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.5)$$

où $t_{arrêt}$ est le temps qui correspond à la fin du pompage. Ce rabattement, $s_P(r, t)$, est calculé en utilisant les équations (6.5) et les valeurs des paramètres S et T déterminées par (6.4) pour un piézomètre (position r) donné.

Si une remontée se produit à partir de ce temps $t_{arrêt}$, alors le rabattement résiduel s'(r, t) s'exprime par:

$$s'(r,t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right) - \frac{Q}{4\pi T}W(u') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.6)$$

u' est l'argument de la fonction de puits en remontée défini par: $u' = \dfrac{r^2 S'}{4Tt'}$ ..... (6.7)

et t' est le temps de remontée défini par: t' = 0 lorsque t = $t_{arrêt}$ ..... (6.8)

Lorsque ce temps t' devient suffisamment grand pour que l'approximation de Cooper-Jacob pour la fonction W(u') soit vérifiée, et si T' = T, (6.6) devient:

$$s'(r,t) = s'(t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{S't}{St'}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6.9)$$

L'interprétation graphique de cette dernière équation s'(r, t) vs logt/t' permet de calculer le rapport S/S' de l'intercept à l'origine $(t/t')_0$ et T=T' de la pente $\Delta s'$ par:

$$\begin{cases} \dfrac{S}{S'} = \left(\dfrac{t}{t'}\right)_0 \\ T = T' = \dfrac{2.3Q}{4\pi\left(\Delta s'/cycle\right)} \end{cases} \quad \text{(6.10)}$$

Ainsi, dans le cas où S' = S, seule la transmissivité peut être déterminée. L'équation (6.9) est indépendante du coefficient d'emmagasinement (Chap.3, section 3.4). La valeur de l'intercept à l'origine de s'(r, t) vs logt/t', soit $(t/t')_0$, est égale à 1.

On peut cependant obtenir S' ≠ S quand T' = T en utilisant s_P - s' (éqs 6.5 et 6.6) :

$$\left(s_P - s'\right) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u'\right) \quad \text{(6.11)}$$

L'équation ci-dessus est similaire à celle qui exprime le rabattement dans un aquifère homogène, d'épaisseur constante, et d'étendue infinie (équation 6.1). Lorsque t' devient suffisamment grand pour que l'approximation de Cooper-Jacob pour la fonction W(u') soit vérifiée, elle s'exprimera par:

$$\left(s_P - s'\right) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt'}{r^2 S'}\right) \quad \text{(6.12)}$$

L'interprétation graphique de l'équation ci-dessus, (s_P - s') vs logt', fournit le coefficient d'emmagasinement S' et la transmissivité T' = T par:

$$\begin{cases} T = T' = \dfrac{2.3Q}{4\pi\left(\Delta(s_P - s')\Big/_{cycle}\right)} \\ S' = \dfrac{2.25Tt_0'}{r^2} \end{cases} \qquad (6.13)$$

L'utilisation des deux interprétations simultanées (équations 6.10 et 6.13) permet la détermination de S' et T'=T ainsi que la vérification de la valeur de S, dans le cas où S ≠ S'.

6.2.1 Discussion des équations existantes

Les deux méthodes d'interprétation des données d'un essai d'aquifère, en milieu infini, qui sont représentées par les équations (6.10) et (6.13) présentent certaines limites et désavantages, parmi lesquels nous citons:

1. La méthode d'interprétation directe de s' vs logt/t' (équations 6.9 et 6.10) ne nous fournit pas l'emmagasinement S et/ou S', lorsque ces derniers restent constants durant les deux phases de l'essai. En effet, lorsque S=S', l'expression (6.9) devient indépendante de l'emmagasinement. Ainsi, comme montré au paragraphe 6.2, seule la transmissivité T = T' peut être déterminée. De plus, pour un aquifère homogène, cette équation (6.9) est indépendante de la variable de l'espace r. La solution ne dépend donc pas du piézomètre utilisé.

2. Les valeurs de S' et de T'=T, déterminées à partir de l'interprétation graphique de (s_P-s') vs logt' (équations 6.12 et 6.13), ne peuvent être considérées comme résultant seulement de l'interprétation des données de la phase de remontée. En effet, par construction, ces valeurs dépendent de la qualité des valeurs de S et T obtenues à partir de l'interprétation des données de pompage s(r, t) vs logt (équation 6.4) . Par conséquent, une erreur sur cette interprétation se répercutera sur le calcul des valeurs de s_P(r, t), (équation 6.5), et par la suite sur l'interprétation de (s_P - s') vs logt', (équation 6.13). De plus, le coefficient d'emmagasinement S n'est pas un paramètre de la fonction (s_P - s'). Par conséquent il ne peut être déterminé par son interprétation.

Pour remédier à cela, deux nouvelles méthodes d'interprétation des données de remontée sont présentées ci-dessous. Pour ces deux méthodes, on suppose que toutes les hypothèses énoncées et les équations présentées précédemment restent valables.

6.2.2 1ère nouvelle méthode: méthode des rabattements résiduels normalisés

La méthode des rabattements résiduels normalisés, notée « MRRN », suppose que le rabattement résiduel s'(r, t) relevé à un puits d'observation au temps t' vérifie l'équation (6.9). A l'arrêt du pompage, soit à t = $t_{arrêt}$, le rabattement est noté $s_{arrêt}$; il représente le rabattement résiduel initial s'_{ini} qui se produit au temps t'=0. Ainsi,

$$s_{arrêt}\ (t = t_{arrêt}) = s'_{ini}\ (t' = 0) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.14)$$

En considérant (6.3) à t = $t_{arrêt}$:

$$s_{arret}(r, t_{arret}) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25T}{r^2 S} t_{arret}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.15)$$

En divisant l'équation (6.9) par l'équation (6.15), membre à membre, nous obtenons:

$$\frac{s'(r,t)}{s_{arret}(r, t_{arret})} = \frac{\log\left(\frac{S' t}{S t'}\right)}{\log\left(\left(\frac{2.25 t_{arret}}{r^2}\right)\frac{T}{S}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.16)$$

Que l'on peut réécrire autrement par:

$$\frac{s'(t')}{s_{arret}(r, t_{arret})} = \frac{1}{\log\left(\left(\frac{2.25 t_{arret}}{r^2}\right)\frac{T}{S}\right)} \log\left(\frac{t}{t'}\right) + \frac{\log\left(\frac{S'}{S}\right)}{\log\left(\left(\frac{2.25 t_{arret}}{r^2}\right)\frac{T}{S}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6.17)$$

La représentation graphique de cette fonction, s'(t')/ $s_{arrêt}$ vs logt/t', est une droite dont la pente est égale à

$$\Delta\left(\frac{s'(t')}{s_{arret}}\right) = \frac{1}{\log\left(\left(\frac{2.25 t_{arret}}{r^2}\right)\frac{T}{S}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.18)$$

ce qui donne le rapport T/S, soit la diffusivité, exprimé par:

$$\log\left(\frac{T}{S}\right) = \frac{1}{\Delta\left(\frac{s'(t')}{s_{arret}}\right)} - \log\left(\frac{2.25 t_{arret}}{r^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6.19)$$

et l'intercept à l'origine des ordonnées, $\frac{s'(t')}{s_{arret}} = 0$, correspond à:

$$\left(\frac{t}{t'}\right)_0 = \left(\frac{S}{S'}\right) \quad \text{(6.20)}$$

Cette dernière équation est identique à la première équation du système (6.10). Elle donne le rapport des coefficients d'emmagasinement S/S'. Les équations (6.19) et (6.10) conduisent aux valeurs de S/S', T et T/S qui permettent de déterminer par conséquent les trois paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (T = T', S, S').

6.2.3 2ème nouvelle méthode: méthode des écarts des rabattements résiduels

Cette méthode, désignée par (M.E.R.R.) a l'avantage de déterminer le coefficient d'emmagasinement en remontée S' non couplé à celui en pompage S. Des équations (6.9) et (6.15) on obtient:

$$s_{arret} - s' = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25T}{r^2 S}t_{arret}\right) - \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{S't}{St'}\right) \quad \text{(6.21)}$$

soit:

$$s_{arret} - s' = -\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{S'r^2}{2.25Tt_{arret}}\frac{t}{t'}\right) \quad \text{(6.22)}$$

La représentation graphique de cette fonction ($s_{arrêt}$ - s') vs logt/t' nous permet de connaitre la transmissivité, T = T', à partir de la pente $\Delta(s_{arrêt} - s')$

$$T' = T = -\frac{2.3Q}{4\pi(\Delta(s_{arrêt} - s')/cycle)} \qquad \text{(6.23)}$$

et le coefficient d'emmagasinement en remontée S' de l'intercept $(t/t')_0$

$$S' = \frac{2.25Tt_{arrêt}}{r^2\left(\frac{t}{t'}\right)_0} \qquad \text{(6.24)}$$

6.2.4 Discussion des équations nouvelles

L'examen des deux nouvelles méthodes d'interprétation permet de mettre en évidence les remarques suivantes:

1. Ces nouvelles équations ont l'avantage de fournir la valeur du coefficient d'emmagasinement S même s'il est différent de S' durant les deux phases de l'essai. Cette valeur est déterminée par la seule interprétation des mesures effectuées durant la phase de remontée.

Les équations 6.17 et 6.22 sont des fonctions de la distance radiale r. Par conséquent, ces deux équations 6.17 et 6.22 sont définies à chaque piézomètre installé ce qui permet de vérifier l'homogénéité de l'aquifère testé, dans un cas réel.

Les fonctions définies par les équations (6.9) et (6.17) ont la même expression de l'intercept à l'origine (éqs. 6.10 et 6.20). Ceci fournit un point de vérification.

2. La deuxième méthode présentée (méthode des écarts des rabattements résiduels, M.E.R.R.) ne permet pas la vérification de la valeur du coefficient d'emmagasinement S trouvée par l'interprétation des données de la phase de pompage, lorsque $S \neq S'$. En effet, l'équation (6.22) est indépendante de S. Cependant, avec l'interprétation simultanée de l'équation (6.9) on peut retrouver cette dernière valeur.

6.3 EXEMPLES NUMÉRIQUES

Trois exemples numériques vont nous permettre d'illustrer l'utilisation des deux nouvelles méthodes présentées ci-dessus. Le premier exemple considère un cas synthétique construit à l'aide du programme « SUPTHEIS ». Dans cet exemple, on considère le cas où le coefficient d'emmagasinement est différent durant les deux phases de l'essai ($S \neq S$). Le deuxième exemple présenté, devenu classique, est celui tiré de Todd (1980, pp. 127 et 134). Enfin, le troisième cas qui correspond à un essai réel est de l'USDI Groundwater Manual (1977, pp. 120). Ces deux derniers exemples sont choisis parmi d'autres pour leur popularité.

Exemple No.1 (cas synthétique)

Cet exemple considère un aquifère confiné horizontal homogène et isotrope, infini, de transmissivité T = 0,01m^2/s et de coefficient d'emmagasinement S = 2,25 10^{-4}. La diffusivité est T/S = 44,44 m^2/s. Le débit de pompage est Q = 0,03 m^3/s. On suppose qu'un piézomètre est installé à la distance radiale, r = 2m, de l'axe central du puits de pompage passant par (0, 0) m. Les valeurs des rabattements ont été générées à l'aide du programme SUPTHEIS. Pour chaque fonction de puits, nous avons utilisé les 30 premiers termes de la série. Ces rabattements en fonction du temps sont reportés au tableau (6.1) et représentés sur la figure (6.1). Les valeurs relevées de la pente, Δs/cycle, et de l'intercept t_0 , sont respectivement de 0,55 m et 0,04 s. Ces valeurs correspondent aux valeurs théoriques données par le système d'équations (6.4) soit dans notre cas:

$$\frac{\Delta s}{cycle} = \frac{2.3Q}{4\pi T} = \frac{2.3x0,03}{4\pi 0,01} \approx 0,55m \quad \text{et} \quad t_0 = \frac{r^2 S}{2,25T} = \frac{2^2 x2,25x10^{-4}}{2,25x0,01} = 0,04s \qquad (6.25)$$

On suppose que l'arrêt du pompage se produit au temps $t_{arrêt}$ = 3000s alors que le rabattement au piézomètre (r = 2 m) est égal à $s_{arrêt}$ = 2,679 m. Il représente le rabattement résiduel initial s'_{ini} à t' = 0. Comme pour le pompage, les valeurs des rabattements résiduels s'(t, r) sont générées par le programme SUPTHEIS en utilisant les 30 premiers termes de la fonction de puits.

Afin d'étudier un cas général de remontée, nous avons considéré le cas où S = S' et le cas où S ≠ S'. Ainsi, deux cas sont analysés.

Cas No.1:

Le coefficient d''emmagasinement en remontée est égal à celui en pompage, S' = S = 2,25 10^{-4} (tableau 6.2). La représentation graphique des rabattements résiduels s'(r, t) en fonction de logt/t' (figure 6.2), présente un intercept à l'origine de $(t/t')_0 = 1$. Le coefficient d'emmagasinement ne peut être, alors, déterminé. Cependant la pente de la droite est égale à Δs'/cycle = 0,549 m qui donne T = T' = 0,01 m^2/s. Sur le tableau 6.2, nous avons également reporté les valeurs calculées de (s_P-s'), s'/s'_{ini} et (s'_{ini} - s'). Nous avons utilisé pour le calcul de s_P l'équation 6.5 avec les valeurs (6.25) pour la pente et l'intercept. Les figures 6.3, 6.4 et 6.5 présentent respectivement les graphiques requis par les différentes interprétations: (s_p - s') vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Les valeurs des paramètres obtenues de chaque interprétation graphique sont montrées sur la figure respective. On vérifie qu'elles correspondent aux valeurs utilisées dans la génération des données.

Cas No.2

Dans ce cas, le coefficient d''emmagasinement en remontée est égal à la moitié de celui en pompage, S' = 0,5S = 1,125 10^{-4}. Cette valeur du rapport S/S' fort élevée est choisie pour faciliter l'interprétation visuelle des graphiques. Les valeurs des rabattements résiduels sont reportées dans le tableau 6.3. La représentation graphique de ces rabattements résiduels s'(r, t) en fonction de logt/t' (figure 6.6) tend vers une droite

passant par $(t/t')_0 = 2$ qui correspond au rapport des coefficients d'emmagasinement S/S'. La pente de cette droite est égale à $\Delta s'$/cycle =0,55m qui donne T = T' = 0,01m^2/s. Dans le tableau 6.3, nous avons également reporté les valeurs calculées de la même façon que dans le cas No.1, de (s_p-s'), s'/s'$_{ini}$ et s'$_{ini}$ - s'. Les figures 6.7, 6.8 et 6.9 sont celles requises respectivement par les différentes interprétations suivant (s_p - s') vs logt', s'/s'$_{ini}$ vs logt/t' et (s'$_{ni}$ -s') vs logt/t' ainsi que les valeurs obtenues graphiquement pour les paramètres correspondant aux valeurs utilisées dans la génération des données.

Exemple No.2 (Todd, 1980, pp. 127 et 134)

Le débit de pompage est de 2500m^3/jour (173,611 10^{-2} m^3/min). Les observations sont réalisées à une distance de 60m de l'axe du puits de pompage. Le rabattement à l'arrêt du pompage, soit à t = $t_{arrêt}$ = 240 min, est de $s_{arrêt}$ = 1,12 m ce qui représente le rabattement résiduel initial s'$_{ini}$. Ces observations en pompage et en remontée, présentées par Todd (1980, pp.128 et 134), sont respectivement reportées aux tableaux 6.4 et 6.5.

L'interprétation de la courbe de rabattements s(r = 60m, t) vs logt représentée par la figure 6.10 nous donne les valeurs de T et S, respectivement de la pente : Δs/cycle = 0,3994 m et de l'intercept à l'origine t_0 = 0,3759 min. Des équations 6.4, on en déduit:

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta s \,/\, cycle} = \frac{2,3x2500}{4\pi 0,3994} \approx 1145,645 m^2 \,/\, jour \approx 0,7956 m^2 \,/\, \min$$

et (6.26)

$$S = \frac{2{,}25Tt_0}{r^2} = \frac{2{,}25x0{,}7956x0{,}3759}{60^2} = 1{,}8691x10^{-4}$$

La figure 6.11 représente le graphe de s'(r = 60m, t) vs logt/t'. L'interprétation selon les équations 6.10 nous donne la transmissivité, T = 0,7980 m^2/min, à partir de la pente qui est égale à Δs'/cycle = 0,3982 m, et le rapport S/S' = 1 de l'intercept à l'origine qui est égal à $(t/t')_0$ = 1.

Le tableau 6.5 rassemble les valeurs calculées, de la même façon que dans le cas No.1, de (s_p-s'), s'/s'_{ini} et s'_{ini} - s'. Les figures 6.12, 6.13 et 6.14 présentent respectivement les différentes interprétations suivant (s_p - s') vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et (s'_{ini}-s') vs logt/t' ainsi que les valeurs obtenues graphiquement pour les paramètres qui confirment assez bien les valeurs de pompage (T' = T et S' = S).

Exemple No.3: cas réel (S = S') (USDI Ground Water Manual, 1977, pp. 120)

Les rabattements de pompage présentés au tableau 6.6 sont relevés dans un puits d'observation situé à 100 pi (30,479 m) de l'axe central du puits de pompage. Le débit de pompage est de 162,9 pi^3/min (4,612 m^3/min). La représentation graphique de ces rabattements en fonction du temps est illustrée par la figure 6.15. La transmissivité et le coefficient d'emmagasinement calculés selon les équations (6.4) sont de 31,99 pi^2/min

(2,9717 m^2/min) et de 0,06 respectivement. La valeur de la diffusivité est ainsi égale à T/S = 533,1667 pi^2/min.

Les données de remontée présentées à la page 120 de l'USDI Ground Water Manual sont reportées dans le tableau 6.7. L'arrêt de la pompe se produit à $t = t_{arrêt}$ = 800 min. Le rabattement est alors égal à sa valeur maximale $s_{arrêt} = s'_{ini}$ = 1,86 pi (0,5669m). La figure 6.16 présente l'interprétation directe de s'(r, t) vs logt/t'. La transmissivité obtenue est de 31,95 pi^2/min. L'intercept à l'origine est égal à 1. Par conséquent le coefficient d'emmagasinement S' est égal à S et ne peut être déterminé par cette méthode. Cependant, l'interprétation suivant la nouvelle méthode « M.E.R.R. » (figure 6.18) nous donne la valeur de la transmissivité T = 32,16 pi^2/min, et le coefficient d'emmagasinement en remontée S' = 0,059. L'interprétation suivant la méthode « M.R.R.N. », (figure 6.19), nous donne la diffusivité T/S qui a pour valeur 533,68 pi^2/min. Comme, selon la figure 6.16, la transmissivité est de 31,99 pi^2/min, nous aurons S = 31,99/533,68 $\cong$ 0,06. Les différentes méthodes confirment donc que T' = T et S' = S.

Exemple No.4: cas réel (S $\neq$ S') (Forkasiewicz, 1972)

Le deuxième essai réel est réalisé sur l'aquifère d'Ivry-sur-Seine (Bassin de Paris, France). Le forage d'essai, d'un rayon r_w = 0,10 m, traverse complètement l'aquifère formé de sable d'épaisseur b = 60 m, confiné entre deux couches d'argile entre 540 et 600 m de profondeur. Dans toutes les directions, les limites latérales sont estimées à plus

de 100 km de distance. On peut donc considérer cet aquifère comme infini. Le pompage a duré 71 heures au débit constant Q = 200 m^3/h soit 55 l/s. Un ancien forage situé à 110 m de l'axe central du puits de pompage a pu tenir lieu de piézomètre. Les rabattements de pompage au piézomètre sont reportés au tableau 6.8. Le rabattement à l'arrêt du pompage qui représente le rabattement résiduel initial $s'_{ini.}$, soit à $t = t_{arrêt}$ = 71h15 min, est de $s_{arrêt}$ = 41,08 m au puits de pompage et de $s_{arrêt}$ = 16,77 m au piézomètre.

La figure 6.20 présente les courbes s vs logt. Les valeurs de T et S sont déterminées par la méthode de Cooper-Jacob à partir du prolongement de la branche log-linéaire repectivement de la pente: Δs/cycle = 5,934 m et de l'intercept à l'origine t_0 = 6,125 min. Des équations 6.4, on en déduit: T= 1,7136x10^{-3} m^2/s et S = 1,1710x10^{-4}.

Les rabattements résiduels sont reportés au tableau 6.9. La figure 6.21 donne la représentation usuelle s' vs logt/t'. La pente de la partie log-linéaire est de $\Delta s'$/cycle = 5,95m et l'intercept à l'origine de son prolongement est $(t/t')_0$ = 1,25. De l'équation 6.10, on en déduit: T = 1,7090 10^{-3} m^2/s et S/S' = 1,25. Ce rapport supérieur à 1 peut être relié à l'ampleur du rabattement (41,08 m au puits à 110 m du piézomètre) et des contraintes effectives générées qui ont pu créer une surconsolidation de l'aquifère.

Les figures 6.22 et 6.23 illustrent respectivement l'application de la méthode des rabattements résiduels normalisés « MRRN » et la méthode des écarts de rabattements résiduels « MERR » à l'essai de remontée d'Ivry-sur-Seine. Les résultats sont reportés au

tableau 6.10 sur lequel on trouve également les résultats des interprétations de la courbe de pompage et de remontée par les méthodes classique de Cooper-Jacob. Tel que l'on peut le constater les résultats sont comparables. De la remontée on obtient $T'=T \cong 1,71$ m^2/s , $S' = 1,03\ 10^{-4}$ et $S = 1,25\ 10^{-4}$. Du pompage on obtient $T \cong 1,71\ m^2/s$, $S = 1,17\ 10^{-4}$.

6.4 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

La figure 6.24 résume les différentes méthodes d'interprétation des données de remontée lorsque l'on se trouve dans les hypothèses présentées à la section 6.2. La méthode de Ballukraya et Sharma (1991) ainsi que celle de Banton et Bangoy (1996), discutées au chapitre 3, ne figurent pas parmi les méthodes citées dans l'organigramme. Ces méthodes ne nous permettent pas de trouver la valeur de S' ou de vérifier la valeur de S lorsque ces dernières sont différentes. En effet, l'hypothèse principale de chacune des deux méthodes est le cas particulier où S = S' (paragraphe 3.4.1 de la section 3.4 du chapitre 3). En plus la méthode de Ballukraya-Sharma est une méthode non graphique où le calcul de S se fait à chaque point de mesure. Il y aura donc autant de valeurs pour S que de points de mesure.

Tableau 6.1: Essai de pompage (Cas synthétique, r = 2m)

t(s)	s(m)	t(s)	s(m)
0,01	0,008	9	1,293
0,02	0,043	10	1,318
0,03	0,081	20	1,483
0,04	0,117	30	1,580
0,05	0,149	40	1,649
0,06	0,178	50	1,702
0,07	0,204	60	1,746
0,08	0,228	70	1,782
0,09	0,249	80	1,814
0,10	0,269	90	1,842
0,15	0,350	100	1,867
0,20	0,410	200	2,033
0,30	0,498	400	2,198
0,40	0,563	500	2,252
0,50	0,613	600	2,295
0,60	0,655	700	2,332
0,70	0,690	800	2,364
0,80	0,721	900	2,392
0,90	0,749	1 000	2,417
1,00	0,773	2 000	2,583
1,50	0,868	3 000	2,679
2,00	0,936	4 000	2,748
3,00	1,032	5 000	2,801
4,00	1,100	6 000	2,845
5,00	1,153	7 000	2,882
6,00	1,197	8 000	2,914
7,00	1,233	9 000	2,942
8,00	1,265	10 000	2,967

Tableau 6.2: Essai de remontée (Cas synthétique, r = 2m, S = S' = 2.25E-4)
t -arrêt = 3000 s, et s-arrêt = 2.679m

t'(s)	t(s)	t/t'	s'(m)	s'/sini	s'ini-s'	sp(m)	sp-s' (m)
0,01	3000,01	300 001	2,671	0,997	0,008	2,679	0,008
0,02	3000,02	150 001	2,637	0,984	0,043	2,679	0,043
0,03	3000,03	100 001	2,598	0,970	0,081	2,679	0,081
0,04	3000,04	75 001	2,562	0,956	0,117	2,679	0,117
0,05	3000,05	60 001	2,530	0,944	0,149	2,679	0,149
0,06	3000,06	50 001	2,501	0,934	0,178	2,679	0,178
0,07	3000,07	42 858	2,475	0,924	0,204	2,679	0,204
0,08	3000,08	37 501	2,452	0,915	0,228	2,679	0,228
0,09	3000,09	33 334	2,430	0,907	0,249	2,679	0,249
0,1	3000,1	30 001	2,410	0,900	0,269	2,679	0,269
0,15	3000,15	20 001	2,330	0,870	0,350	2,679	0,350
0,2	3000,2	15 001 -	2,270	0,847	0,410	2,679	0,410
0,3	3000,3	10 001	2,181	0,814	0,498	2,679	0,498
0,4	3000,4	7 501,0	2,117	0,790	0,562	2,679	0,563
0,5	3000,5	6 001,0	2,066	0,771	0,613	2,679	0,613
0,6	3000,6	5 001,0	2,025	0,756	0,655	2,679	0,655
0,7	3000,7	4 286,7	1,989	0,742	0,690	2,679	0,690
0,8	3000,8	3 751,0	1,958	0,731	0,721	2,679	0,721
0,9	3000,9	3 334,3	1,931	0,721	0,749	2,679	0,749
1	3001	3 001,0	1,906	0,711	0,773	2,679	0,773
1,5	3001,5	2 001,0	1,811	0,676	0,868	2,680	0,868
2	3002	1 501,0	1,743	0,651	0,936	2,680	0,936
3	3003	1 001,0	1,648	0,615	1,032	2,680	1,032
4	3004	751,0	1,579	0,589	1,100	2,680	1,100
5	3005	601,0	1,526	0,570	1,153	2,680	1,153
6	3006	501,0	1,483	0,554	1,196	2,680	1,197
7	3007	429,6	1,447	0,540	1,233	2,680	1,233
8	3008	376,0	1,415	0,528	1,264	2,680	1,265
9	3009	334,3	1,387	0,518	1,292	2,680	1,293
10	3010	301,0	1,362	0,508	1,317	2,680	1,318
20	3020	151,0	1,198	0,447	1,482	2,681	1,483
30	3030	101,0	1,102	0,411	1,578	2,682	1,580
40	3040	76,0	1,034	0,386	1,646	2,683	1,649
50	3050	61,0	0,981	0,366	1,698	2,683	1,702
60	3060	51,0	0,939	0,350	1,741	2,684	1,746
70	3070	43,9	0,903	0,337	1,777	2,685	1,782
80	3080	38,5	0,871	0,325	1,808	2,686	1,814
90	3090	34,3	0,844	0,315	1,835	2,686	1,842
100	3100	31,0	0,820	0,306	1,860	2,687	1,867
200	3200	16,0	0,662	0,247	2,018	2,695	2,033
300	3300	11,0	0,572	0,214	2,107	2,702	2,130
400	3400	8,5	0,511	0,191	2,169	2,709	2,198
500	3500	7,0	0,465	0,173	2,215	2,716	2,252
600	3600	6,0	0,428	0,160	2,252	2,723	2,295
800	3800	4,8	0,372	0,139	2,307	2,736	2,364
1000	4000	4,0	0,331	0,124	2,348	2,748	2,417
2000	5000	2,5	0,219	0,082	2,461	2,801	2,583
3000	6000	2,0	0,165	0,062	2,514	2,845	2,679
7000	10000	1,4	0,085	0,032	2,594	2,967	2,882

Tableau 6.3: Essai de remontée (Cas synthétique, r = 2m, S= 2S'=2.25E-4)
t-arrêt = 3000s et s-arrêt = 2.679m

t'(s)	t(s)	t/t'	s'(m)	sp(m)	sp-s'(m)	s'/sini	s'ini-s' (m)
0,01	3 000,0	300 001,0	2,637	2,679	0,043	0,984	0,043
0,02	3 000,0	150 001,0	2,562	2,679	0,117	0,956	0,117
0,03	3 000,0	100 001,0	2,501	2,679	0,178	0,934	0,178
0,04	3 000,0	75 001,00	2,452	2,679	0,228	0,915	0,228
0,05	3 000,1	60 001,00	2,410	2,679	0,269	0,900	0,269
0,06	3 000,1	50 001,00	2,375	2,679	0,305	0,886	0,305
0,07	3 000,1	42 858,14	2,344	2,679	0,336	0,875	0,336
0,08	3 000,1	37 501,00	2,316	2,679	0,363	0,865	0,363
0,09	3 000,1	33 334,33	2,292	2,679	0,388	0,855	0,388
0,10	3 000,1	30 001,00	2,269	2,679	0,410	0,847	0,410
0,15	3 000,2	20 001,00	2,181	2,679	0,498	0,814	0,498
0,20	3 000,2	15 001,00	2,117	2,679	0,563	0,790	0,562
0,30	3 000,3	10 001,00	2,024	2,679	0,655	0,756	0,655
0,40	3 000,4	7 501,00	1,958	2,679	0,721	0,731	0,721
0,50	3 000,5	6 001,00	1,906	2,679	0,773	0,711	0,773
0,60	3 000,6	5 001,00	1,863	2,679	0,816	0,695	0,816
0,70	3 000,7	4 286,71	1,827	2,679	0,852	0,682	0,852
0,80	3 000,8	3 751,00	1,796	2,679	0,884	0,670	0,883
0,90	3 000,9	3 334,33	1,768	2,679	0,911	0,660	0,911
1,00	3 001,0	3 001,00	1,743	2,679	0,936	0,651	0,936
1,50	3 001,5	2 001,00	1,647	2,680	1,032	0,615	1,032
2,00	3 002,0	1 501,00	1,579	2,680	1,100	0,589	1,100
3,00	3 003,0	1 001,00	1,483	2,680	1,197	0,553	1,196
4,00	3 004,0	751,00	1,415	2,680	1,265	0,528	1,265
5,00	3 005,0	601,00	1,362	2,680	1,318	0,508	1,318
6,00	3 006,0	501,00	1,318	2,680	1,362	0,492	1,361
7,00	3 007,0	429,57	1,282	2,680	1,398	0,478	1,398
8,00	3 008,0	376,00	1,250	2,680	1,430	0,466	1,430
9,00	3 009,0	334,33	1,222	2,680	1,458	0,456	1,458
10,00	3 010,0	301,00	1,197	2,680	1,483	0,447	1,483
20,00	3 020,0	151,00	1,032	2,681	1,649	0,385	1,647
30,00	3 030,0	101,00	0,936	2,682	1,746	0,349	1,743
40,00	3 040,0	76,00	0,868	2,683	1,814	0,324	1,811
50,00	3 050,0	61,00	0,816	2,683	1,867	0,305	1,864
60,00	3 060,0	51,00	0,773	2,684	1,911	0,289	1,906
70,00	3 070,0	43,86	0,737	2,685	1,948	0,275	1,942
80,00	3 080,0	38,50	0,706	2,686	1,980	0,264	1,973
90,00	3 090,0	34,33	0,679	2,686	2,008	0,253	2,001
100,00	3 100,0	31,00	0,654	2,687	2,033	0,244	2,025
200,00	3 200,0	16,00	0,496	2,695	2,198	0,185	2,183
300,00	3 300,0	11,00	0,407	2,702	2,295	0,152	2,272
400,00	3 400,0	8,50	0,345	2,709	2,364	0,129	2,334
500,00	3 500,0	7,00	0,299	2,716	2,417	0,112	2,380
600,00	3 600,0	6,00	0,262	2,723	2,461	0,098	2,417
700,00	3 700,0	5,29	0,232	2,729	2,497	0,087	2,447
800,00	3 800,0	4,75	0,207	2,736	2,529	0,077	2,473
900,00	3 900,0	4,33	0,185	2,742	2,557	0,069	2,495
1 000,00	4 000,0	4,00	0,165	2,748	2,583	0,062	2,514
2 000,00	5 000,0	2,50	0,053	2,801	2,748	0,020	2,626
3 000,00	6 000,0	2,00	0.000	2,845	2,845	0.000	2,679

Tableau 6.4: Essai de pompage (TODD, 1980, pp.127)

t(min)	s(m)
1.0	0.20
1.5	0.27
2.0	0.30
2.5	0.34
3.0	0.37
4.0	0.41
5.0	0.45
6.0	0.48
8.0	0.53
10	0.57
12	0.60
14	0.63
18	0.67
24	0.72
30	0.76
40	0.81
50	0.85
60	0.90
80	0.93
100	0.96
120	1.00
150	1.04
180	1.07
210	1.10
240	1.12

Tableau 6.5: Essai de remontée (Todd, 1980, pp. 134)

t'(min)	t(min)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp(m)	sp-s'(m)
1	241	241,00	0,89	0,80	0,23	1,12	0,23
2	242	121,00	0,81	0,73	0,31	1,12	0,31
3	243	81,00	0,76	0,68	0,36	1,12	0,36
5	245	49,00	0,68	0,61	0,44	1,12	0,44
7	247	35,29	0,64	0,57	0,48	1,13	0,49
10	250	25,00	0,56	0,50	0,56	1,13	0,57
15	255	17,00	0,49	0,44	0,63	1,13	0,64
20	260	13,00	0,45	0,40	0,67	1,13	0,68
30	270	9,00	0,38	0,34	0,74	1,14	0,76
40	280	7,00	0,34	0,30	0,78	1,15	0,81
60	300	5,00	0,28	0,25	0,84	1,16	0,88
80	320	4,00	0,24	0,22	0,88	1,17	0,93
100	340	3,40	0,21	0,19	0,91	1,18	0,97
140	380	2,71	0,17	0,15	0,95	1,20	1,03
180	420	2,33	0,14	0,13	0,98	1,22	1,08

Tableau 6.6: Essai de pompage (USDI, 1977, pp.119)

t(min)	s(pi)
5	0,08
10	0,22
15	0,33
20	0,41
25	0,50
30	0,55
40	0,66
50	0,73
60	0,80
70	0,86
80	0,92
90	0,96
100	1,00
110	1,04
120	1,07
180	1,24
240	1,35
300	1,45
360	1,52
420	1,59
480	1,65
540	1,71
600	1,73
660	1,77
720	1,81
800	1,86

Tableau 6.7: Essai de remontée (USDI, 1977, pp. 120)

t(min)	t'(min)	t/t'	s'(pi)	s'/s'ini	s'ini -s'	sp (pi)	sp - s'
800	0		1,86				
805	5	161,00	1,78	0,96	0,08	1,85	0,07
810	10	81,00	1,64	0,88	0,22	1,85	0,21
815	15	54,33	1,53	0,82	0,33	1,85	0,32
820	20	41,00	1,45	0,78	0,41	1,85	0,40
825	25	33,00	1,37	0,74	0,49	1,86	0,49
830	30	27,67	1,32	0,71	0,54	1,86	0,54
840	40	21,00	1,22	0,66	0,64	1,86	0,64
850	50	17,00	1,15	0,62	0,71	1,87	0,72
860	60	14,33	1,09	0,59	0,77	1,87	0,78
870	70	12,43	1,03	0,55	0,83	1,88	0,85
880	80	11,00	0,97	0,52	0,89	1,88	0,91
890	90	9,89	0,94	0,51	0,92	1,89	0,95
900	100	9,00	0,90	0,48	0,96	1,89	0,99
910	110	8,27	0,87	0,47	0,99	1,90	1,03
920	120	7,67	0,85	0,46	1,01	1,90	1,05
980	180	5,44	0,70	0,38	1,16	1,93	1,23
1040	240	4,33	0,61	0,33	1,25	1,95	1,34
1100	300	3,67	0,54	0,29	1,32	1,97	1,43
1160	360	3,22	0,49	0,26	1,37	2,00	1,51
1220	420	2,90	0,46	0,25	1,40	2,02	1,56
1280	480	2,67	0,40	0,22	1,46	2,04	1,64
1340	540	2,48	0,36	0,19	1,50	2,05	1,69
1400	600	2,33	0,36	0,19	1,50	2,07	1,71
1460	660	2,21	0,34	0,18	1,52	2,09	1,75
1520	720	2,11	0,31	0,17	1,55	2,10	1,79
1600	800	2,00	0,29	0,16	1,57	2,13	1,84

Tableau 6.8: essai de pompage à Ivry-sur-seine (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre situé à r = 110 m

t(min)	s(m)
0	0
1	0,02
2	0,05
3	0,19
4	0,48
6	1,25
8	1,86
10	2,34
12	2,72
15	3,21
18	3,58
24	4,13
30	4,58
40	5,15
50	5,69
60	6,09
80	6,75
110	7,51
140	8,09
180	8,72
240	9,62
300	9,92
360	10,42
420	10,87
540	11,55
660	12,02
900	12,82
1140	13,27
1500	14,42
1860	14,62
2220	14,89
2700	15,37
3180	16,12
3660	16,82
4140	16,67
4260	16,72
4275	16,77

Tableau 6.9: essai de remontée à Ivry-sur-seine (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre situé à r = 110 m

t'(min)	t(min)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	(s'ini-s')
0	4275		16,77	1	0
1	4276	4 276,000	16,77	1	0
2	4277	2 138,500	16,43	0,980	0,34
3	4278	1 426,000	16,05	0,957	0,72
4	4279	1 069,750	15,7	0,936	1,07
6	4281	713,500	15,08	0,899	1,69
8	4283	535,375	14,58	0,869	2,19
10	4285	428,500	14,22	0,848	2,55
12	4287	357,250	13,87	0,827	2,9
15	4290	286,000	13,83	0,825	2,94
18	4293	238,500	13,82	0,824	2,95
24	4299	179,125	12,68	0,756	4,09
30	4305	143,500	12,1	0,722	4,67
40	4315	107,875	11,6	0,692	5,17
50	4325	86,500	11	0,656	5,77
60	4335	72,250	10,6	0,632	6,17
80	4355	54,438	9,94	0,593	6,83
110	4385	39,864	9,15	0,546	7,62
165	4440	26,909	8,19	0,488	8,58
225	4500	20,000	7,42	0,442	9,35
345	4620	13,391	6,37	0,380	10,4
465	4740	10,194	6,12	0,365	10,65
585	4860	8,308	5,12	0,305	11,65
705	4980	7,064	4,52	0,270	12,25
825	5100	6,182	4,07	0,243	12,7
1065	5340	5,014	3,71	0,221	13,06
1425	5700	4,000	3,02	0,180	13,75
1665	5940	3,568	2,72	0,162	14,05
2385	6660	2,792	2,07	0,123	14,7
2865	7140	2,492	1,82	0,109	14,95
3345	7620	2,278	1,42	0,085	15,35
3825	8100	2,118	1,17	0,070	15,6
4305	8580	1,993	1,17	0,070	15,6

Tableau 6.10 : valeurs des paramètres T, S et S' déterminées par la phase de pompage et de remontée de l'exemple No.2 (Ivry-sur-Seine) au piézomètre P11 (r_r = 110 m)

Méthode utilisée	Pente Intercept	Paramètres de l'aquifère (T, S et S')
PHASE DE POMPAGE		
Méthode de Cooper-Jacob s vs logt	pente: Δs/cycle = 5,934 m intercept: t_0 = 6,125 min	T = 1,7136 10^{-3} m^2/s S = 1,1710 10^{-4}
PHASE DE REMONTÉE		
s' vs log(t/t')	pente: $\Delta s'$/cycle = 5,95 m intercept: $(t/t')_0$ = 1,25	T = 1,7090 10^{-3} m^2/s S/S' = 1,25
s'/s'_{ini} vs log(t/t')	pente: $\Delta(s'/s'_{ini})$ /cycle = 0,3551 intercept: $(t/t')_0$ = 1,21	T/S = 13,7285 m^2/s S/S' = 1,21
(s_{ini} - s') vs log(t/t')	pente: $\Delta(s_{ini} - s')$/cycle = - 5,955 m intercept: $(t/t')_0$ = 788,854	T = 1,7075 10^{-3} m^2/s S' = 1,0324 10^{-4}

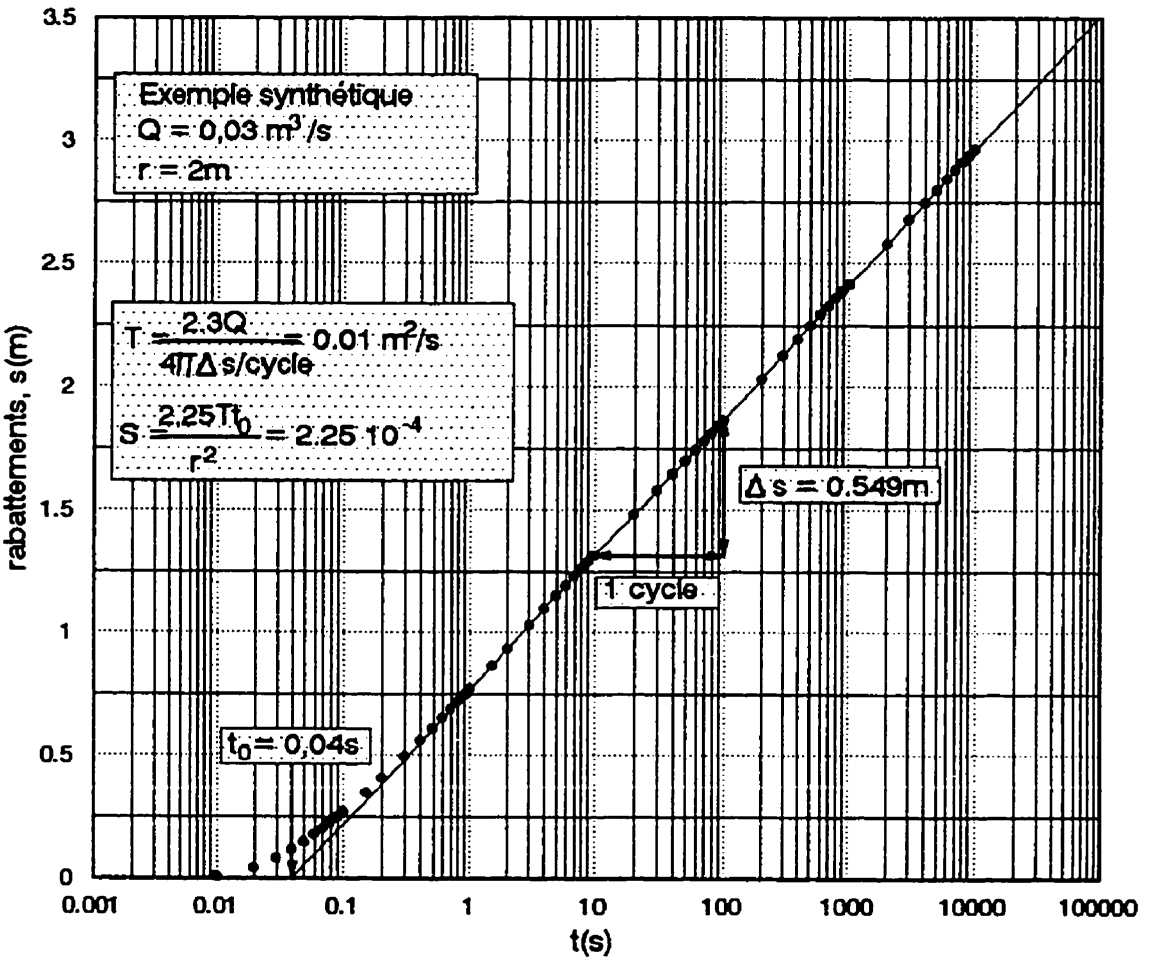


Figure 6.1: rabattements en fonction du temps

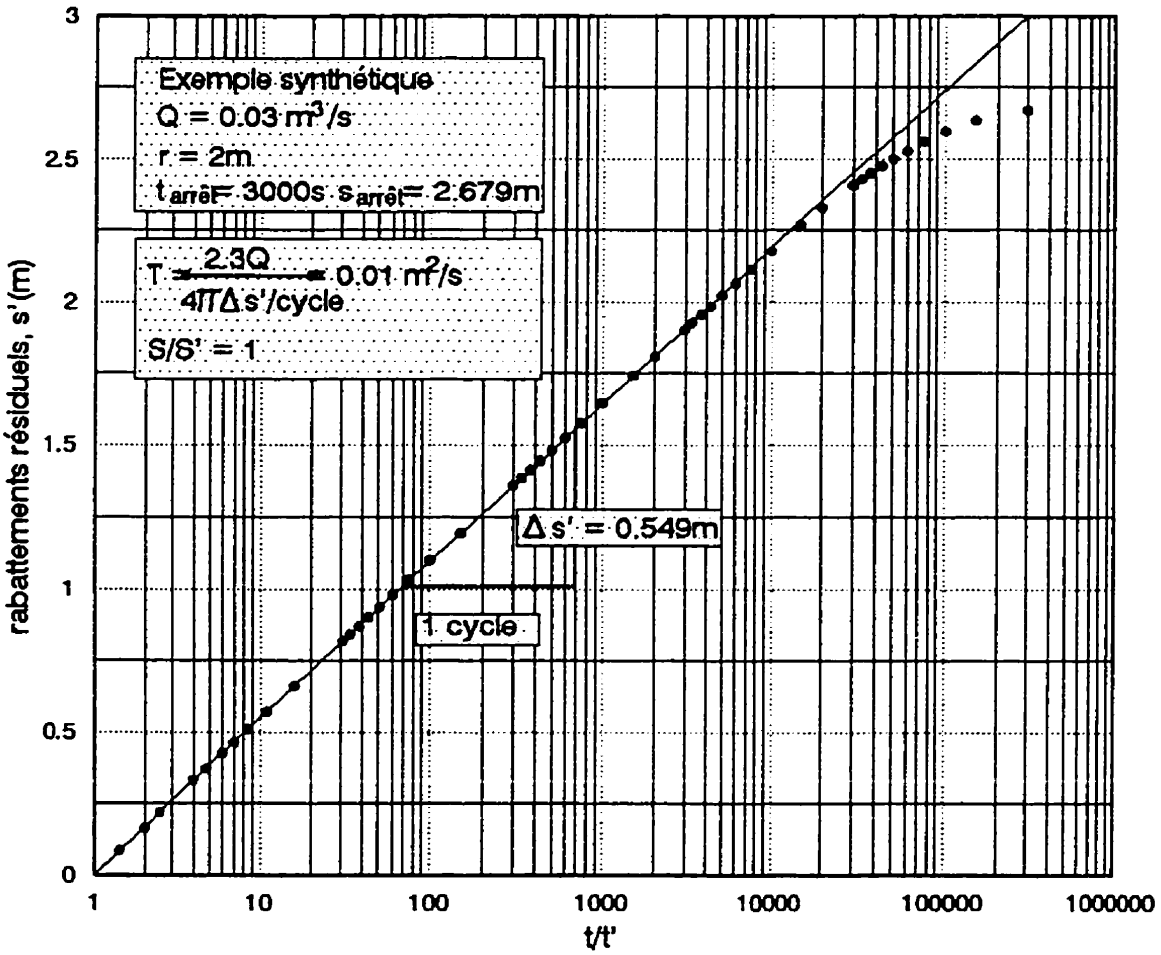


Figure 6.2: rabattements résiduels en fonction de t/t'

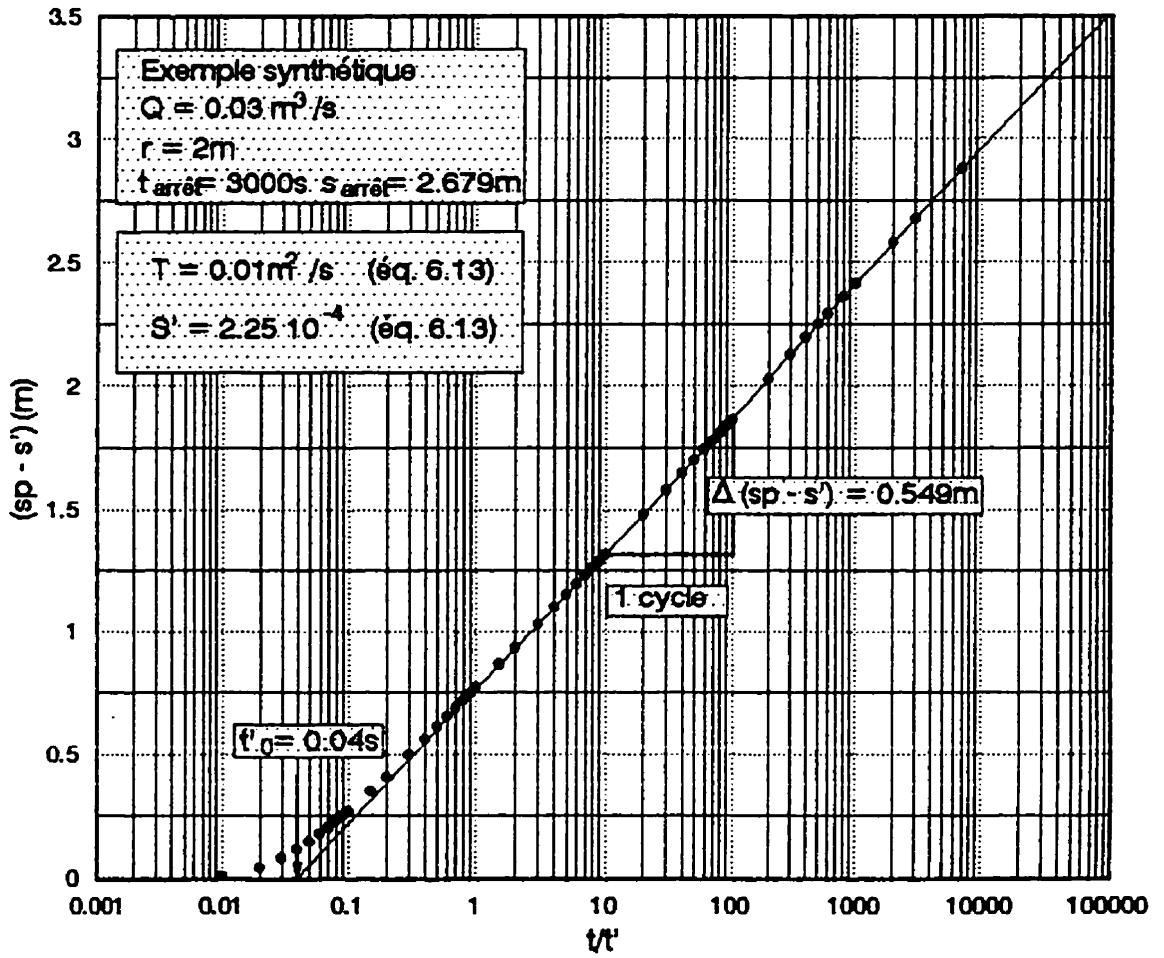


Figure 6.3: (sp - s') en fonction de t/t'

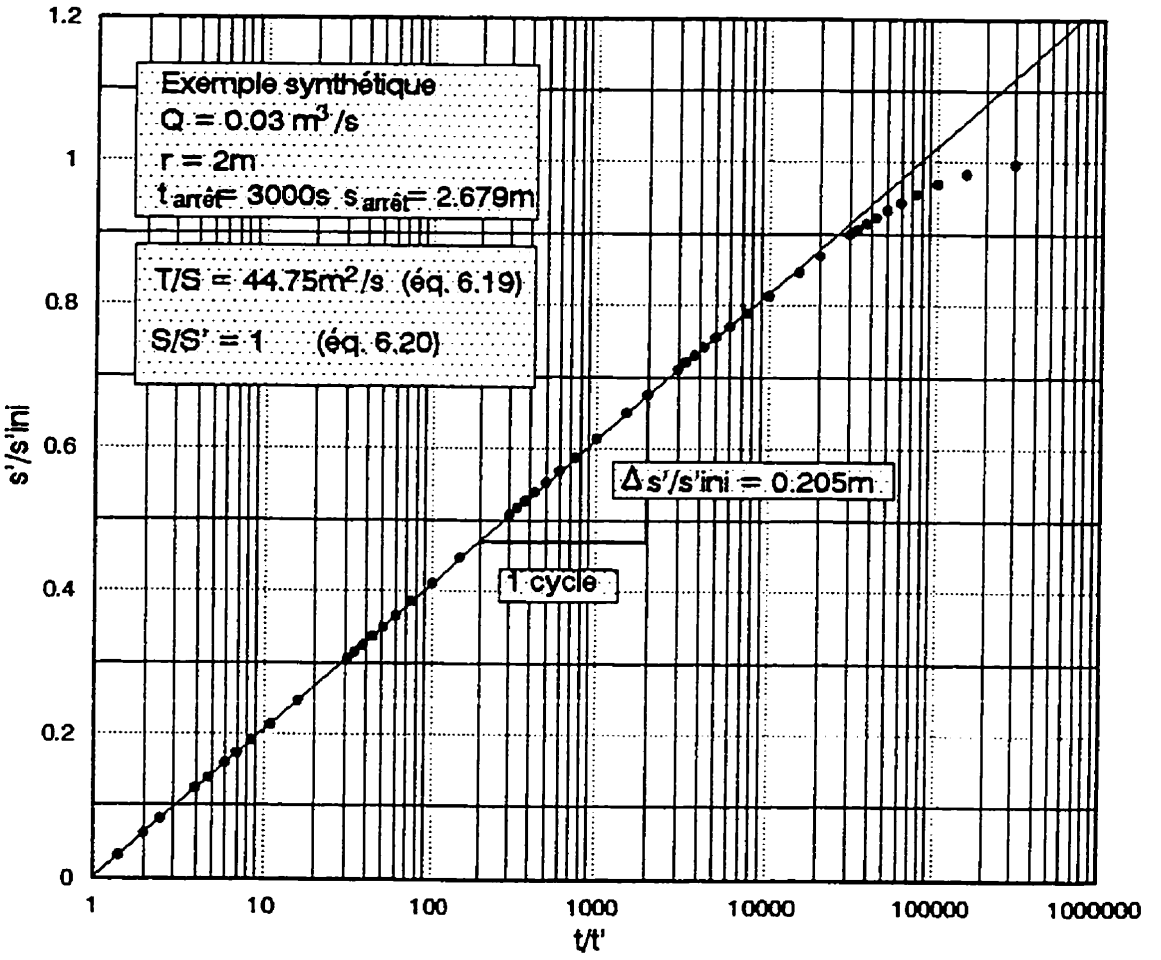


Figure 6.4: s'/s'ini en fonction de t/t'

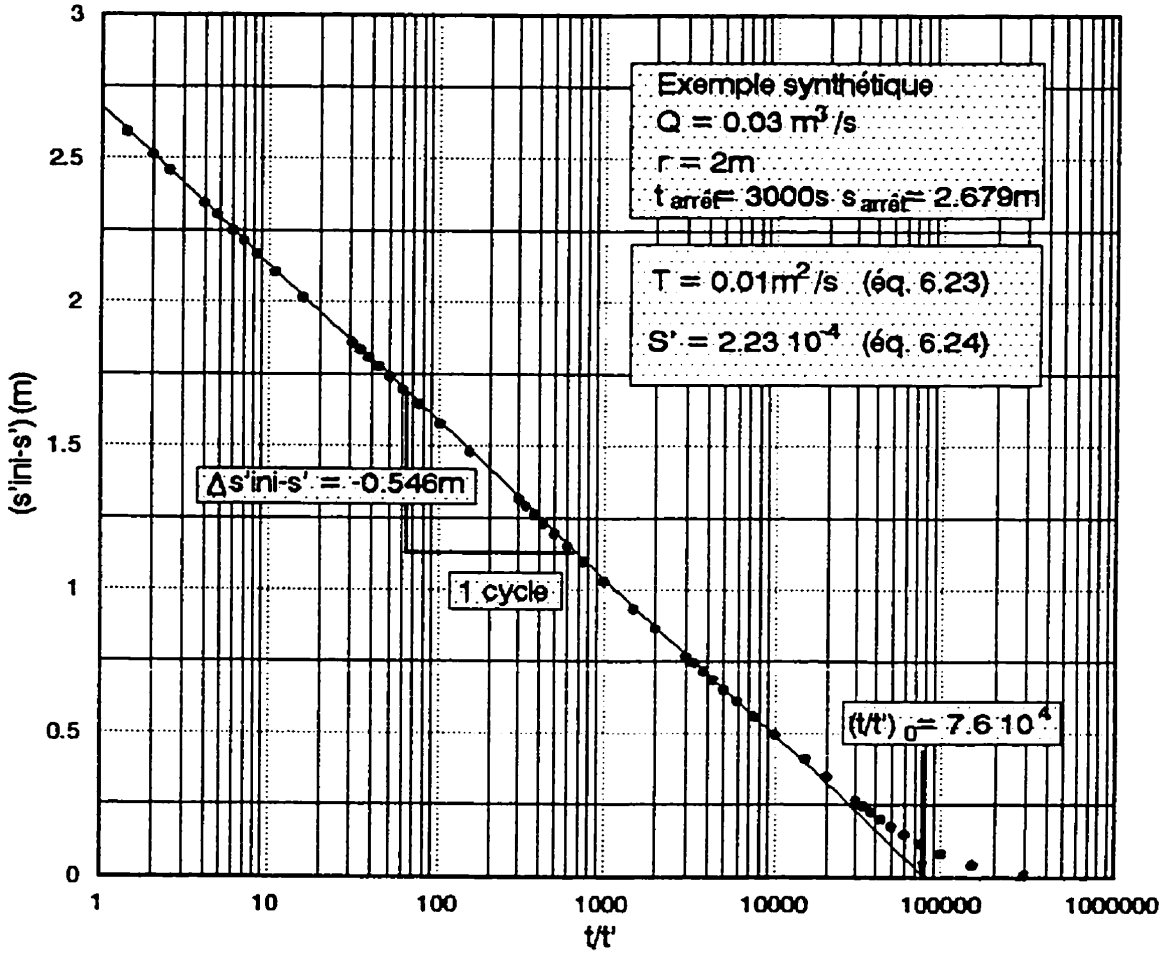


Figure 6.5: s'ini-s' en fonction de t/t'

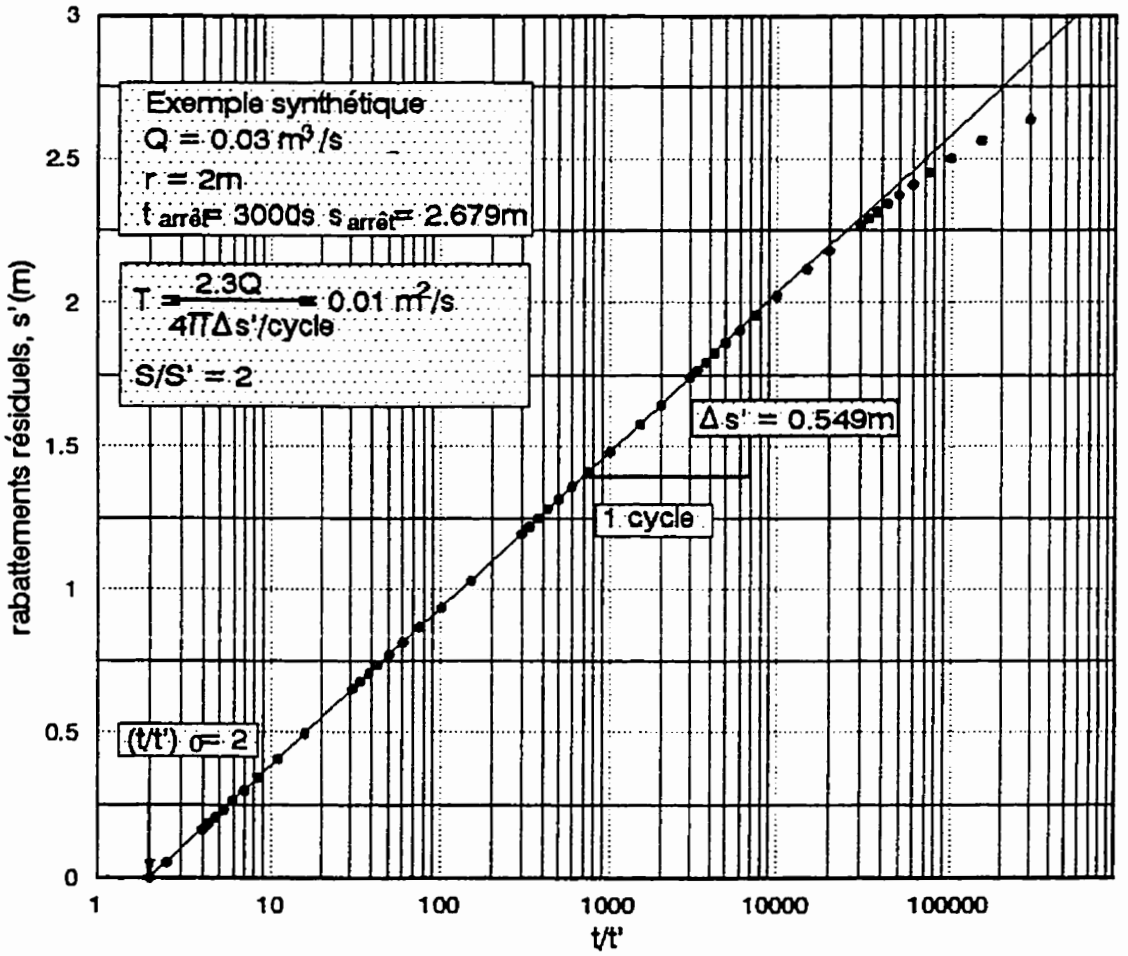


Figure 6.6: rabattements résiduels en fonction de t/t'

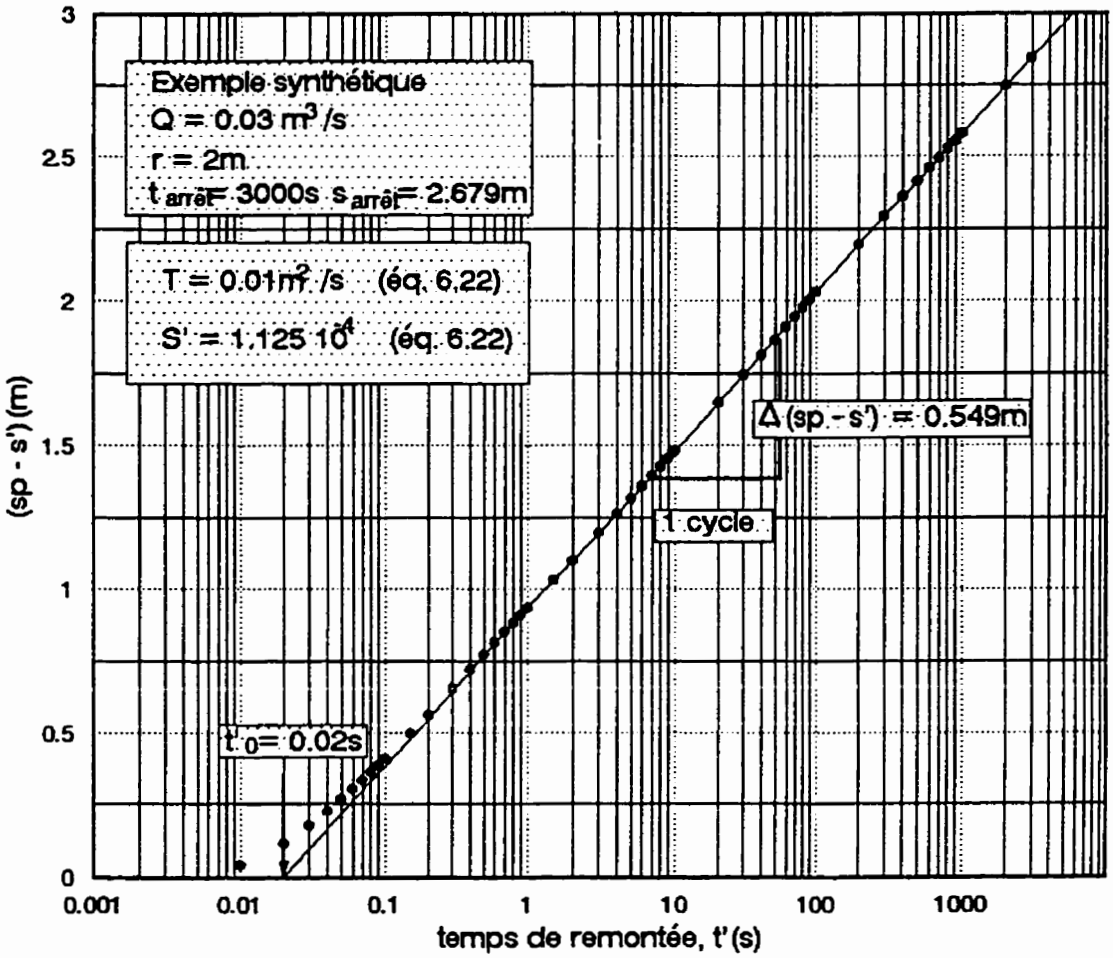


Figure 6.7: (sp - s') en fonction de t'

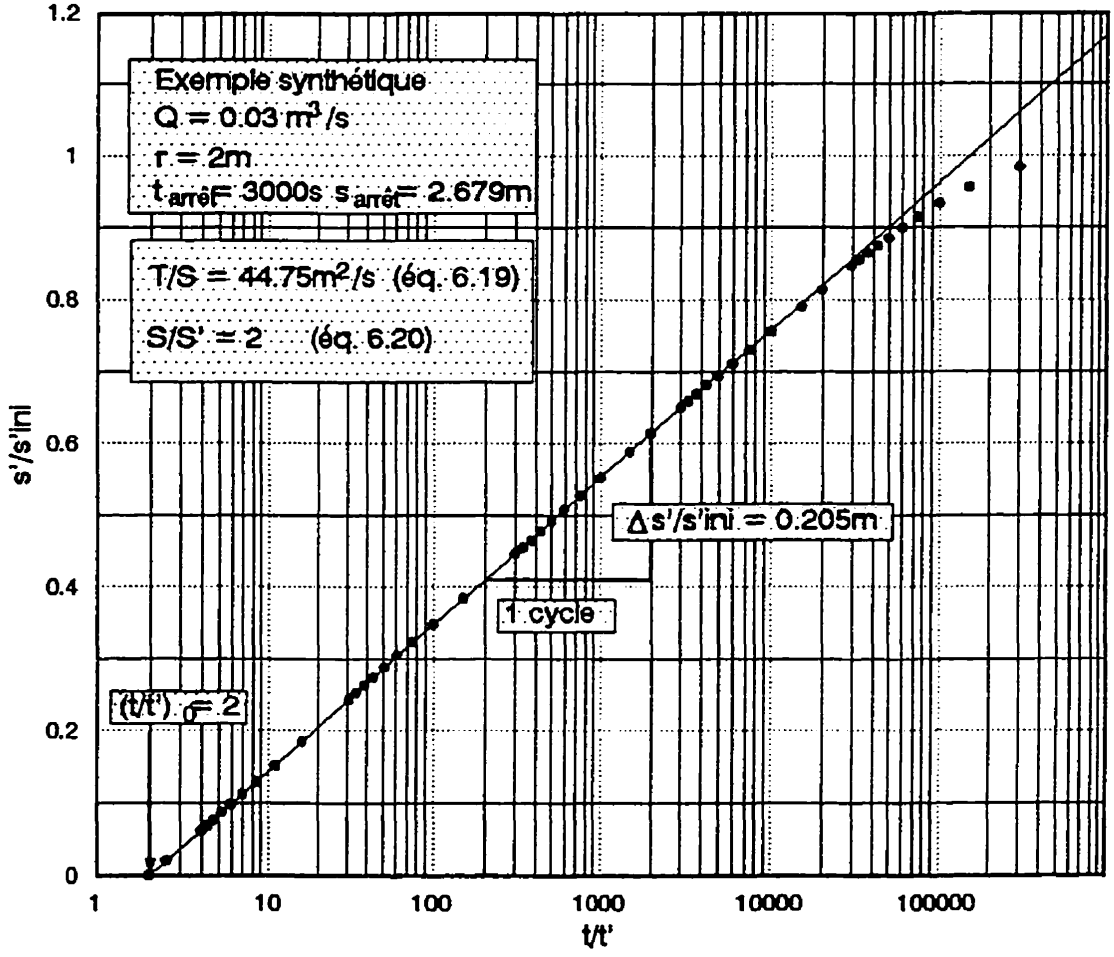


Figure 6.8: s'/s'ini en fonction de t/t'

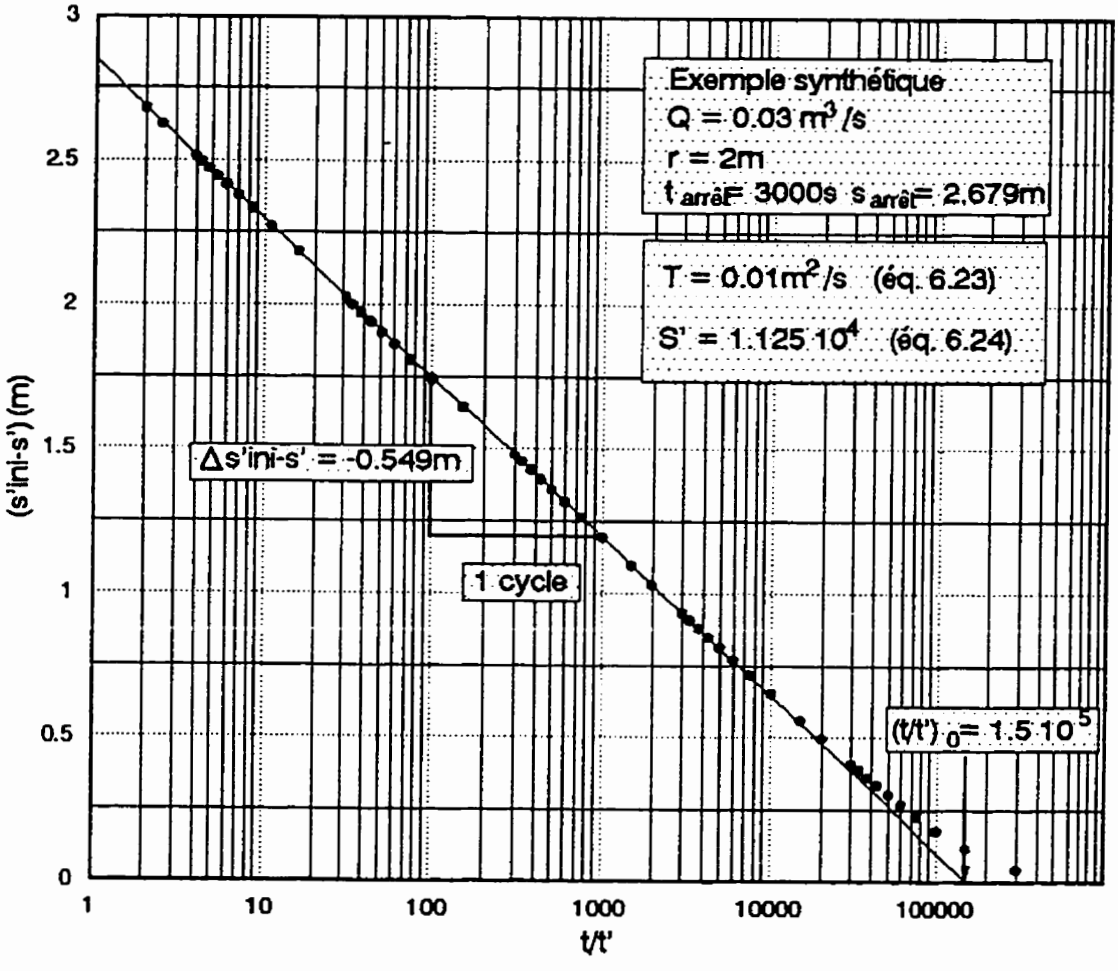


Figure 6.9: s'ini-s' en fonction de t/t'

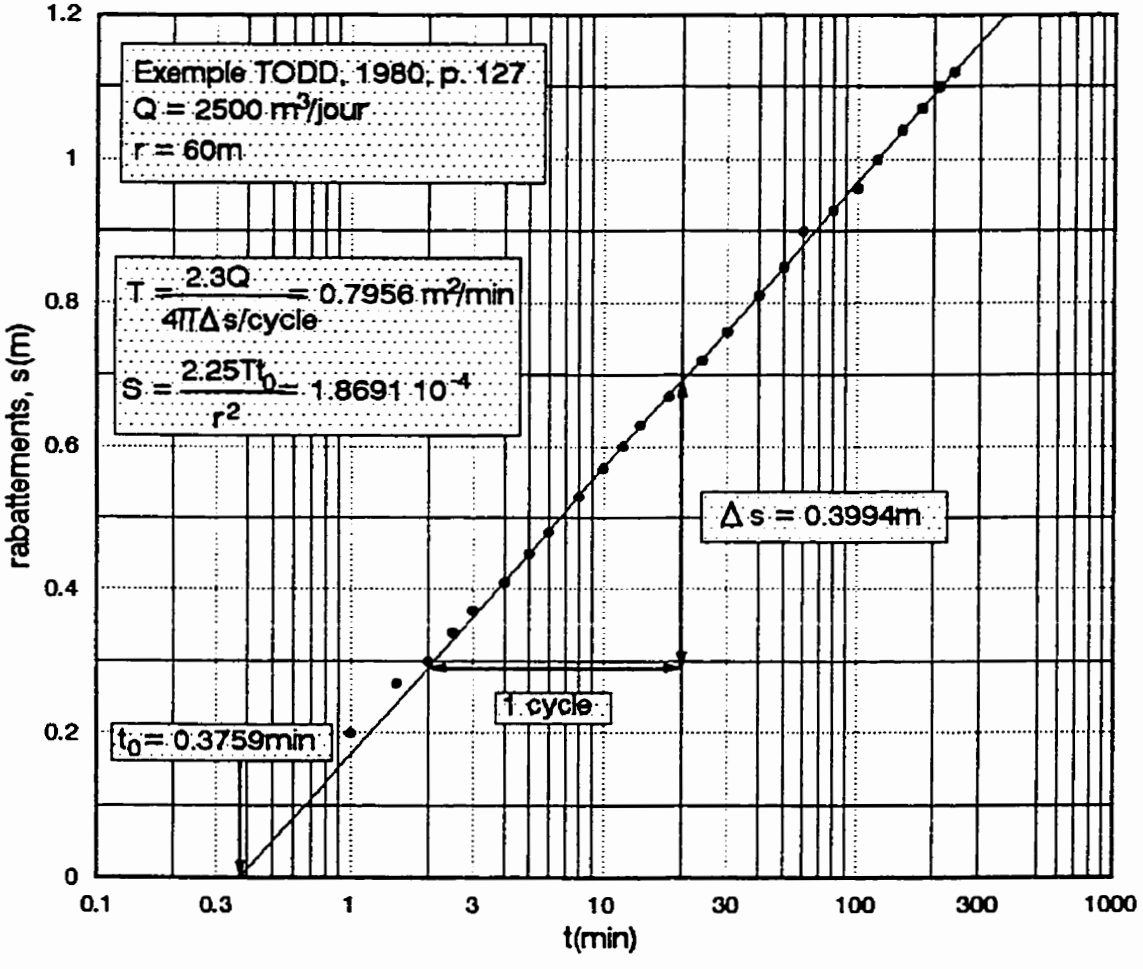


Figure 6.10: rabattements en fonction du temps

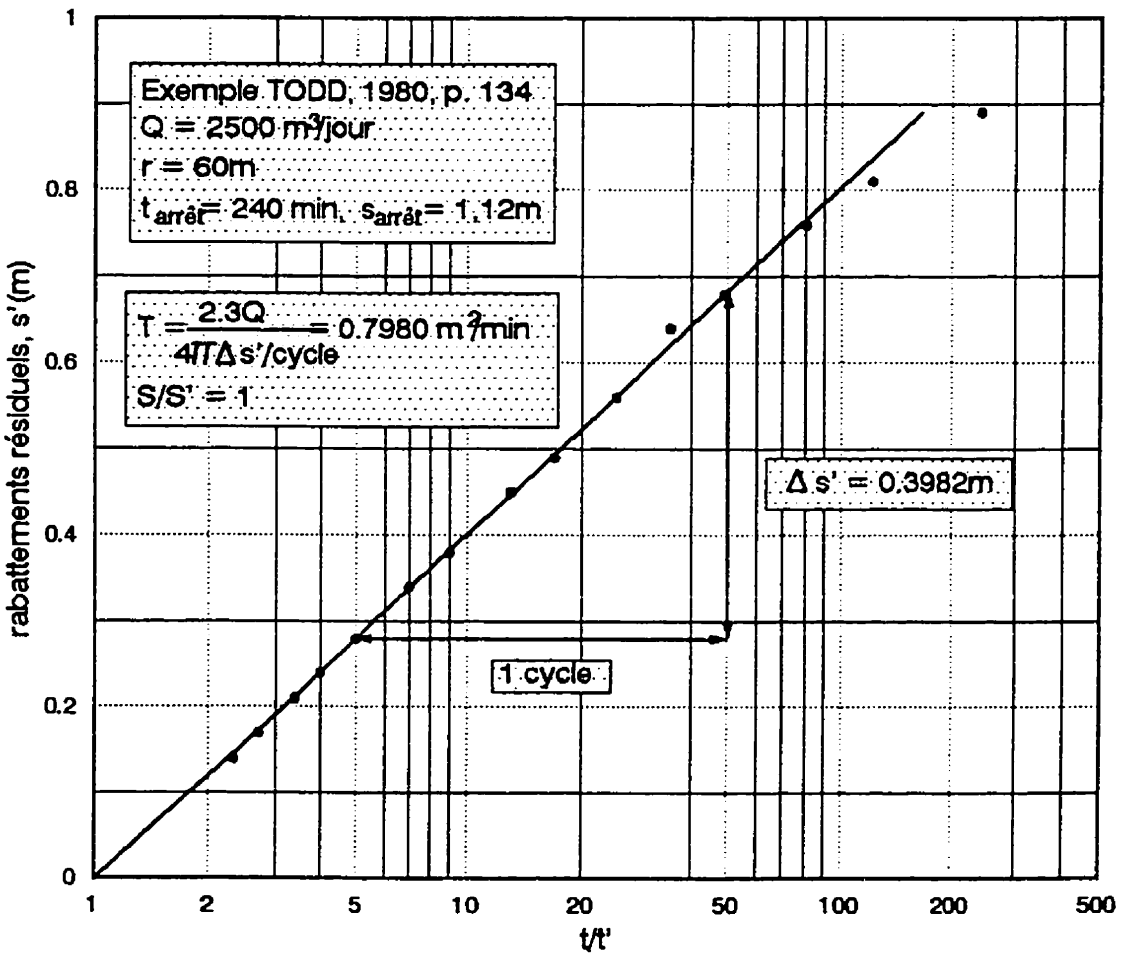


Figure 6.11: rabattements résiduels en fonction de t/t'

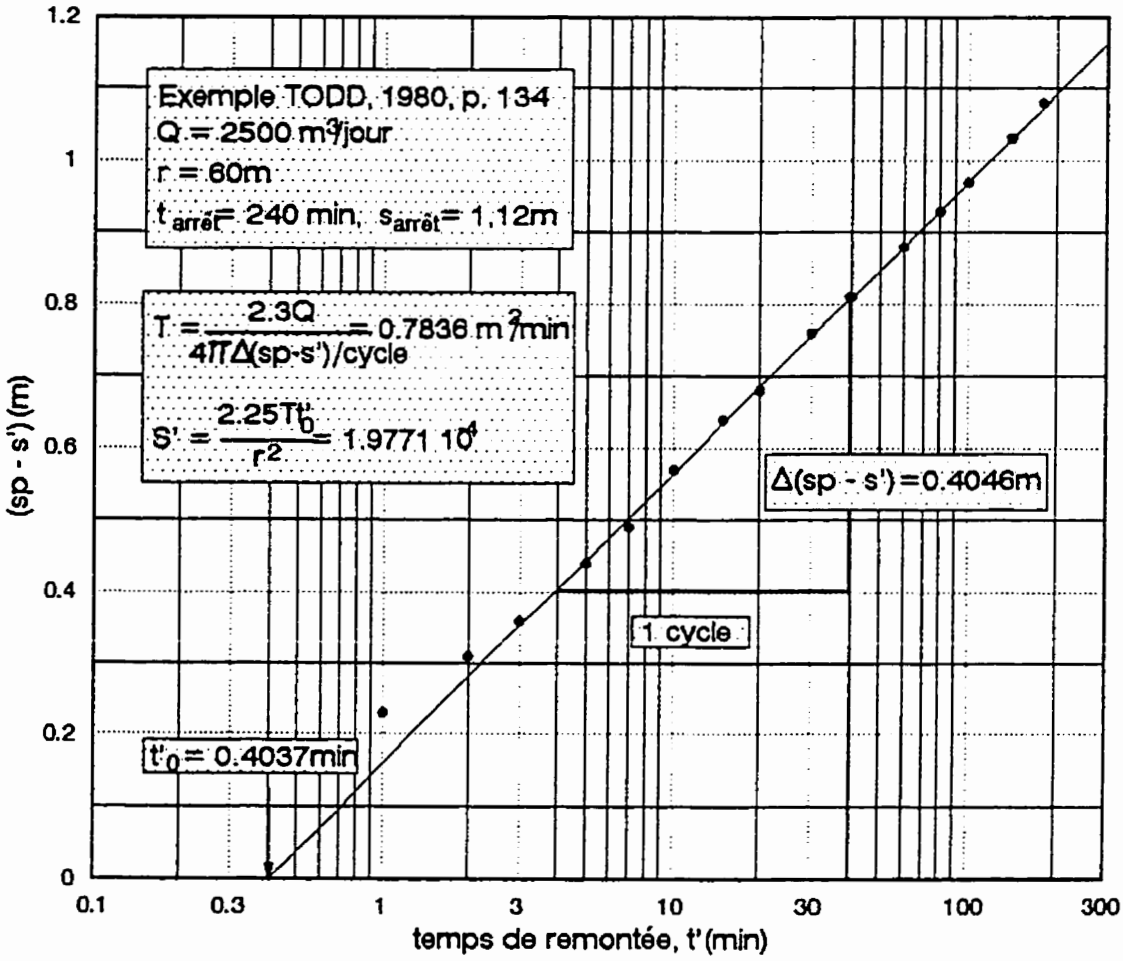


Figure 6.12: (sp - s') en fonction de t'

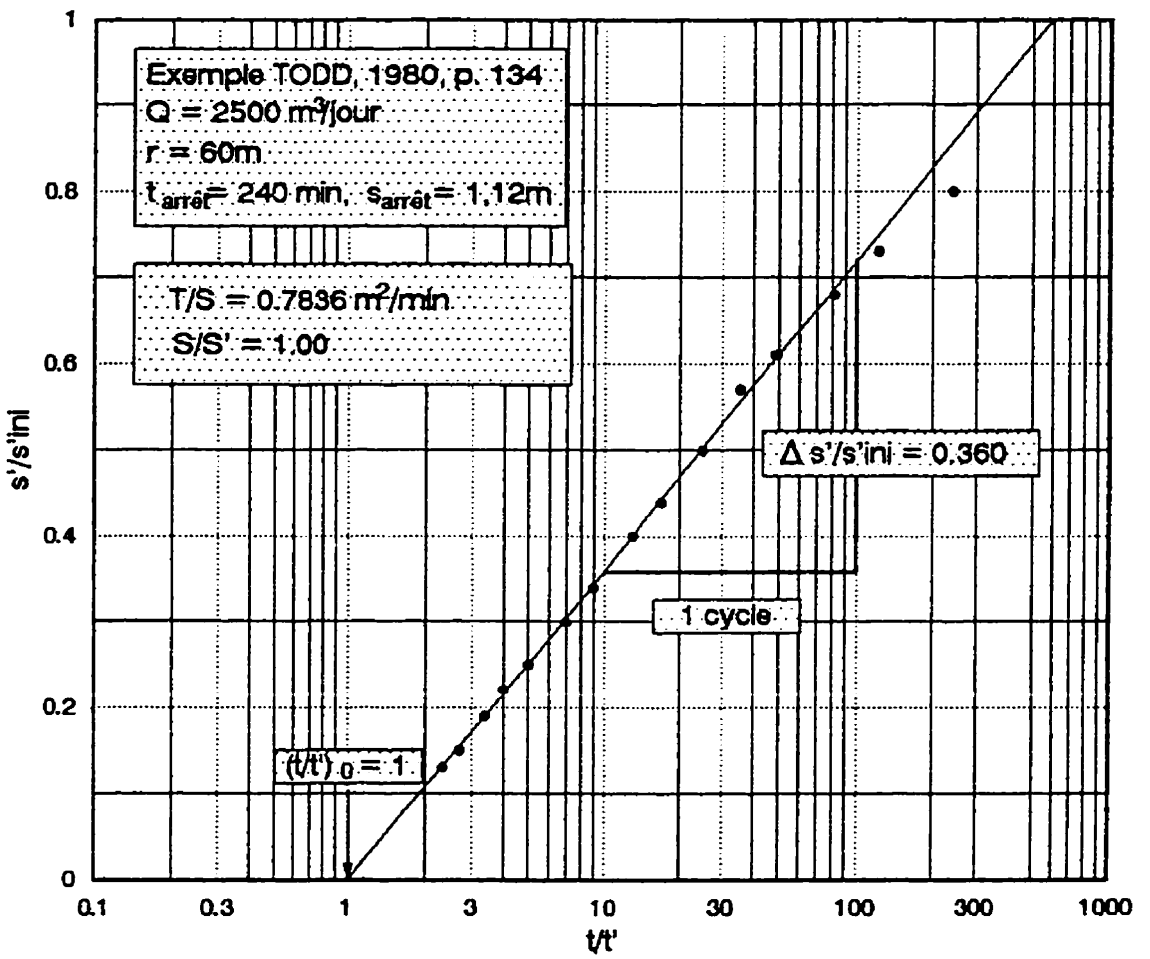


Figure 6.13: s'/s'ini en fonction de t/t'

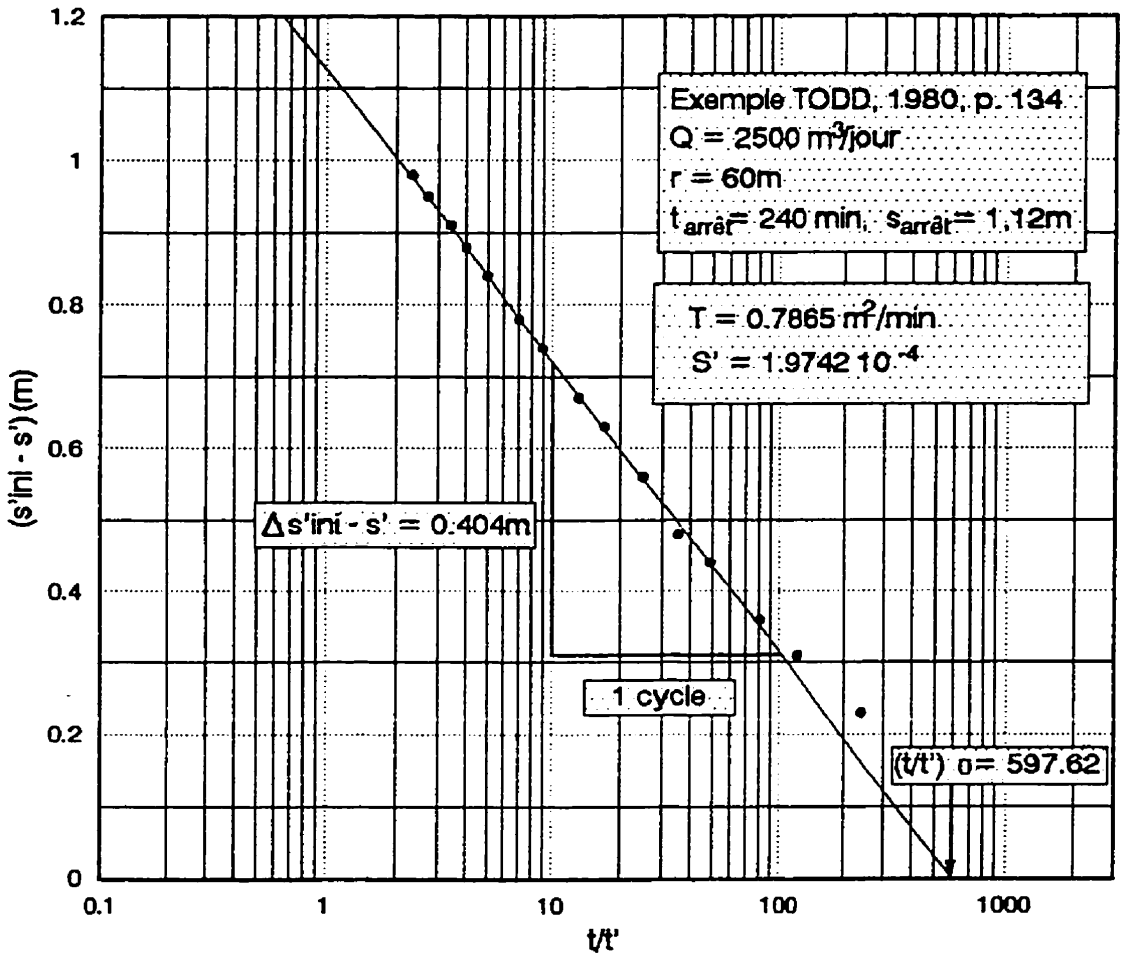


Figure 6.14: (s'ini-s') en fonction de t/t'

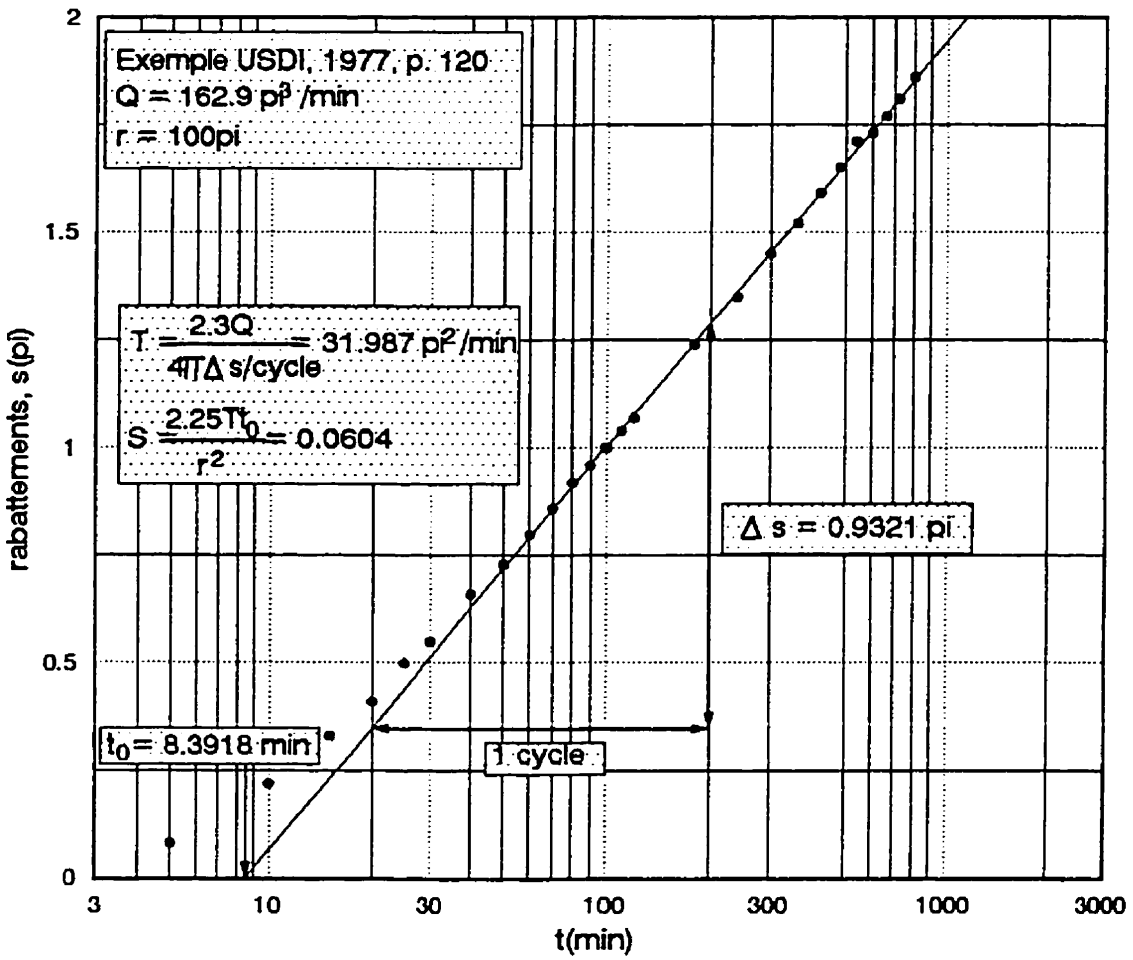


Figure 6.15: rabattements en fonction du temps

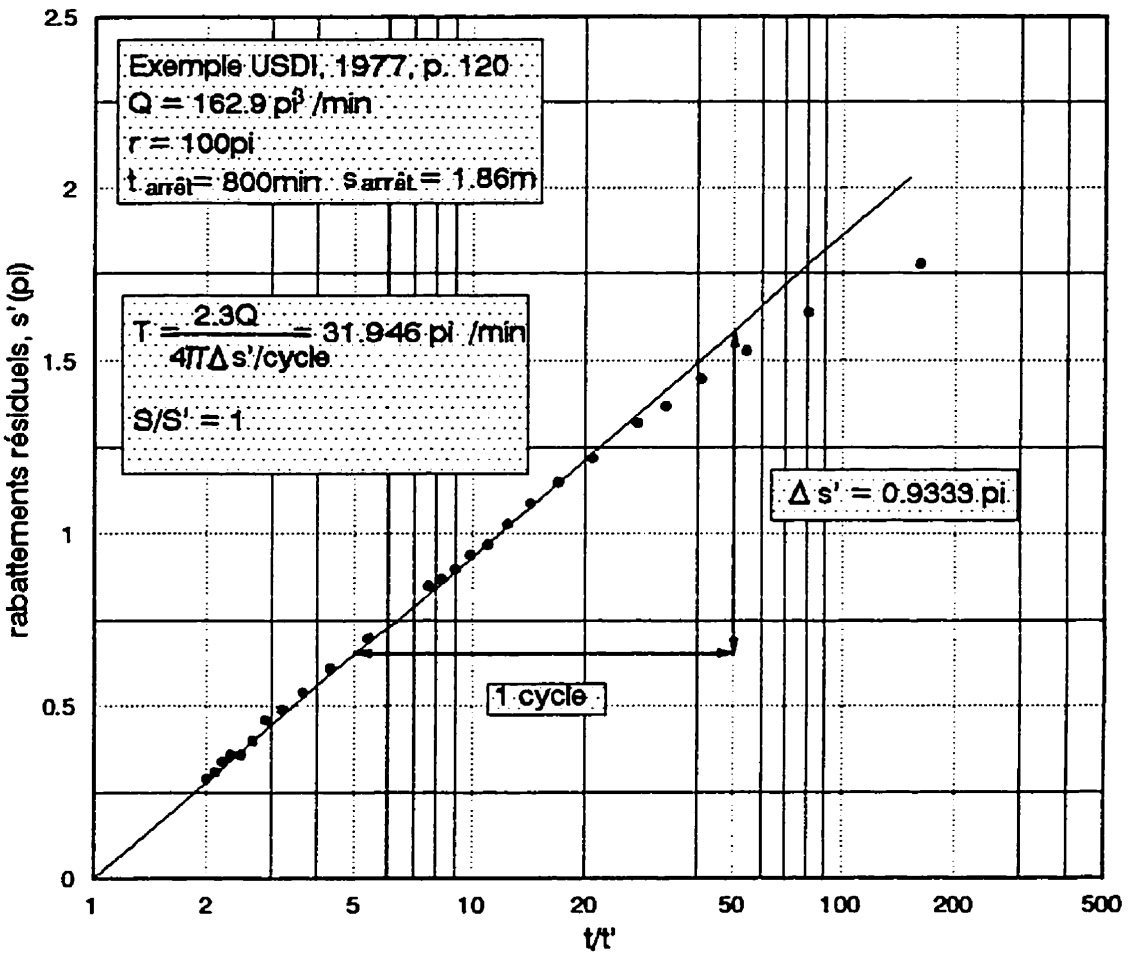


Figure 6.16: rabattements résiduels en fonction de t/t'

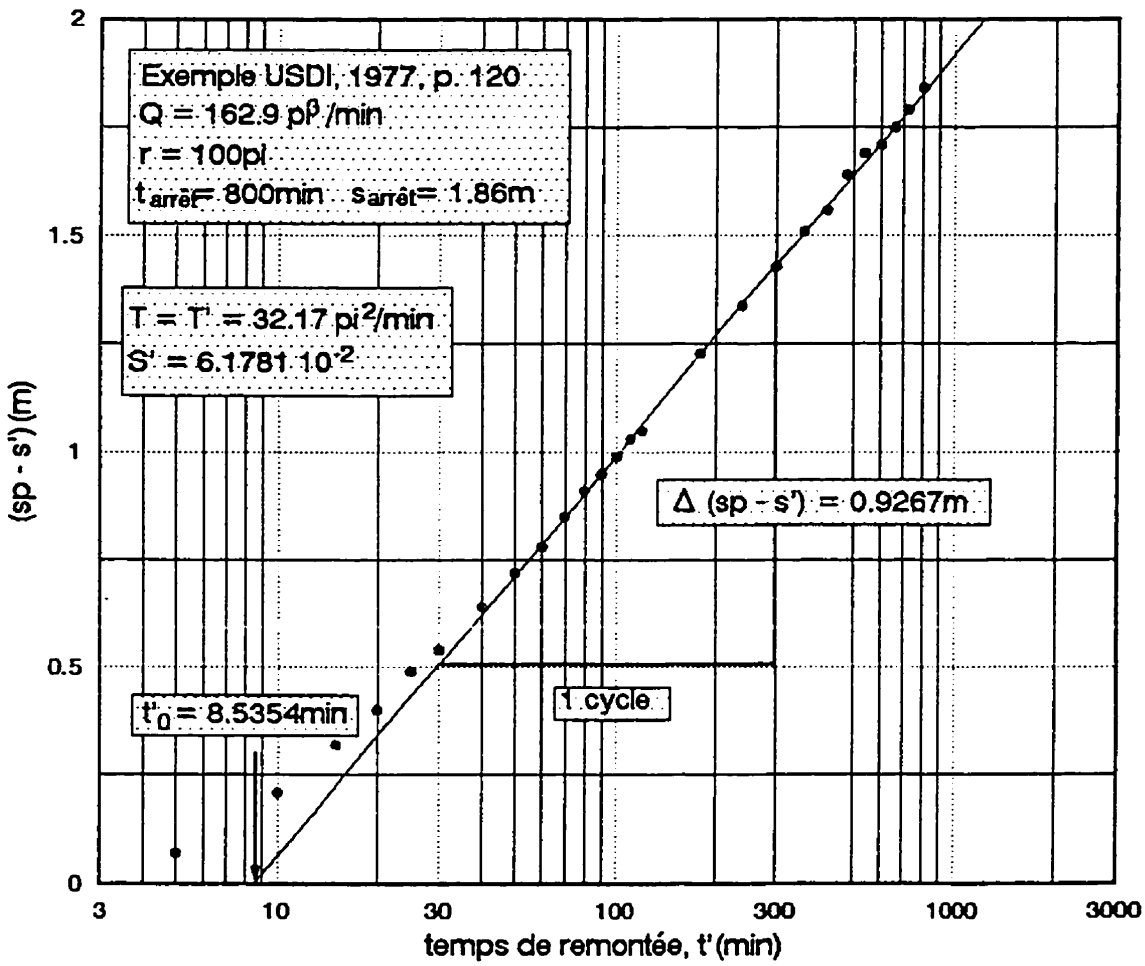


Figure 6.17: (sp - s') en fonction de t'

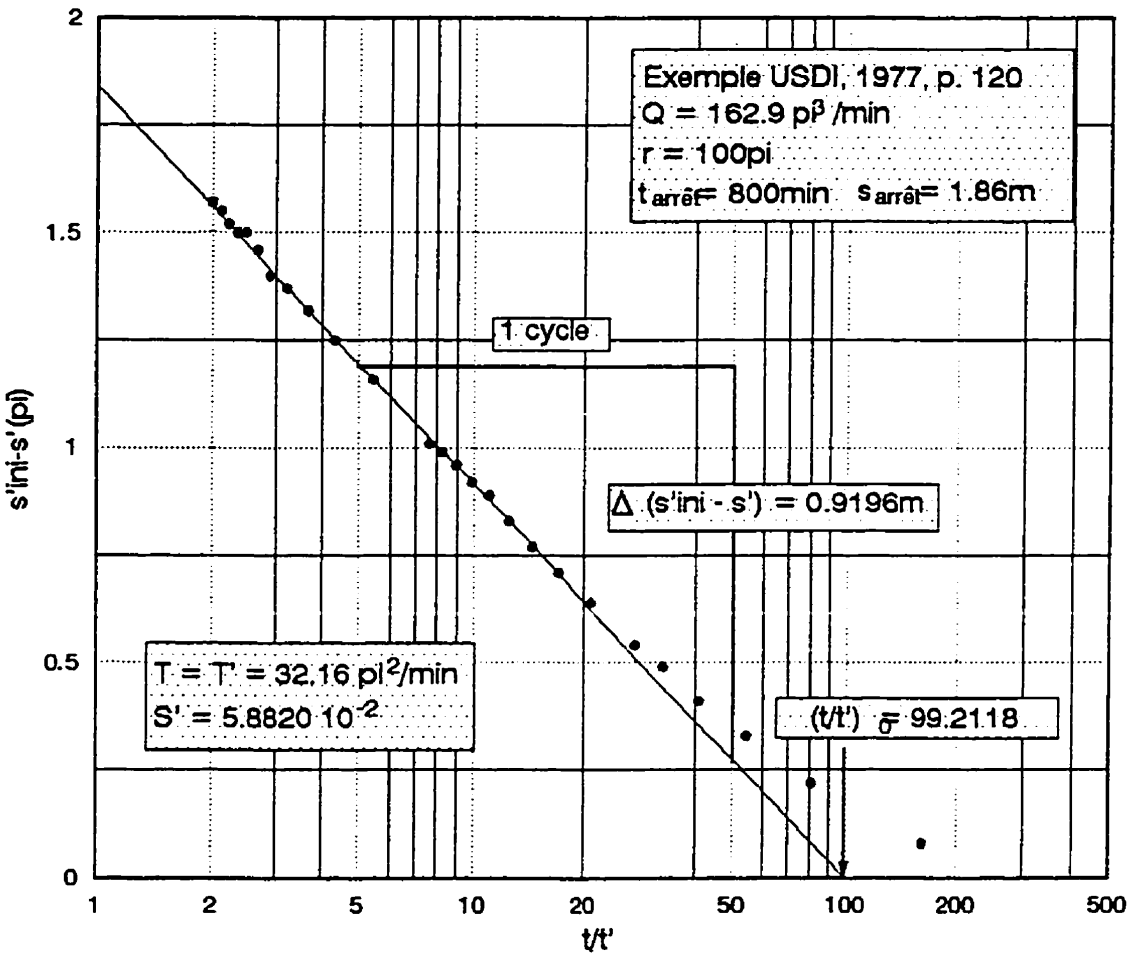


Figure 6.18: Méthode d'interprétation M.E.R.R

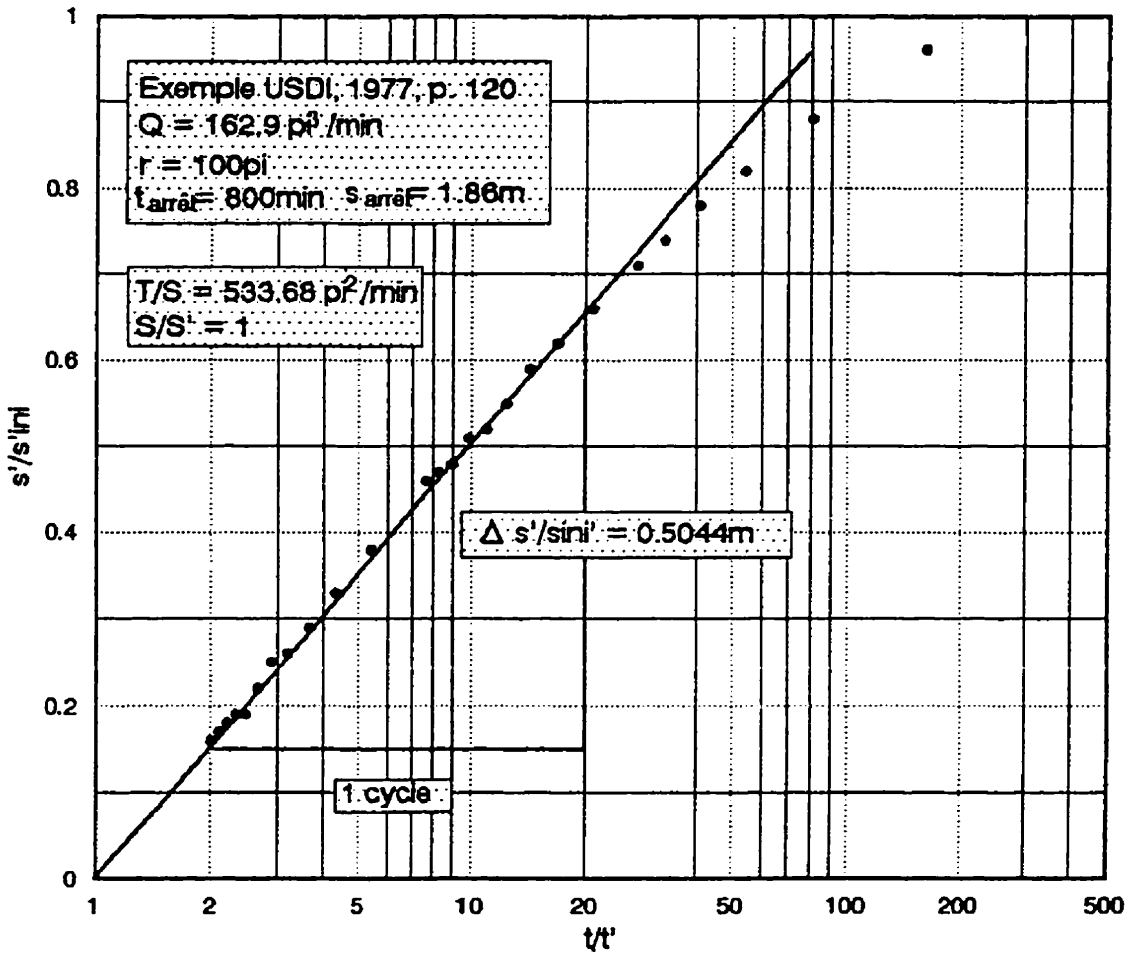


Figure 6.19: la méthode d'interprétation M.R.R.N

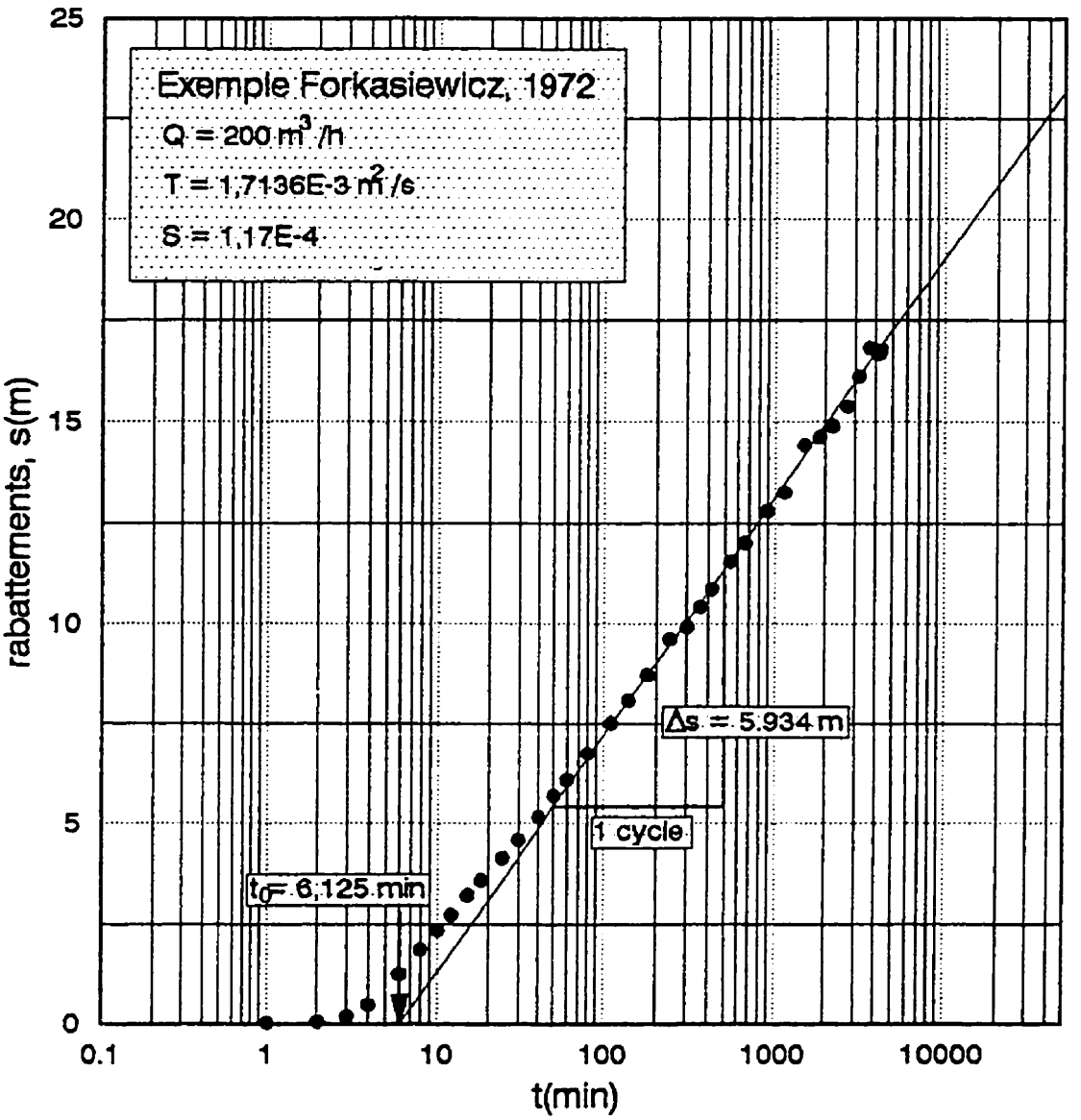


Figure 6.20: rabattements en fonction du temps.

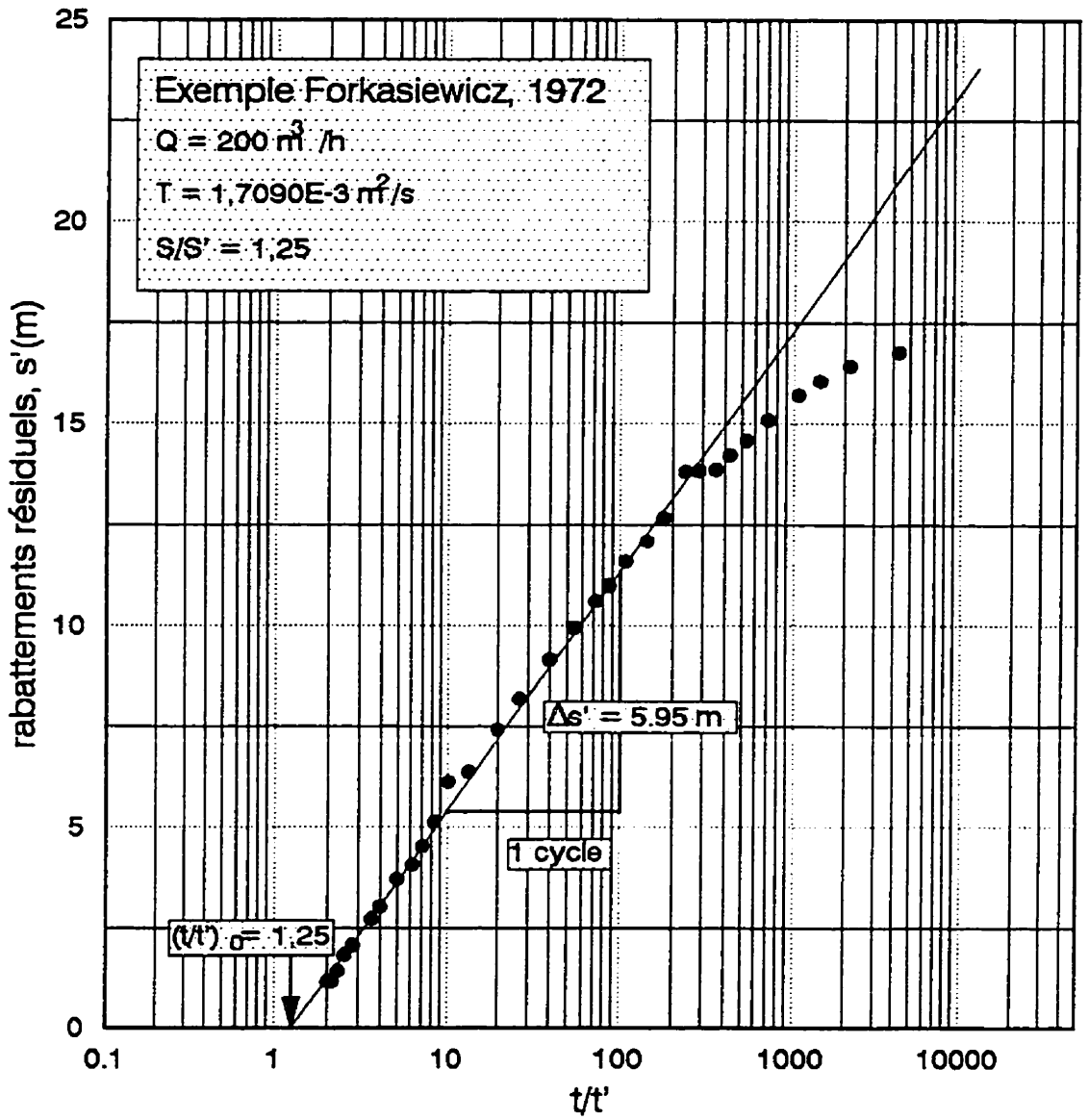


Figure 6.21: rabattements résiduels en fonction de t/t'.

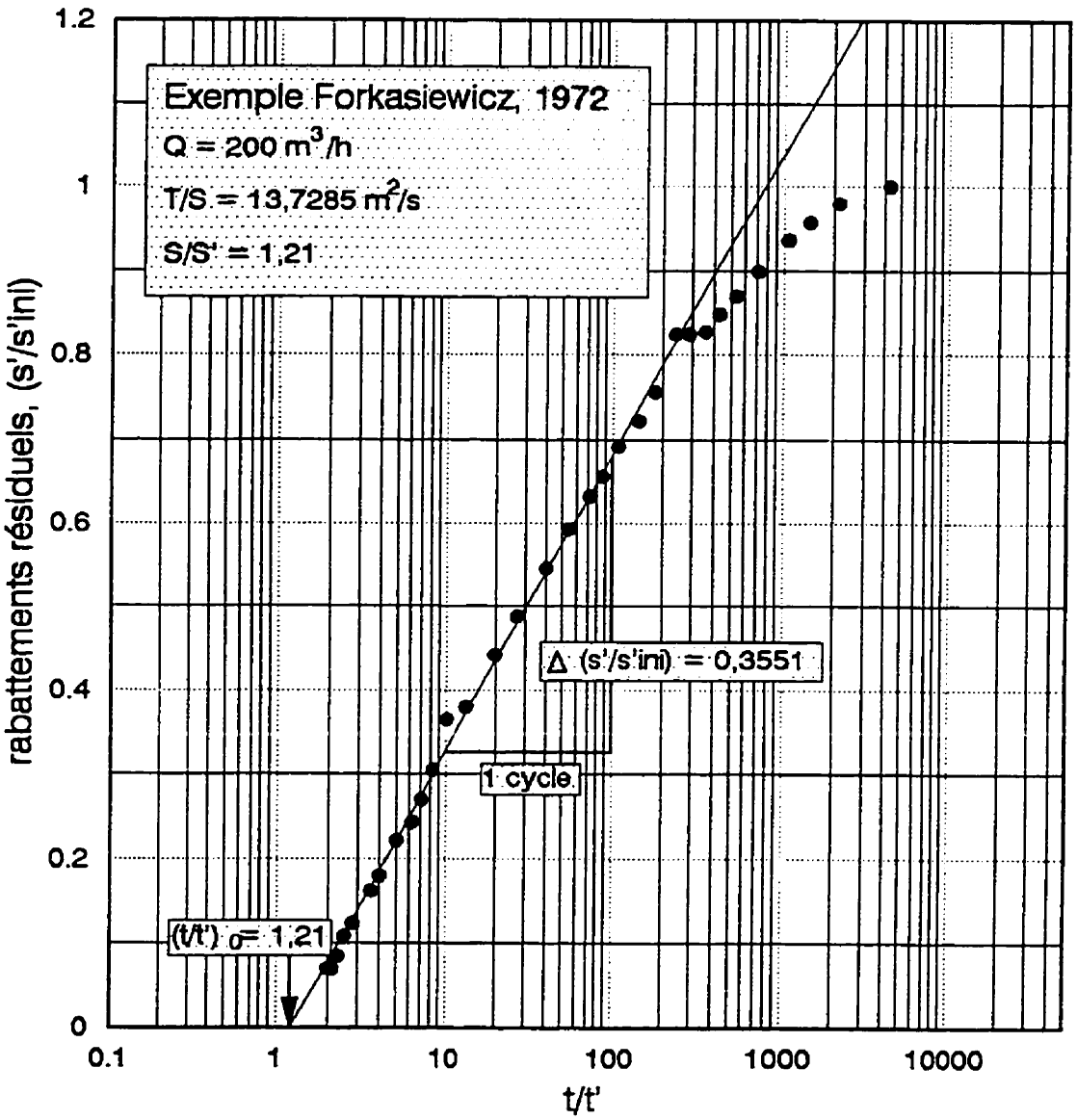


Figure 6.22: s'/s'ini vs logt/t'.

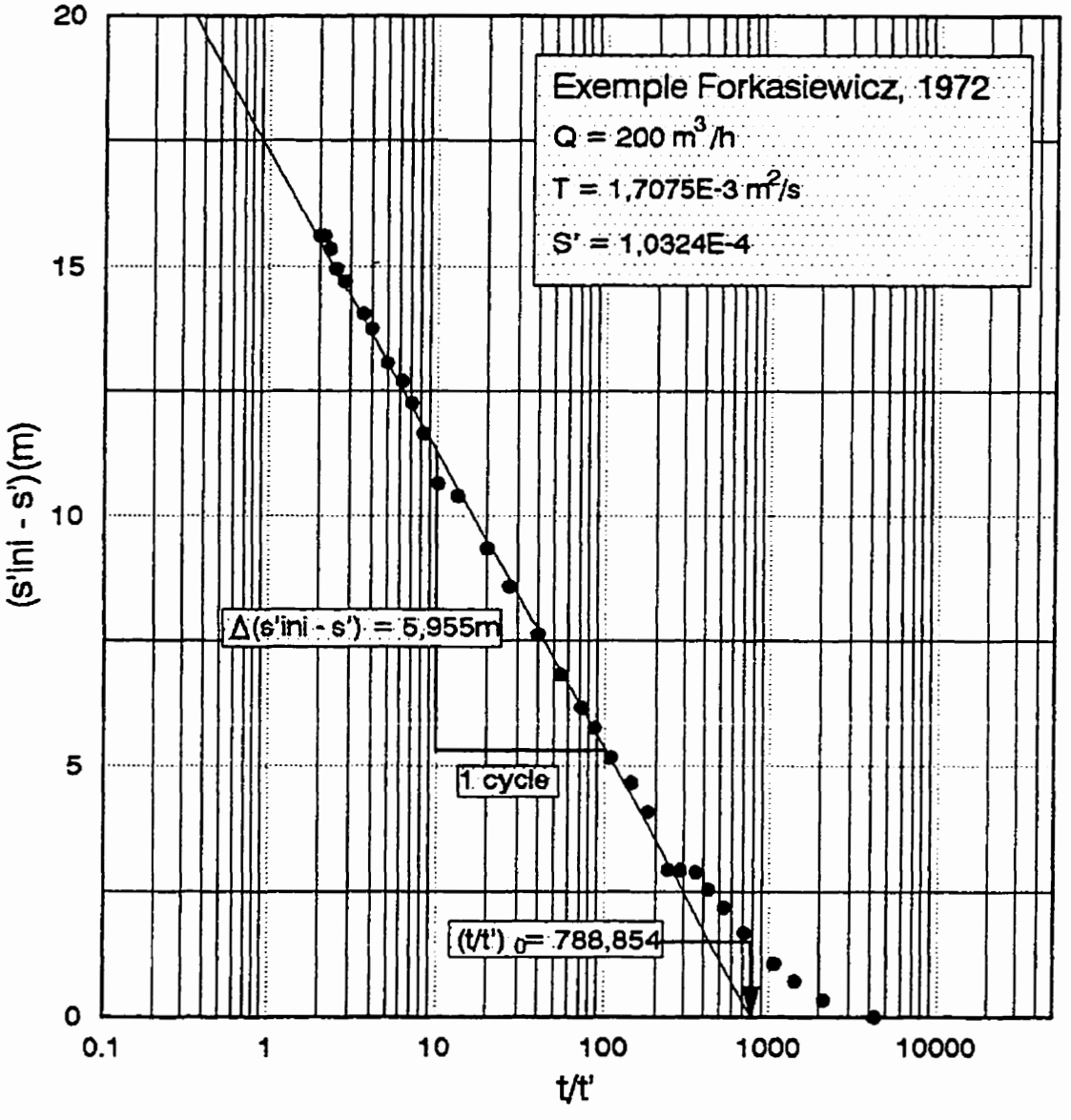


Figure 6.23: (s'ini - s') vs logt/t'.

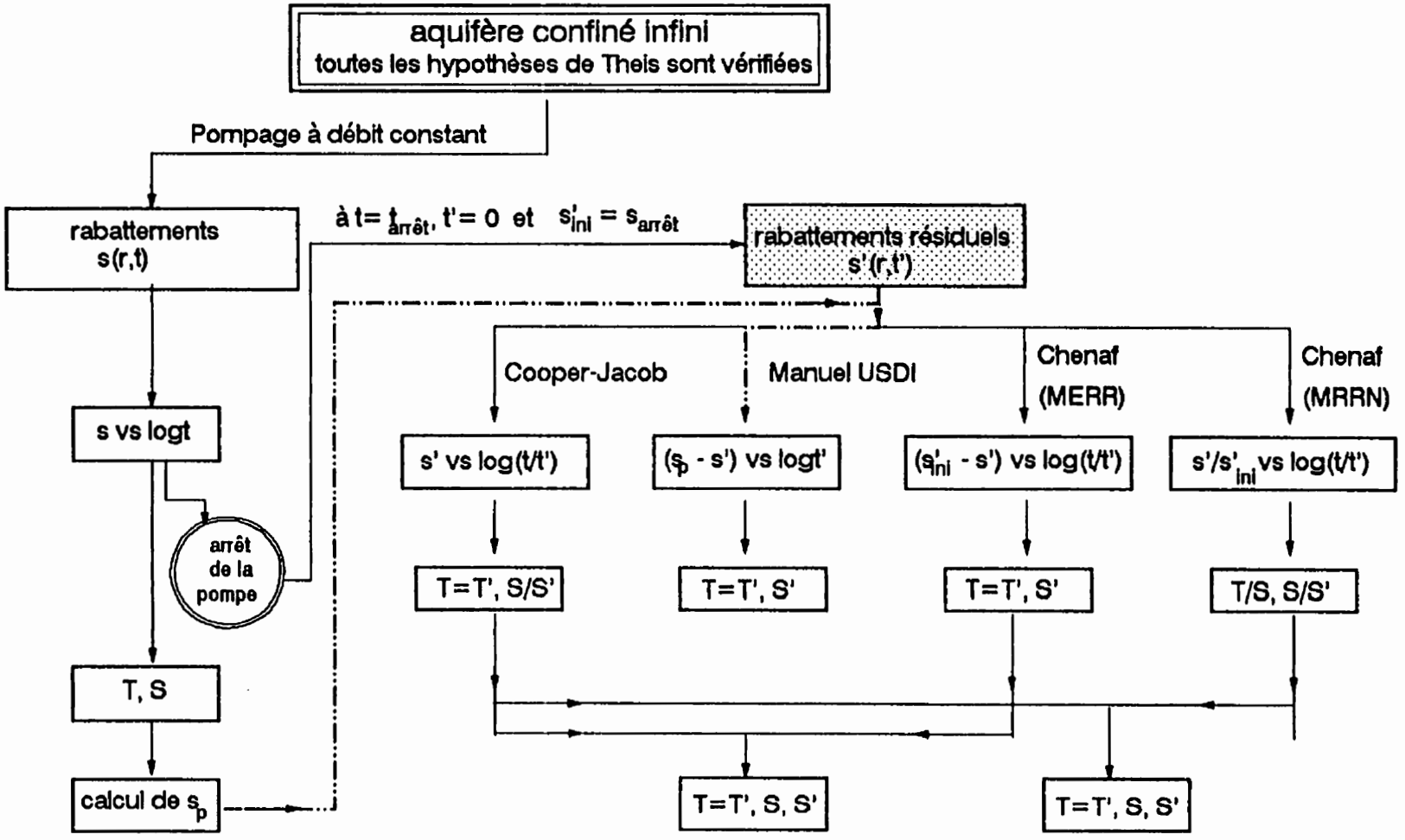


Figure 6.24: Méthodes d'interprétation des données de remontée dans le cas d'un aquifère infini

CHAPITRE VII

NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET DE LA TRANSMISSIVITÉ DANS LE CAS D'UN AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIÈRE DE RECHARGE LINÉAIRE

7.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, aucune méthode d'interprétation des données de remontée n'est disponible lorsqu'une ou plusieurs frontières sont rencontrées.

Au chapitre 5, la simulation par éléments finis d'un essai d'aquifère confiné a été effectuée. Les deux phases de pompage et de remontée ont été considérées dans un aquifère limité par une frontière de recharge circulaire supposée parfaite et verticale.

Dans ce chapitre, on étudiera le cas d'un milieu aquifère limité par une seule frontière rectiligne de recharge. Une nouvelle approche d'analyse en zones de la courbe des rabattements est mise au point. Si on désigne par $s_{arrêt}$ le rabattement à l'arrêt de la pompe au temps $t_{arrêt}$, l'importance de la position du point ($t_{arrêt}$ et $s_{arrêt}$) sur cette courbe de rabattement est alors examinée. En se basant sur le principe de superposition de la solution de Theis (chapitre 3), des solutions analytiques pour l'interprétation des données

de remontée sont construites. Ces nouvelles méthodes permettent de déterminer les paramètres hydrodynamiques qui sont la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, durant la phase de remontée et de vérifier les valeurs obtenues pour ces paramètres durant la phase de pompage qui précède. La position et l'orientation de la frontière sont également obtenues. L 'application de ces méthodes sera illustrée par deux exemples numériques l'un synthétique généré par le programme « SUPTHEIS » utilisé au chapitre précédent et l'autre réel.

7.2 ANALYSE DE LA COURBE DE RABATTEMENTS: NOUVELLE APPROCHE

L'expression générale des rabattements en fonction du temps est:

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{Q}{4\pi T}\left\{W(u_r) - W(u_i)\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7.1)$$

La figure 7.1 est la représentation graphique de l'équation (7.1). C'est la courbe type des rabattements en fonction du logarithme du temps, $s(r_r, r_i, t)$ vs *log* t, dans un essai d'aquifère en présence d'une frontière de recharge. L'analyse de la forme de cette courbe permet de distinguer quatre zones différentes. Ces zones notées dans l'ordre suivant: ZONE A, ZONE B, ZONE C et ZONE D sont définies comme suit (figure 7.1) :

ZONE A $0 \leq t < t_M$

Cette zone correspond au début de l'essai. L'argument u_r est assez grand et donc plusieurs termes de la fonction $W(u_r)$ interviennent dans l'équation du rabattement.

$$s(r_r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u_r) \qquad (7.2)$$

avec $$u_r = \frac{r_r^2 S}{4Tt} \qquad (7.3)$$

Dépendemment de la position du piézomètre ou du puits d'observation, donc de la distance r_r, cette zone peut être de courte ou de longue durée. Elle est difficile à interpréter correctement et sans aucun intérêt pratique.

ZONE B $t_M \leq t < t_N$

Cette zone subséquente à la ZONE A se développe lorsque u_r devient petit. C'est donc tout simplement la partie de Cooper-Jacob. L'expression du rabattement $s(r_r, t)$ vs logt devient log-linéaire et s'exprime par:

$$s(r_r, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r_r^2 S} \qquad (7.4)$$

Seul l'effet du puits réel est présent. Tout se passe comme si on pompait dans un aquifère infini. Le prolongement de cette branche au delà du temps t_N, noté s_P, est donné par l'équation:

$$s_P(r_r, t) = \Delta s \log \frac{t}{t_0} \qquad (7.5)$$

avec Δs et t_0 exprimant, respectivement, la pente et l'intercept à l'origine par les équations:

$$\begin{cases} \Delta s = \dfrac{2.3Q}{4\pi T} \\ t_0 = \dfrac{r_r^2 S}{2.25T} \end{cases} \qquad (7.6)$$

ZONE C $t_M \leq t < t_K$

Cette zone débute là où l'effet du puits image commence à se superposer à celui du puits réel exprimé par l'équation 7.2, et finit au palier asymptotique où $s = s_\infty$ (régime permanent). Ainsi, le rabattement devient fonction du triplet (r_r, r_i, t):

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r^2 S} - \frac{Q}{4\pi T}W(u_i) \qquad (7.7)$$

avec $u_i = \dfrac{r_i^2 S}{4Tt}$ (7.8)

ZONE D $t_K \leq t < \infty$

La ZONE D débute au temps $t = t_K$. Dans cette zone, en plus de l'argument u_r, u_i est petit et tous deux inférieurs à 0.01, selon Cooper-Jacob. Cette condition est satisfaite pour un temps t qui vérifie l'inéquation:

$t \geq 56.25\beta^2 t_{0r} = t_K$ avec $\beta = \dfrac{r_i}{r_r}$ et $t_{0r} = \dfrac{r_r^2 S}{2.25T}$ (7.9)

Les fonctions de puits réelle et image sont alors log-linéaires. Le rabattement devient

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r^2 S} - \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_i^2 S} \qquad (7.10)$$

qui s'écrit:

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{r_i^2}{r_r^2} = s_{MAX}(r_r, r_i) \qquad (7.11)$$

Le rabattement stabilisé est à sa valeur maximale. Il devient indépendant du temps. Le régime permanent est alors atteint.

Ainsi, en utilisant les résultats (7.4) et (7.11), le point I de la courbe de rabattement (figure 7.1) est défini par les coordonnées (t_I, s(t_I, r_r)) telles que:

$$s(r_r, t_I) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt_I}{r_r^2 S} = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{r_i^2}{r_r^2} \qquad (7.12)$$

ce qui donne

$$\frac{2.25Tt_I}{r_r^2 S} = \frac{r_i^2}{r_r^2} = \beta^2 \qquad (7.13)$$

où l'on voit que t_I est indépendant de r_r et ne dépend que de r_i.

En utilisant (7.9) , l'équation (7.13) devient :

$$t_I = \beta^2 t_0 \qquad (7.14)$$

et de (7.9) et (7.14) on écrit:

$t_K = 56.25\ t_I$ . . . . (7.15)

En se basant sur cette subdivision en 4 zones (A, B, C et D), deux méthodes d'interprétation de s'(r_r , r_i, t) sont alors développées et présentées ci-après.

7.3 INTERPRÉTATION DES DONNÉES DE LA REMONTÉE: ÉQUATIONS NOUVELLES

L'expression générale de la remontée exprimée par les rabattements résiduels en fonction du temps dans l'hypothèse où T = T', est:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{Q}{4\pi T}\{W(u_r) - W(u_i)\} - \frac{Q}{4\pi T}\{W(u'_r) - W(u'_i)\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.16)$$

Dépendemment de la valeur du temps $t_{arrêt}$, donc de l'origine du temps t', cette équation (7.16) prend plusieurs formes. Nous considérons les cas où la remontée débute dans la ZONE B, dans la ZONE D et dans la ZONE C. Le cas de la ZONE A ne présente aucun intérêt pratique.

7.3.1 Remontée dans la ZONE B

Dans la ZONE B, le rabattement n'est pas fonction de r_i. Le puits image n'a pas commencé à influencer l'équation du rabattement. Son expression en fonction du logarithme du temps $s(r_r, t)$ vs logt est linéaire (équation 7.4). Quand la remontée se produit dans cette zone tout se passe comme dans l'aquifère infini de mêmes paramètres. Par conséquent, l'effet de la frontière de recharge ne peut être détecté. L'expression du rabattement résiduel est:

$$s'(r_r, t) = \frac{2{,}3Q}{4\pi T}\log\frac{2{,}25Tt}{r_r^2 S} - \frac{Q}{4\pi T}W(u_r') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.17)$$

Toutes les méthodes d'interprétation présentées au chapitre 6 sont alors valables. L'interprétation de $s'(r_r, t)$ en fonction de $\log(t/t')$, conjointement avec l'une des deux méthodes M.E.R.R ou M.R.R.N (chapitre 6), permet la détermination de la transmissivité ($T' = T$) et du coefficient d'emmagasinement ($S' \neq S$ ou $S' = S$) .

7.3.2 Remontée dans la ZONE D

Si on considère que la remontée débute au temps $t = t_A$ tel que $t_A \geq t_K$ qui revient à $t_A/t_i \geq 56.25$, l'équation (7.16) devient :

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2 - \frac{Q}{4\pi T}\{W(u'_r) - W(u'_i)\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.18)$$

Lorsque r_r est très inférieur à r_i , $r_i / r_r > 20$ (Chapuis, 1994b), l'argument u'_r tend plus vite vers 0.01 que u'_i, ainsi la fonction $W(u'_r)$ devient plus vite log-linéaire que $W(u'_i)$. Dans ces conditions, on peut écrire les quatre états successifs par lesquels passe l'équation ci-dessus (7.18):

ÉTAT 1:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2 - \frac{Q}{4\pi T}W(u'_r) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.19)$$

ÉTAT 2:

Lorsque u'_r devient faible

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt'}{r_r^2S'}=-\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt'}{r_i^2S'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7.20)$$

La représentation graphique de s'(r_r, r_i, t) vs logt' nous donne la transmissivité, T, à partir de la pente et le produit r_i^2S' à partir de l'intercept à l'origine.

ÉTAT 3:

Dans l'état intermédiaire entre l'état 2 et 4:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{Q}{4\pi T}\left\{2.3\log\frac{2.25Tt'}{r_r^2S'}-W(u'_i)\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.21)$$

ÉTAT 4:

Lorsque u'_i devient faible, la fonction $W(u'_i)$ devient log-linéaire conduisant à :

$$s'=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.22)$$

Ainsi, l'analyse des quatre états successifs montre que la représentation graphique de s'(r_r, r_i, t) vs logt' indique un segment rectiligne (éq. 7.20) avec deux changements de pente. Le deuxième mène à s'=0 (un exemple est traité en 7.4). Cette nouvelle interprétation constitue la première nouvelle méthode qui nous permet la détermination de T et du produit r_i^2S'. Les méthodes qui suivront permettront de découpler le produit r_i et S' et également de vérifier la valeur de S.

7.3.2.1 Courbe des données corrigées de remontée (s_{MAX} - s') vs logt'

L'équation (7.18) combinée à l'équation (7.11) devient:

$$s_{max} - s' = \frac{Q}{4\pi T}\left\{W(u'_r) - W(u'_i)\right\} \quad \text{.....(7.23)}$$

L'équation ci-dessus indique la même relation que l'équation (7.1). Par conséquent, la représentation graphique de (s_{max}-s') vs logt', courbe CDCR, est équivalente à celle du pompage (figure 7.1). La partie log-linéaire de Cooper-Jacob est atteinte lorsque u'$_r$ devient plus petit que 0.01, soit au temps t' ≥ 56.25 t_{0r}'. En conséquence, les paramètres d'aquifère en remontée (T', S') peuvent être déterminés indépendamment de (T, S) comme suit:

La pente donne $$T' = \frac{2.3Q}{4\pi\left(\frac{\Delta(s_{max} - s')}{1 cycle}\right)} \quad \text{.....(7.24)}$$

et de l'intercept, on obtient $$S' = \frac{2.25Tt_0'}{r_r^2} \quad \text{.....(7.25)}$$

7.3.2.2 courbe des rabattements résiduels corrigés: s' vs log[(t_{cor}/t')-1].

La méthode de la courbe des rabattements résiduels corrigés, par abréviation « la méthode CRRC » s'applique pour la remontée débutant en un temps t appartenant à la ZONE D. Si on suppose l'équation (7.18) à son état 2, nous aurons:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{r_i^2}{r_r^2} - \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt'}{r_r^2 S'} \quad \text{.....(7.26)}$$

qui peut s'écrire comme:

$$s'(r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{S' r_i^2}{2.25Tt'} \quad \text{.......(7.27)}$$

La représentation de $s'(r_i, t)$ vs $\log t'$, nous donne la transmissivité $T = T'$ et le produit $S'r_i^2$:

La pente donne: $$T' = -\frac{2.3Q}{4\pi\left(\frac{\Delta s'}{1cycle}\right)} \quad \text{.......(7.28)}$$

et de l'intercept, on obtient $S' r_i^2 = 2.25Tt'_0$ ....(7.29)

D'un autre côté, en utilisant l'équation (7.13), l'équation (7.26) devient:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt_I}{r_r^2 S} - \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt'}{r_r^2 S'} \quad \text{.......(7.30)}$$

soit, $$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{S' t_I}{St'} \quad \text{.......(7.31)}$$

Par ailleurs, on définit un temps corrigé t_{cor} tel que :

$t_{cor} = t - (t_A - t_I)$ ....(7.32)

et comme $t = t' + t_A$, alors $t_{cor} = t' + t_I$ ....(7.33)

Schématiquement, pour le temps t_{cor}, le temps d'arrêt est le temps t_I. Tout se passe comme si le chronomètre, pour la phase transitoire, s'arrêtait au temps t_I. Par la suite, toute la solution devient indépendante du temps. Ainsi, l'équation (7.31) devient;

$$s'(t,r_r,r_i)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{t_{cor}}{t'}-1\right)\frac{S'}{S} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7.34)$$

Ainsi, la représentation graphique de $s'(r_r, r_i, t)$ soit vs log $[(t_{cor}/t')-1]$ soit vs $\log(t_i/t')$ nous donne la valeur correcte du rapport de S/S' et de la transmissivité T par la pente qui donne $T=-\dfrac{2.3Q}{4\pi\left(\dfrac{\Delta s'}{1cycle}\right)}$ ..... (7.35)

et par l'intercept dont on extrait $\dfrac{S}{S'}=\left(\dfrac{t_{cor}}{t'}-1\right)_o=\left(\dfrac{t_I}{t'}\right)_0$ ..... (7.36)

Ce résultat corrige celui avancé dans l'article de la conférence internationale d'hydrogéologie (Chenaf et Chapuis, 1995) qui proposait une représentation de $s'(r_r, r_i, t)$ en fonction de $\log(t_{cor}/t')$. Ce dernier était seulement basé sur une constatation graphique visuelle. Comme nous allons le voir à travers l'exemple 7.4, l'erreur n'est visible qu'aux faibles valeurs de $(t_{cor}/t'$ ou $(t_{cor}/t')-1)$. Dans la nouvelle représentation le fond de cuillère n'est pas observé, comme c'était le cas pour la première.

7.3.3 Remontée dans la ZONE C

Dans la ZONE C, seulement la fonction de puits réel est log-linéaire. Le rabattement est donné par l'équation (7.7). Si la remontée commence dans cette zone, au temps $t = t_A$ tel que $t_K \geq t_A \geq t_N$ l'équation (7.16) prend la forme:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{Q}{4\pi T}\left\{\left[2.3\log\frac{2.25Tt}{r_r^2S}-W(u_i)\right]-\left[W(u_r')-W(u_i')\right]\right\} \quad \text{(7.37)}$$

Comme vu précédemment dans la section 7.3.2, lorsque r_r est très inférieur à r_i, l'argument u'_r tend plus vite vers 0.01 que u'_i ; ainsi la fonction $W(u'_r)$ devient plus vite log-linéaire que $W(u'_i)$. Dans ces conditions, on peut écrire les différents états successifs par lesquels passe l'équation (7.37):

ÉTAT 1:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r^2S}-\frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_i)-W(u'_r)\right] \quad \text{(7.38)}$$

ÉTAT 2:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{Q}{4\pi T}W(u'_r) \quad \text{(7.39)}$$

ÉTAT 3:

Lorsque u'_r devient faible

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt'}{r_r^2S'}=-\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt'}{r_i^2S'} \quad \text{(7.40)}$$

ÉTAT 4:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2-\frac{Q}{4\pi T}\left\{2.3\log\frac{2.25Tt'}{r_r^2S'}-W(u'_i)\right\} \quad \text{(7.41)}$$

ÉTAT 5:

Lorsque la fonction W(u'$_i$) devient log-linéaire, l'équation ci-dessus tend vers 0 :

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2 - \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_i}{r_r}\right)^2 = 0 \qquad (7.42)$$

Ainsi, l'analyse des cinq états successifs montre que la représentation graphique de s'(r_r, r_i, t) vs logt' indique plusieurs courbures. La dernière courbure mène à s'(r_r, r_i, t) = 0. De la partie log-linéaire de la fonction (état 3) on obtient la transmissivité T à partir de la pente et, le produit r_i^2S' à partir de l'intercept à l'origine. Ce cas de remontée est le plus compliqué pour lequel aucune interprétation directe n'a pu être obtenue.

7.4 EXEMPLE NUMÉRIQUE

- Exemple No. 1 (cas synthétique)

Pour illustrer en général ce qui a été présenté dans la section 7.3 et plus particulièrement l'utilisation des méthodes développées dans la section 7.3.2, un exemple numérique synthétique est construit à l'aide du programme SUPTHEIS. Cet exemple suppose qu'un puits de pompage de coordonnées (0 m, 0 m) pompe à un débit constant Q = 0.03m^3/s une nappe aquifère confinée de transmissivité T = 0.01 m^2/s et de coefficient d'emmagasinement S = 2.25 10^{-4}. La diffusivité est donc égale à T/S=44.44 m^2/s. Une frontière de recharge verticale et linéaire passe par le point de coordonnées (100 m, 0 m).

Par conséquent, l'influence de cette frontière est représentée par un autre puits image d'injection situé au point (200 m, 0 m). Trois puits d'observation P1, P2 et P3 sont installés dans l'aquifère. Ces puits sont respectivement identifiés par les triplets (r_r, r_i, $\beta = r_i/r_r$) tel que P1(2 m, 200 m, 100), P2(4 m, 240 m, 60) et P3(10 m, 400 m, 40). Les rabattements de pompage aux trois puits sont générés à l'aide du programme SUPTHEIS. Pour chaque fonction de puits nous avons utilisé ses 30 premiers termes. Ces rabattements en fonction du temps sont reportés dans le tableau 7.1 et représentés par la figure 7.2. Nous allons considérer deux différents temps d'arrêt t_A de la pompe. Chacun des temps est pris soit dans la ZONE B ou la ZONE D. Dans la ZONE B, ce temps d'arrêt t_A est égal à 50 s et correspond à s'_{ini} = 1.7015 m dans P1, à s'_{ini} = 1.3714 m dans P2 et s'_{ini} = 0.9362 m dans P3. Dans la ZONE D, t_A = 100 000 s correspond à s'_{ini} = 2.1983 m dans P1, à s'_{ini} = 1.9541 m dans P2 et s'_{ini} = 1.7592 m dans P3. Dans cet exemple, nous considérons également le cas où le coefficient d'emmagasinement est différent pendant la phase de pompage et la phase de remontée ($S' \neq S$).

CAS No.1

Dans ce cas le coefficient d'emmagasinement en remontée est égal à celui en pompage, $S' = S = 2.25\ 10^{-4}$. Pour chaque temps d'arrêt de la pompe t_A appartenant à chacune des deux zones B et D, les valeurs des rabattements résiduels sont générées par le programme SUPTHEIS en utilisant les 30 premiers termes de chaque fonction de puits.

L'interprétation des résultats dépend de la zone à partir de laquelle la remontée s'effectue:

Remontée en ZONE B:

Pour la remontée en ZONE B, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (cf. Figure 7.3). Les courbes obtenues convergent vers la droite de pente $\Delta s'/cycle$ = 0,549m et d'intercept $(t/t')_0 = 1$. La situation est similaire à celle représentée à la figure 6.2. La transmissivité peut être déterminée, $T=T'=0.01 m^2/s$. Cependant le coefficient d'emmagasinement ne peut pas être extrait de ces courbes.

Les valeurs calculées de $(s_P - s')$, s'/s'_{ini} et $(s'_{ini} - s')$ sont reportées dans les tableaux 7.2, 7.3 et 7.4 respectivement pour les piézomètres P1, P2 et P3. Nous avons utilisé pour le calcul de s_P les équations 7.5 et 7.6 qui sont équivalentes à 6.5. Les figures 7.4, 7.5 et 7.6 représentent les différentes interprétations suivant $(s_P - s')$ vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t'. Les valeurs des paramètres obtenues de chaque interprétation sont indiquées respectivement sur chaque figure. Elles correspondent bien aux valeurs adoptées pour générer les données.

Remontée en ZONE D:

Pour la remontée en ZONE D, nous avons représenté s' vs logt' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (figure 7.7). Pour chaque piézomètre nous avons la pente de la partie log-linéaire qui fournit la transmissivité et l'intercept à l'origine qui nous fournit le produit $S'r_i^2$. Il n'est donc pas possible de connaitre le coefficient d'emmagasinement. Les valeurs calculées de t_{cor}/t', $(s_{max} - s')$ et $(s_P - s')$ sont reportées dans les tableaux 7.5, 7.6 et 7.7 pour chaque piézomètre P1, P2 et P3 respectivement. Nous avons utilisé l'équation 7.11, pour le calcul de s_{max}, et les équations 7.5 et 7.6 pour le calcul de s_P. La figure 7.8

illustre les différentes CDCR proposées, « courbes des données de remontée corrigées », soit (s_{max} - s') vs logt'. Les courbes obtenues sont équivalentes à celles du pompage (cf. Figure 7.2). Pour le piézomètre, P1, le plus proche du puits, les valeurs relevées de la pente, $\Delta(s_{max} - s')$/ cycle, et de l'intercept, t'_0, sont respectivement de 0,549m et 0,04s qui nous donnent une transmissivité, T', de 0,01m^2/s (éq. 7.24) et un coefficient d'emmagasinement, S', de 2,25 10^{-4} (éq. 7.25). Sur cette même figure, nous avons également représenté les valeurs de (s_P - s') vs logt'. Les courbes obtenues présentent toutes un segment de droite log-linéaire de pente, $\Delta(s_P - s')$/ cycle, constante et égale à $\Delta(s_{max} - s')$/ cycle. La transmissivité est alors déterminée de la pente. Cependant le coefficient d'emmagasinement ne peut être calculé de ces courbes.

La figure 7.9 donne la représentation usuelle des courbes de remontée (s' vs *log* t/t') pour les trois piézomètres (série 1). Nous remarquons que :

1. Ces courbes (type 1) ne convergent pas vers la même droite log-linéaire.
2. Le prolongement linéaire de chacun des segments log-linéaires ne coupe pas l'axe à t/t' = S/S' =1

Par conséquent, les paramètres de l'aquifère ne peuvent être correctement évalués. La représentation des CRRC proposées « Courbes des Rabattements Résiduels Corrigées » est également illustrée par la figure 7.9. Ces courbes (série 2) représentent la variation de s' vs log (t_{cor}/t' -1) telle qu'expliquée au paragraphe 7.3.2.2. Contrairement aux courbes usuelles, nous remarquons que :

1. Ces courbes corrigées (type 2) convergent vers la même droite log-linéaire.
2. Le prolongement linéaire de chacun des segments log-linéaires coupe l'axe à $t/t'=S/S' = 1$

Ceci nous permet de retrouver $T = T' = 0.01 m^2/s$ de la pente, $\Delta s'$/ cycle, (éq. 7.35) et le rapport $S/S'= 1$ de l'intercept, $(t_{cor}/t' - 1)_0$, (éq.7.36). Nous avons également représenté (figure 7.10) les courbes corrigées telles que proposées initialement dans le cadre de la conférence internationale d'hydrogéologie (Chenaf et Chapuis, 1995), soit s' vs $\log(t_{cor}/t')$. Cette correction basée sur des constatations visuelles est améliorée par l'équation 7.34 qui propose une translation de l'axe t_{cor}/t' de -1 (figure 7.9). Il est bien évident que la différence entre les deux représentations qui en résultent n'est visible que pour les faibles valeurs de t_{cor}/t'. La figure 7.10 illustre l'étude comparative des deux représentations s' vs $\log (t_{cor}/t')$ et s' vs $\log(t_{cor}/t' - 1)$. On voit bien que pour cette dernière représentation la courbe est plus régulière, aux faibles valeurs de $(t_{cor}/t' - 1)$, et le fond de cuillère observé dans la première correction a disparu dans la deuxième.

CAS No.2

Dans ce cas, on va considérer le coefficient d'emmagasinement en remontée égal à la moitié de celui en pompage, $S'= S/2 = 1.125\ 10^{-4}$. Comme pour le cas No.1, les valeurs des rabattements résiduels s'(r, t), sont générées par le programme SUPTHEIS en utilisant les 30 premiers termes de la fonction de puits.

Comme dans le cas précédent, l'interprétation des résultats dépend de la zone à partir de laquelle la remontée débute:

Remontée en ZONE B:

Pour la remontée en ZONE B, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (Figure 7.11). Les courbes obtenues convergent vers la droite de pente $\Delta s'/cycle = 0{,}549m$ et d'intercept $(t/t')_0 = 2$ qui correspond au rapport des coefficients d'emmagasinement S/S'. La situation est similaire à celle présentée à la figure 6.6. La transmissivité, $T=T'=0.01m^2/s$, est déterminée par la pente. Les valeurs de $(s_P - s')$, s'/s'_{ini} et $(s'_{ini} - s')$ sont reportées aux tableaux 7.8, 7.9 et 7.10 respectivement pour les piézomètres P1, P2 et P3. Nous les avons calculées de la même façon qu'au cas No.1. Les figures 7.12, 7.13 et 7.14 présentent les différentes interprétations suivant $(s_P - s')$ vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t'. Les valeurs des paramètres obtenues de chacune de ces interprétation sont montrées sur la figure respective. Elles correspondent bien aux valeurs adoptées pour générer les données.

Remontée en ZONE D:

Pour la remontée en ZONE D, nous avons représenté s' vs logt' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (figure 7.15). Pour chacun des piézomètres nous avons la pente de la partie log-linéaire qui fournit la transmissivité et l'intercept à l'origine qui nous fournit le produit $S'r_i^2$. Il n'est donc pas possible de connaitre le coefficient d'emmagasinement. Les valeurs calculées de $(s_{max} - s')$, $(s_P - s')$ et t_{cor}/t' sont reportées aux tableaux 7.11, 7.12 et 7.13 pour chacun des piézomètres P1, P2 et P3 respectivement. Nous les avons calculées de la même facon qu'au cas No.1. La figure 7.16 présente la

représentation des CDCR proposées, soit (s_{max} - s') vs logt'. Les courbes obtenues sont équivalentes à celles du pompage (cf. Figure 7.2). Pour le piézomètre, P1, le plus proche du puits, les valeurs relevées de la pente, $\Delta(s_{max}$ - s')/ cycle, et de l'intercept, t'_0, sont respectivement de 0,549m et 0,02s qui nous donnent une transmissivité, T', de 0,01m^2/s (éq. 7.24) et un coefficient d'emmagasinement, S', de 1.125 10^{-4} (éq. 7.25). Sur cette même figure, nous avons également représenté les valeurs de (s_P - s') vs logt'. Les courbes obtenues présentent toutes un segment de droite log-linéaire de pente, $\Delta(s_P$ - s')/ cycle, constante et égale à $\Delta(s_{max}$ - s')/ cycle. La transmissivité est alors déterminée de la pente. Cependant le coefficient d'emmagasinement ne peut être calculé de ces courbes.

La figure 7.17 donne la représentation usuelle des courbes de remontée (s' vs logt/t') pour les trois piézomètres ainsi que les courbes CRRC proposées, soit s' vs log (t_{cor}/t' -1). Comme on l'a vu dans le cas No.1, la transmissivité T = T' = 0.01m^2/s est calculée de la pente, Δs'/ cycle, (éq. 7.35) et le rapport S/S'= 2 de l'intercept, $(t_{cor}/t' - 1)_0$, (éq.7.35). Nous avons également comparé (figure 7.18) les courbes corrigées telles que proposées initialement dans le cadre de la conférence internationale d'hydrogéologie (Chenaf et Chapuis, 1995), soit s' vs log t_{cor}/t', avec la nouvelle correction, s' vs log(t_{cor}/t' - 1). Comme dans le cas No.1, où S = S', cette dernière représentation est plus régulière que la première, aux faibles valeurs de (t_{cor}/t' - 1) et le fond de cuillère observé dans la première correction a disparu dans la deuxième.

- **Exemple No. 2 : cas réel** (Forkasiewicz, 1972)

Cet essai a été réalisé dans le cadre de l'étude hydrogéologique de l'aquifère profond à nappe captive de la région de Mateur (Tunisie). Cet aquifère, d'une épaisseur d'environ 40 m, est formé de calcaire blanc dur, très fissuré. Ces calcaires affleurent dans les collines voisines qui se trouvent à environ 1,5 km. Le puits de pompage capte entièrement cette formation. Le débit de pompage est Q = 144 m^3/h soit 2,4 m^3/min. Un seul piézomètre (P11), distant du forage de 151,5 m, pénètre les calcaires. A la fin de la phase de pompage qui a duré 671h30min (40 290 min) soit presque 28 jours le rabattement au piézomètre s'était stabilisé à 3,91m. Pendant la phase de remontée subséquente le niveau initial dans le piézomètre a été retrouvé après environ 65 h (3900 min) soit environ 2,7 jours.

Les rabattements de pompage sont reportés au tableau 7.14. Ils sont représentés sur la figure 7.19. On remarque une stabilisation des rabattements à des valeurs entre 4,00 m et 3,91 m indiquant la présence d'une frontière de recharge. Les valeurs de T et S sont déterminées à partir de la zone log-linéaire du graphe respectivement de la pente : Δs/cycle = 1,80 m et de l'intercept à l'origine t_0 = 7,90 min. Des équations 7.6, on en déduit: T = 0,244 m^2/min = 4,067 10^{-3} m^2/s et S = 1,8898 10^{-4}.

Étant donné que la valeur du rabattement maximal est entre s^1_{max} = 4,00 m et s^2_{max} = 3,91 m , l'intervalle de variation du temps de transition t_i , déterminé à partir du graphe s vs logt par l'équation $t_I = t_0\ 10^{\frac{s_{max}}{\Delta s}}$, sera respectivement entre t_{i1} =1317,80 min et t_{i2} = 1174,49 min.

et celui de r_i, également déterminée à partir du même graphe en utilisant l'équation (7.11)

laquelle prend la forme : $r_i = r_r \sqrt{10^{\frac{s_{max}}{\Delta s}}}$, sera respectivement entre r_{i1} = 1956,70 m et r_{i2} = 1847,24 m.

Les rabattements résiduels sont reportés au tableau 7.15. La figure 7.20 illustre s' vs logt'. La pente de la partie log-linéaire est de: $\Delta s'$/cycle = -1,75 m et l'intercept de son prolongement à l'origine est t'_0 = 1200 min. De l'équation 7.20, on en déduit: T = 0,244 m^2/min = 4,1835 10^{-3} m^2/s et $r_i^2 S'$ = 677,727 m^2.

La figure 7.21 donne la représentation usuelle de la courbe de remontée (s' vs logt/t'). On remarque qu'elle présente une branche linéaire suivie d'un changement de pente menant à s' = 0. Le premier changement de pente, qui théoriquement se produit au faibles valeurs de t' (avant l'apparition de la branche log-linéaire) n'est pas représenté car la première valeur relevée après s'_{ini} était à 1 heure du début de la remontée. Étant donné que la remontée s'est produit en ZONE D, nous avons également représenté sur la même figure les CRRC proposées « Courbes des Rabattements Résiduels Corrigées » en considérant pour le calcul de $(t_{cor}/t') - 1 = t_i/t'$ les valeurs extrêmes t_{i1} et t_{i2} . Comme on peut le constater l'écart est très faible entre les deux représentations. La pente de la branche log-linéaire est de $\Delta s'$/cycle = 1,75 m et l'intercept à l'origine est de $(t_{cor}/t' - 1)_0 = 1$. Des équations 7.35 et 7.36 on en déduit: T = 0,244 m^2/min = 4,1835 10^{-3} m^2/s et S/S' = 1.

La figure 7.22 présente les courbes CDCR « Courbes des Données de Remontée Corrigées » en considérant les valeurs extrêmes s^1_{max} et s^2_{max} . Comme on peut le

constater l'écart est très faible entre les deux représentations. La pente de la branche log-linéaire moyenne est de $\Delta(s_{max} - s')$/cycle = 1,85 m et l'intercept à l'origine est de t'_0 = 7,90 min. Des équations 7.24 et 7.25 on en déduit: T = 0,2376 m^2/min = 3,96 10^{-3} m^2/s et S' = 1,8377 10^{-4}. En combinant cette valeur de S' et le produit r_i^2 S' = 677,727 m^2, on trouve r_i = 1920,39 m.

L'interprétation des données de remontée nous a donc permis de confirmer les valeurs des paramètres déterminées par l'interpétation de la phase de pompage, comme illustré au tableau 7.16.

7.6 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

La figure 7.23 résume les différentes méthodes d'interprétation des données de remontée lorsque l'on se trouve dans les hypothèses présentées à la section 7.2. Il est important de souligner que si durant la phase de pompage, la ZONE C commence à se développer, il est recommandé de laisser l'essai se poursuivre jusqu'à la stabilisation des rabattements. Autrement dit, de continuer l'essai jusqu'à atteindre la ZONE D puis poursuivre avec la remontée à partir de cette zone. Car sinon on ne pourra connaitre que la transmissivité, T, et le produit $S'r_i^2$. Le coefficient d'emmagasinement et la position de la frontière ne peuvent être déterminés.

Tableau 7.1: essai de pompage (essai synthétique)

(suite)

t(s)	s(m) P1 rr = 2m ri = 200m	s(m) P2 rr = 4m ri = 240m	s(m) P3 rr = 10m ri = 400m	t(s)	s(m) P1 rr = 2m ri = 200m	s(m) P2 rr = 4m ri = 240m	s(m) P3 rr = 10m ri = 400m
0,01	0,0083	0,0000	0,0000	100,00	1,8592	1,5344	1,1003
0,02	0,0426	0,0005	0,0000	200,00	1,9903	1,6820	1,2646
0,03	0,0813	0,0031	0,0000	300,00	2,0485	1,7529	1,3586
0,04	0,1171	0,0083	0,0000	400,00	2,0813	1,7946	1,4220
0,05	0,1493	0,0154	0,0000	500,00	2,1024	1,8221	1,4680
0,06	0,1781	0,0239	0,0000	**600,00**	**2,1170**	**1,8415**	**1,5031**
0,07	0,2041	0,0331	0,0000	700,00	2,1278	1,8560	1,5306
0,08	0,2277	0,0426	0,0000	800,00	2,1361	1,8672	1,5529
0,09	0,2493	0,0524	0,0001	900,00	2,1427	1,8761	1,5713
0,10	0,2691	0,0621	0,0001	1 000,0	2,1480	1,8834	1,5867
0,15	0,3496	0,1085	0,0012	2 000,0	2,1727	1,9178	1,6649
0,20	0,4099	0,1493	0,0040	3 000,0	2,1812	1,9298	1,6948
0,30	0,4982	0,2162	0,0139	4 000,0	2,1856	1,9360	1,7105
0,40	0,5625	0,2691	0,0275	5 000,0	2,1882	1,9397	1,7202
0,50	0,6132	0,3127	0,0426	6 000,0	2,1899	1,9422	1,7268
0,60	0,6549	0,3496	0,0582	7 000,0	2,1912	1,9440	1,7316
0,70	0,6905	0,3816	0,0737	8 000,0	2,1921	1,9453	1,7352
0,80	0,7214	0,4099	0,0887	9 000,0	2,1929	1,9464	1,7380
0,90	0,7488	0,4352	0,1032	10 000,0	2,1935	1,9472	1,7403
1,00	0,7733	0,4581	0,1171	15 000,0	2,1952	1,9498	1,7472
1,50	0,8684	0,5480	0,1781	20 000,0	2,1961	1,9511	1,7507
2,00	0,9362	0,6132	0,2277	30 000,0	2,1970	1,9523	1,7542
3,00	1,0321	0,7064	0,3046	40 000,0	2,1975	1,9530	1,7560
4,00	1,1003	0,7733	0,3629	50 000,0	2,1977	1,9534	1,7570
5,00	1,1533	0,8256	0,4099	60 000,0	2,1979	1,9536	1,7577
6,00	1,1967	0,8684	0,4492	70 000,0	2,1980	1,9538	1,7583
7,00	1,2333	0,9047	0,4829	80 000,0	2,1981	1,9539	1,7586
8,00	1,2651	0,9362	0,5125	90 000,0	2,1982	1,9540	1,7589
9,00	1,2932	0,9640	0,5388	**100 000**	**2,1983**	**1,9541**	**1,7592**
10,00	1,3182	0,9889	0,5625	200 000	2,1985	1,9545	1,7602
20,00	1,4835	1,1533	0,7214	300 000	2,1986	1,9546	1,7606
30,00	1,5801	1,2497	0,8160	400 000	2,1987	1,9547	1,7608
40,00	1,6487	1,3182	0,8836	500 000	2,1987	1,9548	1,7609
50,00	**1,7015**	**1,3714**	**0,9362**	600 000	2,1987	1,9548	1,7610
60,00	1,7443	1,4147	0,9792	700 000	2,1987	1,9548	1,7610
70,00	1,7800	1,4512	1,0157	800 000	2,1987	1,9548	1,7610
80,00	1,8102	1,4826	1,0474	900 000	2,1987	1,9548	1,7611
90,00	1,8364	1,5101	1,0753	1 000 000	2,1988	1,9548	1,7611

Tableau 7.2: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P1, ß = 100)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5001	1,6933	0,9949	0,0087	0,0091	20	3,5	0,2965	0,1742	1,4055	1,4882
0,02	2501	1,659	0,9747	0,043	0,0435	30	2,667	0,2301	0,1352	1,4719	1,5845
0,03	1667,667	1,6204	0,9521	0,0816	0,0821	40	2,25	0,1877	0,1103	1,5143	1,655
0,04	1251	1,5846	0,931	0,1174	0,1179	50	2	0,1576	0,0926	1,5444	1,7102
0,05	1001	1,5525	0,9121	0,1495	0,1501	60	1,833	0,1349	0,0793	1,5671	1,7557
0,06	834,333	1,5237	0,8952	0,1784	0,179	70	1,714	0,1171	0,0688	1,5849	1,7943
0,07	715,286	1,4977	0,88	0,2043	0,205	80	1,625	0,1028	0,0604	1,5993	1,8277
0,08	626	1,4742	0,8661	0,2279	0,2286	90	1,556	0,091	0,0535	1,611	1,8572
0,09	556,556	1,4527	0,8535	0,2494	0,2501	100	1,5	0,0812	0,0477	1,6208	1,8835
0,1	501	1,4329	0,8419	0,2692	0,27	200	1,25	0,0338	0,0199	1,6683	2,0528
0,15	334,333	1,3526	0,7947	0,3494	0,3505	300	1,167	0,0184	0,0108	1,6836	2,1485
0,2	251	1,2926	0,7594	0,4095	0,4107	400	1,125	0,0116	0,0068	1,6905	2,2154
0,3	167,667	1,2048	0,7079	0,4972	0,499	500	1,1	0,0079	0,0047	1,6941	2,2669
0,4	126	1,1409	0,6703	0,5611	0,5634	600	1,083	0,0058	0,0034	1,6963	2,3089
0,5	101	1,0907	0,6408	0,6113	0,614	700	1,071	0,0044	0,0026	1,6976	2,3445
0,6	84,333	1,0494	0,6166	0,6526	0,6558	800	1,063	0,0035	0,002	1,6986	2,3753
0,7	72,429	1,0144	0,596	0,6877	0,6913	900	1,056	0,0028	0,0016	1,6993	2,4025
0,8	63,5	0,9839	0,5781	0,7182	0,7223	1000	1,05	0,0023	0,0013	1,6997	2,4269
0,9	56,556	0,957	0,5622	0,7451	0,7497	2000	1,025	0,0006	0,0004	1,7014	2,5883
1	51	0,9329	0,5481	0,7692	0,7742	3000	1,017	0,0003	0,0002	1,7018	2,6835
1,5	34,333	0,8401	0,4936	0,8619	0,8693	4000	1,013	0,0002	0,0001	1,7019	2,7513
2	26	0,7746	0,4551	0,9274	0,9371	5000	1,01	0,0001	0,0001	1,7019	2,8041
3	17,667	0,6832	0,4014	1,0188	1,0331	6000	1,008	0,0001	0	1,702	2,8472
4	13,5	0,6194	0,3639	1,0827	1,1014	7000	1,007	0,0001	0	1,702	2,8838
5	11	0,5707	0,3353	1,1314	1,1545	8000	1,006	0	0	1,702	2,9154
6	9,333	0,5315	0,3123	1,1705	1,1979	9000	1,006	0	0	1,702	2,9434
7	8,143	0,499	0,2932	1,203	1,2346	10000	1,005	0	0	1,702	2,9684
8	7,25	0,4713	0,2769	1,2307	1,2665	15000	1,003	0	0	1,702	3,0648
9	6,556	0,4473	0,2628	1,2548	1,2946	20000	1,003	0	0	1,702	3,1333
10	6	0,4261	0,2503	1,276	1,3198						

Tableau 7.3: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5001	1,3714	1	0	0,0001	20	3,5	0,2979	0,2172	1,0735	1,1539
0,02	2501	1,371	0,9997	0,0004	0,0006	30	2,667	0,2329	0,1698	1,1386	1,2508
0,03	1667,667	1,3684	0,9978	0,003	0,0032	40	2,25	0,1918	0,1399	1,1796	1,3199
0,04	1251	1,3633	0,9941	0,0082	0,0084	50	2	0,163	0,1189	1,2084	1,3739
0,05	1001	1,3561	0,9889	0,0153	0,0155	60	1,833	0,1414	0,1031	1,23	1,4183
0,06	834,333	1,3478	0,9828	0,0236	0,0239	70	1,714	0,1244	0,0907	1,247	1,456
0,07	715,286	1,3386	0,9761	0,0328	0,0331	80	1,625	0,1106	0,0807	1,2608	1,4889
0,08	626	1,3291	0,9692	0,0423	0,0427	90	1,556	0,0993	0,0724	1,2722	1,518
0,09	556,556	1,3194	0,9621	0,052	0,0524	100	1,5	0,0897	0,0654	1,2818	1,544
0,1	501	1,3097	0,955	0,0617	0,0622	200	1,25	0,0407	0,0297	1,3307	1,7149
0,15	334,333	1,2636	0,9214	0,1078	0,1085	300	1,167	0,0233	0,017	1,3482	1,8127
0,2	251	1,223	0,8918	0,1484	0,1494	400	1,125	0,015	0,0109	1,3564	1,881
0,3	167,667	1,1566	0,8433	0,2148	0,2163	500	1,1	0,0105	0,0076	1,3609	1,9334
0,4	126	1,1041	0,8051	0,2673	0,2692	600	1,083	0,0077	0,0056	1,3637	1,976
0,5	101	1,061	0,7737	0,3104	0,3128	700	1,071	0,0059	0,0043	1,3655	2,012
0,6	84,333	1,0246	0,7471	0,3468	0,3497	800	1,063	0,0047	0,0034	1,3667	2,0431
0,7	72,429	0,993	0,7241	0,3784	0,3817	900	1,056	0,0038	0,0028	1,3676	2,0705
0,8	63,5	0,9652	0,7038	0,4062	0,41	1000	1,05	0,0032	0,0023	1,3683	2,0951
0,9	56,556	0,9404	0,6857	0,431	0,4353	2000	1,025	0,0009	0,0006	1,3705	2,2571
1	51	0,918	0,6694	0,4534	0,4581	3000	1,017	0,0004	0,0003	1,371	2,3524
1,5	34,333	0,8304	0,6055	0,541	0,5481	4000	1,013	0,0002	0,0002	1,3712	2,4203
2	26	0,7675	0,5597	0,6039	0,6133	5000	1,01	0,0001	0,0001	1,3713	2,4731
3	17,667	0,6788	0,495	0,6926	0,7065	6000	1,008	0,0001	0,0001	1,3713	2,5162
4	13,5	0,6163	0,4494	0,7551	0,7735	7000	1,007	0,0001	0,0001	1,3713	2,5528
5	11	0,5685	0,4145	0,8029	0,8257	8000	1,006	0,0001	0	1,3714	2,5845
6	9,333	0,5299	0,3864	0,8415	0,8685	9000	1,006	0	0	1,3714	2,6124
7	8,143	0,4978	0,363	0,8736	0,9049	10000	1,005	0	0	1,3714	2,6375
8	7,25	0,4705	0,3431	0,9009	0,9364	15000	1,003	0	0	1,3714	2,7339
9	6,556	0,4467	0,3257	0,9247	0,9642	20000	1,003	0	0	1,3714	2,8024
10	6	0,4258	0,3105	0,9456	0,9892						

Tableau 7.4: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50 s. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P3, ß = 40)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5001	0,9362	1,0001	0	0	30	2,667	0,2314	0,2472	0,7048	0,8148
0,02	2501	0,9363	1,0001	0	0	40	2,25	0,1917	0,2048	0,7444	0,8825
0,03	1667,667	0,9363	1,0002	0	0	50	2	0,1641	0,1753	0,772	0,9353
0,04	1251	0,9364	1,0002	0	0	60	1,833	0,1437	0,1535	0,7925	0,9785
0,05	1001	0,9364	1,0003	0	0	70	1,714	0,1279	0,1366	0,8083	1,0151
0,06	834,333	0,9364	1,0003	0	0	80	1,625	0,1152	0,1231	0,8209	1,0468
0,07	715,286	0,9365	1,0003	0	0	90	1,556	0,1049	0,112	0,8313	1,0748
0,08	626	0,9365	1,0004	0	0	100	1,5	0,0963	0,1028	0,8399	1,0999
0,09	556,556	0,9365	1,0004	0	0	200	1,25	0,0522	0,0557	0,884	1,266
0,1	501	0,9365	1,0004	0	0	300	1,167	0,0344	0,0368	0,9017	1,364
0,15	334,333	0,9356	0,9994	0,0005	0	400	1,125	0,0247	0,0264	0,9115	1,4338
0,2	251	0,9331	0,9968	0,003	0,0017	500	1,1	0,0186	0,0199	0,9175	1,4877
0,3	167,667	0,9237	0,9867	0,0125	0,0117	600	1,083	0,0146	0,0156	0,9216	1,5317
0,4	126	0,9106	0,9727	0,0256	0,0253	700	1,071	0,0117	0,0125	0,9245	1,5687
0,5	101	0,8959	0,957	0,0403	0,0404	800	1,063	0,0096	0,0103	0,9266	1,6007
0,6	84,333	0,8808	0,9408	0,0554	0,056	900	1,056	0,008	0,0086	0,9281	1,6288
0,7	72,429	0,8658	0,9248	0,0704	0,0715	1000	1,05	0,0068	0,0073	0,9294	1,654
0,8	63,5	0,8512	0,9093	0,085	0,0865	2000	1,025	0,0021	0,0023	0,934	1,8184
0,9	56,556	0,8372	0,8943	0,099	0,101	3000	1,017	0,001	0,0011	0,9351	1,9143
1	51	0,8237	0,8799	0,1124	0,1149	4000	1,013	0,0006	0,0006	0,9356	1,9824
1,5	34,333	0,765	0,8172	0,1712	0,176	5000	1,01	0,0004	0,0004	0,9358	2,0353
2	26	0,7177	0,7666	0,2185	0,2256	6000	1,008	0,0003	0,0003	0,9359	2,0786
3	17,667	0,6453	0,6893	0,2908	0,3025	7000	1,007	0,0002	0,0002	0,936	2,1152
4	13,5	0,5914	0,6317	0,3448	0,3609	8000	1,006	0,0002	0,0002	0,936	2,1469
5	11	0,5488	0,5862	0,3874	0,4079	9000	1,006	0,0001	0,0001	0,936	2,1749
6	9,333	0,5138	0,5488	0,4224	0,4472	10000	1,005	0,0001	0,0001	0,9361	2,1999
7	8,143	0,4842	0,5172	0,452	0,481	15000	1,003	0	0	0,9361	2,2964
8	7,25	0,4587	0,49	0,4774	0,5106	20000	1,003	0	0	0,9361	2,3649
9	6,556	0,4365	0,4662	0,4997	0,537	30000	1,002	0	0	0,9362	2,4615
10	6	0,4167	0,4452	0,5194	0,5607	40000	1,001	0	0	0,9362	2,5301
20	3,5	0,2943	0,3144	0,6418	0,7199						

Tableau 7.5: Remontée en ZONE D, tarrêt = 100000 secondes. Cas où S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P1, ß = 100)

t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	10000000	40001	39999,8	2,1900	0,0088	1,3270	90	1112,11	5,44444	4,444	0,3619	1,8369	3,1553
0,02	5000002	20001	20000,2	2,1556	0,0432	1,3613	100	1001	5	4	0,3391	1,8597	3,1781
0,03	3333335	13334	13333,4	2,1170	0,0818	1,3999	200	501	3	2	0,2080	1,9908	3,3094
0,04	2500001	10001	9999,98	2,0812	0,1176	1,4358	300	334,333	2,33333	1,333	0,1498	2,0490	3,3679
0,05	2000001	8000,9	7999,94	2,0490	0,1498	1,4680	400	251	2	1	0,1170	2,0818	3,4009
0,06	1666668	6667,7	6666,71	2,0201	0,1787	1,4968	500	201	1,8	0,8	0,0959	2,1029	3,4222
0,07	1428572	5715,3	5714,29	1,9941	0,2047	1,5228	600	167,667	1,66667	0,667	0,0812	2,1176	3,4371
0,08	1250001	5001	4999,98	1,9705	0,2283	1,5464	700	143,857	1,57143	0,571	0,0704	2,1284	3,4482
0,09	1111112	4445,5	4444,49	1,9490	0,2498	1,5680	800	126	1,5	0,5	0,0622	2,1366	3,4567
0,1	1000001	4001	4000,02	1,9291	0,2697	1,5878	900	112,111	1,44444	0,444	0,0556	2,1432	3,4635
0,15	666667,6	2667,7	2666,66	1,8487	0,3502	1,6683	1000	101	1,4	0,4	0,0503	2,1485	3,4690
0,2	500001	2001	2000,02	1,7884	0,4104	1,7286	2000	51	1,2	0,2	0,0256	2,1732	3,4961
0,3	333334,3	1334,3	1333,32	1,7001	0,4987	1,8168	3000	34,3333	1,13333	0,133	0,0171	2,1818	3,5070
0,4	250001	1001	999,996	1,6358	0,5630	1,8812	4000	26	1,1	0,1	0,0127	2,1861	3,5136
0,5	200001	801	800	1,5851	0,6137	1,9318	5000	21	1,08	0,08	0,0101	2,1887	3,5185
0,6	166667,7	667,67	666,669	1,5433	0,6555	1,9736	6000	17,6667	1,06667	0,067	0,0084	2,1904	3,5225
0,7	142858,2	572,43	571,433	1,5078	0,6910	2,0092	7000	15,2857	1,05714	0,057	0,0071	2,1917	3,5260
0,8	125001	501	499,996	1,4769	0,7219	2,0401	8000	13,5	1,05	0,05	0,0062	2,1926	3,5292
0,9	111112,1	445,44	444,443	1,4495	0,7493	2,0675	9000	12,1111	1,04444	0,044	0,0054	2,1934	3,5321
1	100001	401	400	1,4249	0,7739	2,0920	10000	11	1,04	0,04	0,0049	2,1940	3,5349
1,5	66667,66	267,67	266,667	1,3299	0,8689	2,1871	15000	7,66667	1,02667	0,027	0,0031	2,1957	3,5472
2	50001	201	200	1,2621	0,9367	2,2549	20000	6	1,02	0,02	0,0022	2,1966	3,5583
3	33334,33	134,33	133,333	1,1662	1,0326	2,3508	30000	4,33333	1,01333	0,013	0,0014	2,1974	3,5782
4	25001	101	100	1,0980	1,1008	2,4190	40000	3,5	1,01	0,01	0,0010	2,1978	3,5963
5	20001	81	80	1,0450	1,1538	2,4720	50000	3	1,008	0,008	0,0007	2,1981	3,6130
6	16667,67	67,667	66,6667	1,0016	1,1972	2,5154	60000	2,66667	1,00667	0,007	0,0006	2,1982	3,6286
7	14286,71	58,143	57,1429	0,9649	1,2339	2,5520	70000	2,42857	1,00571	0,006	0,0005	2,1984	3,6432
8	12501	51	50	0,9332	1,2656	2,5838	80000	2,25	1,005	0,005	0,0004	2,1984	3,6569
9	11112,11	45,444	44,4444	0,9051	1,2937	2,6119	90000	2,11111	1,00444	0,004	0,0003	2,1985	3,6699
10	10001	41	40	0,8800	1,3188	2,6370	100000	2	1,004	0,004	0,0003	2,1985	3,6822
20	5001	21	20	0,7148	1,4840	2,8022	200000	1,5	1,002	0,002	0,0001	2,1987	3,7791
30	3334,333	14,333	13,3333	0,6181	1,5807	2,8989	300000	1,33333	1,00133	0,001	0,0000	2,1988	3,8479
40	2501	11	10	0,5496	1,6492	2,9674	400000	1,25	1,001	1E-03	0,0000	2,1988	3,9012
50	2001	9	8	0,4967	1,7021	3,0204	500000	1,2	1,0008	8E-04	0,0000	2,1988	3,9447
60	1667,667	7,6667	6,66667	0,4539	1,7449	3,0632	600000	1,16667	1,00067	7E-04	0,0000	2,1988	3,9815
70	1429,571	6,7143	5,71429	0,4183	1,7805	3,0988	700000	1,14286	1,00057	6E-04	0,0000	2,1988	4,0134
80	1251	6	5	0,3880	1,8108	3,1291							

Tableau 7.6: Remontée en ZONE D, tarrêt =100 000 s, S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	10000000	57600,8	57599,8	1,9541	0,0008	1,2319	100	1001	6,76	5,76	0,4198	1,5351	2,7665
0,02	5000002	28801,2	28800,2	1,9536	0,0013	1,2324	200	501	3,88	2,88	0,2721	1,6828	2,9144
0,03	3333335	19201	19200	1,9510	0,0039	1,2350	300	334,333	2,92	1,92	0,2012	1,7537	2,9855
0,04	2500001	14401	14400	1,9458	0,0091	1,2402	400	251	2,44	1,44	0,1595	1,7954	3,0275
0,05	2000001	11520,9	11519,9	1,9387	0,0162	1,2473	500	201	2,152	1,152	0,1320	1,8229	3,0552
0,06	1666668	9601,04	9600,04	1,9303	0,0247	1,2558	600	167,667	1,96	0,96	0,1126	1,8423	3,0748
0,07	1428572	8229,58	8228,58	1,9211	0,0338	1,2649	700	143,857	1,82286	0,82286	0,0981	1,8568	3,0895
0,08	1250001	7200,98	7199,98	1,9115	0,0434	1,2745	800	126	1,72	0,72	0,0869	1,8680	3,1010
0,09	1111112	6401,04	6400,04	1,9018	0,0531	1,2842	900	112,111	1,64	0,64	0,0780	1,8769	3,1101
0,1	1000001	5761,02	5760,02	1,8920	0,0629	1,2940	1000	101	1,576	0,576	0,0707	1,8842	3,1177
0,15	666667,6	3840,99	3839,99	1,8457	0,1092	1,3403	2000	51	1,288	0,288	0,0364	1,9185	3,1543
0,2	500001	2881,02	2880,02	1,8048	0,1501	1,3812	3000	34,3333	1,192	0,192	0,0243	1,9306	3,1687
0,3	333334,3	1920,99	1919,99	1,7379	0,2170	1,4481	4000	26	1,144	0,144	0,0182	1,9367	3,1772
0,4	250001	1441	1440	1,6850	0,2699	1,5010	5000	21	1,1152	0,1152	0,0145	1,9404	3,1832
0,5	200001	1153	1152	1,6414	0,3135	1,5446	6000	17,6667	1,096	0,096	0,0120	1,9429	3,1879
0,6	166667,7	961,003	960,003	1,6045	0,3504	1,5815	7000	15,2857	1,08229	0,08229	0,0102	1,9447	3,1920
0,7	142858,2	823,862	822,862	1,5725	0,3824	1,6135	8000	13,5	1,072	0,072	0,0089	1,9461	3,1955
0,8	125001	720,996	719,996	1,5442	0,4107	1,6418	9000	12,1111	1,064	0,064	0,0078	1,9471	3,1988
0,9	111112,1	640,998	639,998	1,5189	0,4360	1,6671	10000	11	1,0576	0,0576	0,0070	1,9479	3,2018
1	100001	577	576	1,4961	0,4588	1,6899	15000	7,66667	1,0384	0,0384	0,0045	1,9505	3,2149
1,5	66667,66	385	384	1,4062	0,5487	1,7798	20000	6	1,0288	0,0288	0,0032	1,9517	3,2263
2	50001	289	288	1,3410	0,6139	1,8450	30000	4,33333	1,0192	0,0192	0,0020	1,9529	3,2467
3	33334,33	193	192	1,2477	0,7072	1,9383	40000	3,5	1,0144	0,0144	0,0014	1,9535	3,2650
4	25001	145	144	1,1808	0,7741	2,0052	50000	3	1,01152	0,01152	0,0010	1,9539	3,2818
5	20001	116,2	115,2	1,1286	0,8263	2,0574	60000	2,66667	1,0096	0,0096	0,0008	1,9541	3,2974
6	16667,67	97	96	1,0858	0,8691	2,1003	70000	2,42857	1,00823	0,00823	0,0006	1,9543	3,3120
7	14286,71	83,2857	82,2857	1,0495	0,9054	2,1366	80000	2,25	1,0072	0,0072	0,0005	1,9544	3,3258
8	12501	73	72	1,0180	0,9369	2,1681	90000	2,11111	1,0064	0,0064	0,0005	1,9545	3,3388
9	11112,11	65	64	0,9901	0,9648	2,1959	100000	2	1,00576	0,00576	0,0004	1,9545	3,3511
10	10001	58,6	57,6	0,9652	0,9897	2,2208	200000	1,5	1,00288	0,00288	0,0001	1,9548	3,4482
20	5001	29,8	28,8	0,8008	1,1541	2,3852	300000	1,33333	1,00192	0,00192	0,0001	1,9548	3,5169
30	3334,333	20,2	19,2	0,7044	1,2505	2,4817	400000	1,25	1,00144	0,00144	0,0000	1,9549	3,5702
40	2501	15,4	14,4	0,6359	1,3190	2,5502	500000	1,2	1,00115	0,00115	0,0000	1,9549	3,6137
50	2001	12,52	11,52	0,5828	1,3721	2,6034	600000	1,16667	1,00096	0,00096	0,0000	1,9549	3,6505
60	1667,667	10,6	9,6	0,5394	1,4155	2,6467	700000	1,14286	1,00082	0,00082	0,0000	1,9549	3,6824
70	1429,571	9,22857	8,22857	0,5029	1,4520	2,6832	800000	1,125	1,00072	0,00072	0,0000	1,9549	3,7105
80	1251	8,2	7,2	0,4715	1,4834	2,7147	900000	1,11111	1,00064	0,00064	0,0000	1,9549	3,7357
90	1112,111	7,4	6,4	0,4441	1,5108	2,7422							

Tableau 7.7: Remontée en ZONE D, tarrêt = 100000s, S = S' = 2,25E-4
(Piézomètre P3, ß = 40)

t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'(s)	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	1E+07	160000,8	160000	1,7592	0,0021	0,9893	100	1001	17	16	0,6589	1,1024	2,0899
0,02	5000002	80001,17	80000,2	1,7592	0,0021	0,9893	200	501	9	8	0,4946	1,2668	2,2544
0,03	3333335	53334,38	53333,4	1,7592	0,0021	0,9893	300	334,33	6,33333	5,33333	0,4006	1,3607	2,3486
0,04	2500001	40000,98	40000	1,7592	0,0021	0,9893	400	251	5	4	0,3372	1,4241	2,4122
0,05	2000001	32000,94	31999,9	1,7592	0,0021	0,9893	500	201	4,2	3,2	0,2912	1,4701	2,4585
0,06	1666668	26667,71	26666,7	1,7592	0,0021	0,9893	600	167,67	3,66667	2,66667	0,2561	1,5052	2,4938
0,07	1428572	22858,15	22857,2	1,7592	0,0022	0,9893	700	143,86	3,28571	2,28571	0,2285	1,5328	2,5216
0,08	1250001	20000,98	20000	1,7591	0,0022	0,9894	800	126	3	2	0,2063	1,5550	2,5441
0,09	1111112	17778,82	17777,8	1,7591	0,0022	0,9894	900	112,11	2,77778	1,77778	0,1879	1,5734	2,5627
0,1	1000001	16001,02	16000	1,7590	0,0023	0,9895	1000	101	2,6	1,6	0,1725	1,5888	2,5784
0,15	666668	10667,66	10666,7	1,7579	0,0034	0,9906	2000	51	1,8	0,8	0,0943	1,6670	2,6589
0,2	500001	8001,016	8000,02	1,7552	0,0061	0,9933	3000	34,333	1,53333	0,53333	0,0645	1,6968	2,6911
0,3	333334	5334,323	5333,32	1,7453	0,0160	1,0032	4000	26	1,4	0,4	0,0487	1,7126	2,7091
0,4	250001	4000,996	4000	1,7317	0,0296	1,0168	5000	21	1,32	0,32	0,0390	1,7223	2,7211
0,5	200001	3201	3200	1,7165	0,0448	1,0320	6000	17,667	1,26667	0,26667	0,0325	1,7288	2,7300
0,6	166668	2667,669	2666,67	1,7009	0,0604	1,0476	7000	15,286	1,22857	0,22857	0,0277	1,7336	2,7369
0,7	142858	2286,719	2285,72	1,6855	0,0758	1,0630	8000	13,5	1,2	0,2	0,0241	1,7372	2,7428
0,8	125001	2000,996	2000	1,6705	0,0908	1,0780	9000	12,111	1,17778	0,17778	0,0213	1,7400	2,7478
0,9	111112	1778,776	1777,78	1,6560	0,1053	1,0925	10000	11	1,16	0,16	0,0191	1,7423	2,7522
1	100001	1601	1600	1,6421	0,1192	1,1064	15000	7,6667	1,10667	0,10667	0,0122	1,7491	2,7696
1,5	66667,7	1067,667	1066,67	1,5810	0,1803	1,1675	20000	6	1,08	0,08	0,0088	1,7525	2,7832
2	50001	801	800	1,5314	0,2299	1,2171	30000	4,3333	1,05333	0,05333	0,0055	1,7559	2,8057
3	33334,3	534,3333	533,333	1,4546	0,3067	1,2939	40000	3,5	1,04	0,04	0,0038	1,7575	2,8250
4	25001	401	400	1,3962	0,3651	1,3523	50000	3	1,032	0,032	0,0028	1,7585	2,8425
5	20001	321	320	1,3493	0,4120	1,3993	60000	2,6667	1,02667	0,02667	0,0022	1,7591	2,8585
6	16667,7	267,6667	266,667	1,3100	0,4513	1,4385	70000	2,4286	1,02286	0,02286	0,0018	1,7595	2,8734
7	14286,7	229,5714	228,571	1,2763	0,4851	1,4723	80000	2,25	1,02	0,02	0,0015	1,7598	2,8873
8	12501	201	200	1,2467	0,5146	1,5018	90000	2,1111	1,01778	0,01778	0,0013	1,7601	2,9005
9	11112,1	178,7778	177,778	1,2204	0,5409	1,5282	100000	2	1,016	0,016	0,0011	1,7602	2,9129
10	10001	161	160	1,1967	0,5646	1,5519	200000	1,5	1,008	0,008	0,0004	1,7610	3,0104
20	5001	81	80	1,0378	0,7235	1,7108	300000	1,3333	1,00533	0,00533	0,0002	1,7611	3,0793
30	3334,33	54,33333	53,3333	0,9432	0,8181	1,8054	400000	1,25	1,004	0,004	0,0001	1,7612	3,1326
40	2501	41	40	0,8756	0,8857	1,8730	500000	1,2	1,0032	0,0032	0,0001	1,7612	3,1762
50	2001	33	32	0,8230	0,9383	1,9256	600000	1,1667	1,00267	0,00267	0,0001	1,7613	3,2130
60	1667,67	27,66667	26,6667	0,7799	0,9814	1,9687	700000	1,1429	1,00229	0,00229	0,0000	1,7613	3,2449
70	1429,57	23,85714	22,8571	0,7434	1,0179	2,0052	800000	1,125	1,002	0,002	0,0000	1,7613	3,2730
80	1251	21	20	0,7118	1,0495	2,0369	900000	1,1111	1,00178	0,00178	0,0000	1,7613	3,2982
90	1112,11	18,77778	17,7778	0,6839	1,0774	2,0649	1000000	1,1	1,0016	0,0016	0,0000	1,7613	3,3209

Tableau 7.8: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P1, ß = 100)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'inf(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5 001	1,659	1,868	0,975	0,043	0,044
0,02	2 501	1,585	1,703	0,931	0,117	0,118
0,03	1 668	1,524	1,606	0,895	0,178	0,179
0,04	1 251	1,474	1,537	0,866	0,228	0,229
0,05	1 001	1,433	1,484	0,842	0,269	0,270
0,06	834,3	1,397	1,440	0,821	0,304	0,305
0,07	715,3	1,366	1,404	0,803	0,335	0,336
0,08	626,0	1,339	1,372	0,787	0,363	0,364
0,09	556,6	1,314	1,344	0,773	0,387	0,388
0,10	501,0	1,292	1,319	0,759	0,409	0,411
0,15	334,3	1,204	1,222	0,708	0,497	0,499
0,20	251,0	1,140	1,154	0,670	0,562	0,563
0,30	167,7	1,048	1,057	0,616	0,654	0,656
0,40	126,0	0,982	0,989	0,577	0,720	0,722
0,50	101,0	0,931	0,936	0,547	0,771	0,774
0,60	84,33	0,888	0,893	0,522	0,813	0,817
0,70	72,43	0,853	0,857	0,501	0,849	0,853
0,80	63,50	0,822	0,826	0,483	0,880	0,884
0,90	56,56	0,794	0,798	0,467	0,907	0,912
1,00	51,00	0,770	0,773	0,453	0,932	0,937
1,50	34,33	0,676	0,679	0,398	1,025	1,033
2,00	26,00	0,611	0,612	0,359	1,091	1,101
3,00	17,67	0,519	0,520	0,305	1,183	1,198
4,00	13,50	0,455	0,456	0,267	1,247	1,266
5,00	11,00	0,406	0,407	0,238	1,296	1,319
6,00	9,33	0,367	0,368	0,215	1,335	1,363
7,00	8,14	0,334	0,335	0,196	1,368	1,400
8,00	7,25	0,306	0,308	0,180	1,395	1,432
9,00	6,56	0,282	0,283	0,166	1,420	1,460
10,00	6,00	0,261	0,262	0,153	1,441	1,485
20,00	3,50	0,131	0,134	0,077	1,570	1,651
30,00	2,67	0,066	0,069	0,039	1,636	1,749
40,00	2,25	0,026	0,028	0,015	1,675	1,817
50,00	2,00	0,000	0,000	0,000	1,702	1,868

Tableau 7.9: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'inf(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5 001	1,371	1,868	1,000	0,000	0,001
0,02	2 501	1,363	1,703	0,994	0,008	0,008
0,03	1 668	1,348	1,606	0,983	0,024	0,024
0,04	1 251	1,329	1,537	0,969	0,042	0,043
0,05	1 001	1,310	1,484	0,955	0,062	0,062
0,06	834,3	1,290	1,440	0,941	0,081	0,081
0,07	715,3	1,272	1,404	0,928	0,099	0,100
0,08	626,0	1,255	1,372	0,915	0,117	0,117
0,09	556,6	1,238	1,344	0,903	0,133	0,134
0,10	501,0	1,223	1,319	0,892	0,149	0,149
0,15	334,3	1,156	1,222	0,843	0,216	0,216
0,20	251,0	1,103	1,154	0,804	0,268	0,269
0,30	167,7	1,023	1,057	0,746	0,348	0,350
0,40	126,0	0,963	0,989	0,703	0,408	0,410
0,50	101,0	0,916	0,936	0,668	0,456	0,458
0,60	84,33	0,876	0,893	0,639	0,495	0,498
0,70	72,43	0,842	0,857	0,614	0,529	0,533
0,80	63,50	0,813	0,826	0,593	0,559	0,563
0,90	56,56	0,786	0,798	0,574	0,585	0,589
1,00	51,00	0,763	0,773	0,556	0,608	0,613
1,50	34,33	0,672	0,679	0,490	0,699	0,707
2,00	26,00	0,607	0,612	0,443	0,764	0,773
3,00	17,67	0,517	0,520	0,377	0,855	0,869
4,00	13,50	0,454	0,456	0,331	0,918	0,936
5,00	11,00	0,405	0,407	0,295	0,966	0,989
6,00	9,33	0,366	0,368	0,267	1,005	1,032
7,00	8,14	0,334	0,335	0,244	1,038	1,069
8,00	7,25	0,306	0,308	0,223	1,065	1,101
9,00	6,56	0,282	0,283	0,206	1,089	1,129
10,00	6,00	0,261	0,262	0,191	1,110	1,154
20,00	3,50	0,133	0,134	0,097	1,238	1,319
30,00	2,67	0,068	0,069	0,050	1,303	1,416
40,00	2,25	0,028	0,028	0,020	1,344	1,484
50,00	2,00	0,000	0,000	0,000	1,371	1,537

Tableau 7.10: Remontée en ZONE B, tarrêt = 50s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4 (Piézomètre P3, ß = 40)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'inf(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp-s'
0,01	5 001	0,936	1,868	1,000	-	-
0,02	2 501	0,936	1,703	1,000	-	-
0,03	1 668	0,936	1,606	1,000	-	-
0,04	1 251	0,936	1,537	1,000	-	-
0,05	1 001	0,936	1,484	1,000	-	-
0,06	834,3	0,936	1,440	1,000	0,000	-
0,07	715,3	0,936	1,404	0,999	0,001	-
0,08	626,0	0,935	1,372	0,999	0,001	-
0,09	556,6	0,934	1,344	0,998	0,002	0,000
0,10	501,0	0,933	1,319	0,996	0,004	0,002
0,15	334,3	0,923	1,222	0,986	0,013	0,012
0,20	251,0	0,910	1,154	0,972	0,027	0,025
0,30	167,7	0,879	1,057	0,939	0,057	0,056
0,40	126,0	0,849	0,989	0,907	0,087	0,087
0,50	101,0	0,821	0,936	0,877	0,115	0,115
0,60	84,33	0,796	0,893	0,850	0,140	0,141
0,70	72,43	0,773	0,857	0,825	0,164	0,165
0,80	63,50	0,751	0,826	0,802	0,185	0,187
0,90	56,56	0,731	0,798	0,781	0,205	0,207
1,00	51,00	0,713	0,773	0,762	0,223	0,226
1,50	34,33	0,639	0,679	0,682	0,298	0,302
2,00	26,00	0,583	0,612	0,622	0,354	0,361
3,00	17,67	0,501	0,520	0,535	0,435	0,447
4,00	13,50	0,442	0,456	0,472	0,494	0,510
5,00	11,00	0,396	0,407	0,423	0,540	0,561
6,00	9,33	0,359	0,368	0,384	0,577	0,602
7,00	8,14	0,328	0,335	0,350	0,608	0,637
8,00	7,25	0,301	0,308	0,322	0,635	0,668
9,00	6,56	0,278	0,283	0,297	0,658	0,695
10,00	6,00	0,258	0,262	0,275	0,678	0,720
20,00	3,50	0,132	0,134	0,141	0,804	0,882
30,00	2,67	0,068	0,069	0,073	0,868	0,978
40,00	2,25	0,028	0,028	0,030	0,908	1,046
50,00	2,00	-	-	-	0,936	1,099

Tableau 7.11: Remontée en ZONE D, tarrêt = 100 000s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4
(Piézomètre P1, ß = 100)

t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	10 000 000	40 000,8	39 999,8	2,156	0,043	1,361	60,00	1 667,7	7,7	6,7	0,301	1,898	3,216
0,02	5 000 002	20 001,2	20 000,2	2,081	0,118	1,436	70,00	1 429,6	6,7	5,7	0,271	1,928	3,246
0,03	3 333 335	13 334,4	13 333,4	2,020	0,179	1,497	80,00	1 251,0	6,0	5,0	0,246	1,953	3,271
0,04	2 500 001	10 001,0	10 000,0	1,971	0,228	1,546	90,00	1 112,1	5,4	4,4	0,225	1,973	3,292
0,05	2 000 001	8 000,9	7 999,9	1,929	0,270	1,588	100,0	1 001,0	5,0	4,0	0,208	1,991	3,309
0,06	1 666 668	6 667,7	6 666,7	1,894	0,305	1,623	200,0	501,000	3,000	2,000	0,117	2,082	3,400
0,07	1 428 572	5 715,3	5 714,3	1,863	0,336	1,654	300,0	334,333	2,333	1,333	0,081	2,118	3,436
0,08	1 250 001	5 001,0	5 000,0	1,835	0,363	1,682	400,0	251,000	2,000	1,000	0,062	2,137	3,456
0,09	1 111 112	4 445,5	4 444,5	1,811	0,388	1,706	500,0	201,000	1,800	0,800	0,050	2,149	3,468
0,10	1 000 001	4 001,0	4 000,0	1,788	0,410	1,729	600,0	167,667	1,667	0,667	0,042	2,157	3,476
0,15	666 668	2 667,7	2 666,7	1,700	0,499	1,817	700,0	143,857	1,571	0,571	0,036	2,162	3,482
0,20	500 001	2 001,0	2 000,0	1,636	0,563	1,881	800,0	126,000	1,500	0,500	0,032	2,167	3,487
0,30	333 334	1 334,3	1 333,3	1,543	0,655	1,974	900,0	112,111	1,444	0,444	0,028	2,170	3,491
0,40	250 001	1 001,0	1 000,0	1,477	0,722	2,040	1 000	101,000	1,400	0,400	0,026	2,173	3,494
0,50	200 001	801,0	800,0	1,425	0,774	2,092	2 000	51,000	1,200	0,200	0,013	2,186	3,509
0,60	166 668	667,7	666,7	1,382	0,817	2,135	3 000	34,333	1,133	0,133	0,008	2,190	3,516
0,70	142 858	572,4	571,4	1,346	0,853	2,171	4 000	26,000	1,100	0,100	0,006	2,193	3,520
0,80	125 001	501,0	500,0	1,315	0,884	2,202	5 000	21,000	1,080	0,080	0,005	2,194	3,524
0,90	111 112	445,4	444,4	1,287	0,912	2,230	6 000	17,667	1,067	0,067	0,004	2,195	3,527
1,00	100 001	401,0	400,0	1,262	0,937	2,255	7 000	15,286	1,057	0,057	0,003	2,195	3,530
1,50	66 667,7	267,7	266,7	1,166	1,033	2,351	8 000	13,500	1,050	0,050	0,003	2,198	3,532
2,00	50 001,0	201,0	200,0	1,098	1,101	2,419	9 000	12,111	1,044	0,044	0,002	2,198	3,535
3,00	33 334,3	134,3	133,3	1,002	1,197	2,515	10 000	11,000	1,040	0,040	0,002	2,197	3,538
4,00	25 001,0	101,0	100,0	0,933	1,266	2,584	15 000	7,667	1,027	0,027	0,001	2,197	3,549
5,00	20 001,0	81,0	80,0	0,880	1,319	2,637	20 000	6,000	1,020	0,020	0,001	2,198	3,560
6,00	16 667,7	67,7	66,7	0,837	1,362	2,680	30 000	4,333	1,013	0,013	0,000	2,198	3,579
7,00	14 286,7	58,1	57,1	0,800	1,399	2,717	40 000	3,500	1,010	0,010	0,000	2,199	3,597
8,00	12 501,0	51,0	50,0	0,768	1,431	2,749	50 000	3,000	1,008	0,008	0,000	2,199	3,614
9,00	11 112,1	45,4	44,4	0,740	1,459	2,777	60 000	2,667	1,007	0,007	0,000	2,199	3,629
10,00	10 001,0	41,0	40,0	0,715	1,484	2,802	70 000	2,429	1,006	0,006	0,000	2,199	3,644
20,00	5 001,0	21,0	20,0	0,550	1,649	2,967	80 000	2,250	1,005	0,005	0,000	2,199	3,657
30,00	3 334,3	14,3	13,3	0,454	1,745	3,063	90 000	2,111	1,004	0,004	0,000	2,199	3,670
40,00	2 501,0	11,0	10,0	0,388	1,811	3,129	100 000	2,000	1,004	0,004	0,000	2,199	3,682
50,00	2 001,0	9,0	8,0	0,339	1,860	3,178							

Tableau 7.12: Remontée en ZONE D, tarrêt = 100 000 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4
(Piézomètre P2, ß = 60)

t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	10000000	57600,76	57599,76	1,9536	0,0013	1,2324	60	1667,667	10,6	9,6	0,3785	1,5764	2,6076
0,02	5000002	28801,17	28800,17	1,9458	0,0091	1,2402	70	1429,571	9,22857	8,22857	0,3448	1,6101	2,6414
0,03	3333335	19201,04	19200,04	1,9303	0,0247	1,2556	80	1251	8,2	7,2	0,3166	1,6383	2,6696
0,04	2500001	14400,98	14399,98	1,9115	0,0434	1,2745	90	1112,111	7,4	6,4	0,2927	1,6622	2,6935
0,05	2000001	11520,94	11519,94	1,8920	0,0629	1,2940	100	1001	6,76	5,76	0,2721	1,6828	2,9141
0,06	1666668	9601,042	9600,042	1,8729	0,0820	1,3131	200	501	3,88	2,88	0,1595	1,7954	3,0270
0,07	1428572	8229,576	8228,576	1,8545	0,1004	1,3315	300	334,3333	2,92	1,92	0,1126	1,8423	3,0741
0,08	1250001	7200,977	7199,977	1,8370	0,1179	1,3490	400	251	2,44	1,44	0,0869	1,8680	3,1000
0,09	1111112	6401,042	6400,042	1,8205	0,1344	1,3655	500	201	2,152	1,152	0,0707	1,8842	3,1165
0,1	1000001	5761,016	5760,016	1,8048	0,1501	1,3812	600	167,6667	1,96	0,96	0,0596	1,8953	3,1279
0,15	666667,6	3840,99	3839,99	1,7379	0,2170	1,4481	700	143,8571	1,82286	0,82286	0,0514	1,9035	3,1362
0,2	500001	2881,016	2880,016	1,6850	0,2699	1,5010	800	126	1,72	0,72	0,0452	1,9097	3,1427
0,3	333334,3	1920,99	1919,99	1,6045	0,3504	1,5815	900	112,1111	1,64	0,64	0,0403	1,9146	3,1478
0,4	250001	1440,996	1439,996	1,5442	0,4107	1,6418	1000	101	1,576	0,576	0,0364	1,9185	3,1520
0,5	200001	1153	1152	1,4961	0,4588	1,6899	2000	51	1,288	0,288	0,0182	1,9367	3,1725
0,6	166667,7	961,0026	960,0026	1,4580	0,4969	1,7300	3000	34,33333	1,192	0,192	0,0120	1,9429	3,1811
0,7	142858,2	823,8616	822,8616	1,4216	0,5333	1,7644	4000	26	1,144	0,144	0,0088	1,9461	3,1865
0,8	125001	720,9961	719,9961	1,3916	0,5633	1,7944	5000	21	1,1152	0,1152	0,0069	1,9480	3,1907
0,9	111112,1	640,9983	639,9983	1,3650	0,5899	1,8210	6000	17,66667	1,096	0,096	0,0057	1,9492	3,1942
1	100001	577	576	1,3410	0,6139	1,8450	7000	15,28571	1,08229	0,08229	0,0048	1,9501	3,1974
1,5	66667,66	385	384	1,2477	0,7072	1,9383	8000	13,5	1,072	0,072	0,0041	1,9508	3,2003
2	50001	289	288	1,1808	0,7741	2,0052	9000	12,11111	1,064	0,064	0,0036	1,9513	3,2030
3	33334,33	193	192	1,0658	0,8691	2,1003	10000	11	1,0576	0,0576	0,0031	1,9518	3,2056
4	25001	145	144	1,0180	0,9369	2,1680	15000	7,66667	1,0384	0,0384	0,0019	1,9530	3,2175
5	20001	116,2	115,2	0,9852	0,9897	2,2208	20000	6	1,0288	0,0288	0,0015	1,9536	3,2282
6	16667,67	97	96	0,9221	1,0328	2,2640	30000	4,33333	1,0192	0,0192	0,0007	1,9542	3,2479
7	14286,71	83,28571	82,28571	0,8855	1,0694	2,3005	40000	3,5	1,0144	0,0144	0,0004	1,9545	3,2659
8	12501	73	72	0,8538	1,1011	2,3322	50000	3	1,01152	0,01152	0,0003	1,9546	3,2825
9	11112,11	65	64	0,8259	1,1290	2,3602	60000	2,66667	1,0096	0,0096	0,0002	1,9547	3,2980
10	10001	58,6	57,6	0,8008	1,1541	2,3852	70000	2,42857	1,00823	0,00823	0,0001	1,9548	3,3126
20	5001	29,8	28,8	0,6359	1,3190	2,5502	80000	2,25	1,0072	0,0072	0,0001	1,9549	3,3263
30	3334,333	20,2	19,2	0,5394	1,4155	2,6466	90000	2,11111	1,0064	0,0064	0,0000	1,9549	3,3392
40	2501	15,4	14,4	0,4715	1,4834	2,7146	100000	2	1,00576	0,00576	-	1,9549	3,3515
50	2001	12,52	11,52	0,4198	1,5351	2,7664							

Tableau 7.13: Remontée en ZONE D, tarrêt = 100 000 s. Cas où S = 2S' = 2,25E-4
(Piézomètre P3, ß = 40)

t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-1	s'(m)	smax-s'	sp-s'	t'	t/t'	tcor/t'	tcor/t'-2	s'(m)	smax-s'	sp-s'
0,01	10000000	160000,8	159999,8	1,7592	0,0021	0,9893	60	1667,667	27,66667	26,66667	0,6156	1,1457	2,1331
0,02	5000002	80001,17	80000,17	1,7592	0,0021	0,9893	70	1429,571	23,85714	22,85714	0,5790	1,1823	2,1697
0,03	3333335	53334,38	53333,38	1,7592	0,0021	0,9893	80	1251	21	20	0,5473	1,2140	2,2014
0,04	2500001	40000,98	39999,98	1,7591	0,0022	0,9894	90	1112,111	18,77778	17,77778	0,5194	1,2419	2,2293
0,05	2000001	32000,84	31999,84	1,7590	0,0023	0,9895	100	1001	17	16	0,4946	1,2668	2,2542
0,06	1666668	26667,71	26666,71	1,7588	0,0025	0,9897	200	501	9	8	0,3372	1,4241	2,4118
0,07	1428572	22858,15	22857,15	1,7583	0,0030	0,9902	300	334,3333	6,33333	5,33333	0,2561	1,5052	2,4931
0,08	1250001	20000,98	19999,98	1,7575	0,0038	0,9910	400	251	5	4	0,2063	1,5551	2,5432
0,09	1111112	17778,82	17777,82	1,7565	0,0048	0,9920	500	201	4,2	3,2	0,1725	1,5888	2,5772
0,1	1000001	16001,02	16000,02	1,7552	0,0061	0,9933	600	167,6667	3,66667	2,66667	0,1481	1,6132	2,6018
0,15	666667,6	10667,66	10666,66	1,7453	0,0160	1,0032	700	143,6571	3,28571	2,28571	0,1297	1,6316	2,6205
0,2	500001	8001,016	8000,016	1,7317	0,0296	1,0168	800	126	3	2	0,1153	1,6460	2,6351
0,3	333334,3	5334,323	5333,323	1,7009	0,0604	1,0476	900	112,1111	2,77778	1,77778	0,1038	1,6575	2,6469
0,4	250001	4000,996	3999,996	1,6705	0,0908	1,0780	1000	101	2,6	1,6	0,0943	1,6670	2,6568
0,5	200001	3201	3200	1,6421	0,1192	1,1064	2000	51	1,8	0,8	0,0487	1,7126	2,7045
0,6	166667,7	2667,669	2666,669	1,6160	0,1453	1,1325	3000	34,33333	1,53333	0,53333	0,0324	1,7289	2,7232
0,7	142858,2	2286,719	2285,719	1,5922	0,1691	1,1563	4000	26	1,4	0,4	0,0240	1,7373	2,7338
0,8	125001	2000,996	1999,996	1,5703	0,1910	1,1782	5000	21	1,32	0,32	0,0190	1,7424	2,7412
0,9	111112,1	1778,776	1777,776	1,5501	0,2112	1,1984	6000	17,66667	1,26667	0,26667	0,0155	1,7458	2,7469
1	100001	1601	1600	1,5314	0,2299	1,2171	7000	15,28571	1,22857	0,22857	0,0131	1,7482	2,7516
1,5	66667,66	1067,667	1066,667	1,4546	0,3067	1,2939	8000	13,5	1,2	0,2	0,0112	1,7501	2,7556
2	50001	801	800	1,3962	0,3651	1,3523	9000	12,11111	1,17778	0,17778	0,0098	1,7515	2,7593
3	33334,33	534,3333	533,3333	1,3100	0,4513	1,4385	10000	11	1,16	0,16	0,0087	1,7526	2,7626
4	25001	401	400	1,2467	0,5146	1,5018	15000	7,66667	1,10667	0,10667	0,0052	1,7561	2,7766
5	20001	321	320	1,1967	0,5646	1,5519	20000	6	1,08	0,08	0,0036	1,7578	2,7885
6	16667,67	267,6667	266,6667	1,1553	0,6060	1,5932	30000	4,33333	1,05333	0,05333	0,0019	1,7594	2,8092
7	14286,71	229,5714	228,5714	1,1201	0,6412	1,6284	40000	3,5	1,04	0,04	0,0011	1,7602	2,8277
8	12501	201	200	1,0894	0,6719	1,6591	50000	3	1,032	0,032	0,0007	1,7606	2,8446
9	11112,11	178,7778	177,7778	1,0622	0,6991	1,6863	60000	2,66667	1,02667	0,02667	0,0004	1,7609	2,8603
10	10001	161	160	1,0378	0,7235	1,7108	70000	2,42857	1,02286	0,02286	0,0003	1,7610	2,8749
20	5001	81	80	0,8756	0,8857	1,8729	80000	2,25	1,02	0,02	0,0001	1,7612	2,8887
30	3334,333	54,33333	53,33333	0,7799	0,9814	1,9687	90000	2,11111	1,01778	0,01778	0,0001	1,7612	2,9017
40	2501	41	40	0,7118	1,0495	2,0368	100000	2	1,016	0,016	0,0000	1,7613	2,9140
50	2001	33	32	0,6589	1,1024	2,0898							

Tableau 7.14: essai de pompage:essai réel (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre P11 à r = 151,5 m

t(h)	t(min)	s(m) P11	t(h)	t(min)	s(m) P11
0	0	0	26	1560	3,69
0,017	1		30	1800	3,69
0,033	2		36	2160	3,77
0,05	3		42	2520	3,78
0,067	4		48	2880	3,79
0,083	5	0,18	56	3360	3,8
0,1	6		64	3840	3,89
0,133	8		76	4560	3,88
0,167	10	0,37	88	5280	3,92
0,2	12		100	6000	3,93
0,25	15	0,57	120	7200	3,89
0,3	18		140	8400	3,97
0,42	25	0,89	164	9840	3,98
0,5	30	1,01	188	11280	4,02
0,67	40	1,25	212	12720	4,02
0,83	50	1,41	240	14400	4,01
1	60	1,57	264	15840	4
1,33	80	1,82	288	17280	4
1,67	100	2,01	312	18720	4
2	120	2,17	336	20160	4
2,5	150	2,35	360	21600	4
3	180	2,41	384	23040	4,01
3,5	210	2,61	408	24480	4,02
4	240	2,71	432	25920	4
5	300	2,87	456	27360	3,89
6	360	2,99	480	28800	3,98
7	420	3,12	504	30240	3,96
8	480	3,18	528	31680	3,97
9	540	3,23	552	33120	3,95
10	600	3,31	576	34560	3,91
12	720	3,43	600	36000	3,92
14	840	3,47	624	37440	3,91
18	1080	3,54	648	38880	3,91
22	1320	3,63	671,5	40290	

Tableau 7.15: essai de pompage: essai réel (Forkasiewicz, 1972)
Piézomètre P11 à r = 151,5 m

t'(h)	t'(min)	t(min)	t/t'	s'(m)	tl1/t'	tl2/t'	(smax1-s')	(smax2-s')
0	0	40290		3,91				
1	60	40350	672,5	2,29	21,96332	19,57483	1,71	1,62
1,5	90	40380	448,6667	1,97	14,64221	13,04989	2,03	1,94
2	120	40410	336,75	1,75	10,98166	9,787417	2,25	2,16
2,5	150	40440	269,6	1,56	8,785327	7,829933	2,44	2,35
3	180	40470	224,8333	1,35	7,321106	6,524944	2,65	2,56
3,5	210	40500	192,8571	1,26	6,275233	5,59281	2,74	2,65
4	240	40530	168,875	1,18	5,490829	4,893708	2,82	2,73
4,5	270	40560	150,2222	1,14	4,880737	4,349963	2,86	2,77
5,58	335	40625	121,2687	1,09	3,933728	3,50594	2,91	2,82
6,58	395	40685	103	0,84	3,3362	2,973392	3,16	3,07
8,58	515	40805	79,23301	0,67	2,558833	2,280563	3,33	3,24
10,58	635	40925	64,44882	0,57	2,075274	1,849591	3,43	3,34
13,58	815	41105	50,43558	0,46	1,616931	1,441092	3,54	3,45
17,58	1055	41345	39,18957	0,34	1,249099	1,113261	3,66	3,57
21,58	1295	41585	32,11197	0,28	1,017605	0,906942	3,72	3,63
25,58	1535	41825	27,24756	0,22	0,858501	0,76514	3,78	3,69
29,58	1775	42065	23,69859	0,16	0,742422	0,661685	3,84	3,75
33,58	2015	42305	20,99504	0,15	0,653995	0,582873	3,85	3,76
37,58	2255	42545	18,86696	0,12	0,58439	0,520838	3,88	3,79
43,58	2615	42905	16,40727	0,07	0,503938	0,449136	3,93	3,84
49,58	2975	43265	14,54286	0,055	0,442958	0,394787	3,945	3,855
55,58	3335	43625	13,08096	0,035	0,395142	0,352171	3,965	3,875
61,58	3695	43985	11,90392	0,02	0,356644	0,317859	3,98	3,89
64,58	3875	44165	11,39742	0	0,340077	0,303094	4	3,91
67,58	4055	44345	10,93588	0,01	0,324981	0,28964	3,99	3,9
73,58	4415	44705	10,12571	0,005	0,298482	0,266023	3,995	3,905

Tableau 7.16 : valeurs des paramètres T, S, S' et r_i déterminées par la phase de pompage et de remontée de l'exemple No.2 (essai réel) au piézomètre P11 (r_r = 151,5 m)

Méthode utilisée	Pente Intercept	Paramètres de l'aquifère et r_i (T, S, S') et r_i
PHASE DE POMPAGE		
Méthode de Cooper-Jacob s vs logt	pente: Δs/cycle = 1,80 m intercept: t_0 = 7,90 min	T = 4,0670 10^{-3} m^2/s S = 1,8898 10^{-4} $r_i \in$ (1847,24 m, 1956,70 m)
PHASE DE REMONTÉE		
s' vs logt	pente: $\Delta s'$/cycle = - 1,75 m intercept: t'_0 = 1200 min	T = 4,1835 10^{-3} m^2/s r_i^2 S' = 677,727 m^2 - - **(1)**
s' vs log(t_{cor}/t' -1)	pente: $\Delta s'$/cycle = - 1,75 m intercept: $(t_{cor}/t' - 1)_0$ = 1	T = 4,1835 10^{-3} m^2/s S/S' = 1 ==> S = S'
(s_{max} - s') vs logt'	pente: $\Delta(s_{max} - s')$/cycle = - 1,85 m intercept: t'_0 = 7,90 min	T = 3,96 10^{-3} m^2/s S' = 1,8377 10^{-4} - **(2)**
		de (1) et (2): r_i = 1920,39 m

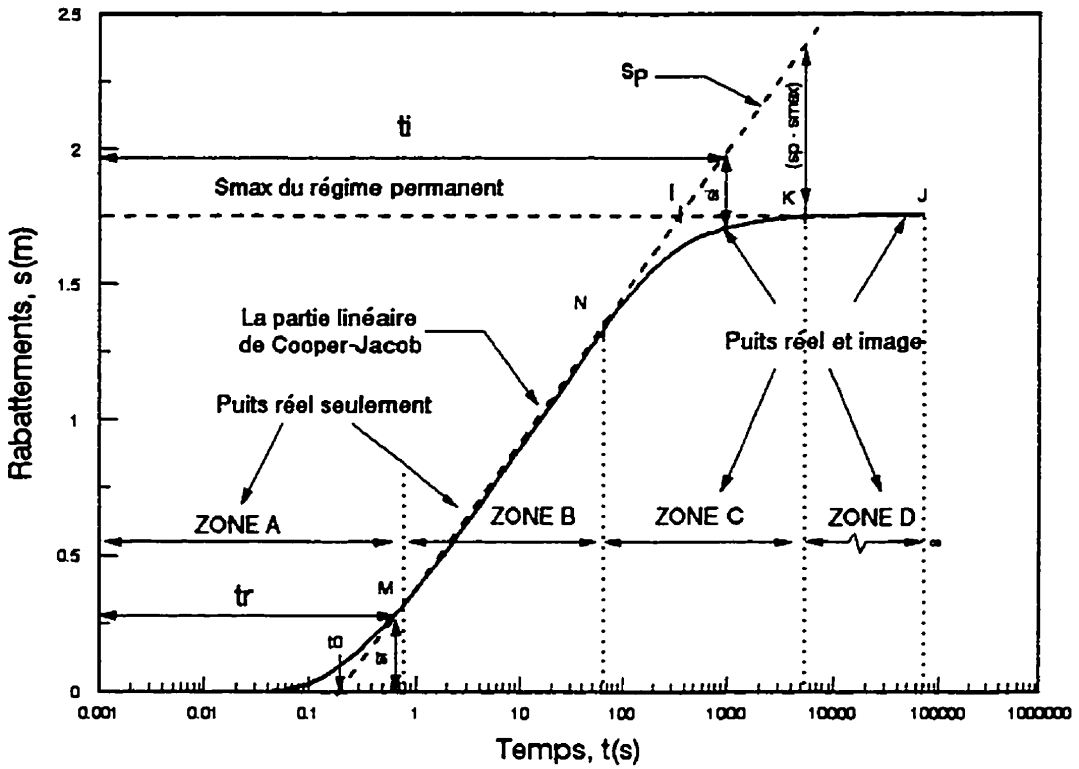


Figure 7.1: Analyse de la courbe de rabattements. Nouvelle approche. Définition des Définition des zones A à D.

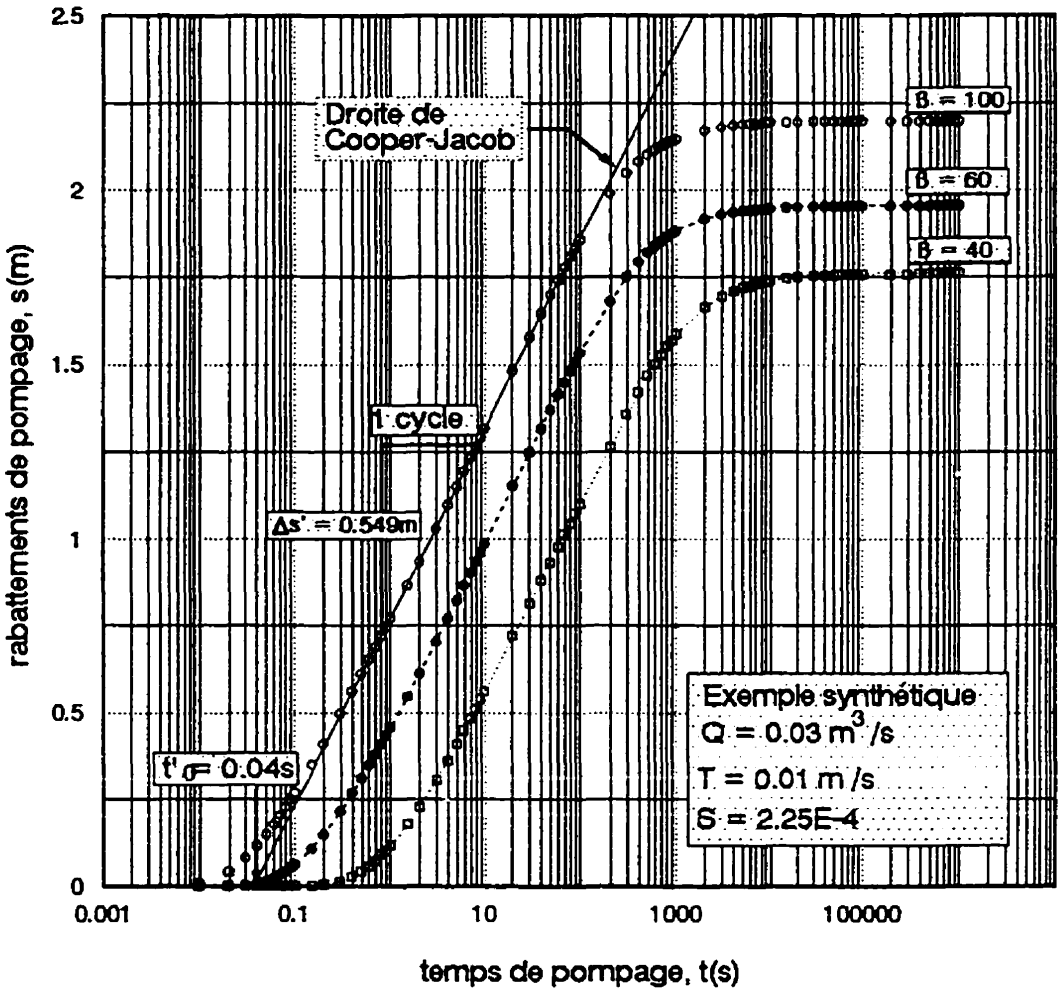


Figure 7.2: Courbes de rabattements en fonction du temps, s(r, t) vs logt.

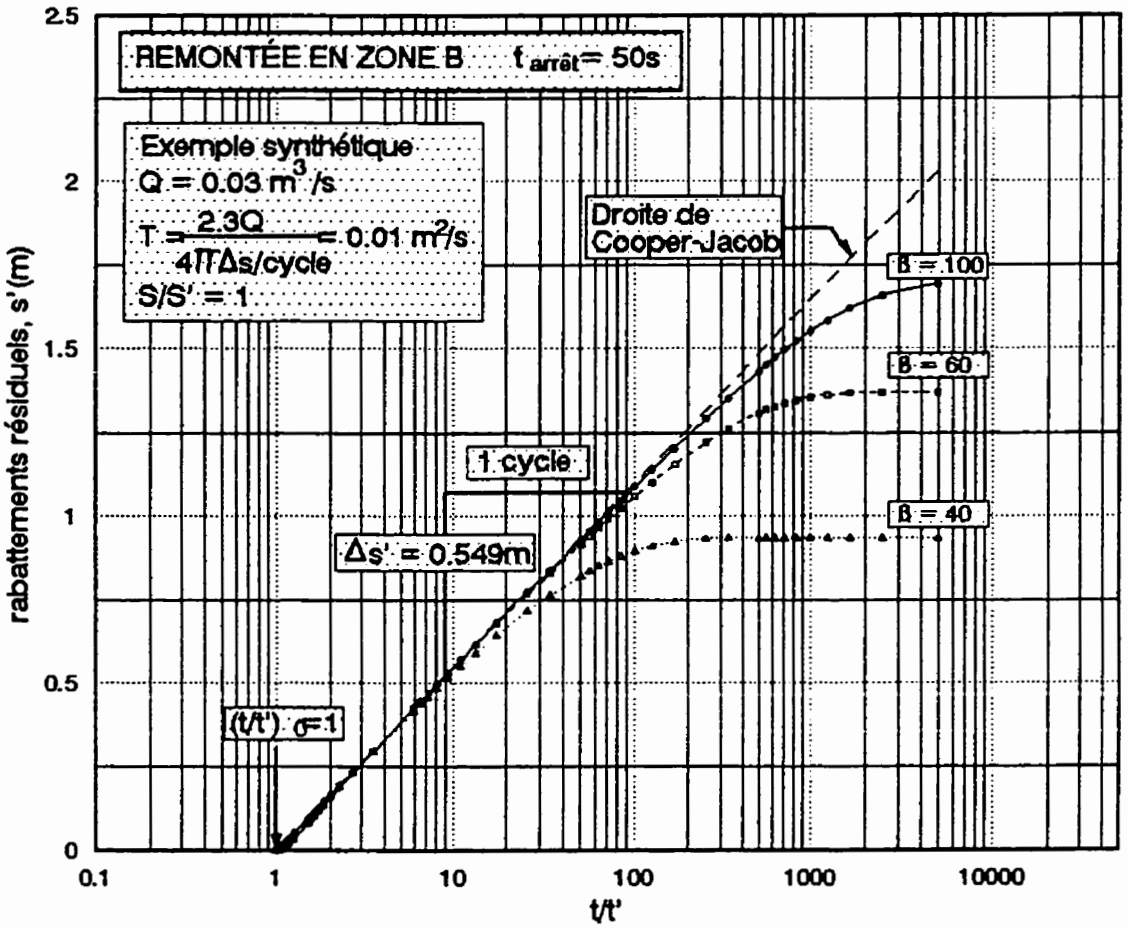


Figure 7.3: Remontée en ZONE B, s'(rr, t) vs logt/t'
Cas où S = S'.

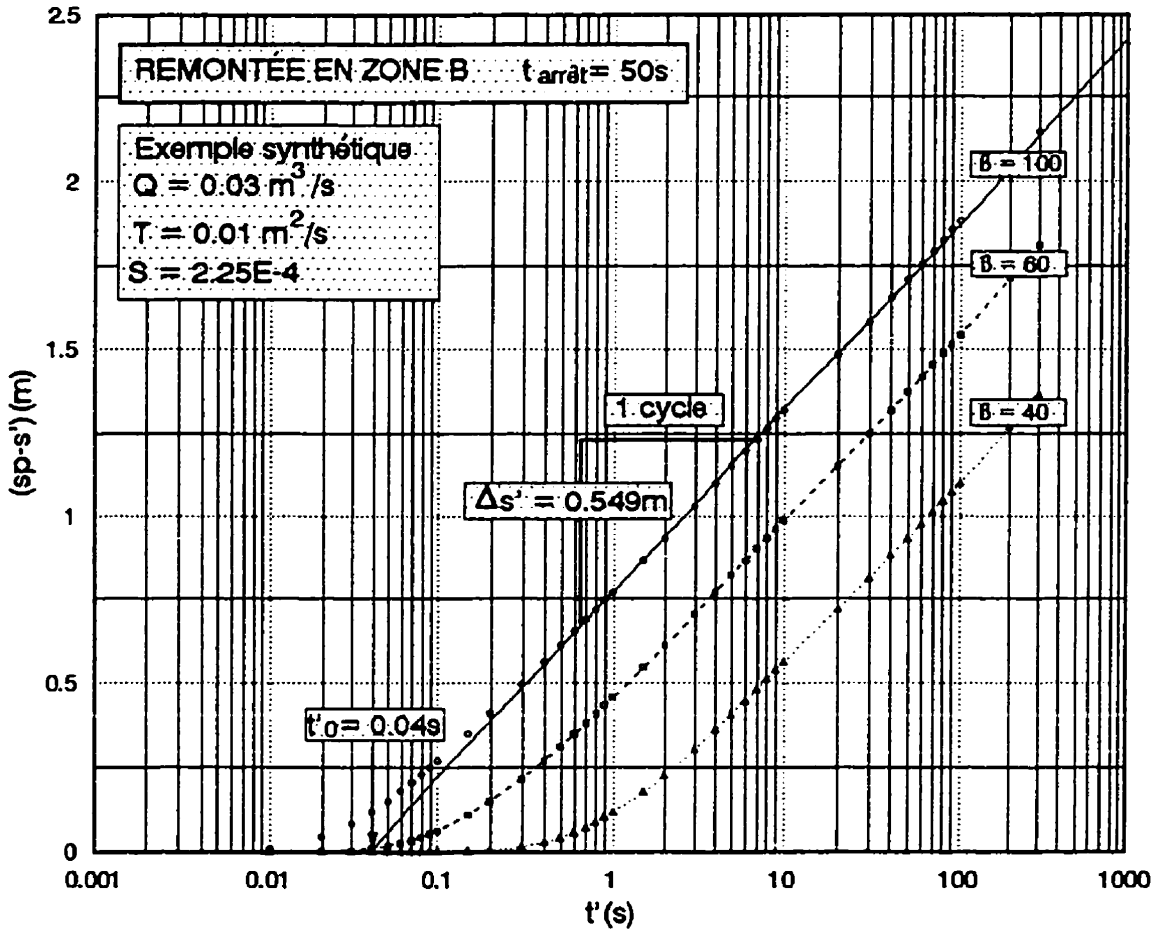


Figure 7.4: Remontée en ZONE B, (sp - s') vs logt'
Cas où S = S'

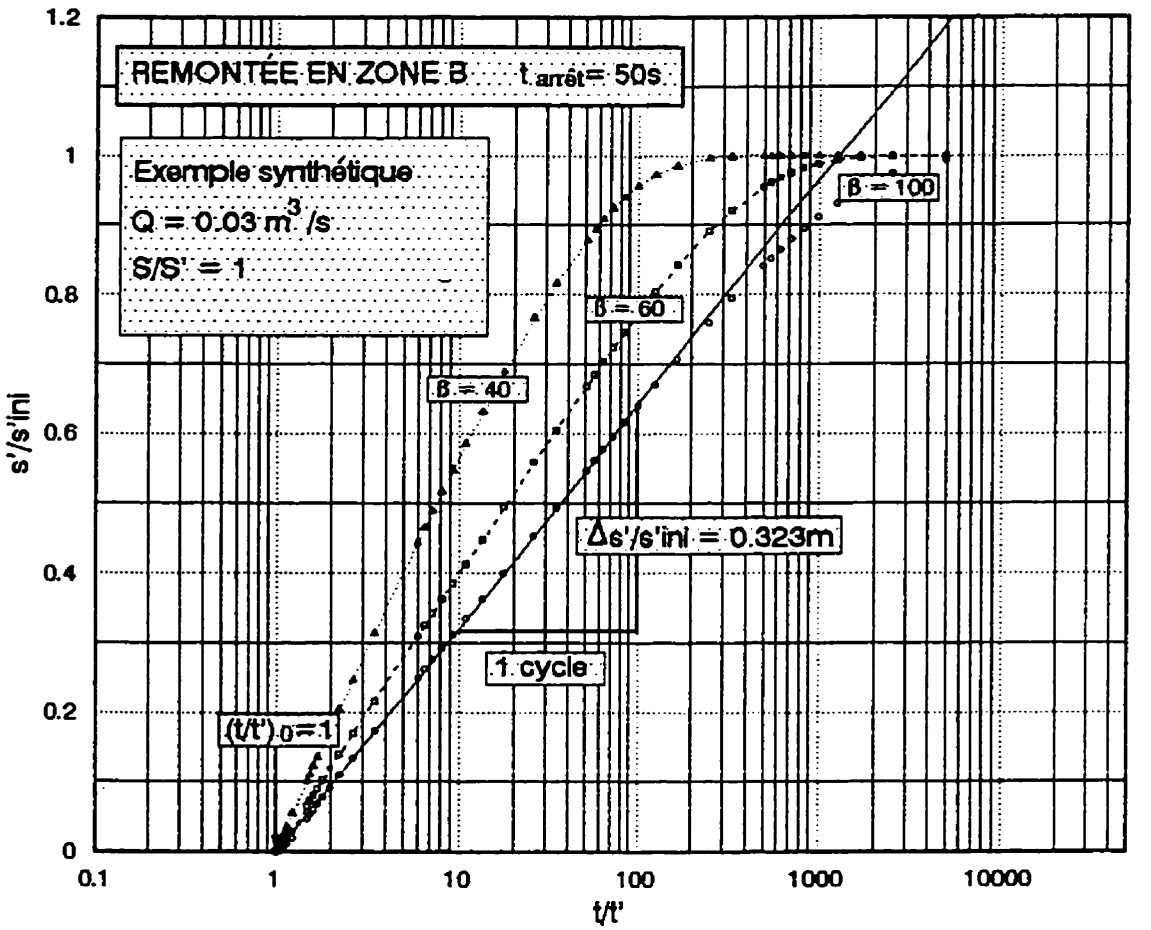


Figure 7.5: Remontée en ZONE B, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = S'.

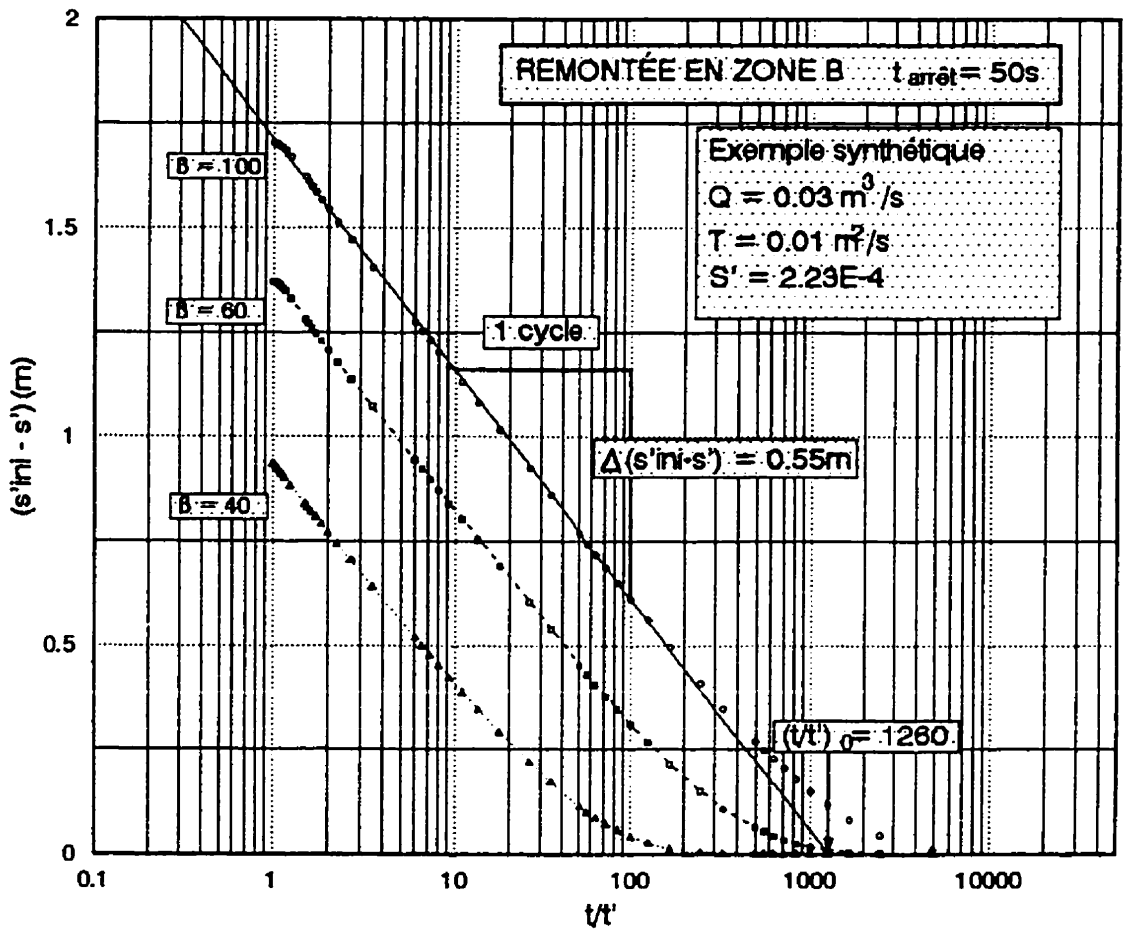


Figure 7.6: Remontée en ZONE B, (s'ini - s')(r, t) vs logt/t'
Cas où S = S'.

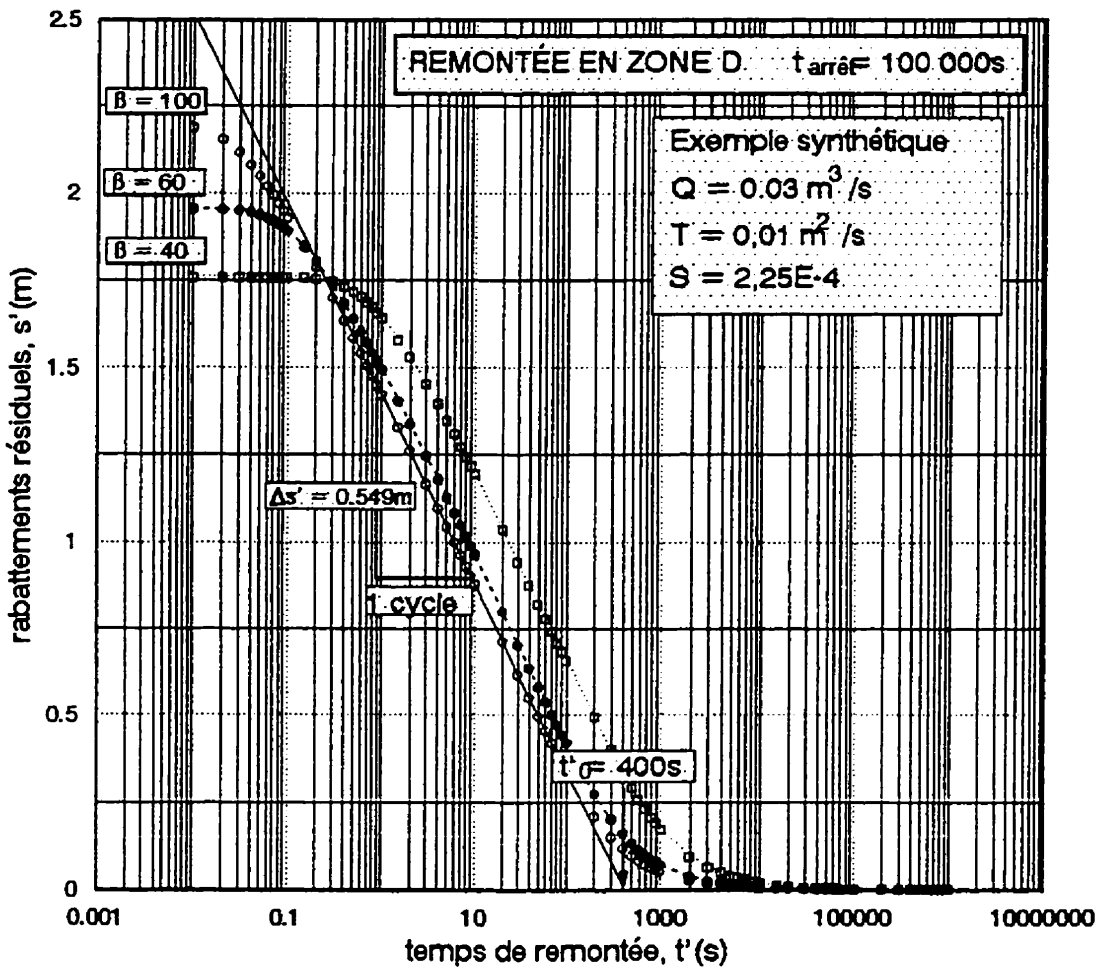


Figure 7.7: Remontée en ZONE D, s' vs logt'
Cas où S = S'.

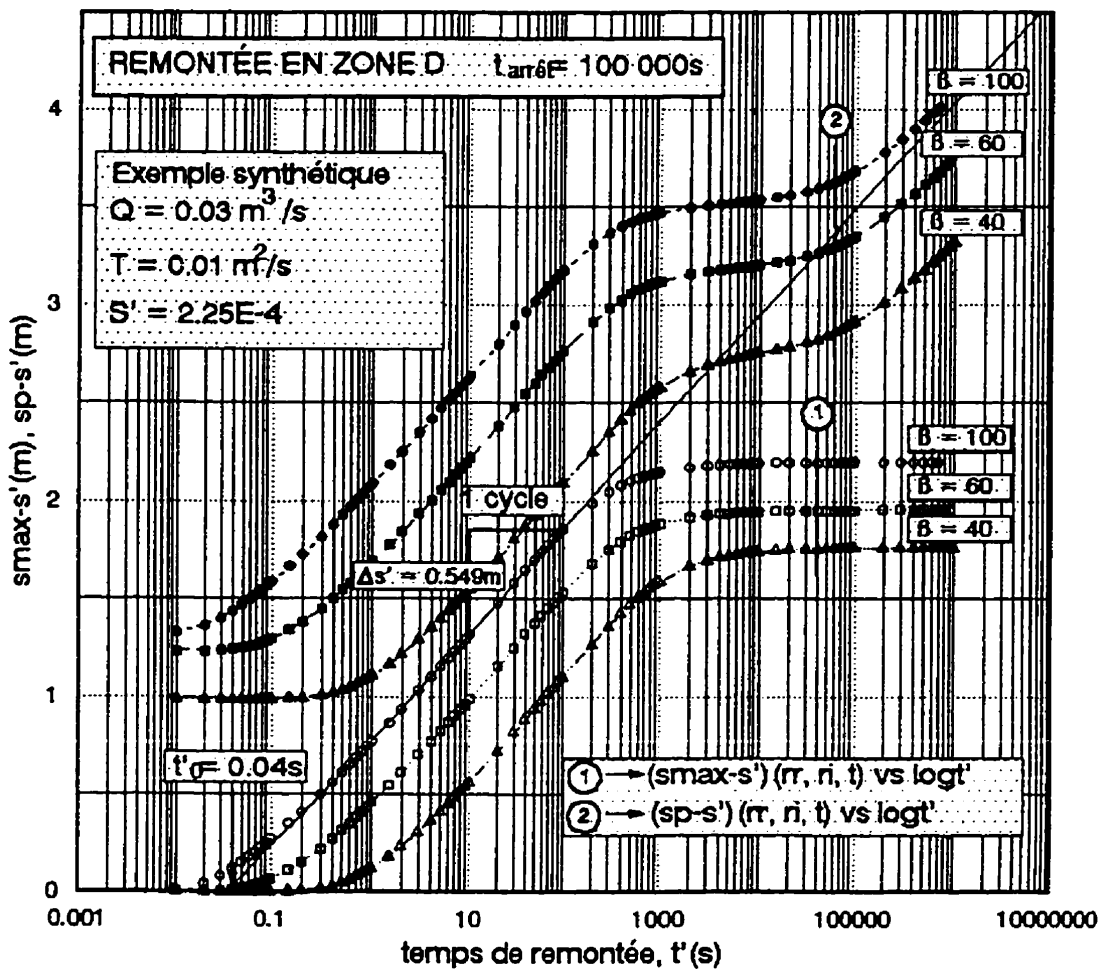


Figure 7.8: Remontée en ZONE D, (smax-s') et (sp-s') vs logt'.
Cas où S = S'.

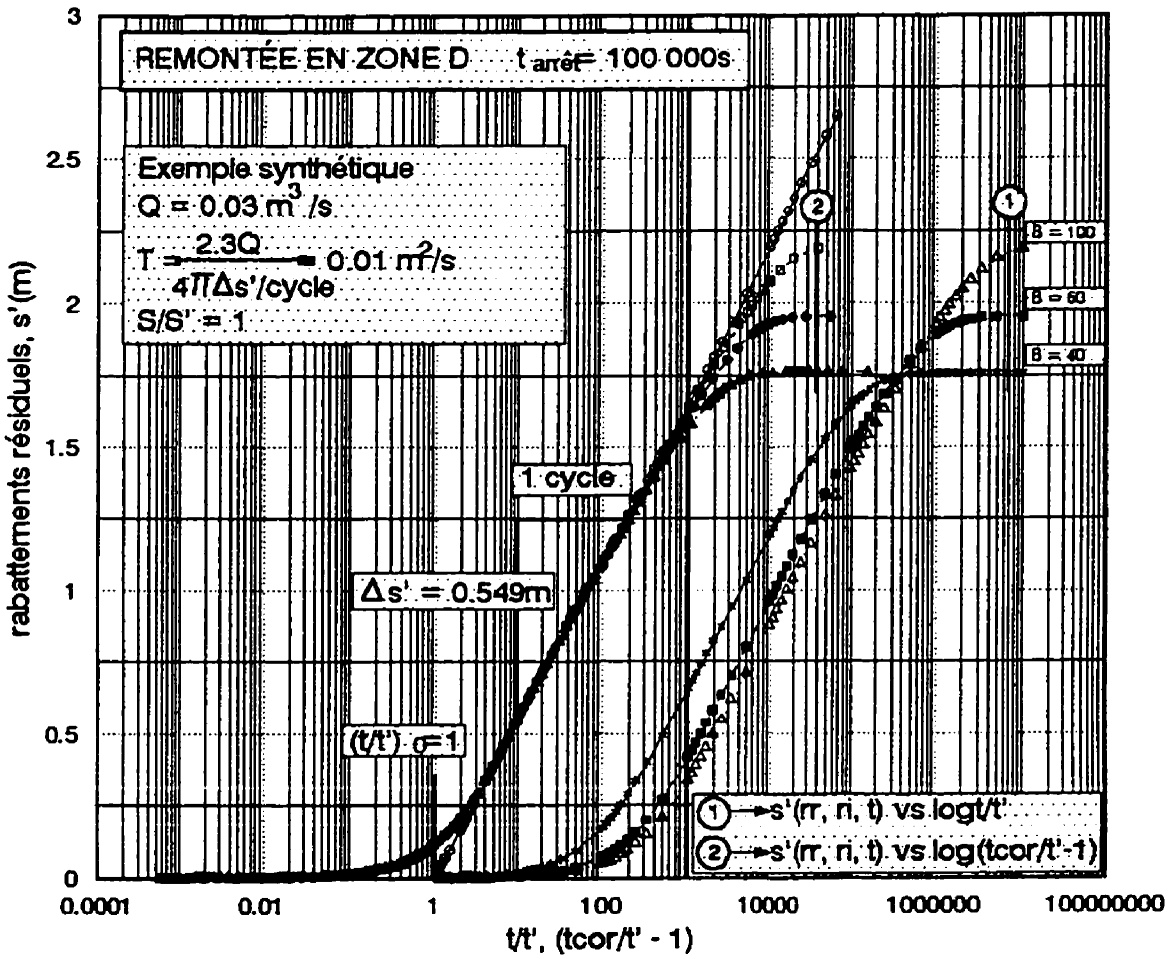


Figure 7.9: Remontée en ZONE D, s'vs logt/t' et log(tcor/t'-1)
Cas où S = S'.

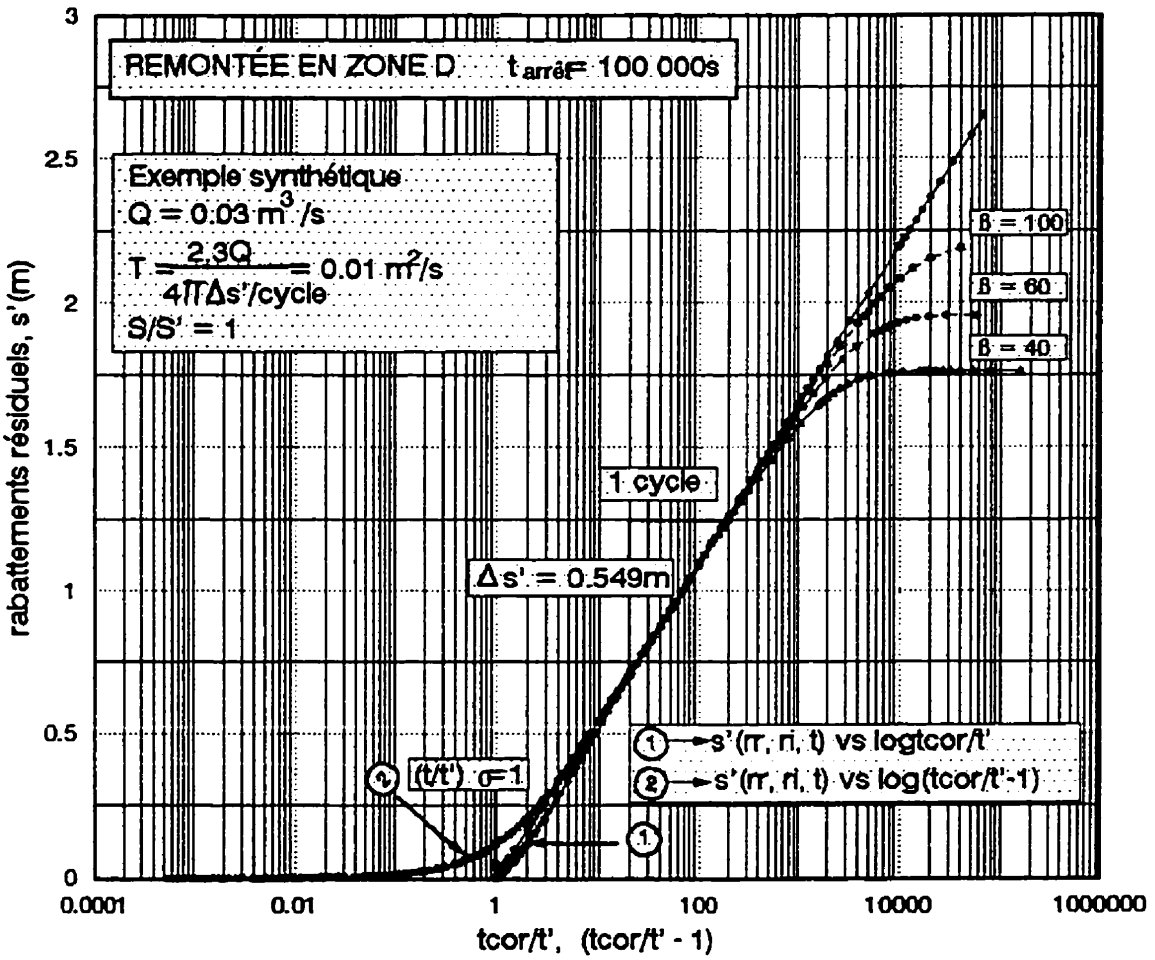


Figure 7.10: Remontée en ZONE D, s'vs logtcor/t' et log(tcor/t'-1)
Cas où S = S'.

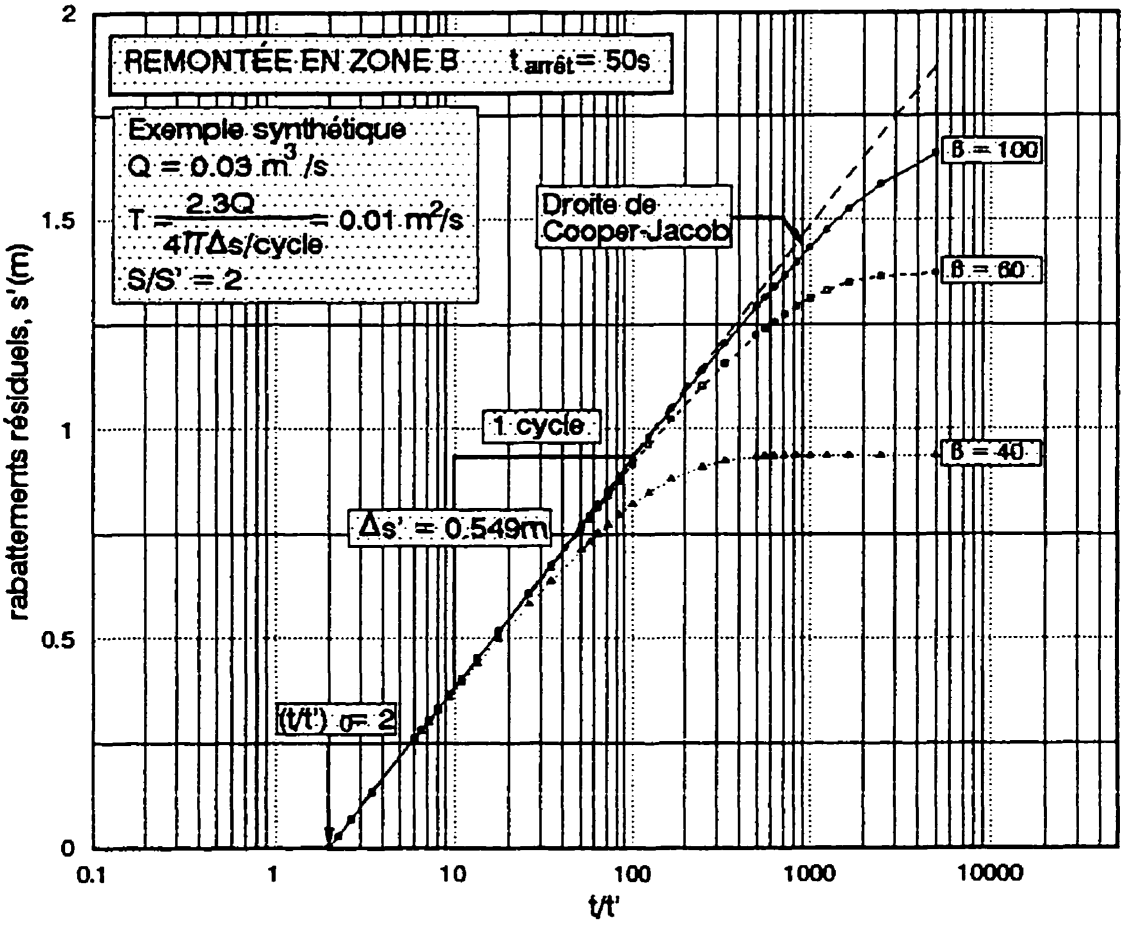


Figure 7.11: Remontée en ZONE B, s'(rr, t) vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

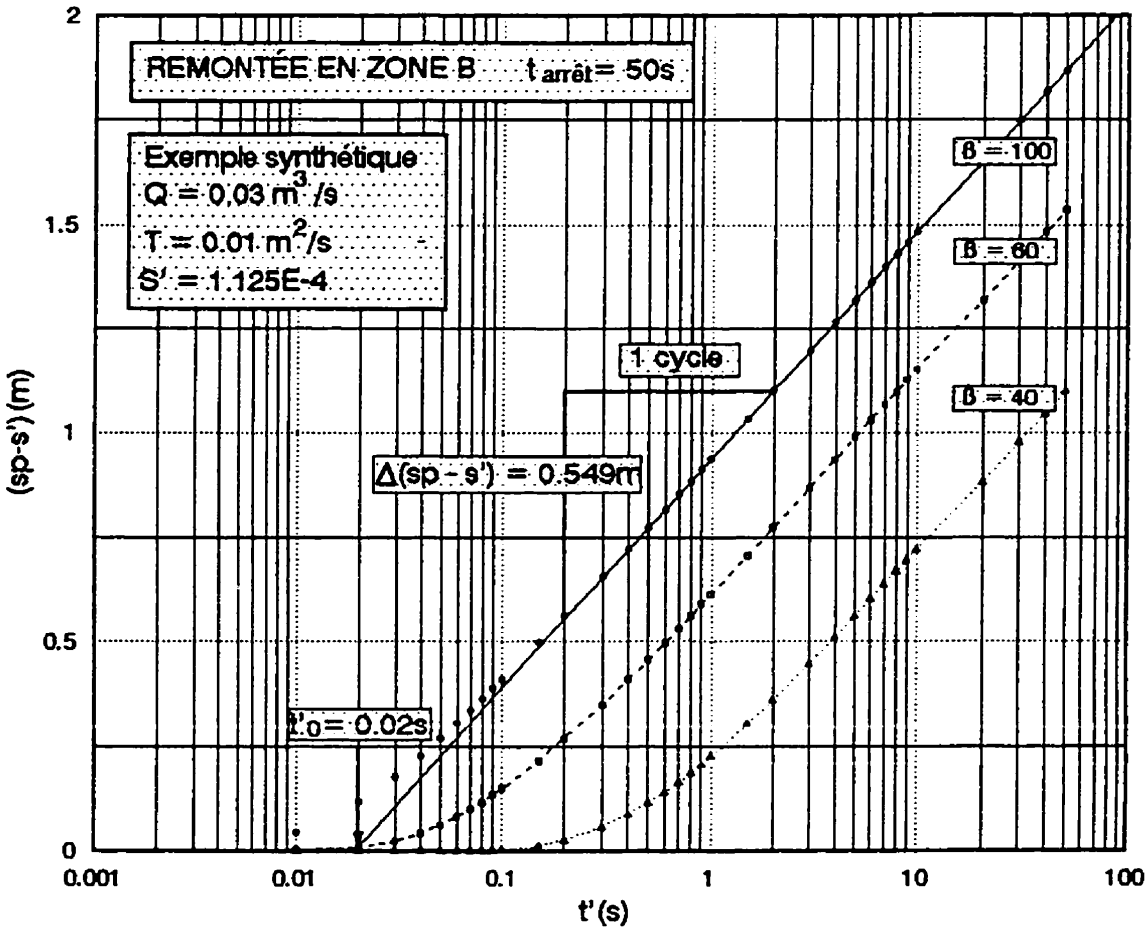


Figure 7.12: Remontée en ZONE B, (sp - s') vs logt'
Cas où S = 2S'

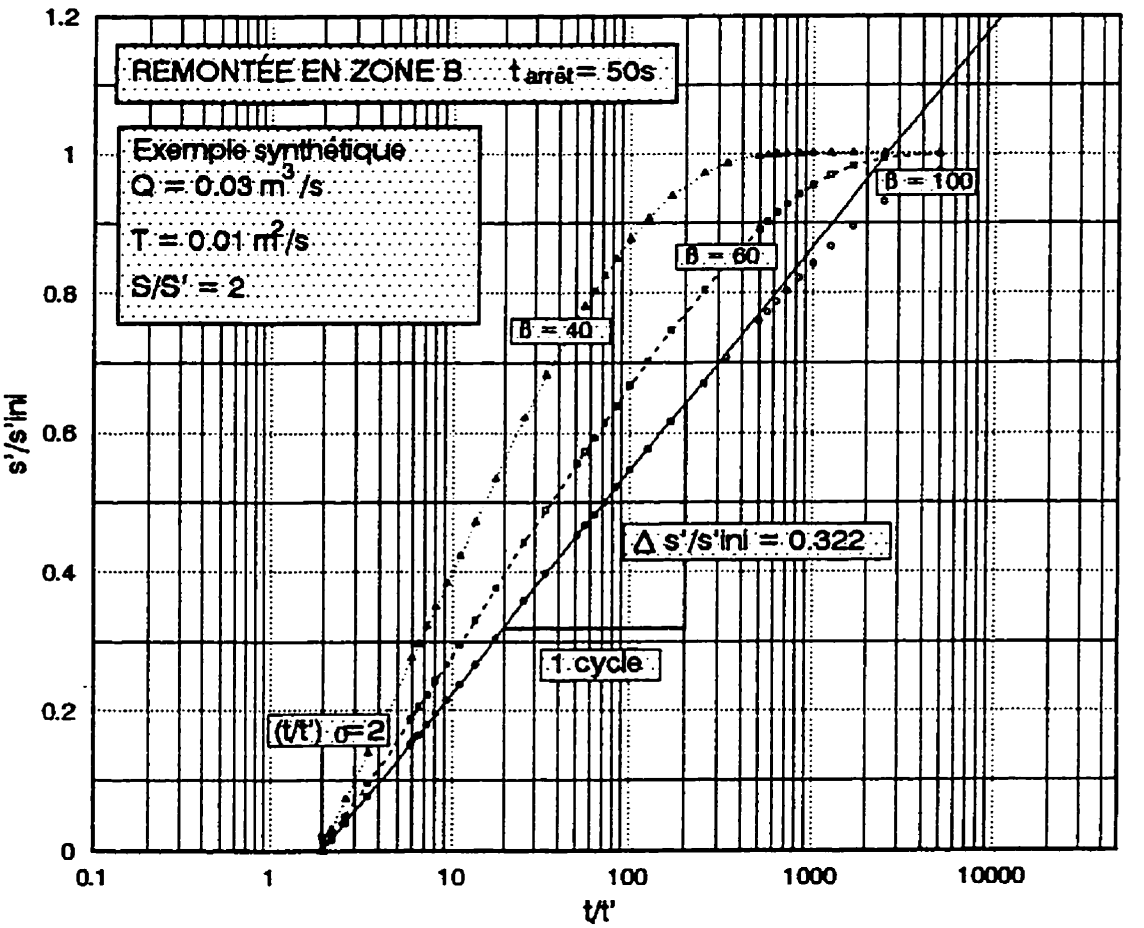


Figure 7.13: Remontée en ZONE B, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

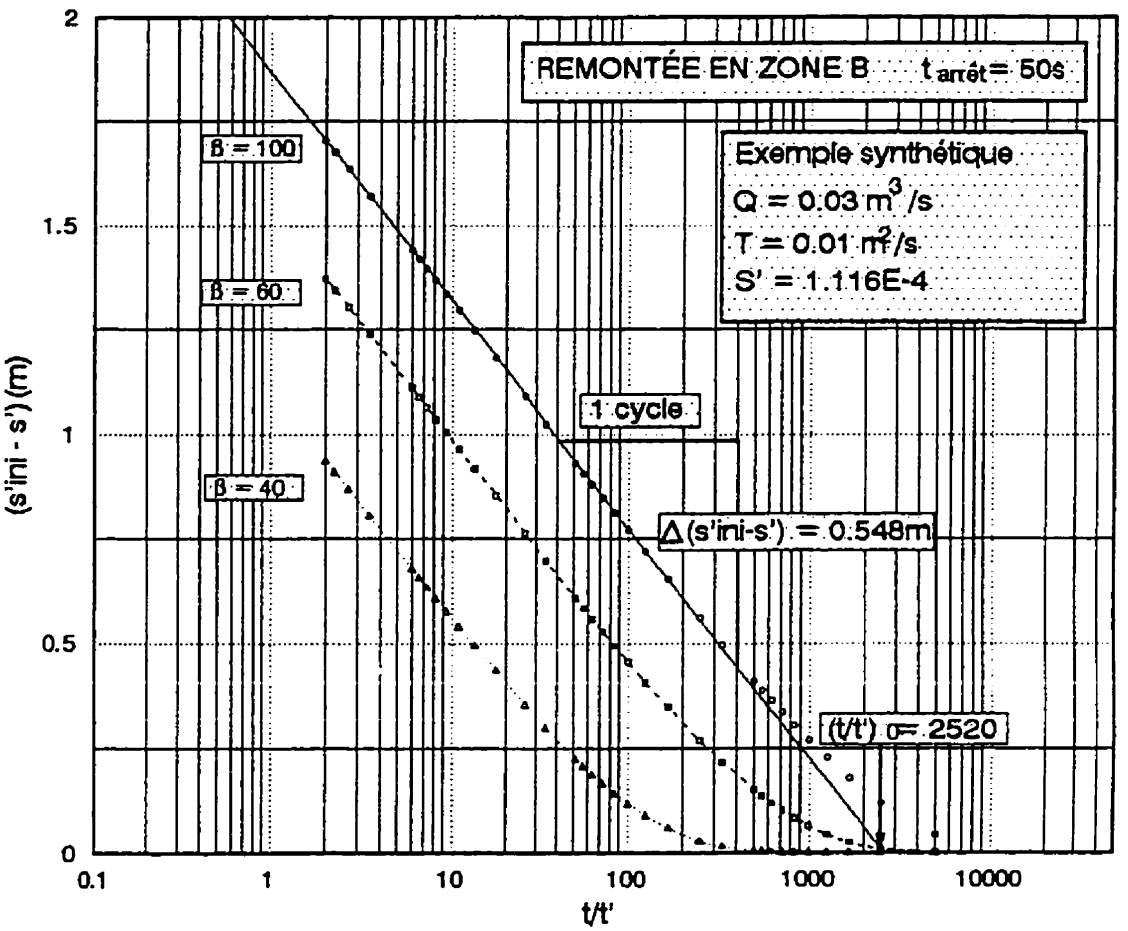


Figure 7.14: Remontée en ZONE B, (s'ini - s') vs logt/t'.
Cas où S = 2S'.

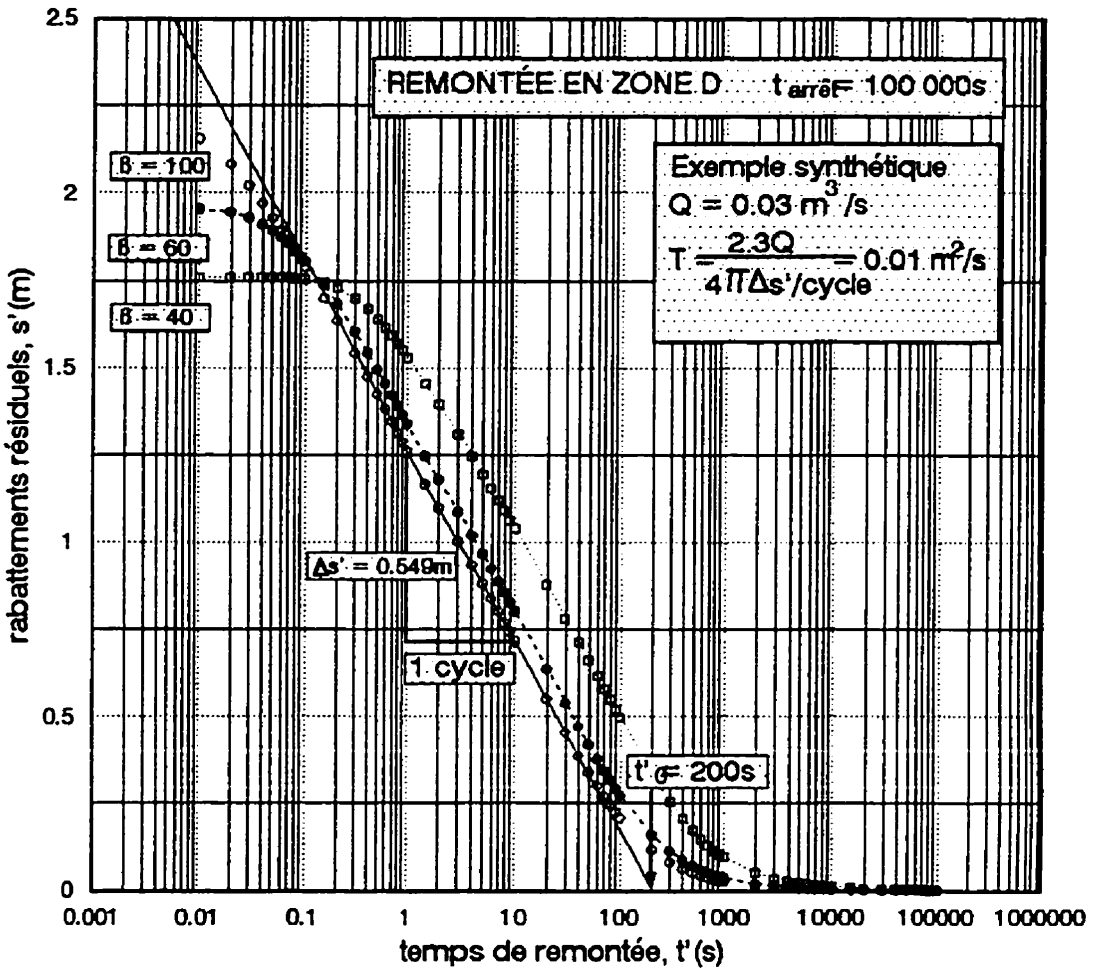


Figure 7.15: Remontée en ZONE D, s' vs logt'
Cas où S = 2S'.

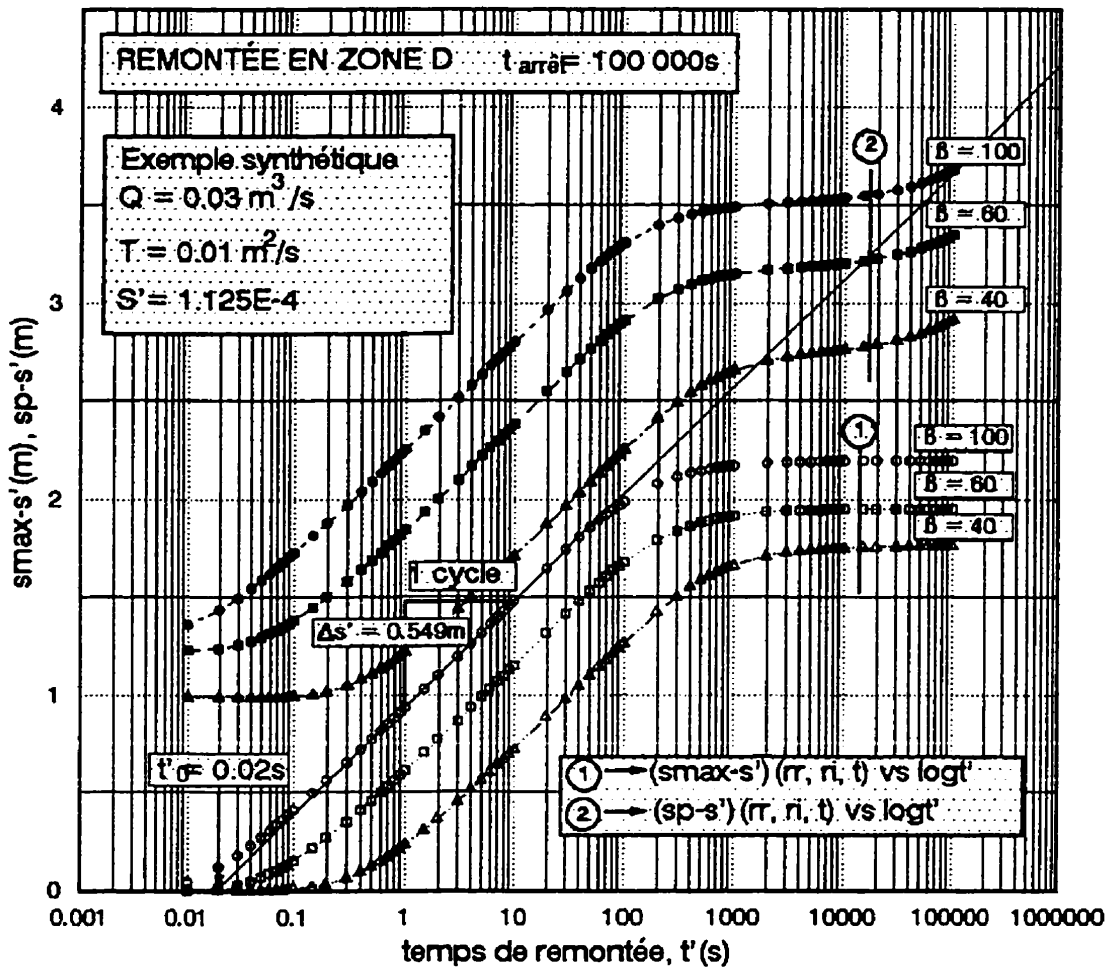


Figure 7.16: Remontée en ZONE D, (smax-s') et (sp-s') vs logt'.
Cas où S = 2S'.

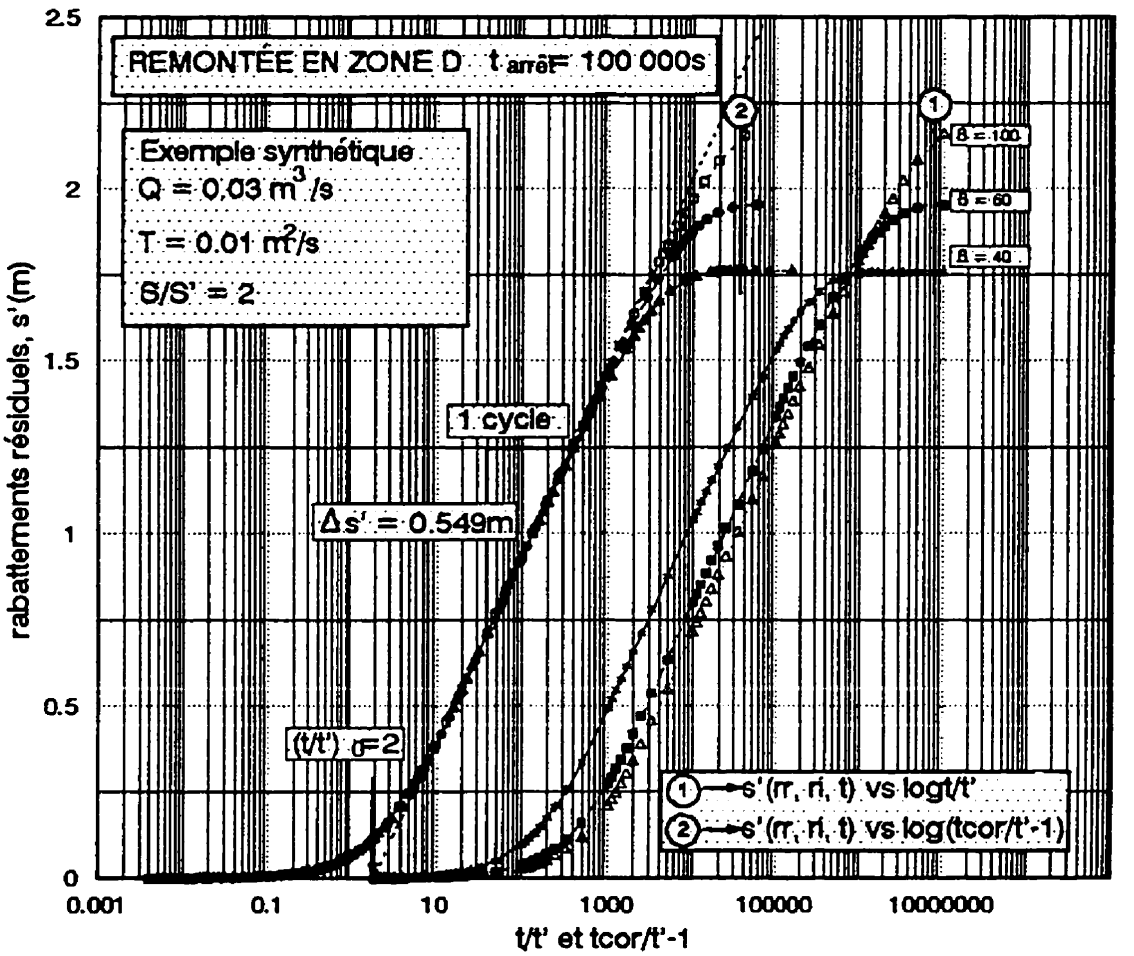


Figure 7.17: Remontée en ZONE D, s'vs logt/t' et log(tcor/t'-1)
Cas où S = 2S'.

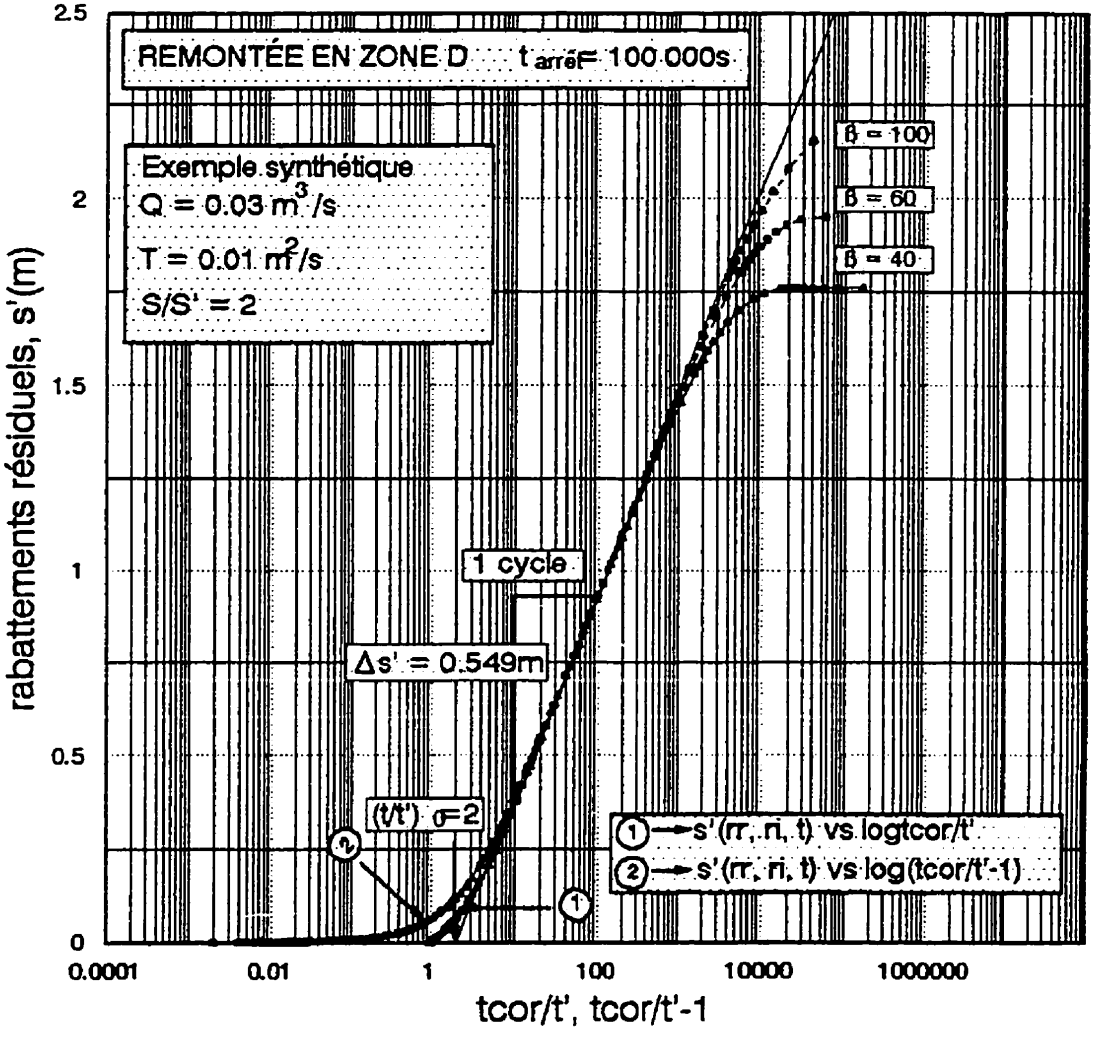


Figure 7.18: Remontée en ZONE D, s'vs logtcor/t' et log(tcor/t'-1)
Cas où S = 2S'.

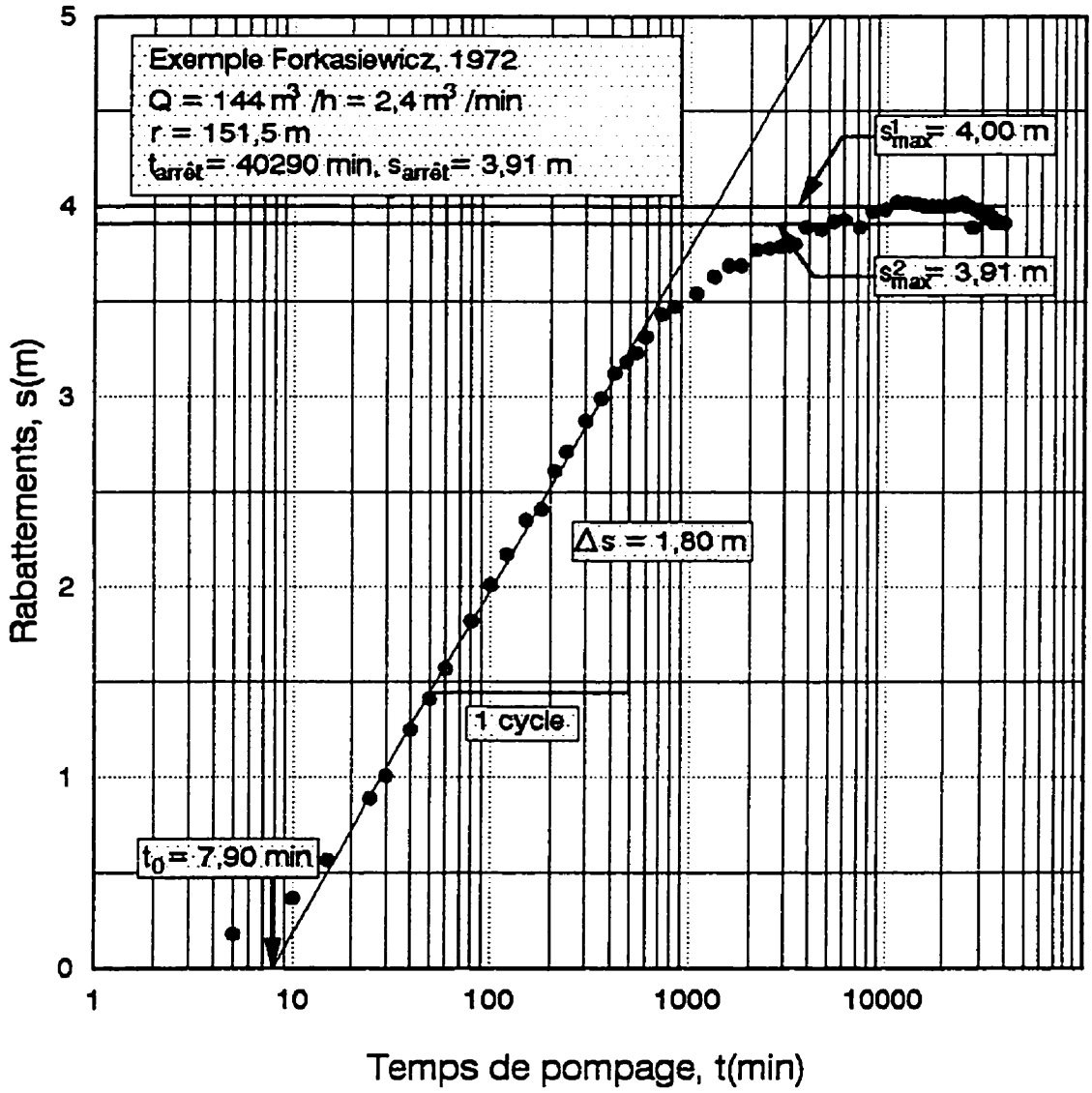


Figure 7.19: Rabattements en fonction du temps, s vs logt

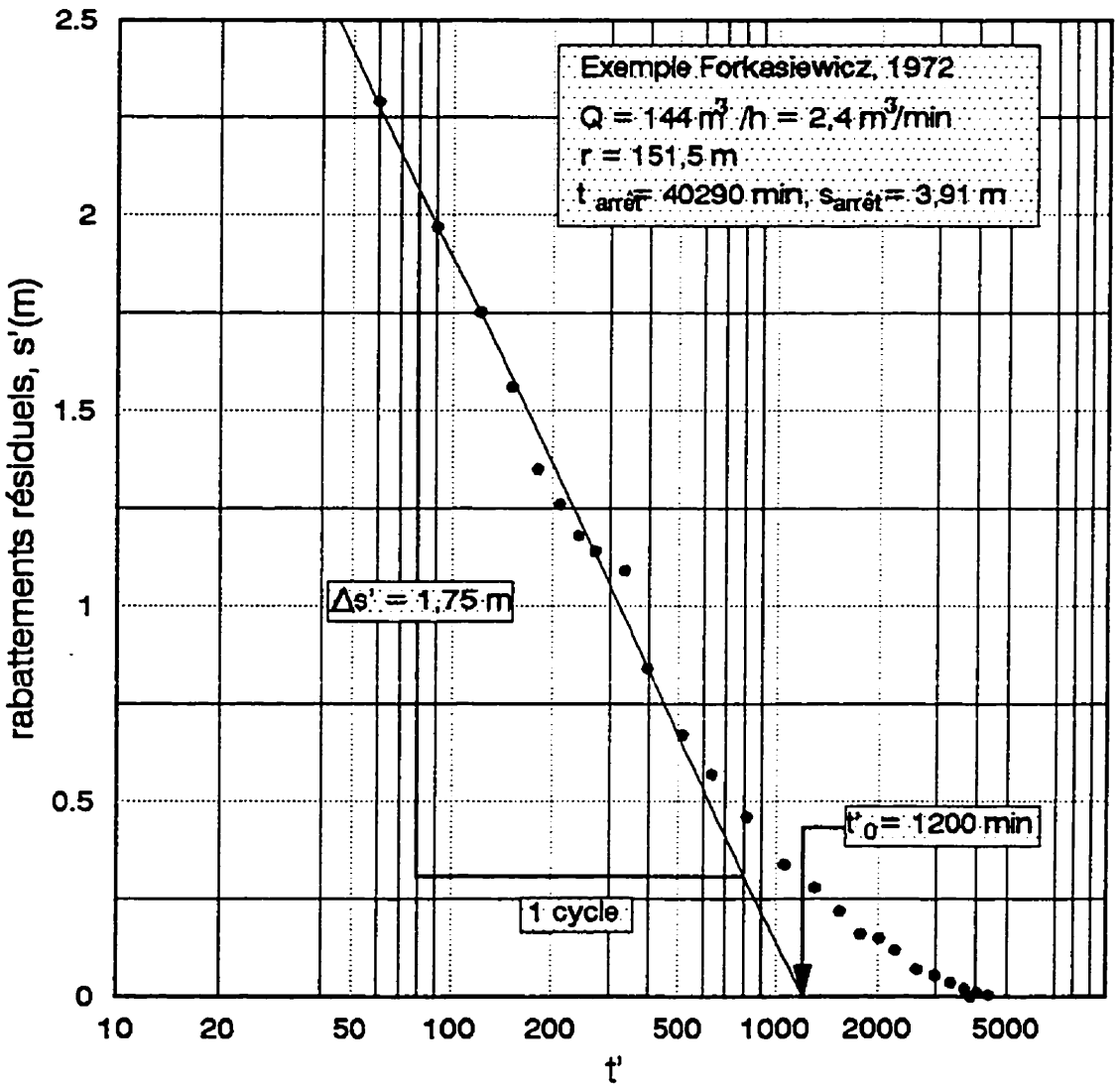


Figure 7.20: Rabattements résiduels en fonction du temps, s' vs logt'.

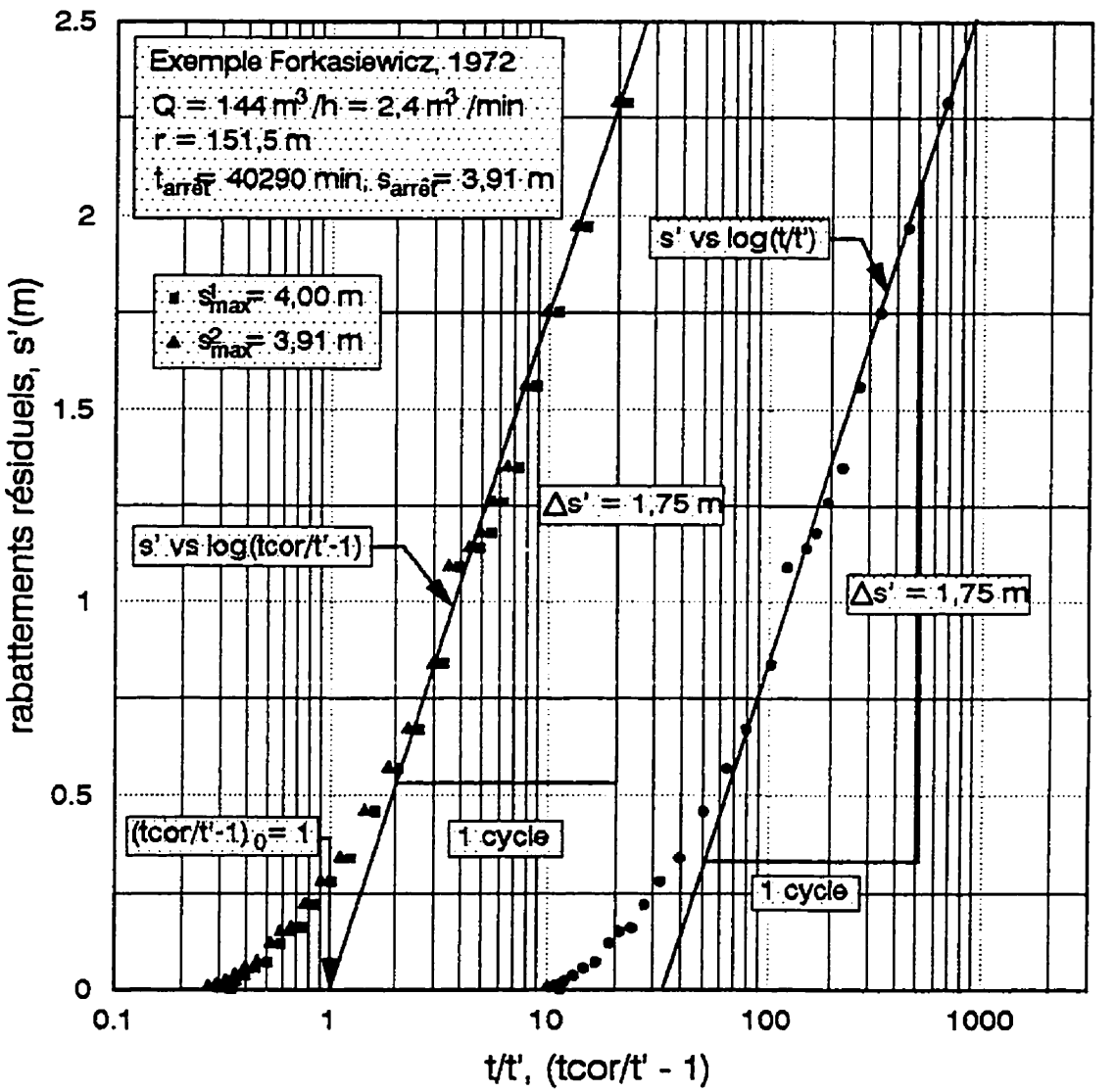


Figure 7.21: Rabattements résiduels, s' vs logt/t' et log(tcor/t'-1)

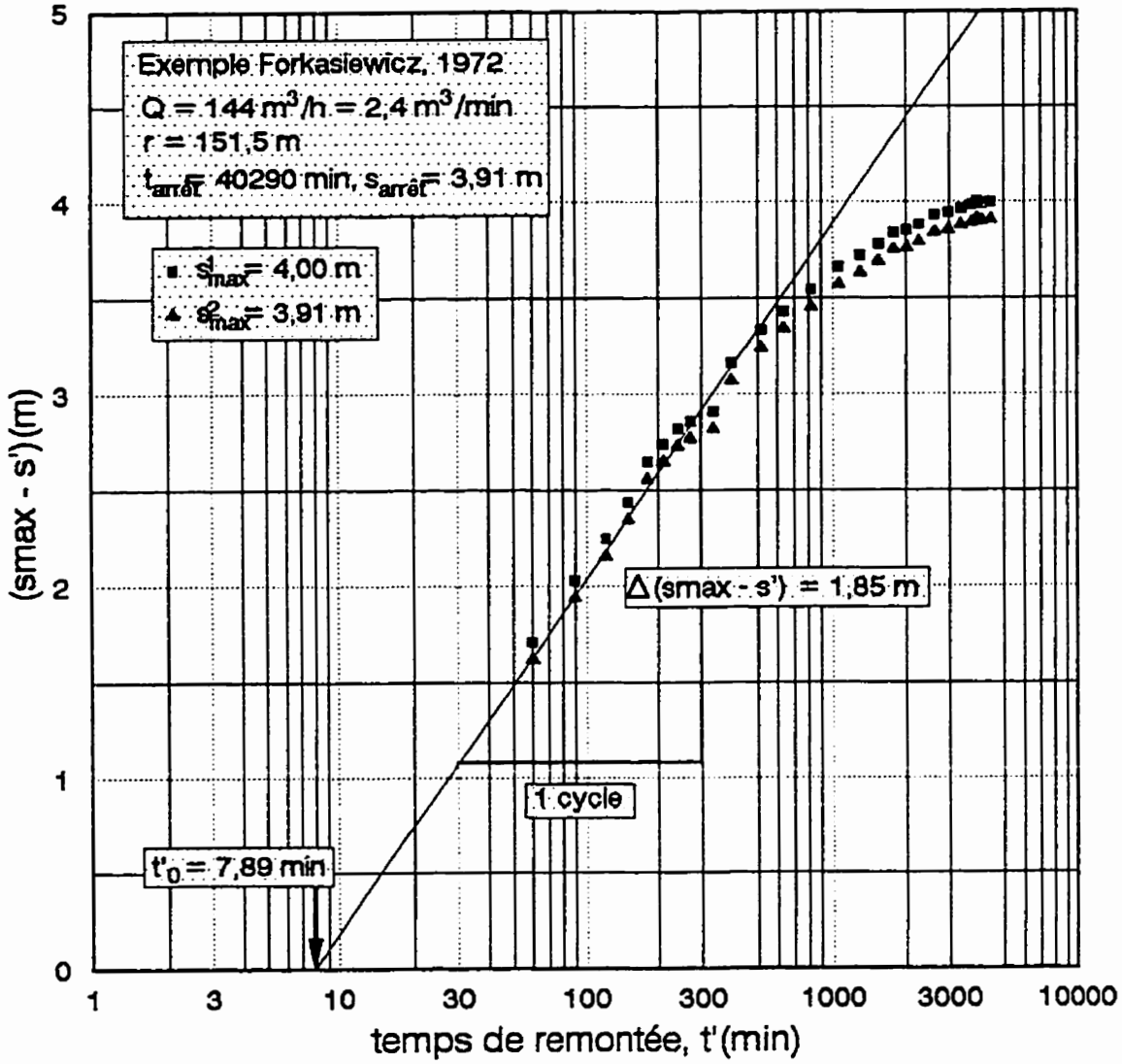


Figure 7.22: (smax - s') vs logt'.

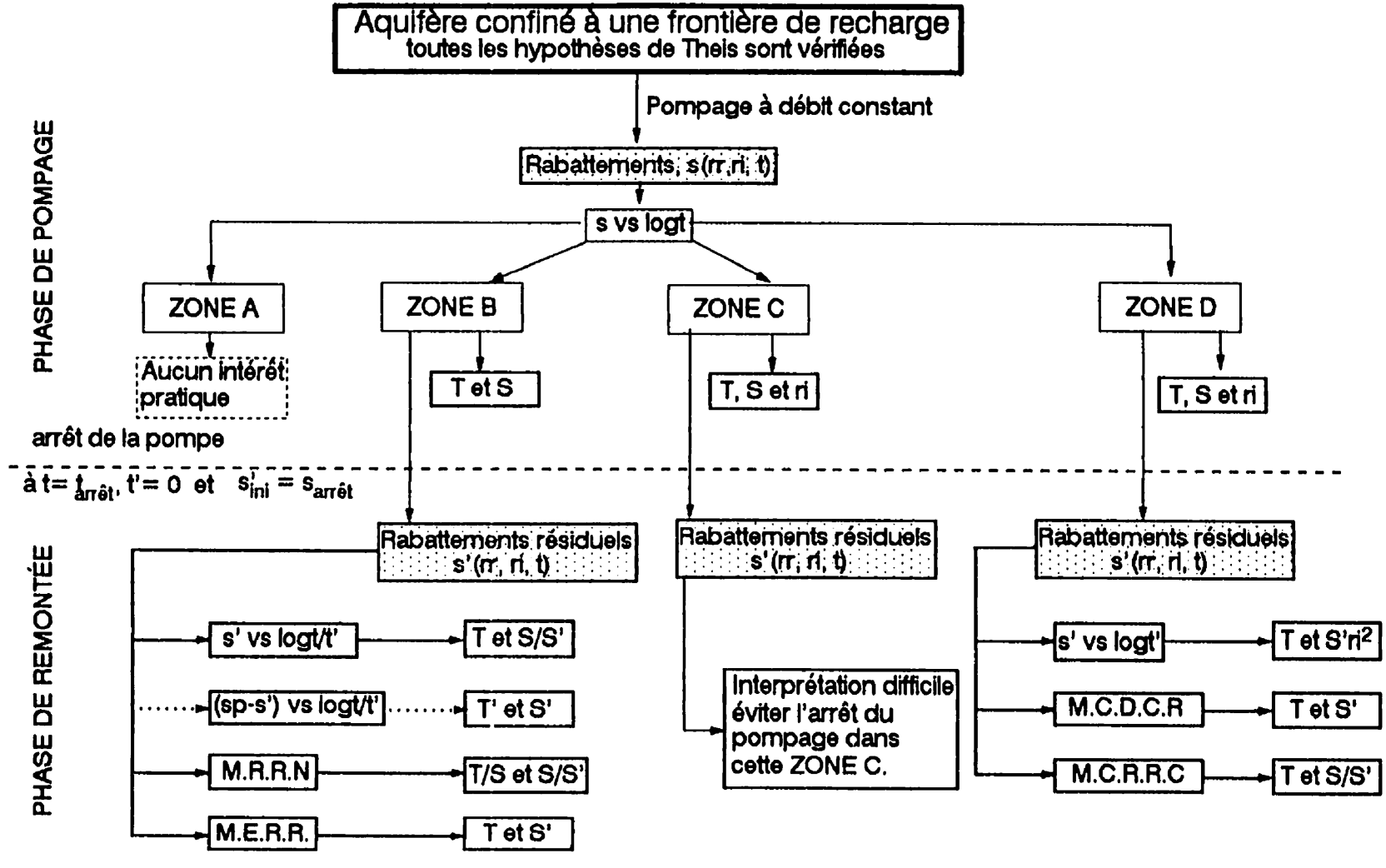


Figure 7.23: Méthodes d'interprétation des données de remontée dans le cas d'un aquifère confiné limité par une frontière de recharge.

CHAPITRE VIII

NOUVELLES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES COURBES DE REMONTÉE POUR L'ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET DE LA TRANSMISSIVITÉ DANS LE CAS D'UN AQUIFERE LIMITÉ PAR UNE FRONTIÈRE IMPERMÉABLE LINÉAIRE

8.1 INTRODUCTION

Au chapitre précédent, l'interprétation d'un essai de remontée dans un milieu aquifère à nappe captive avec une frontière de recharge a été étudiée.

Dans ce chapitre, on étudiera le cas d'un aquifère à nappe captive limité par une seule frontière imperméable rectiligne. La même approche d'analyse en zones de la courbe des rabattements utilisée dans le cas de la frontière de recharge sera suivie dans ce cas. On considère toujours que T = T' mais l'on peut avoir S ≠ S'. Si on désigne par $s_{arrêt}$ le rabattement à l'arrêt de la pompe au temps $t_{arrêt}$ (t_A), l'importance de la position du couple ($t_{arrêt}$, $s_{arrêt}$) sur cette courbe de rabattement est alors examinée. En se basant sur le principe de superposition de Theis, des solutions analytiques pour l'interprétation des données de remontée sont construites. Ces méthodes sont introduites dans le programme de calcul « SUPTHEIS » utilisé aux chapitres VI et VII. L'application de ces méthodes sera illustrée par un exemple numérique synthétique.

8.2 ANALYSE DE LA COURBE DE RABATTEMENTS: NOUVELLE APPROCHE

L'expression générale des rabattements en fonction du temps est:

$$s(r_r,r_i,t)=\frac{Q}{4\pi T}\{W(u_r)+W(u_i)\} \qquad (8.1)$$

La figure 8.1 illustre la représentation graphique de la fonction s(r_r, r_i, t) vs *log* t ci-dessus. Comme pour le cas de la frontière de recharge, l'examen de cette courbe type des rabattements en fonction du logarithme du temps, permet la distinction de quatre zones différentes. Ces zones notées ZONE A, ZONE B, ZONE C et ZONE D peuvent être définies comme suit:

<u>ZONE A</u> $0 \leq t < t_M$

Cette zone correspond au début de l'essai. Dans cette zone, seul le puits réel est actif. L'argument u_r est suffisamment grand pour que tous les termes de la fonction W(u_r) interviennent dans l'équation du rabattement ci dessous:

$$s(r_r,t)=\frac{Q}{4\pi T}W(u_r) \qquad (8.2)$$

Cette zone ne représente aucun intérêt, pour l'étude qui suivra.

<u>ZONE B</u> $t_M \leq t < t_N$

Pour $t_M \leq t \leq t_N$, l'expression du rabattement donnée par l'équation (8.1) devient

$$s(r_r,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r^2 S} \qquad (8.3)$$

Le prolongement, noté s_{P1} , de cette première branche au-delà du temps t_N est exprimé par l'équation

$$s_{P1} = \Delta s_1 \log \frac{t}{t_{01}} \quad \ldots\ldots (8.4)$$

Δs_1 et t_{01} représentent respectivement la pente et l'intercept à l'origine ($s_{P1} = 0$) exprimés par:

$$\Delta s_1 = \frac{2{,}3Q}{4\pi T} \text{ et } t_{01} = \frac{r_r^2 S}{2{,}25T} \quad \ldots\ldots (8.5)$$

ZONE C $t_N \leq t < t_K$

Dans cette zone, le puits image commence à influencer la solution. L'expression du rabattement (8.1) est:

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{2{,}3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r_r^2 S} + \frac{Q}{4\pi T} W(u_i) \quad \ldots\ldots (8.6)$$

ZONE D $t_K \leq t < \infty$

Dans la ZONE D, les fonctions de puits réelle et image sont log-linéaires. Les arguments u_r et u_i sont inférieurs à 0.01 et le temps $t \geq 56.25\beta^2 t_{01} = t_K$ avec $\beta = r_r / r_i$.

Comme $t_i = \beta^2 t_{01}$ on obtient $t \geq t_K = 56.25\, t_i$ ..... (8.7)

Le rabattement pour $t \geq t_K$ est alors égal à:

$$s(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r_r^2 S} + \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r_i^2 S} \quad \ldots\ldots (8.8)$$

qui s'écrit comme

$$s(r_r,r_i,t)=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r_r r_i S}\right)^2 \qquad (8.9)$$

soit, $$s(r_r,r_i,t)=2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r r_i S} \qquad (8.10)$$

La prolongation de cette deuxième branche au-delà du temps t_K , notée s_{P2}, est définie comme:

$$s_{P2}=\Delta s_2 \log\frac{t}{t_{02}} \qquad (8.11)$$

Δs_2 et t_{02} représentent respectivement la pente et l'intercept à l'origine (s_{P2} = 0) exprimés par:

$$\Delta s_2 = 2\frac{2{,}3Q}{4\pi T} = 2\Delta s_1 \quad \text{et} \quad t_{02} = \frac{r_r r_i S}{2{,}25T} = \beta\, t_{01} \qquad (8.12)$$

avec $\beta = r_i / r_r$

8.3 INTERPRÉTATION DES DONNÉES DE LA REMONTÉE: ÉQUATIONS NOUVELLES

L'expression générale du rabattement résiduel, pour une remontée débutant au temps t' = 0 qui correspond à t = t_A est:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_r)+W(u_i)\right]-\frac{Q}{4\pi T'}\left[W(u_r')+W(u_i')\right] \qquad (8.13)$$

Cette équation prend plusieurs formes, dépendamment de la position de l'origine du temps t'. Ainsi on peut distinguer les cas suivant.

8.3.1 Remontée dans la ZONE B

Dans la ZONE B, le rabattement n'est pas fonction de r_i. Par conséquent, l'effet de la frontière imperméable ne peut être détectée. Le rabattement résiduel sera exprimé par:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r_r^2 S} - \frac{Q}{4\pi T}W(u_r') \qquad (8.14)$$

Cette équation est identique à (6.6). L'interprétation de $s'(r_r,\ t\ )$ en fonction de logt/t', conjointement avec l'une des deux méthodes M.E.R.R. ou M.R.R.N, présentées au chapitre 6, permet la détermination de la transmissivité (T' = T) et du coefficient d'emmagasinement (S' ≠ S ou S' = S).

8.3.2 Remontée dans la ZONE D

Le rabattement à l'arrêt de la pompe est exprimé par l'équation:

$$s_{arret}(r_r, r_i) = 2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt_{arret}}{r_r r_i S}\right) = s'_{im} \qquad (8.15)$$

et le rabattement résiduel s'écrit comme:

$$s'(r_r, r_i, t) = 2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_r') + W(u_i')\right] \qquad (8.16)$$

Lorsque r_r est beaucoup plus petit que r_i , l'argument u'_r tend vers 0.01 plus vite que u'_i ainsi la fonction $W(u'_r)$ devient plus vite log-linéaire que $W(u'_i)$. Dans ces conditions, on peut écrire les différents états successifs par lesquels passe l'équation ci-dessus (8.16):

ÉTAT 1:

$$s'(r_r, r_i, t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{Q}{4\pi T}W(u'_r) \quad \text{.....(8.17)}$$

ÉTAT 2:

Lorsque u'_r devient faible

$$s'(r_r, r_i, t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt'}{r_r^2 S'}\right) \quad \text{.....(8.18)}$$

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25TS'}{r_i^2 S^2}\frac{t^2}{t'}\right) \quad \text{.....(8.19)}$$

Comme $t = t_{arrêt} + t' = t_{arrêt}(1 + t'/t_{arrêt})$ et $t' <<< t_{arrêt}$, $t'/t_{arrêt}$ peut être négligé devant 1 et par conséquent t^2/t' peut être approximé par $(t_{arrêt}\, t)/t'$.

Ainsi, l'expression (8.19) devient:

$$s'(r_r, r_i, t) = \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25TS'\, t_{arret}}{r_i^2 S^2}\frac{t}{t'}\right) \quad \text{.....(8.20)}$$

dont la pente et l'intercept à l'origine sont:

$$\left(\frac{\Delta s'}{\text{lcycle}}\right)_1 = \frac{2,3Q}{4\pi T} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{01} = \frac{r_i^2 S^2}{2,25TS'\, t_{arret}} \quad \text{.....(8.21)}$$

ÉTAT 3:

Dans l'état intermédiaire entre l'état 2 et 4:

$$s'(r_r, r_i, t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{Q}{4\pi T}\left\{\log\left(\frac{2,25Tt'}{r_r^2 S'}\right) + W(u'_i)\right\} \quad \text{.....(8.22)}$$

ÉTAT 4:

Lorsque u'_i devient assez petit, la fonction $W(u'_i)$ devient elle aussi log-linéaire conduisant à :

$$s'(r_r, r_i, t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt'}{r_r r_i S'}\right) \quad \text{..... (8.23)}$$

soit:

$$s'(r_r, r_i, t) = s'(t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{S' t}{S t'}\right) \quad \text{..... (8.24)}$$

La variation de s' vs logt/t' devient log-linéaire dont la pente et l'intercept à l'origine sont:

$$\left(\frac{\Delta s'}{1 cycle}\right)_2 = 2\frac{2,3Q}{4\pi T} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{02} = \frac{S}{S'} \quad \text{..... (8.25)}$$

Ainsi, le graphe de la fonction $s'(r_r, r_i, t)$ vs $\log(t/t')$ est défini par les équations des quatre états successifs. Ce graphe présente deux segments log-linéaires correspondant aux états 2 et 4 (8.20 et 8.24) et deux courbures permettant les changements de pente (éqs 8.17 et 8.22). Le premier segment log-linéaire correspond à l'état 2. Il permet de déterminer la transmissivité T et le produit $r_i^2S^2/S'$ respectivement de la pente et de l'intercept à l'origine de son prolongement. Le deuxième segment log-linéaire correspond à l'état 4. Ce segment dont la pente est le double de la pente du premier segment permet de déterminer en plus de T la valeur du rapport S/S' par l'intercept à l'origine de son prolongement. Jusqu'à ce point, l'interprétation des données de remontée nous a permis de trouver T, S/S' et r_i^2S . On a donc besoin d'une quatrième équation pour découpler nos quatre inconnues: T = T', S, S' et r_i. Cette équation est introduite par les différentes méthodes proposées ci-dessous.

8.3.2.1. Méthode de (s_{P2} -s') vs logt'

Considérons la différence membre a membre des équations 8.11 et 8.16 :

$$s_{P2} - s' = \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_r') + W(u_i')\right] \quad \text{(8.26)}$$

Elle donne une expression similaire à (8.1). Ainsi la représentation graphique de (s_{P2} - s') en fonction de logt' aura la même allure que la figure 8.1. Elle présente deux branches log-linéaires successives: le doublement de la pente indique la présence d'une frontière imperméable. Les équations de ces deux branches sont respectivement:

$$s_{P2} - s' = \frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt'}{r_r^2 S'}\right) \quad \text{(8.27)}$$

les paramètres T et S' sont alors déterminés à partir de cette première branche

et

$$s_{P2} - s' = 2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt'}{r_r r_i S'}\right) \quad \text{(8.28)}$$

la distance r_i est déterminée par cette deuxième branche

Quoique ces équations, que nous considérons présentées pour la première fois, constituent un pas en avant pour l'interprétation des données de remontée elles ne sont toutefois pas sans critiques. En effet, comme pour l'aquifère infini, cette méthode d'interprétation basée sur le prolongement de la courbe de rabattement présente les limites et inconvénients cités à la section 6.2.1.

8.3.2.2 Méthode de (s'_{ini} - s') vs logt/t'

En considérant la différence, membre à membre, entre les équations (8.15) et (8.16), on peut écrire:

$$(s'_{im}-s')(r_r,r_i,t)=2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt_{arrêt}}{r_r r_i S}\right)-2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r_r r_i S}\right)+\frac{Q}{4\pi T}\left\{W(u'_r)+W(u'_i)\right\} \quad .. \text{(8.29)}$$

Comme on l'a vu au début de la section 8.3.2, l'expression du rabattement résiduel (éq. 8.16) s' en fonction de t/t' passe par deux états linéaires que l'on a identifiés par les états 2 et 4. Ils définissent respectivement la première branche et la deuxième branche du graphe s' vs logt/t'. Par conséquent, il en va ainsi pour la nouvelle fonction (s'_{ini} - s'). La première branche est définie par la différence, membre à membre, entre les équations (8.15) et (8.20):

$$(s'_{im}-s')(r_r,r_i,t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt_{arret}}{r_r r_i S}\right) - \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25TS'\,t_{arret}}{r_i^2 S^2}\frac{t}{t'}\right) \quad \ldots\ldots \text{(8.30)}$$

soit:

$$(s'_{im}-s')(r_r,r_i,t) = -\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_r^2 S'}{2,25Tt_{arret}}\frac{t}{t'}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(8.31)}$$

les paramètres T et S' sont alors déterminés à partir de cette première branche du graphique de (s'_{ini} - s') vs *log* t/t', respectivement de la pente et de l'intercept à l'origine:

$$\frac{\Delta\left(s'_{im}-s'\right)_1}{1cycle} = -\frac{2,3Q}{4\pi T} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{01} = \frac{2,25Tt_{arret}}{r_r^2 S'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(8.32)}$$

et lorsque t' devient de plus en plus grand, la fonction $W(u'_i)$ devient, à son tour, log-linéaire. Par conséquent, La deuxième branche sera définie par la différence, membre à membre, entre les équations (8.15) et (8.24):

$$(s'_{ini} - s')(r_r, r_i, t) = 2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt_{arret}}{r_r r_i S}\right) - 2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{S' t}{St'}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8.33)$$

$$(s'_{im} - s')(r_r, r_i, t) = -2\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_r r_i S' t}{2.25Tt_{arret} t'}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.34)$$

les paramètres T et $r_i S'$ sont alors déterminés à partir de cette deuxième branche du graphique de $(s'_{ini} - s')$ vs *log* t/t', respectivement de la pente et de l'intercept à l'origine:

$$\frac{\Delta(s'_{im} - s')_2}{1 cycle} = -2\frac{2,3Q}{4\pi T} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{02} = \frac{2,25Tt_{arret}}{r_r r_i S'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8.35)$$

Le rapport $(t/t')_{01} / (t/t')_{02}$ est égal à $r_i / r_r = ß$.

Cette nouvelle méthode des courbes de rabattements corrigés nous permet de connaître en plus de T, S' la valeur de r_i.

8.3.2.3 Méthode de s'/s'_{ini} vs log t/t'

En considérant les équations (8.15) et (8.16), le rapport s'/s'_{ini} présente deux branches log-linéaires. La première branche est définie par:

$$\frac{s'}{s'_{im}}(r_r, r_i, t) = \frac{1}{2\left[\log\left(\frac{2,25t_{arrêt}}{r_r}\frac{T}{r_i S}\right)\right]}\log\left(\frac{t}{t'}\right) + \frac{\log\left(\frac{2,25TS' t_{arret}}{r_i^2 S^2}\right)}{2\left[\log\left(\frac{2,25t_{arrêt}}{r_r}\frac{T}{r_i S}\right)\right]} \quad \ldots\ldots (8.36)$$

Respectivement, de la pente et de l'intercept à l'origine avec l'axe des abscisses, les rapports $(T/r_iS)^2$ et $TS'/(r_iS)^2$ sont alors déterminés. Ce qui nous permet de connaitre T/S' et S'/r_iS exprimés par:

$$\frac{\Delta\left(s'/s'_{im}\right)_1}{1cycle} = \frac{1}{\left[\log\left(\frac{2{,}25t_{arret}}{r_r}\frac{T}{r_iS}\right)^2\right]} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{01} = \frac{r_i^2S^2}{2{,}25TS'\,t_{arret}} \qquad \text{(8.37)}$$

et la deuxième branche définie par:

$$\frac{s'}{s'_{ini}}(r_r, r_i, t) = \frac{1}{\left[\log\left(\frac{2.25t_{arret}}{r_r}\frac{T}{r_iS}\right)\right]}\log\left(\frac{t}{t'}\right) + \frac{\log\left(\frac{S'}{S}\right)}{\left[\log\left(\frac{2.25t_{arret}}{r_r}\frac{T}{r_iS}\right)\right]} \qquad \text{(8.38)}$$

du graphe s'/s'_{ini} (r_r, r_i, t) vs log(t/t') nous donne le rapport T/r_iS et le rapport des coefficients d'emmagasinement S/S' respectivement de la pente et de l'intercept à l'origine, $s'/s'_{ini} = 0$, exprimés par:

$$\frac{\Delta\left(s'/s'_{im}\right)_2}{1cycle} = \frac{1}{\left[\log\left(\frac{2.25t_{arret}}{r_r}\frac{T}{r_iS}\right)\right]} \quad \text{et} \quad \left(\frac{t}{t'}\right)_{02} = \frac{S}{S'} \qquad \text{(8.39)}$$

Jusqu'à ce point, nous avons pu déterminer, par les équations (8.37) et (8.39), les quantités r_i , T/S', T/S, S/S' . Ces équations peuvent être utilisées conjointement avec les équations soit 8.21 soit 8.32 et 8.35 pour découpler les paramètres T = T', S', S.

8.3.3 Remontée dans la ZONE C

Dans la ZONE C, seulement la fonction de puits réel est log-linéaire. Le rabattement est donné par l'équation (8.6). Si la remontée commence dans cette zone, au temps $t = t_A$ tel que $t_K \geq t_A \geq t_N$ l'équation (8.13) prend la forme:

$$s'(r_r,r_i,t) = \frac{Q}{4\pi T}\left\{\left[2.3\log\frac{2.25Tt}{r_r^2 S} + W(u_i)\right] - \left[W(u_r') + W(u_i')\right]\right\} \quad \text{(8.40)}$$

Comme vu précédemment dans la section 7.3.2, lorsque r_r est très petit devant r_i, $r_i / r_r > 10$ (Chapuis, 1994a) l'argument u'_r tend plus vite vers 0.01 que u'_i ; ainsi la fonction $W(u'_r)$ devient plus vite log-linéaire que $W(u'_i)$. Dans ces conditions, on peut écrire les différents états successifs par lesquels passe l'équation (8.40):

ÉTAT 1:

$$s'(r_r,r_i,t) = \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r^2 S}\right) + \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_i) - W(u'_r)\right] \quad \text{(8.41)}$$

ÉTAT 2:

$$s'(r_r,r_i,t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{Q}{4\pi T}W(u'_r) \quad \text{(8.42)}$$

ÉTAT 3:

Lorsque u'_r devient faible

$$s'(r_r,r_i,t) = 2\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt}{r_r r_i S}\right) - \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt'}{r_r^2 S'}\right) = \frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_r S'}{r_i S}\frac{t}{t'}\right) \quad \text{(8.43)}$$

ÉTAT 4:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_rS'}{r_iS}\frac{t}{t'}\right)-\frac{Q}{4\pi T}W(u'_i) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8.44)$$

ÉTAT 5:

$$s'(r_r,r_i,t)=\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_rS'}{r_iS}\frac{t}{t'}\right)-\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2,25Tt'}{r_i^2S'}\right)=\frac{2,3Q}{4\pi T}\log\left(\frac{r_rr_iS'^2}{2,25ST}\frac{t}{t'^2}\right) \quad \ldots\ldots \quad (8.45)$$

Ainsi, l'analyse des cinq états successifs montre que la représentation graphique de $s'(r_r, r_i, t)$ vs $\log t'$ indique plusieurs courbures. Ce cas de remontée est le plus compliqué pour lequel aucune interprétation directe n'a pu être obtenue.

8.4 Exemple numérique (cas synthétique)

Pour illustrer ce qui a été développé dans la section 8.3, un exemple numérique synthétique est construit à l'aide du programme SUPTHEIS. Cet exemple suppose qu'un puits de pompage situé aux coordonnées (0 m, 0 m) pompe, à un débit constant de Q = 0,03m^3/s, un aquifère confiné de transmissivité T = 0,01m^2/s et d'emmagasinement S = 2,25 10^{-4}. La diffusivité est donc égale à T/S = 44,44 m^2/s. Une frontière imperméable verticale et linéaire passe par le point de coordonnées (100 m, 0 m). Par conséquent, l'influence de cette frontière est représentée par un autre puits image de pompage situé au point (200 m, 0 m). Trois puits d'observation P1, P2 et P3 sont installés dans l'aquifère.

Ces puits sont identifiés par les triplets (r_r, r_i et $\beta = r_i/r_r$) tel que P1(2 m, 200 m, 100), P2(4 m, 240 m, 60) et P3(10 m, 400 m, 40). Les rabattements aux trois puits sont générés à l'aide du programme SUPTHEIS. Pour chaque fonction de puits nous avons utilisé les 30 premiers termes. Ces rabattements en fonction du temps sont rassemblés dans le tableau 8.1 et illustrés par la figure 8.2. Nous allons considérer deux différents temps d'arrêt t_A de la pompe. L'un de ces temps est pris dans la ZONE B, et l'autre dans la ZONE D. Dans la ZONE B, ce temps à l'arrêt t_A est égal à 50 s et correspond à s'_{ini} = 1,7025 m dans P1, à s'_{ini} = 1,3715 m dans P2 et s'_{ini} = 0,9362 m dans P3. Dans la ZONE D, le temps à l'arrêt est t_A = 100 000 s et correspond à s'_{ini} = 4,8348 m dans P1, à s'_{ini} = 4,4170 m dans P2 et s'_{ini} = 3,7370 m dans P3. Dans cet exemple, nous considérons également le cas où le coefficient d'emmagasinement est différent pendant la phase de pompage et la phase de remontée ($S' \neq S$).

CAS No.1

Dans ce cas le coefficient d'emmagasinement en remontée est égal à celui en pompage, $S' = S = 2{,}25\ 10^{-4}$. Pour chaque temps d'arrêt de la pompe t_A appartenant à chacune des deux zones B et D, les valeurs des rabattements résiduels sont générées par le programme SUPTHEIS en utilisant les 30 premiers termes de chaque fonction de puits.

L'interprétation des résultats dépend de la zone à partir de laquelle la remontée s'effectue:

Remontée en ZONE B:

Pour la remontée en ZONE B, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (cf. Figure 8.3). Les courbes obtenues convergent vers la même droite de pente $\Delta s'/cycle = 0,549m$ et d'intercept à l'origine $(t/t')_0 = 1$. La situation est similaire à celle représentée aux figures 6.2 et 7.3. En utilisant la pente, la transmissivité peut être déterminée, $T=T'=0.01m^2/s$. Cependant le coefficient d'emmagasinement ne peut être calculé de ces courbes.

Les valeurs calculées de $(s_{P1} - s')$, s'/s'_{ini} et $(s'_{ini} - s')$ sont reportées dans les tableaux 8.2, 8.3 et 8.4 respectivement pour les piézomètres P1, P2 et P3. Nous avons utilisé pour le calcul de s_{P1} les équations 8.4 et 8.5 qui sont équivalentes à 6.5. Les figures 8.4, 8.5 et 8.6 représentent les différentes interprétations suivant $(s_{P1} - s')$ vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t'. Pour le piézomètre P1, le plus proche du puits, Les valeurs des paramètres obtenues de chaque interprétation sont indiquées respectivement sur chaque figure. Ces valeurs nous fournissent les mêmes valeurs de T, S, S' et r_i que nous avons considérées pour générer les données.

Remontée en ZONE D:

Pour la remontée en ZONE D, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (figure 8.7). Comme exposé au paragraphe 8.3.2, chaque courbe présente deux parties log-linéaires correspondant aux états 2 et 4 et deux parties courbes qui correspondent aux états 1 et 3. Comme pour le pompage, la pente du segment de l'état 2 est le double de la pente du segment de l'état 4. Ainsi de l'état 2, on peut déterminer pour chaque piézomètre les couples $(T, S'/r_i^2\ S^2)$. D'un autre côté, les

courbes de l'état 4 convergent vers la droite de pente $\Delta s'$/cycle = 1,098 m et d'intercept $(t/t')_0 = 1$ qui permet de calculer (T, S/S'). En conclusion, la transmissivité T et la distance r_i séparant le piézomètre du puits image sont alors connues mais non les coefficients d'emmagasinement S et S'. En effet, seul le rapport S/S' peut être déterminé.

Les valeurs calculées de $(s_{P2} - s')$ sont reportées dans les tableau 8.5, 8.6 et 8.7 pour chaque piézomètres P1, P2 et P3 respectivement. Nous avons utilisé les équations 8.11 et 8.12 pour le calcul de s_{P2}. La figure 8.8 illustre les courbes $(s_{P2} - s')$ vs logt' pour ces trois piézomètres. Les courbes obtenues sont équivalentes à celles du pompage (cf. Figure 8.2). Pour le piézomètre P1, le plus proche du puits, les valeurs de la pente et de l'intercept à l'origine du premier segment log-linéaire sont respectivement $\Delta s_1 = \Delta(s_{P2} - s')_1$ / cycle = 0,549 m et t'_{01} = 0,04 s. Par conséquent, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement qui en résultent sont T' = T de 0,01 m^2/s et S' = 2,25 10^{-4}. L'analyse du deuxième segment log-linéaire nous permet de constater le doublement de la pente $\Delta s_2 = \Delta(s_{P2} - s')_2$ / cycle = 1,098 m = $2\Delta s_1$ traduisant ainsi la présence d'une frontière rectiligne imperméable. L'intercept à l'origine du prolongement de ce deuxième segment est t'_{02} = 4 s. Ainsi, le rapport $\frac{t'_{02}}{t'_{01}} = \frac{4}{0,04} = 100$ est bien égal à $\beta = 100$ (équations 8.27 et 8.28) et permet de déterminer la distance $r_i = \beta r_r = 200$ m.

La figure 8.9 présente les courbes MERR « Méthodes des écarts de Rabattements résiduels ». Comme montré à la section 8.3.2.2 le graphe $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t' présente deux branches linéaires. La pente de la première branche log-linéaire est de $\Delta(s_{ini} - s')_1$ /cycle =

0,549 m et l'intercept à l'origine est de $(t/t')_{01} = 25\ 10^5$. Des équations 8.32 on en déduit: $T = 0{,}01\ m^2/s$ et $S' = 2{,}25\ 10^{-4}$. La pente de la deuxième branche log-linéaire vaut $\Delta(s_{ini} - s')_2$ /cycle = 1,098 m qui est le double de la pente de la première branche, et l'intercept à l'origine est de $(t/t')_{02} = 25\ 10^3$. Des équations 8.35 on en déduit: $T = 0{,}01\ m^2/s$ et $r_i S' = 4{,}50\ 10^{-2}$ m. En combinant ces valeurs entre elles, on trouve: $r_i = r_r\ (t/t')_{01} / (t/t')_{02}$ soit $r_i = 2x\ 25\ 10^5/25\ 10^3 = 200$ m. Donc par cette représentation $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t' il devient possible de connaitre T, S' et r_i . La combinaison de ces résultats avec la représentation de s' vs logt/t' nous permet de vérifier la valeur de S pour ce cas égale à S' (figure 8.7).

La figure 8.10 illustre les courbes de rabattements normalisés, s'/s'_{ini} vs logt/t', pour les trois piézomètres. Ces courbes présentent deux branches log-linéaires comme montré par les équations (8.36) et (8.38). Les valeurs des paramètres de chacune de ces branches (pente, intercept) sont indiquées sur la figure, pour le piézomètre P1. En utilisant ces valeurs et les équations (8.37) et (8.39), on trouve à partir de la première branche: $T/r_i S = 0{,}222$ m/s et $(r_i S)^2/(T S') = 900\ s.m^{-1}$. Le produit de ces deux dernières valeurs donne $r_i S/S' = 199.2$ m et $(T/r_i S)(r_i S/S') = T/S' = 44{,}36\ m^2/s$. La deuxième branche nous donne le rapport S/S' =1 qui confirme que S = S'.

CAS No.2

Dans ce cas, on va considérer le coefficient d'emmagasinement en remontée égal à la moitié de celui en pompage, S'= S/2 = 1.125 10^{-4}. Comme pour le cas No.1, les valeurs des rabattements résiduels s'(r, t), sont générées par le programme SUPTHEIS en utilisant les 30 premiers termes de la fonction de puits.

Comme dans le cas précédent, l'interprétation des résultats dépend de la zone à partir de laquelle la remontée débute:

Remontée en ZONE B:

Pour la remontée en ZONE B, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (cf. Figure 8.11). Les courbes obtenues convergent vers la droite de pente $\Delta s'$/cycle = 0,549m et d'intercept $(t/t')_0 = 2$. La situation est similaire à celle représentée aux figures 6.2 et 7.3. En utilisant la pente, la transmissivité peut être déterminée, T=T'=0.01m^2/s.

Les valeurs calculées de (s_{P1} - s'), s'/s'_{ini} et (s'_{ini} - s') sont reportées dans les tableaux 8.8, 8.9 et 8.10 respectivement pour les piézomètres P1, P2 et P3. Nous avons calculé s_{P1} de la même façon que dans le cas No.1. Les figures 8.12, 8.13 et 8.14 représentent les différentes interprétations suivant (s_{P1} - s') vs logt', s'/s'_{ini} vs logt/t' et (s'_{ini} - s') vs logt/t'. Les valeurs des paramètres obtenues de chaque interprétation sont indiquées respectivement sur chaque figure.

Remontée en ZONE D:

Pour la remontée en ZONE D, nous avons représenté s' vs logt/t' pour les trois piézomètres P1, P2 et P3 (figure 8.15). Comme exposé au paragraphe 8.3.2, chaque courbe présente deux parties log-linéaires correspondant aux états 2 et 4 et deux parties courbes qui correspondent aux états 1 et 3. Comme pour le pompage, la pente du segment de l'état 2 est le double de la pente du segment de l'état 4. Ainsi de l'état 2, on peut déterminer pour chaque piézomètre les couples (T, r_iS/S'). Cependant, les courbes de l'état 4 convergent vers la droite de pente $\Delta s'$/cycle = 1,098 m et d'intercept $(t/t')_0 = 2$ qui permet de calculer (T, S/S'). En conclusion, la transmissivité T et la distance r_i séparant le piézomètre du puits image sont alors connues mais non les coefficients d'emmagasinement S et S'. En effet, seul le rapport S/S' peut être déterminé.

Les valeurs calculées de (s_{P2} - s') sont reportées dans les tableaux 8.11, 8.12 et 8.13 pour chaque piézomètre P1, P2 et P3 respectivement. Nous avons calculé s_{P2} de la même façon que dans le cas No.1. La figure 8.16 illustre les courbes (s_{P2} - s') vs logt' pour les trois piézomètres. Les courbes obtenues sont équivalentes à celles du pompage (cf. Figure 8.2). Pour le piézomètre P1 le plus proche du puits les valeurs de la pente et de l'intercept à l'origine du premier segment log-linéaire sont respectivement $\Delta s_1 = \Delta(s_{P2} - s')_1$ / cycle = 0,549 m et t'_{01} = 0,02 s. Par conséquent, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement qui en résultent sont T' = T de 0,01 m^2/s et S' = 1,125 10^{-4} (éqs. 8.25 et 8.5). L'analyse du deuxième segment log-linéaire nous permet de constater le doublement de la pente $\Delta s_2 = \Delta(s_{P2} - s')_2$ / cycle = 1,098 m = $2\Delta s_1$ traduisant ainsi la présence d'une frontière rectiligne imperméable (éq.8.26). L'intercept à l'origine du

prolongement de ce deuxième segment est $t'_{02} = 2$ s. Ainsi, le rapport $\frac{t_{02}}{t_{01}} = \frac{2}{0,02} = 100$ est bien égal à $\beta = 100$ ce qui vérifie bien l'équation (8.12) et permet de déterminer la distance $r_i = \beta r_r = 200$ m.

La figure 8.17 présente les courbes MERR « méthode des écarts des Rabattement résiduels ». Comme montré à la section 8.3.2.2 et déjà illustré au cas 1 du présent exemple, le graphe $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t' présente deux branches linéaires. La pente de la première branche log-linéaire est de $\Delta(s_{ini} - s')_1$ /cycle = - 0,549 m et l'intercept à l'origine est de $(t/t')_{01} = 5\ 10^6$. Des équations 8.32 on en déduit: T = 0,01 m^2/s et $S' = 2,25\ 10^{-4}$. La pente de la deuxième branche log-linéaire vaut $\Delta(s_{ini} - s')_2$ /cycle = 1,098 m qui est le double de la pente de la première branche, et l'intercept à l'origine est de $(t/t')_{02} = 5\ 10^4$. Des équations 8.35 on en déduit: T = 0,01 m^2/s et $r_i S' = 2,25\ 10^{-2}$ m. En combinant ces valeurs entre elles, on trouve: $r_i = r_r (t/t')_{01} / (t/t')_{02}$ soit :
$r_i = 2x\ 5\ 10^6/5\ 10^4 = 200$ m. Donc par cette représentation $(s'_{ini} - s')$ vs logt/t' il devient possible de connaitre T, S' et r_i . La combinaison de ces résultats avec la représentation de s' vs logt/t' nous permet de vérifier la valeur de S pour ce cas égale à 2S' (figure 8.15).

La figure 8.18 illustre les courbes de rabattements normalisés, s'/s'_{ini} vs logt/t', pour les trois piézomètres. Ces courbes présentent deux branches log-linéaires comme montré par les équations (8.36) et (8.38). Les valeurs des paramètres de chacune de ces branches (pente, intercept) sont indiquées sur la figure, pour le piézomètre P1. En utilisant ces valeurs et les équations (8.37) et (8.39), on trouve à partir de la première branche: $T/r_i S = 0,222$ m/s et $(r_i S)^2/(T S') = 1800\ s.m^{-1}$. Le produit de ces deux dernières valeurs

donne r_i S/S' = 399,60 m et $(T/r_i S)(r_i S/S') = T/S' = 88,72\ 10^{-2}\ m^2/s$. La deuxième branche nous donne le rapport S/S' = 2 qui confirme que S = 2S'.

8.5 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

La figure 8.19 résume les différentes méthodes d'interprétation des données de remontée lorsque l'on se trouve dans les hypothèses présentées à la section 8.2. Il est important de souligner, comme pour le cas de la frontière de recharge, que si durant la phase de pompage, la ZONE C commence à se développer, il est recommandé de laisser l'essai se poursuivre jusqu'à obtenir la deuxième branche.

Tableau 8.1: essai de pompage dans un milieu aquifère limité par une frontière imperméable. (esssai synthétique)

(suite)

t(s)	s(m) P1 rr = 2m ri = 200m	s(m) P2 rr = 4m ri = 240m	s(m) P3 rr = 10m ri = 400m	t(s)	s(m) P1 rr = 2m ri = 200m	s(m) P2 rr = 4m ri = 240m	s(m) P3 rr = 10m ri = 400m
0,01	0,0083	0,0000	-	100,00	1,8758	1,5390	1,1003
0,02	0,0426	0,0005	-	200,00	2,0756	1,7221	1,2656
0,03	0,0813	0,0031	-	300,00	2,2110	1,8447	1,3648
0,04	0,1171	0,0083	-	400,00	2,3155	1,9403	1,4385
0,05	0,1493	0,0154	-	500,00	2,4009	2,0194	1,4989
0,06	0,1781	0,0239	-	600,00	2,4733	2,0870	1,5508
0,07	0,2041	0,0331	0,0000	700,00	2,5361	2,1461	1,5968
0,08	0,2277	0,0426	0,0000	800,00	2,5916	2,1986	1,6382
0,09	0,2493	0,0524	0,0001	900,00	2,6413	2,2459	1,6760
0,10	0,2691	0,0621	0,0001	1 000,00	2,6863	2,2889	1,7109
0,15	0,3496	0,1085	0,0012	2 000,00	2,9925	2,5855	1,9635
0,20	0,4099	0,1493	0,0040	3 000,00	3,1775	2,7671	2,1272
0,30	0,4982	0,2162	0,0139	4 000,00	3,3106	2,8983	2,2488
0,40	0,5625	0,2691	0,0275	5 000,00	3,4145	3,0011	2,3456
0,50	0,6132	0,3127	0,0426	6 000,00	3,4998	3,0856	2,4261
0,60	0,6549	0,3496	0,0582	7 000,00	3,5721	3,1574	2,4949
0,70	0,6905	0,3816	0,0737	8 000,00	3,6349	3,2198	2,5550
0,80	0,7214	0,4099	0,0887	9 000,00	3,6904	3,2750	2,6084
0,90	0,7488	0,4352	0,1032	10 000,0	3,7402	3,3245	2,6564
1,00	0,7733	0,4581	0,1171	15 000,0	3,9320	3,5155	2,8431
1,50	0,8684	0,5480	0,1781	20 000,0	4,0685	3,6516	2,9770
2,00	0,9362	0,6132	0,2277	30 000,0	4,2612	3,8439	3,1671
3,00	1,0321	0,7064	0,3046	40 000,0	4,3981	3,9807	3,3027
4,00	1,1003	0,7733	0,3629	50 000,0	4,5043	4,0868	3,4082
5,00	1,1533	0,8256	0,4099	60 000,0	4,5912	4,1736	3,4945
6,00	1,1967	0,8684	0,4492	70 000,0	4,6647	4,2470	3,5676
7,00	1,2333	0,9047	0,4829	80 000,0	4,7284	4,3106	3,6310
8,00	1,2651	0,9362	0,5125	90 000,0	4,7845	4,3668	3,6869
9,00	1,2932	0,9640	0,5388	100 000,0	4,8348	4,4170	3,7370
10,00	1,3182	0,9889	0,5625	200 000,0	5,1654	4,7476	4,0669
20,00	1,4835	1,1533	0,7214	300 000,0	5,3590	4,9410	4,2601
30,00	1,5802	1,2497	0,8160	400 000,0	5,4963	5,0783	4,3973
40,00	1,6489	1,3183	0,8836	500 000,0	5,6028	5,1848	4,5037
50,00	1,7025	1,3715	0,9362	600 000,0	5,6898	5,2719	4,5907
60,00	1,7468	1,4150	0,9792	700 000,0	5,7634	5,3454	4,6642
70,00	1,7847	1,4520	1,0157	800 000,0	5,8272	5,4092	4,7280
80,00	1,8182	1,4843	1,0474	900 000,0	5,8834	5,4654	4,7842
90,00	1,8483	1,5130	1,0753	1 000 000	5,9337	5,5157	4,8344

Tableau 8.2: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B.
Cas où S =S' = 2,25E-4 (Piézomètre P1, ß =100)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'
0,01	5001	1,6943	0,9952	0,0083	0,0081	80	1,625	0,129	0,0758	1,5736	1,8015
0,02	2501	1,66	0,975	0,0425	0,0425	90	1,556	0,1199	0,0704	1,5828	1,8283
0,03	1667,667	1,6214	0,9524	0,0811	0,0811	100	1,5	0,1124	0,066	1,5902	1,8523
0,04	1251	1,5856	0,9313	0,1169	0,1169	200	1,25	0,0727	0,0427	1,6298	2,0139
0,05	1001	1,5535	0,9125	0,149	0,1491	300	1,167	0,0552	0,0324	1,6474	2,1118
0,06	834,333	1,5247	0,8955	0,1779	0,178	400	1,125	0,0447	0,0262	1,6579	2,1823
0,07	715,286	1,4987	0,8803	0,2038	0,204	500	1,1	0,0376	0,0221	1,665	2,2373
0,08	626	1,4752	0,8665	0,2274	0,2276	600	1,083	0,0324	0,0191	1,6701	2,2823
0,09	556,556	1,4537	0,8538	0,2489	0,2491	700	1,071	0,0285	0,0168	1,674	2,3203
0,1	501	1,4339	0,8422	0,2687	0,269	800	1,063	0,0255	0,015	1,677	2,3533
0,15	334,333	1,3536	0,7951	0,3489	0,3494	900	1,056	0,023	0,0135	1,6795	2,3823
0,2	251	1,2936	0,7598	0,4089	0,4097	1000	1,05	0,021	0,0123	1,6815	2,4082
0,3	167,667	1,2058	0,7083	0,4967	0,498	2000	1,025	0,0112	0,0066	1,6914	2,5778
0,4	126	1,142	0,6707	0,5606	0,5623	3000	1,017	0,0076	0,0045	1,6949	2,6762
0,5	101	1,0918	0,6413	0,6108	0,613	4000	1,013	0,0058	0,0034	1,6968	2,7457
0,6	84,333	1,0505	0,617	0,652	0,6547	5000	1,01	0,0046	0,0027	1,6979	2,7995
0,7	72,429	1,0154	0,5964	0,6871	0,6903	6000	1,008	0,0039	0,0023	1,6986	2,8434
0,8	63,5	0,985	0,5785	0,7176	0,7212	7000	1,007	0,0033	0,002	1,6992	2,8805
0,9	56,556	0,9581	0,5627	0,7445	0,7486	8000	1,006	0,0029	0,0017	1,6996	2,9125
1	51	0,934	0,5486	0,7686	0,7731	9000	1,006	0,0026	0,0015	1,6999	2,9408
1,5	34,333	0,8413	0,4941	0,8612	0,8681	10000	1,005	0,0024	0,0014	1,7002	2,9661
2	26	0,7758	0,4557	0,9267	0,9359	15000	1,003	0,0016	0,0009	1,701	3,0633
3	17,667	0,6845	0,4021	1,018	1,0317	20000	1,003	0,0012	0,0007	1,7014	3,1321
4	13,5	0,6208	0,3647	1,0817	1,0999	30000	1,002	0,0008	0,0005	1,7017	3,2291
5	11	0,5723	0,3361	1,1302	1,1528	40000	1,001	0,0006	0,0003	1,7019	3,2979
6	9,333	0,5333	0,3132	1,1692	1,1961	50000	1,001	0,0005	0,0003	1,7021	3,3512
7	8,143	0,5009	0,2942	1,2016	1,2327	60000	1,001	0,0004	0,0002	1,7021	3,3948
8	7,25	0,4734	0,2781	1,2291	1,2644	70000	1,001	0,0003	0,0002	1,7022	3,4316
9	6,556	0,4495	0,264	1,253	1,2924	80000	1,001	0,0003	0,0002	1,7022	3,4635
10	6	0,4285	0,2517	1,274	1,3174	90000	1,001	0,0003	0,0002	1,7023	3,4917
20	3,5	0,3013	0,1769	1,4013	1,4814	100000	1	0,0002	0,0001	1,7023	3,5168
30	2,667	0,238	0,1398	1,4645	1,5766	200000	1	0,0001	0,0001	1,7024	3,6824
40	2,25	0,1993	0,1171	1,5032	1,6434	300000	1	0,0001	0	1,7025	3,7792
50	2	0,1732	0,1017	1,5293	1,6946	400000	1	0,0001	0	1,7025	3,8479
60	1,833	0,1544	0,0907	1,5481	1,7362	500000	1	0	0	1,7025	3,9012
70	1,714	0,1402	0,0823	1,5624	1,7712						

Tableau 8.3: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B.
Cas où S =S' = 2,25E-4 (Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'
0,01	5001	1,3715	1	0	0	80	1,625	0,121	0,0882	1,2505	1,4786
0,02	2501	1,3711	0,9997	0,0004	0,0005	90	1,556	0,1115	0,0813	1,2599	1,5057
0,03	1667,667	1,3685	0,9978	0,003	0,0031	100	1,5	0,1038	0,0757	1,2677	1,5299
0,04	1251	1,3634	0,9941	0,0081	0,0083	200	1,25	0,0658	0,048	1,3057	1,6899
0,05	1001	1,3563	0,9889	0,0152	0,0154	300	1,167	0,0503	0,0367	1,3211	1,7856
0,06	834,333	1,3479	0,9828	0,0236	0,0238	400	1,125	0,0412	0,0301	1,3302	1,8548
0,07	715,288	1,3387	0,9761	0,0327	0,033	500	1,1	0,035	0,0255	1,3364	1,9089
0,08	626	1,3292	0,9692	0,0423	0,0426	600	1,083	0,0305	0,0222	1,341	1,9533
0,09	556,556	1,3195	0,9621	0,0519	0,0523	700	1,071	0,027	0,0197	1,3445	1,9909
0,1	501	1,3098	0,9551	0,0616	0,0621	800	1,063	0,0242	0,0177	1,3472	2,0236
0,15	334,333	1,2637	0,9214	0,1078	0,1084	900	1,056	0,022	0,016	1,3495	2,0524
0,2	251	1,2231	0,8918	0,1483	0,1493	1000	1,05	0,0201	0,0147	1,3513	2,0781
0,3	167,667	1,1567	0,8434	0,2148	0,2162	2000	1,025	0,0109	0,008	1,3605	2,2471
0,4	126	1,1042	0,8051	0,2672	0,2691	3000	1,017	0,0075	0,0055	1,364	2,3453
0,5	101	1,0611	0,7737	0,3103	0,3127	4000	1,013	0,0057	0,0042	1,3658	2,4148
0,6	84,333	1,0247	0,7472	0,3468	0,3496	5000	1,01	0,0046	0,0034	1,3669	2,4686
0,7	72,429	0,9931	0,7241	0,3783	0,3816	6000	1,008	0,0039	0,0028	1,3676	2,5125
0,8	63,5	0,9653	0,7039	0,4061	0,4099	7000	1,007	0,0033	0,0024	1,3681	2,5495
0,9	56,556	0,9405	0,6858	0,4309	0,4352	8000	1,006	0,0029	0,0021	1,3685	2,5816
1	51	0,9181	0,6694	0,4533	0,458	9000	1,006	0,0026	0,0019	1,3689	2,6099
1,5	34,333	0,8306	0,6056	0,5409	0,5479	10000	1,005	0,0023	0,0017	1,3691	2,6352
2	26	0,7677	0,5597	0,6038	0,6131	15000	1,003	0,0016	0,0011	1,3699	2,7323
3	17,667	0,6789	0,495	0,6925	0,7064	20000	1,003	0,0012	0,0009	1,3703	2,8012
4	13,5	0,6165	0,4495	0,755	0,7733	30000	1,002	0,0008	0,0006	1,3707	2,8982
5	11	0,5687	0,4146	0,8028	0,8255	40000	1,001	0,0006	0,0004	1,3709	2,967
6	9,333	0,5302	0,3866	0,8413	0,8683	50000	1,001	0,0005	0,0003	1,371	3,0203
7	8,143	0,4981	0,3632	0,8734	0,9046	60000	1,001	0,0004	0,0003	1,3711	3,0639
8	7,25	0,4708	0,3433	0,9007	0,9361	70000	1,001	0,0003	0,0002	1,3711	3,1007
9	6,556	0,447	0,326	0,9244	0,9639	80000	1,001	0,0003	0,0002	1,3712	3,1326
10	6	0,4261	0,3107	0,9453	0,9888	90000	1,001	0,0003	0,0002	1,3712	3,1607
20	3,5	0,2987	0,2178	1,0727	1,153	100000	1	0,0002	0,0002	1,3712	3,1859
30	2,667	0,2346	0,171	1,1369	1,2491	200000	1	0,0001	0,0001	1,3713	3,3514
40	2,25	0,1948	0,142	1,1767	1,317	300000	1	0,0001	0,0001	1,3714	3,4482
50	2	0,1675	0,1221	1,2039	1,3694	400000	1	0,0001	0	1,3714	3,5169
60	1,833	0,1477	0,1077	1,2238	1,4119	500000	1	0	0	1,3714	3,5702
70	1,714	0,1327	0,0968	1,2388	1,4477						

Tableau 8.4: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B.
Cas où S =S' = 2,25E-4 (Piézomètre P3, ß = 40)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'
0,01	5001	0,9362	1	0	0						
0,02	2501	0,9362	1	0	0	80	1,625	0,1153	0,1232	0,8209	1,0467
0,03	1667,667	0,9362	1	0	0	90	1,556	0,105	0,1122	0,8312	1,0747
0,04	1251	0,9362	1	0	0	100	1,5	0,0964	0,103	0,8397	1,0998
0,05	1001	0,9362	1	0	0	200	1,25	0,0541	0,0578	0,882	1,264
0,06	834,333	0,9362	1	0	0	300	1,167	0,039	0,0417	0,8971	1,3594
0,07	715,286	0,9362	1	0	0	400	1,125	0,0315	0,0336	0,9047	1,427
0,08	626	0,9362	1	0	0	500	1,1	0,0268	0,0286	0,9093	1,4796
0,09	556,556	0,9362	1	0	0	600	1,083	0,0236	0,0252	0,9125	1,5226
0,1	501	0,9362	1	0	0	700	1,071	0,0212	0,0227	0,9149	1,5592
0,15	334,333	0,9356	0,9994	0,0005	0	800	1,063	0,0193	0,0206	0,9168	1,591
0,2	251	0,9331	0,9968	0,003	0,0017	900	1,056	0,0178	0,019	0,9184	1,6191
0,3	167,667	0,9237	0,9867	0,0125	0,0117	1000	1,05	0,0165	0,0176	0,9197	1,6443
0,4	126	0,9106	0,9727	0,0256	0,0253	2000	1,025	0,0097	0,0103	0,9265	1,8108
0,5	101	0,8959	0,957	0,0403	0,0404	3000	1,017	0,0069	0,0073	0,9293	1,9084
0,6	84,333	0,8808	0,9408	0,0554	0,056	4000	1,013	0,0053	0,0057	0,9308	1,9777
0,7	72,429	0,8658	0,9248	0,0704	0,0715	5000	1,01	0,0044	0,0047	0,9318	2,0313
0,8	63,5	0,8512	0,9093	0,085	0,0865	6000	1,008	0,0037	0,0039	0,9325	2,0752
0,9	56,556	0,8372	0,8943	0,099	0,101	7000	1,007	0,0032	0,0034	0,933	2,1122
1	51	0,8237	0,8799	0,1124	0,1149	8000	1,006	0,0028	0,003	0,9333	2,1442
1,5	34,333	0,765	0,8172	0,1712	0,176	9000	1,006	0,0025	0,0027	0,9336	2,1725
2	26	0,7177	0,7666	0,2185	0,2256	10000	1,005	0,0023	0,0024	0,9339	2,1977
3	17,667	0,6453	0,6893	0,2908	0,3025	15000	1,003	0,0015	0,0016	0,9346	2,2949
4	13,5	0,5914	0,6317	0,3448	0,3609	20000	1,003	0,0012	0,0012	0,935	2,3637
5	11	0,5488	0,5862	0,3874	0,4079	30000	1,002	0,0008	0,0008	0,9354	2,4607
6	9,333	0,5138	0,5488	0,4224	0,4472	40000	1,001	0,0006	0,0006	0,9356	2,5295
7	8,143	0,4842	0,5172	0,452	0,481	50000	1,001	0,0005	0,0005	0,9357	2,5828
8	7,25	0,4587	0,49	0,4774	0,5106	60000	1,001	0,0004	0,0004	0,9358	2,6264
9	6,556	0,4365	0,4662	0,4997	0,537	70000	1,001	0,0003	0,0004	0,9358	2,6632
10	6	0,4167	0,4452	0,5194	0,5607	80000	1,001	0,0003	0,0003	0,9359	2,6951
20	3,5	0,2943	0,3144	0,6418	0,7199	90000	1,001	0,0003	0,0003	0,9359	2,7232
30	2,667	0,2314	0,2472	0,7048	0,8148	100000	1	0,0002	0,0003	0,9359	2,7484
40	2,25	0,1917	0,2048	0,7444	0,8825	200000	1	0,0001	0,0001	0,936	2,9139
50	2	0,1641	0,1753	0,772	0,9353	300000	1	0,0001	0,0001	0,9361	3,0107
60	1,833	0,1437	0,1535	0,7925	0,9785	400000	1	0,0001	0,0001	0,9361	3,0784
70	1,714	0,1279	0,1366	0,8083	1,015	500000	1	0	0,0001	0,9361	3,1327

Tableau 8.5: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE D
Cas où S =S' = 2,25E-4 (Piézomètre P1, ß = 100)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	(s'ini-s')(m)	(sp2-s')(m)	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	(s'ini-s')(m)	(sp2-s')(m)
0,01	1E+07	4,8265	0,9983	0,0083	0,0086	100	1001	2,9595	0,6121	1,8753	1,8761
0,02	5000002	4,7921	0,9912	0,0426	0,043	200	501	2,7602	0,5709	2,0748	2,0759
0,03	3333335	4,7535	0,9832	0,0813	0,0816	300	334,333	2,6252	0,543	2,2095	2,2113
0,04	2500001	4,7177	0,9758	0,1171	0,1174	400	251	2,5212	0,5215	2,3136	2,3158
0,05	2000001	4,6855	0,9691	0,1493	0,1496	500	201	2,4362	0,5039	2,3986	2,4013
0,06	1666668	4,6566	0,9632	0,1781	0,1785	600	167,667	2,3643	0,489	2,4705	2,4737
0,07	1428572	4,6306	0,9578	0,2041	0,2045	700	143,857	2,302	0,4761	2,5328	2,5365
0,08	1250001	4,607	0,9529	0,2277	0,2281	800	126	2,247	0,4648	2,5878	2,5919
0,09	1111112	4,5855	0,9484	0,2493	0,2497	900	112,111	2,1978	0,4546	2,637	2,6416
0,1	1000001	4,5656	0,9443	0,2691	0,2695	1000	101	2,1532	0,4454	2,6815	2,6866
0,15	666668	4,4851	0,9277	0,3496	0,35	2000	51	1,8517	0,383	2,9831	2,9929
0,2	500001	4,4249	0,9152	0,4099	0,4103	3000	34,333	1,6713	0,3457	3,1634	3,1779
0,3	333334	4,3366	0,897	0,4982	0,4985	4000	26	1,5429	0,3191	3,2919	3,3109
0,4	250001	4,2723	0,8837	0,5625	0,5628	5000	21	1,4435	0,2986	3,3912	3,4149
0,5	200001	4,2216	0,8732	0,6132	0,6135	6000	17,667	1,3628	0,2819	3,472	3,5002
0,6	166668	4,1798	0,8645	0,6549	0,6553	7000	15,286	1,2949	0,2678	3,5399	3,5725
0,7	142858	4,1443	0,8572	0,6905	0,6908	8000	13,5	1,2365	0,2558	3,5982	3,6353
0,8	125001	4,1134	0,8508	0,7214	0,7218	9000	12,111	1,1854	0,2452	3,6493	3,6908
0,9	111112	4,086	0,8451	0,7488	0,7491	10000	11	1,1401	0,2358	3,6947	3,7406
1	100001	4,0614	0,84	0,7733	0,7737	15000	7,667	0,9694	0,2005	3,8653	3,9324
1,5	66667,7	3,9664	0,8204	0,8684	0,8687	20000	6	0,8533	0,1765	3,9815	4,0689
2	50001	3,8986	0,8064	0,9362	0,9365	30000	4,333	0,6987	0,1445	4,136	4,2616
3	33334,3	3,8027	0,7865	1,0321	1,0324	40000	3,5	0,5972	0,1235	4,2376	4,3986
4	25001	3,7345	0,7724	1,1003	1,1006	50000	3	0,5238	0,1083	4,3109	4,5049
5	20001	3,6815	0,7615	1,1533	1,1537	60000	2,667	0,4678	0,0967	4,367	4,5918
6	16667,7	3,6381	0,7525	1,1966	1,197	70000	2,429	0,4232	0,0875	4,4116	4,6653
7	14286,7	3,6015	0,7449	1,2333	1,2337	80000	2,25	0,3868	0,08	4,4479	4,7289
8	12501	3,5697	0,7383	1,2651	1,2655	90000	2,111	0,3565	0,0737	4,4763	4,7851
9	11112,1	3,5417	0,7325	1,2931	1,2935	100000	2	0,3307	0,0684	4,5041	4,8354
10	10001	3,5166	0,7273	1,3182	1,3186	200000	1,5	0,1935	0,04	4,6413	5,1662
20	5001	3,3514	0,6932	1,4834	1,4838	300000	1,333	0,1373	0,0284	4,6974	5,3597
30	3334,33	3,2547	0,6732	1,58	1,5805	400000	1,25	0,1065	0,022	4,7282	5,497
40	2501	3,186	0,659	1,6487	1,6493	500000	1,2	0,087	0,018	4,7477	5,6036
50	2001	3,1325	0,6479	1,7023	1,7029	600000	1,167	0,0736	0,0152	4,7612	5,6908
60	1667,67	3,0883	0,6388	1,7465	1,7471	700000	1,143	0,0637	0,0132	4,771	5,7642
70	1429,57	3,0504	0,6309	1,7844	1,7851	800000	1,125	0,0562	0,0116	4,7765	5,828
80	1251	3,017	0,624	1,8178	1,8185	900000	1,111	0,0503	0,0104	4,7845	5,8842
90	1112,11	2,9869	0,6178	1,8478	1,8486	1000000	1,1	0,0455	0,0094	4,7893	5,9345

Tableau 8.6: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE D.
Cas où S = S' = 2,25E-4 (Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'
0,01	10000000	4,417	1	0	0,0001	100	1001	2,8785	0,6517	1,5385	1,5391
0,02	5000002	4,4165	0,9999	0,0005	0,0006	200	501	2,6959	0,6103	1,7211	1,7222
0,03	3333335	4,4139	0,9993	0,0031	0,0032	300	334,333	2,5737	0,5827	1,8433	1,8448
0,04	2500001	4,4087	0,9981	0,0083	0,0084	400	251	2,4786	0,5612	1,9384	1,9404
0,05	2000001	4,4015	0,9965	0,0154	0,0156	500	201	2,4	0,5434	2,017	2,0195
0,06	1666668	4,3931	0,9946	0,0239	0,024	600	167,667	2,3329	0,5282	2,0841	2,0871
0,07	1428572	4,3839	0,9925	0,0331	0,0332	700	143,857	2,2743	0,5149	2,1427	2,1462
0,08	1250001	4,3744	0,9903	0,0426	0,0427	800	126	2,2222	0,5031	2,1948	2,1987
0,09	1111112	4,3646	0,9881	0,0524	0,0525	900	112,111	2,1753	0,4925	2,2416	2,246
0,1	1000001	4,3549	0,9859	0,0621	0,0622	1000	101	2,1328	0,4829	2,2842	2,2891
0,15	666667,6	4,3085	0,9754	0,1085	0,1086	2000	51	1,8409	0,4168	2,5761	2,5857
0,2	500001	4,2677	0,9662	0,1493	0,1494	3000	34,333	1,664	0,3767	2,753	2,7672
0,3	333334,3	4,2008	0,951	0,2162	0,2163	4000	26	1,5374	0,3481	2,8796	2,8984
0,4	250001	4,1479	0,9391	0,2691	0,2693	5000	21	1,4392	0,3258	2,9778	3,0012
0,5	200001	4,1043	0,9292	0,3127	0,3128	6000	17,667	1,3591	0,3077	3,0579	3,0858
0,6	166667,7	4,0674	0,9208	0,3496	0,3497	7000	15,286	1,2918	0,2925	3,1252	3,1576
0,7	142858,2	4,0354	0,9136	0,3816	0,3818	8000	13,5	1,2338	0,2793	3,1832	3,22
0,8	125001	4,0071	0,9072	0,4099	0,41	9000	12,111	1,183	0,2678	3,2339	3,2752
0,9	111112,1	3,9818	0,9015	0,4352	0,4353	10000	11	1,1379	0,2576	3,2791	3,3247
1	100001	3,9589	0,8963	0,4581	0,4582	15000	7,667	0,9681	0,2192	3,4489	3,5158
1,5	66667,66	3,869	0,8759	0,548	0,5481	20000	6	0,8523	0,193	3,5647	3,6519
2	50001	3,8038	0,8612	0,6131	0,6133	30000	4,333	0,6981	0,1581	3,7188	3,8442
3	33334,33	3,7106	0,8401	0,7064	0,7065	40000	3,5	0,5968	0,1351	3,8202	3,981
4	25001	3,6437	0,8249	0,7733	0,7735	50000	3	0,5235	0,1185	3,8935	4,0872
5	20001	3,5915	0,8131	0,8255	0,8257	60000	2,667	0,4675	0,1058	3,9495	4,174
6	16667,67	3,5486	0,8034	0,8683	0,8685	70000	2,429	0,423	0,0958	3,994	4,2475
7	14286,71	3,5124	0,7952	0,9046	0,9048	80000	2,25	0,3867	0,0875	4,0303	4,3111
8	12501	3,4809	0,7881	0,9361	0,9363	90000	2,111	0,3563	0,0807	4,0607	4,3673
9	11112,11	3,4531	0,7818	0,9639	0,9641	100000	2	0,3306	0,0748	4,0864	4,4175
10	10001	3,4281	0,7761	0,9889	0,989	200000	1,5	0,1935	0,0438	4,2235	4,7482
20	5001	3,2638	0,7389	1,1532	1,1534	300000	1,333	0,1373	0,0311	4,2797	4,9417
30	3334,333	3,1674	0,7171	1,2496	1,2499	400000	1,25	0,1065	0,0241	4,3105	5,0791
40	2501	3,0989	0,7016	1,3181	1,3184	500000	1,2	0,087	0,0197	4,33	5,1856
50	2001	3,0458	0,6896	1,3712	1,3716	600000	1,167	0,0736	0,0167	4,3434	5,2726
60	1667,667	3,0022	0,6797	1,4148	1,4151	700000	1,143	0,0637	0,0144	4,3533	5,3462
70	1429,571	2,9653	0,6713	1,4517	1,4522	800000	1,125	0,0562	0,0127	4,3608	5,41
80	1251	2,9331	0,664	1,4839	1,4844	900000	1,111	0,0503	0,0114	4,3667	5,4662
90	1112,111	2,9044	0,6576	1,5126	1,5131	1000000	1,1	0,0455	0,0103	4,3715	5,5165

Tableau 8.7: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE D.
Cas où S = S' = 2,25E-4 (Piézomètre P3, ß = 40)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'
0,01	10000000	3,737	1	0	0	100	1001	2,6371	0,7057	1,0998	1,099
0,02	5000002	3,737	1	0	0	200	501	2,4723	0,6616	1,2647	1,2643
0,03	3333335	3,737	1	0	0	300	334,333	2,3736	0,6352	1,3634	1,3635
0,04	2500001	3,737	1	0	0	400	251	2,3003	0,6156	1,4367	1,4373
0,05	2000001	3,737	1	0	0	500	201	2,2404	0,5995	1,4965	1,4977
0,06	1666668	3,737	1	0	0	600	167,667	2,189	0,5858	1,548	1,5496
0,07	1428572	3,737	1	0	0	700	143,857	2,1435	0,5736	1,5935	1,5955
0,08	1250001	3,7369	1	0	0	800	126	2,1026	0,5626	1,6344	1,637
0,09	1111112	3,7369	1	0,0001	0	900	112,111	2,0652	0,5526	1,6718	1,6748
0,1	1000001	3,7368	1	0,0001	0	1000	101	2,0308	0,5434	1,7062	1,7097
0,15	666667,6	3,7357	0,9997	0,0012	0	2000	51	1,7829	0,4771	1,9541	1,9623
0,2	500001	3,733	0,9989	0,004	0,0027	3000	34,333	1,6238	0,4345	2,1131	2,126
0,3	333334,3	3,7231	0,9963	0,0139	0,0126	4000	26	1,5068	0,4032	2,2302	2,2476
0,4	250001	3,7095	0,9926	0,0275	0,0262	5000	21	1,4146	0,3785	2,3224	2,3444
0,5	200001	3,6943	0,9886	0,0426	0,0414	6000	17,667	1,3386	0,3582	2,3984	2,4249
0,6	166667,7	3,6787	0,9844	0,0582	0,057	7000	15,286	1,2743	0,341	2,4627	2,4938
0,7	142858,2	3,6633	0,9803	0,0737	0,0724	8000	13,5	1,2185	0,3261	2,5184	2,5539
0,8	125001	3,6483	0,9763	0,0887	0,0874	9000	12,111	1,1695	0,313	2,5674	2,6073
0,9	111112,1	3,6338	0,9724	0,1032	0,1019	10000	11	1,1258	0,3013	2,6111	2,6554
1	100001	3,6199	0,9687	0,1171	0,1158	15000	7,667	0,9603	0,257	2,7767	2,8422
1,5	66667,66	3,5588	0,9523	0,1781	0,1769	20000	6	0,8467	0,2266	2,8903	2,9761
2	50001	3,5092	0,9391	0,2277	0,2265	30000	4,333	0,6947	0,1859	3,0423	3,1663
3	33334,33	3,4324	0,9185	0,3046	0,3033	40000	3,5	0,5943	0,159	3,1426	3,302
4	25001	3,374	0,9029	0,3629	0,3617	50000	3	0,5217	0,1396	3,2153	3,4076
5	20001	3,3271	0,8903	0,4099	0,4086	60000	2,667	0,4661	0,1247	3,2709	3,494
6	16667,67	3,2878	0,8798	0,4491	0,4479	70000	2,429	0,4219	0,1129	3,3151	3,5872
7	14286,71	3,2541	0,8708	0,4829	0,4817	80000	2,25	0,3857	0,1032	3,3513	3,6307
8	12501	3,2245	0,8629	0,5124	0,5112	90000	2,111	0,3555	0,0951	3,3815	3,6867
9	11112,11	3,1982	0,8558	0,5388	0,5375	100000	2	0,3299	0,0883	3,4071	3,7368
10	10001	3,1745	0,8495	0,5625	0,5612	200000	1,5	0,1932	0,0517	3,5437	4,067
20	5001	3,0157	0,807	0,7213	0,7201	300000	1,333	0,1372	0,0367	3,5998	4,2604
30	3334,333	2,9211	0,7817	0,8158	0,8147	400000	1,25	0,1064	0,0285	3,6305	4,3977
40	2501	2,8536	0,7636	0,8834	0,8823	500000	1,2	0,087	0,0233	3,65	4,5042
50	2001	2,801	0,7495	0,9359	0,9349	600000	1,167	0,0736	0,0197	3,6634	4,5913
60	1667,667	2,758	0,738	0,979	0,978	700000	1,143	0,0637	0,0171	3,6732	4,6648
70	1429,571	2,7216	0,7283	1,0154	1,0145	800000	1,125	0,0562	0,015	3,6808	4,7286
80	1251	2,69	0,7198	1,047	1,0461	900000	1,111	0,0503	0,0135	3,6867	4,7848
90	1112,111	2,6621	0,7124	1,0749	1,074	1000000	1,1	0,0455	0,0122	3,6915	4,8351

Tableau 8.8: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'(m)
0,01	5001	1,6599	0,975	0,0426	0,0425
0,02	2501	1,5855	0,9313	0,117	0,1169
0,03	1667,667	1,5245	0,8955	0,178	0,178
0,04	1251	1,475	0,8663	0,2275	0,2276
0,05	1001	1,4336	0,8421	0,2689	0,269
0,06	834,333	1,3982	0,8213	0,3043	0,3044
0,07	715,286	1,3674	0,8031	0,3352	0,3353
0,08	626	1,34	0,7871	0,3626	0,3628
0,09	556,556	1,3154	0,7726	0,3871	0,3874
0,1	501	1,2931	0,7595	0,4094	0,4097
0,15	334,333	1,2051	0,7078	0,4974	0,498
0,2	251	1,141	0,6702	0,5615	0,5623
0,3	167,667	1,0491	0,6162	0,6535	0,6548
0,4	126	0,9831	0,5774	0,7195	0,7212
0,5	101	0,9316	0,5472	0,7709	0,7732
0,6	84,333	0,8894	0,5224	0,8131	0,8158
0,7	72,429	0,8537	0,5014	0,8488	0,852
0,8	63,5	0,8228	0,4833	0,8797	0,8834
0,9	56,556	0,7955	0,4673	0,907	0,9111
1	51	0,7712	0,4529	0,9314	0,9359
1,5	34,333	0,6776	0,398	1,0249	1,0318
2	26	0,6117	0,3593	1,0908	1,1
3	17,667	0,52	0,3054	1,1826	1,1963
4	13,5	0,456	0,2679	1,2465	1,2647
5	11	0,4073	0,2393	1,2952	1,3178
6	9,333	0,3683	0,2163	1,3343	1,3611
7	8,143	0,3359	0,1973	1,3667	1,3978
8	7,25	0,3083	0,1811	1,3943	1,4296
9	6,556	0,2843	0,167	1,4182	1,4576
10	6	0,2633	0,1547	1,4392	1,4826
20	3,5	0,1358	0,0798	1,5668	1,6469
30	2,667	0,0714	0,0419	1,6311	1,7432
40	2,25	0,0301	0,0177	1,6724	1,8126
50	2	0	0	1,7025	1,8679

Tableau 8.9: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B
Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60)

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'(m)
0,01	5001	1,371	0,9997	0,0004	0,0005
0,02	2501	1,3633	0,994	0,0082	0,0083
0,03	1667,667	1,3477	0,9827	0,0237	0,0238
0,04	1251	1,329	0,969	0,0424	0,0426
0,05	1001	1,3096	0,9549	0,0619	0,0621
0,06	834,333	1,2905	0,941	0,081	0,0812
0,07	715,286	1,2722	0,9276	0,0993	0,0996
0,08	626	1,2547	0,9149	0,1167	0,1171
0,09	556,556	1,2383	0,9029	0,1332	0,1336
0,1	501	1,2227	0,8915	0,1488	0,1492
0,15	334,333	1,156	0,8429	0,2155	0,2162
0,2	251	1,1033	0,8044	0,2682	0,2691
0,3	167,667	1,0233	0,7461	0,3482	0,3496
0,4	126	0,9635	0,7025	0,408	0,4099
0,5	101	0,9158	0,6677	0,4557	0,458
0,6	84,333	0,8762	0,6388	0,4953	0,4981
0,7	72,429	0,8423	0,6142	0,5292	0,5324
0,8	63,5	0,8127	0,5926	0,5587	0,5625
0,9	56,556	0,7866	0,5735	0,5849	0,5891
1	51	0,763	0,5564	0,6084	0,6131
1,5	34,333	0,6721	0,49	0,6994	0,7064
2	26	0,6075	0,4429	0,764	0,7733
3	17,667	0,517	0,377	0,8545	0,8633
4	13,5	0,4537	0,3308	0,9178	0,9361
5	11	0,4053	0,2955	0,9661	0,9889
6	9,333	0,3665	0,2672	1,005	1,032
7	8,143	0,3341	0,2436	1,0373	1,0686
8	7,25	0,3066	0,2236	1,0648	1,1002
9	6,556	0,2827	0,2062	1,0887	1,1282
10	6	0,2617	0,1908	1,1097	1,1532
20	3,5	0,1338	0,0976	1,2377	1,318
30	2,667	0,0693	0,0505	1,3022	1,4144
40	2,25	0,0287	0,0209	1,3428	1,483
50	2	0	0	1,3715	1,5369

Tableau 8.10: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable (essai synthétique). Remontée en ZONE B. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40).

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp1-s'(m)
0,01	5001	0,9362	1,0001	0	0
0,02	2501	0,9363	1,0001	0	0
0,03	1667,667	0,9363	1,0002	0	0
0,04	1251	0,9363	1,0002	0	0
0,05	1001	0,9363	1,0001	0	0
0,06	834,333	0,936	0,9999	0,0001	0
0,07	715,286	0,9356	0,9994	0,0006	0
0,08	626	0,9349	0,9987	0,0013	0
0,09	556,556	0,9339	0,9976	0,0022	0,0004
0,1	501	0,9327	0,9963	0,0035	0,0017
0,15	334,333	0,923	0,9859	0,0132	0,0117
0,2	251	0,9096	0,9716	0,0265	0,0253
0,3	167,667	0,8794	0,9393	0,0568	0,056
0,4	126	0,8493	0,9073	0,0868	0,0865
0,5	101	0,8214	0,8774	0,1147	0,1149
0,6	84,333	0,7958	0,8501	0,1403	0,1409
0,7	72,429	0,7725	0,8252	0,1637	0,1648
0,8	63,5	0,7511	0,8023	0,1851	0,1867
0,9	56,556	0,7313	0,7812	0,2048	0,2069
1	51	0,7131	0,7617	0,2231	0,2256
1,5	34,333	0,6386	0,6821	0,2976	0,3024
2	26	0,5825	0,6222	0,3537	0,3608
3	17,667	0,5007	0,5349	0,4354	0,4471
4	13,5	0,4419	0,472	0,4943	0,5104
5	11	0,3962	0,4232	0,54	0,5605
6	9,333	0,3591	0,3836	0,5771	0,6019
7	8,143	0,328	0,3504	0,6081	0,6372
8	7,25	0,3014	0,322	0,6347	0,6679
9	6,556	0,2783	0,2973	0,6579	0,6952
10	6	0,2578	0,2754	0,6783	0,7196
20	3,5	0,1322	0,1412	0,804	0,8821
30	2,667	0,0681	0,0728	0,868	0,978
40	2,25	0,0279	0,0298	0,9082	1,0463
50	2	0	0	0,9362	1,0994

Tableau 8.11: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable
essai synthétique. Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P1, ß = 100).

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'
0,01	10000000	4,7921	0,9912	0,0426	0,043	60	1667,667	2,9102	0,6019	1,9246	1,9252
0,02	5000002	4,7177	0,9758	0,1171	0,1174	70	1429,571	2,8669	0,593	1,9678	1,9685
0,03	3333335	4,6568	0,9632	0,1781	0,1785	80	1251	2,828	0,5849	2,0068	2,0075
0,04	2500001	4,607	0,9529	0,2277	0,2281	90	1112,111	2,7925	0,5776	2,0423	2,0431
0,05	2000001	4,5656	0,9443	0,2691	0,2695	100	1001	2,7597	0,5708	2,0751	2,0759
0,06	1666668	4,5302	0,937	0,3046	0,3049	200	501	2,5202	0,5213	2,3145	2,3158
0,07	1428572	4,4993	0,9306	0,3355	0,3359	300	334,333	2,3629	0,4887	2,4719	2,4737
0,08	1250001	4,4718	0,9249	0,3629	0,3633	400	251	2,2451	0,4644	2,5897	2,5919
0,09	1111112	4,4472	0,9198	0,3876	0,3879	500	201	2,1509	0,4449	2,6839	2,6866
0,1	1000001	4,4249	0,9152	0,4099	0,4103	600	167,667	2,0724	0,4286	2,7624	2,7656
0,15	666667,6	4,3366	0,897	0,4982	0,4985	700	143,857	2,0051	0,4147	2,8296	2,8333
0,2	500001	4,2723	0,8837	0,5625	0,5628	800	126	1,9463	0,4026	2,8885	2,8926
0,3	333334,3	4,1798	0,8645	0,6549	0,6553	900	112,111	1,894	0,3918	2,9407	2,9454
0,4	250001	4,1134	0,8508	0,7214	0,7218	1000	101	1,847	0,382	2,9878	2,9928
0,5	200001	4,0614	0,84	0,7733	0,7737	2000	51	1,5336	0,3172	3,3011	3,3109
0,6	166667,7	4,0188	0,8312	0,816	0,8163	3000	34,333	1,3491	0,279	3,4857	3,5002
0,7	142858,2	3,9826	0,8237	0,8522	0,8525	4000	26	1,2185	0,252	3,6162	3,6353
0,8	125001	3,9512	0,8172	0,8836	0,8839	5000	21	1,1179	0,2312	3,7169	3,7405
0,9	111112,1	3,9235	0,8115	0,9113	0,9117	6000	17,667	1,0362	0,2143	3,7985	3,8267
1	100001	3,8986	0,8064	0,9362	0,9365	7000	15,286	0,9677	0,2002	3,867	3,8997
1,5	66667,66	3,8027	0,7865	1,0321	1,0324	8000	13,5	0,9089	0,188	3,9259	3,963
2	50001	3,7345	0,7724	1,1003	1,1006	9000	12,111	0,8574	0,1773	3,9773	4,0188
3	33334,33	3,6381	0,7525	1,1966	1,197	10000	11	0,8118	0,1679	4,023	4,0689
4	25001	3,5697	0,7383	1,2651	1,2655	15000	7,667	0,6403	0,1324	4,1945	4,2616
5	20001	3,5165	0,7273	1,3182	1,3186	20000	6	0,5237	0,1083	4,3111	4,3985
6	16667,67	3,4731	0,7184	1,3617	1,362	30000	4,333	0,3687	0,0763	4,4661	4,5917
7	14286,71	3,4364	0,7108	1,3984	1,3988	40000	3,5	0,2669	0,0552	4,5679	4,7289
8	12501	3,4046	0,7042	1,4302	1,4306	50000	3	0,1934	0,04	4,6413	4,8353
9	11112,11	3,3765	0,6984	1,4583	1,4587	60000	2,667	0,1372	0,0284	4,6975	4,9223
10	10001	3,3514	0,6932	1,4834	1,4838	70000	2,429	0,0926	0,0192	4,7421	4,9958
20	5001	3,1659	0,659	1,6488	1,6493	80000	2,25	0,0562	0,0116	4,7786	5,0596
30	3334,333	3,0881	0,6387	1,7466	1,7471	90000	2,111	0,0258	0,0053	4,809	5,1158
40	2501	3,0168	0,624	1,818	1,8185	100000	2	0	0	4,8348	5,1661
50	2001	2,9592	0,6121	1,8755	1,8761						

Tableau 8.12: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable
essai synthétique. Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P2, ß = 60).

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'
0,01	10000000	4,4165	0,9999	0,0005	0,0006	60	1667,667	2,8325	0,6413	1,5845	1,5849
0,02	5000002	4,4087	0,9981	0,0083	0,0084	70	1429,571	2,7928	0,6323	1,6242	1,6247
0,03	3333335	4,3931	0,9946	0,0239	0,024	80	1251	2,7573	0,6242	1,6597	1,6602
0,04	2500001	4,3744	0,9903	0,0426	0,0427	90	1112,111	2,7251	0,617	1,6919	1,6925
0,05	2000001	4,3549	0,9859	0,0621	0,0622	100	1001	2,6954	0,6102	1,7216	1,7222
0,06	1666668	4,3357	0,9816	0,0813	0,0814	200	501	2,4777	0,5609	1,9393	1,9404
0,07	1428572	4,3174	0,9774	0,0996	0,0997	300	334,333	2,3315	0,5278	2,0855	2,0871
0,08	1250001	4,2999	0,9735	0,1171	0,1172	400	251	2,2203	0,5027	2,1967	2,1987
0,09	1111112	4,2834	0,9697	0,1336	0,1337	500	201	2,1304	0,4823	2,2866	2,2891
0,1	1000001	4,2677	0,9662	0,1493	0,1494	600	167,667	2,055	0,4653	2,362	2,365
0,15	666667,6	4,2008	0,951	0,2162	0,2163	700	143,857	1,99	0,4505	2,427	2,4304
0,2	500001	4,1479	0,9391	0,2691	0,2693	800	126	1,933	0,4376	2,484	2,488
0,3	333334,3	4,0674	0,9208	0,3496	0,3497	900	112,111	1,8821	0,4261	2,5349	2,5393
0,4	250001	4,0071	0,9072	0,4099	0,41	1000	101	1,8362	0,4157	2,5808	2,5857
0,5	200001	3,9589	0,8963	0,4581	0,4582	2000	51	1,5282	0,346	2,8888	2,8984
0,6	166667,7	3,9188	0,8872	0,4982	0,4983	3000	34,333	1,3454	0,3046	3,0715	3,0858
0,7	142858,2	3,8845	0,8794	0,5325	0,5326	4000	26	1,2158	0,2753	3,2012	3,22
0,8	125001	3,8545	0,8727	0,5625	0,5626	5000	21	1,1158	0,2526	3,3012	3,3246
0,9	111112,1	3,8278	0,8666	0,5892	0,5893	6000	17,667	1,0345	0,2342	3,3825	3,4104
1	100001	3,8038	0,8612	0,6132	0,6133	7000	15,286	0,9663	0,2188	3,4507	3,4831
1,5	66667,66	3,7106	0,8401	0,7064	0,7065	8000	13,5	0,9076	0,2055	3,5093	3,5462
2	50001	3,6437	0,8249	0,7733	0,7735	9000	12,111	0,8563	0,1939	3,5607	3,6019
3	33334,33	3,5486	0,8034	0,8684	0,8685	10000	11	0,8108	0,1836	3,6062	3,6518
4	25001	3,4808	0,7881	0,9361	0,9363	15000	7,667	0,6397	0,1448	3,7773	3,8441
5	20001	3,4281	0,7761	0,9889	0,989	20000	6	0,5233	0,1185	3,8937	3,9809
6	16667,67	3,385	0,7663	1,032	1,0322	30000	4,333	0,3685	0,0834	4,0485	4,1739
7	14286,71	3,3484	0,7581	1,0686	1,0687	40000	3,5	0,2668	0,0604	4,1502	4,311
8	12501	3,3167	0,7509	1,1003	1,1004	50000	3	0,1933	0,0438	4,2237	4,4174
9	11112,11	3,2888	0,7446	1,1282	1,1284	60000	2,667	0,1372	0,0311	4,2798	4,5043
10	10001	3,2637	0,7389	1,1533	1,1534	70000	2,429	0,0926	0,021	4,3244	4,5779
20	5001	3,0988	0,7016	1,3182	1,3184	80000	2,25	0,0562	0,0127	4,3608	4,6416
30	3334,333	3,0021	0,6797	1,4149	1,4151	90000	2,111	0,0258	0,0058	4,3912	4,6978
40	2501	2,9329	0,664	1,4841	1,4844	100000	2	0	0	4,417	4,7481
50	2001	2,8783	0,6516	1,5387	1,5391						

Tableau 8.13: essai de remontée dans un aquifère limité par une frontière imperméable
essai synthétique. Remontée en ZONE D. Cas où S = 2S' = 2,25E-4. (Piézomètre P3, ß = 40).

t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'	t'(s)	t/t'	s'(m)	s'/s'ini	s'ini-s'	sp2-s'
0,01	10000000	3,737	1	0	0	60	1667,667	2,5936	0,694	1,1433	1,1424
0,02	5000002	3,737	1	0	0	70	1429,571	2,557	0,6842	1,18	1,179
0,03	3333335	3,737	1	0	0	80	1251	2,5252	0,6757	1,2118	1,2109
0,04	2500001	3,7369	1	0	0	90	1112,111	2,4971	0,6682	1,2399	1,239
0,05	2000001	3,7368	1	0,0001	0	100	1001	2,4716	0,6615	1,2651	1,2643
0,06	1666668	3,7366	0,9999	0,0004	0	200	501	2,2994	0,6153	1,4376	1,4373
0,07	1428572	3,7361	0,9998	0,0009	0	300	334,333	2,1876	0,5854	1,5494	1,5496
0,08	1250001	3,7353	0,9996	0,0016	0,0004	400	251	2,1007	0,5621	1,6363	1,6369
0,09	1111112	3,7343	0,9993	0,0027	0,0014	500	201	2,0284	0,5428	1,7085	1,7097
0,1	1000001	3,733	0,9989	0,004	0,0027	600	167,667	1,9663	0,5262	1,7707	1,7723
0,15	666667,6	3,7231	0,9963	0,0139	0,0126	700	143,857	1,9116	0,5115	1,8254	1,8275
0,2	500001	3,7095	0,9926	0,0275	0,0262	800	126	1,8627	0,4985	1,8743	1,8768
0,3	333334,3	3,6787	0,9844	0,0582	0,057	900	112,111	1,8185	0,4866	1,9184	1,9215
0,4	250001	3,6483	0,9763	0,0887	0,0874	1000	101	1,7782	0,4758	1,9588	1,9623
0,5	200001	3,6199	0,9687	0,1171	0,1158	2000	51	1,4976	0,4007	2,2394	2,2476
0,6	166667,7	3,5938	0,9617	0,1431	0,1419	3000	34,333	1,325	0,3546	2,412	2,4249
0,7	142858,2	3,57	0,9553	0,167	0,1657	4000	26	1,2006	0,3213	2,5364	2,5536
0,8	125001	3,5481	0,9495	0,1889	0,1876	5000	21	1,1037	0,2954	2,6333	2,6553
0,9	111112,1	3,5279	0,9441	0,209	0,2078	6000	17,667	1,0246	0,2742	2,7124	2,7389
1	100001	3,5092	0,9391	0,2277	0,2265	7000	15,286	0,9579	0,2563	2,779	2,8101
1,5	66667,66	3,4324	0,9185	0,3046	0,3033	8000	13,5	0,9005	0,241	2,8365	2,872
2	50001	3,374	0,9029	0,3629	0,3617	9000	12,111	0,8501	0,2275	2,8869	2,9268
3	33334,33	3,2878	0,8798	0,4492	0,4479	10000	11	0,8053	0,2155	2,9317	2,9759
4	25001	3,2245	0,8629	0,5125	0,5112	15000	7,667	0,6363	0,1703	3,1008	3,1661
5	20001	3,1745	0,8495	0,5625	0,5612	20000	6	0,521	0,1394	3,216	3,3018
6	16667,67	3,1331	0,8384	0,6038	0,6026	30000	4,333	0,3673	0,0983	3,3697	3,4937
7	14286,71	3,0979	0,829	0,639	0,6378	40000	3,5	0,2661	0,0712	3,4709	3,6303
8	12501	3,0672	0,8208	0,6697	0,6685	50000	3	0,1929	0,0516	3,5441	3,7364
9	11112,11	3,04	0,8135	0,6969	0,6957	60000	2,667	0,1369	0,0366	3,6001	3,8232
10	10001	3,0156	0,807	0,7214	0,7201	70000	2,429	0,0924	0,0247	3,6445	3,8966
20	5001	2,8535	0,7636	0,8835	0,8823	80000	2,25	0,0581	0,015	3,6809	3,9603
30	3334,333	2,7579	0,738	0,9791	0,978	90000	2,111	0,0258	0,0069	3,7112	4,0164
40	2501	2,6898	0,7198	1,0472	1,0461	100000	2	0	0	3,737	4,0667
50	2001	2,6369	0,7056	1,1001	1,099						

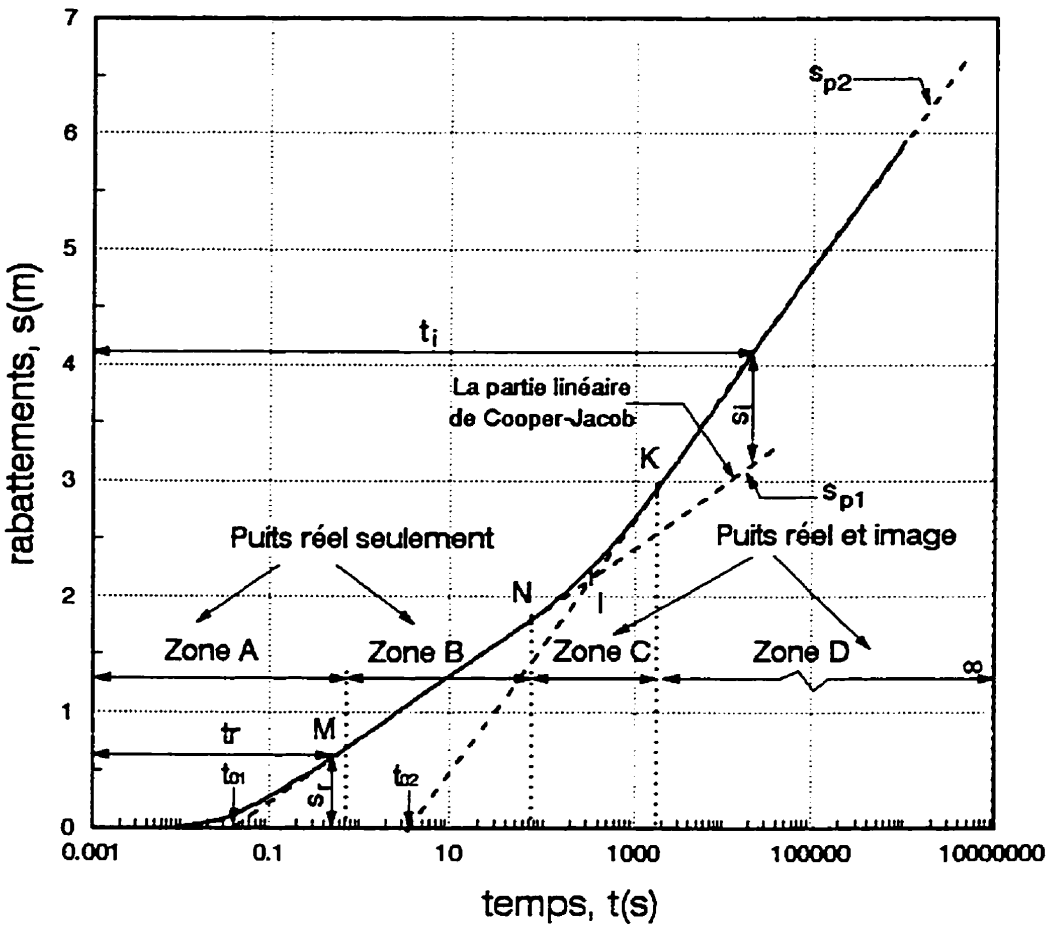


Figure 8.1: Analyse de la courbe de rabattements.
Définition des zones A à D.

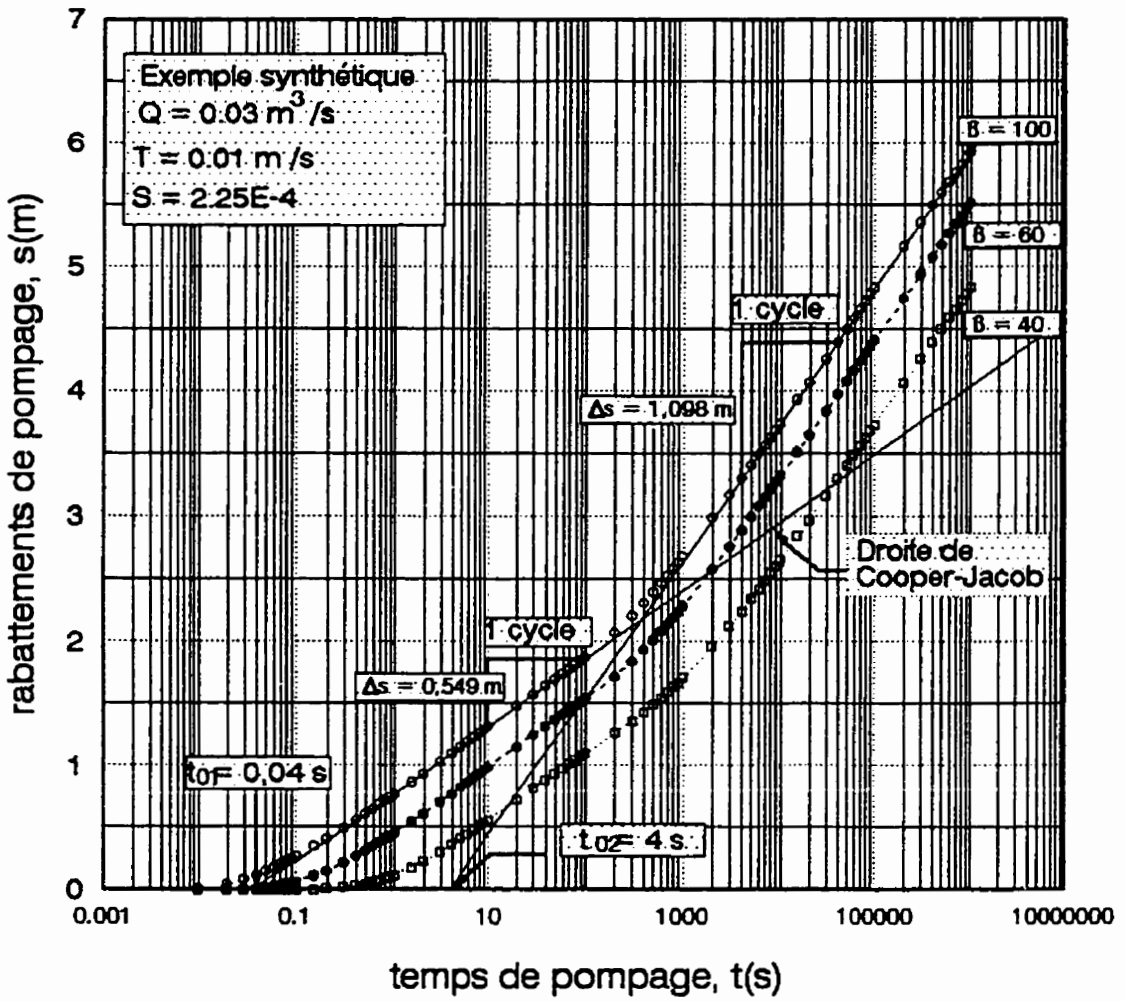


Figure 8.2: Courbes de rabattements en fonction du temps, s(r, t) vs logt.

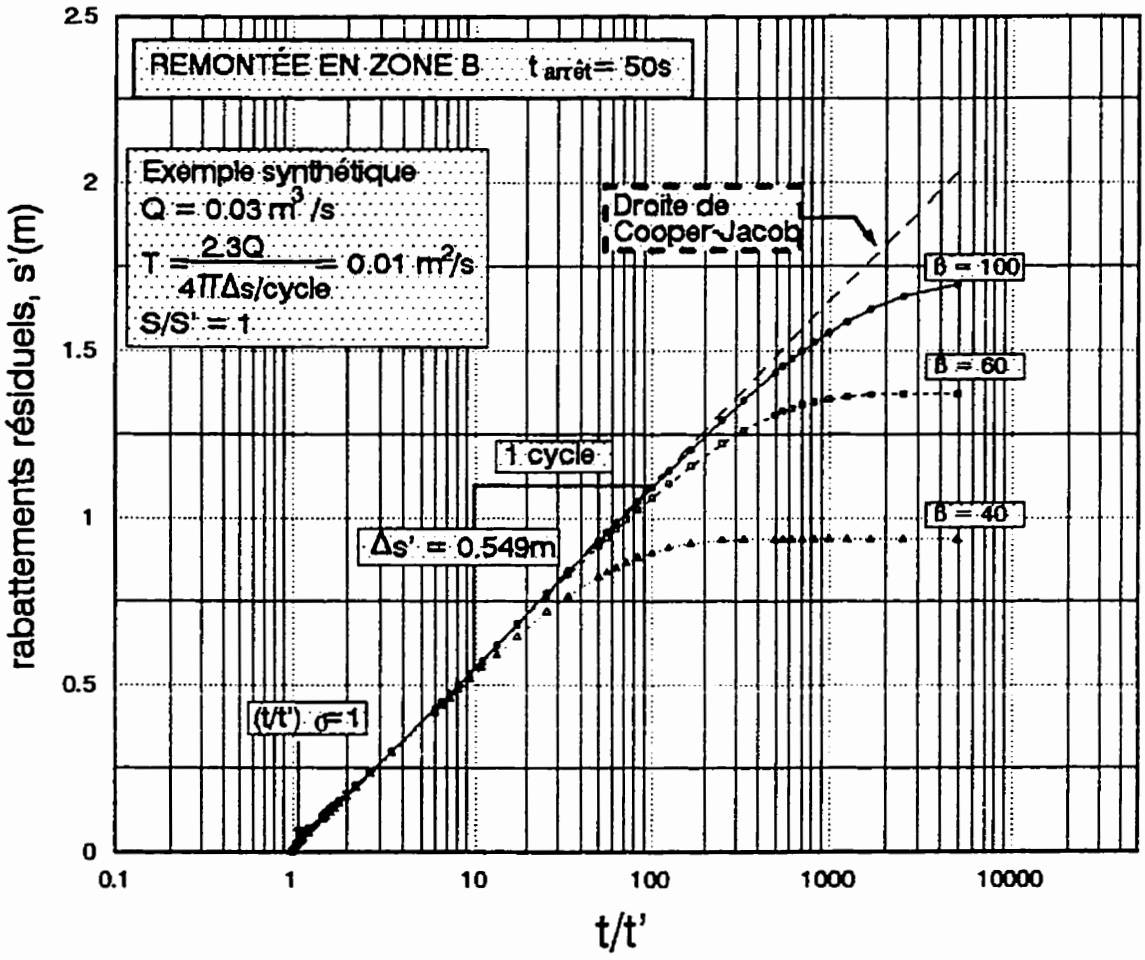


Figure 8.3: Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'
Cas où S = S'.

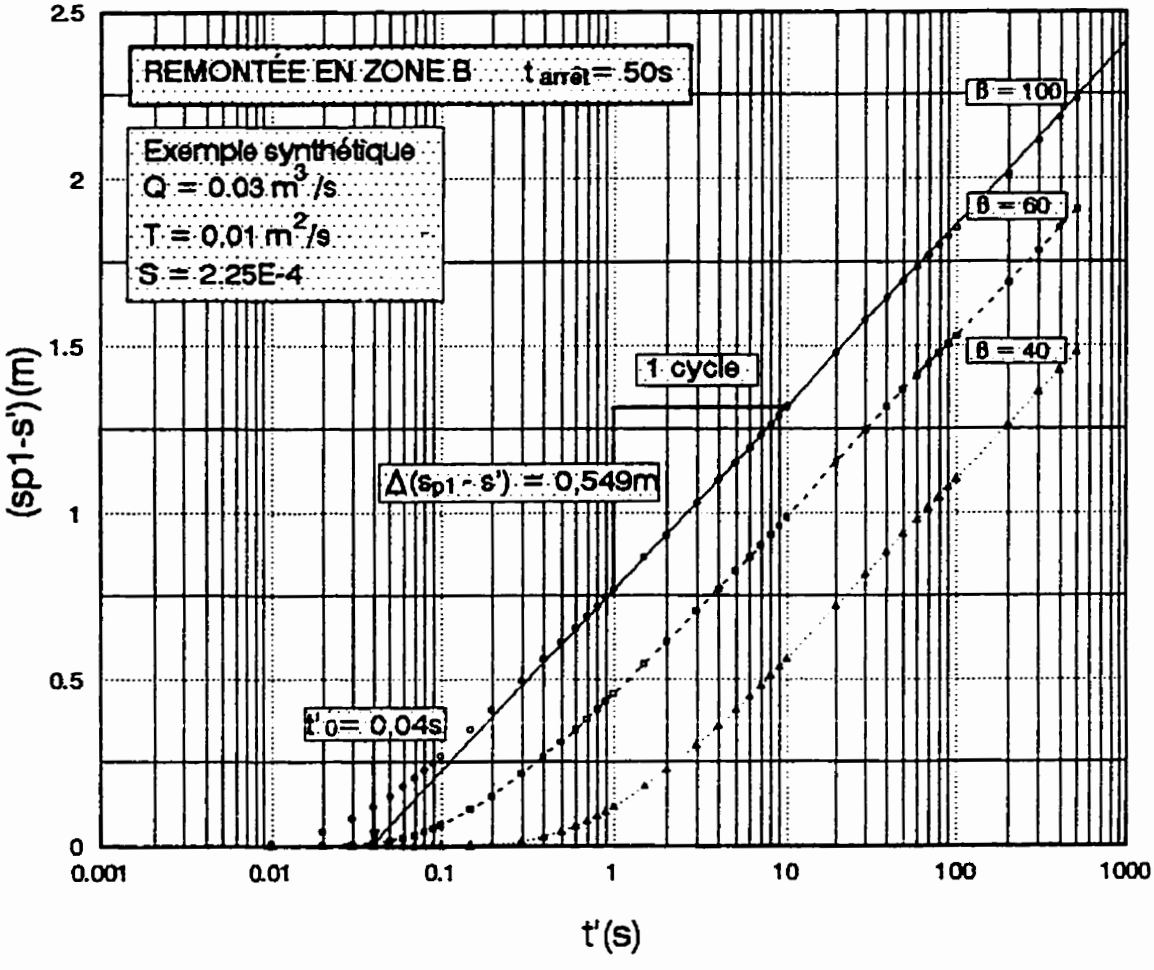


Figure 8.4: Remontée en ZONE B, (sp1 - s') vs logt'
Cas où S = S'

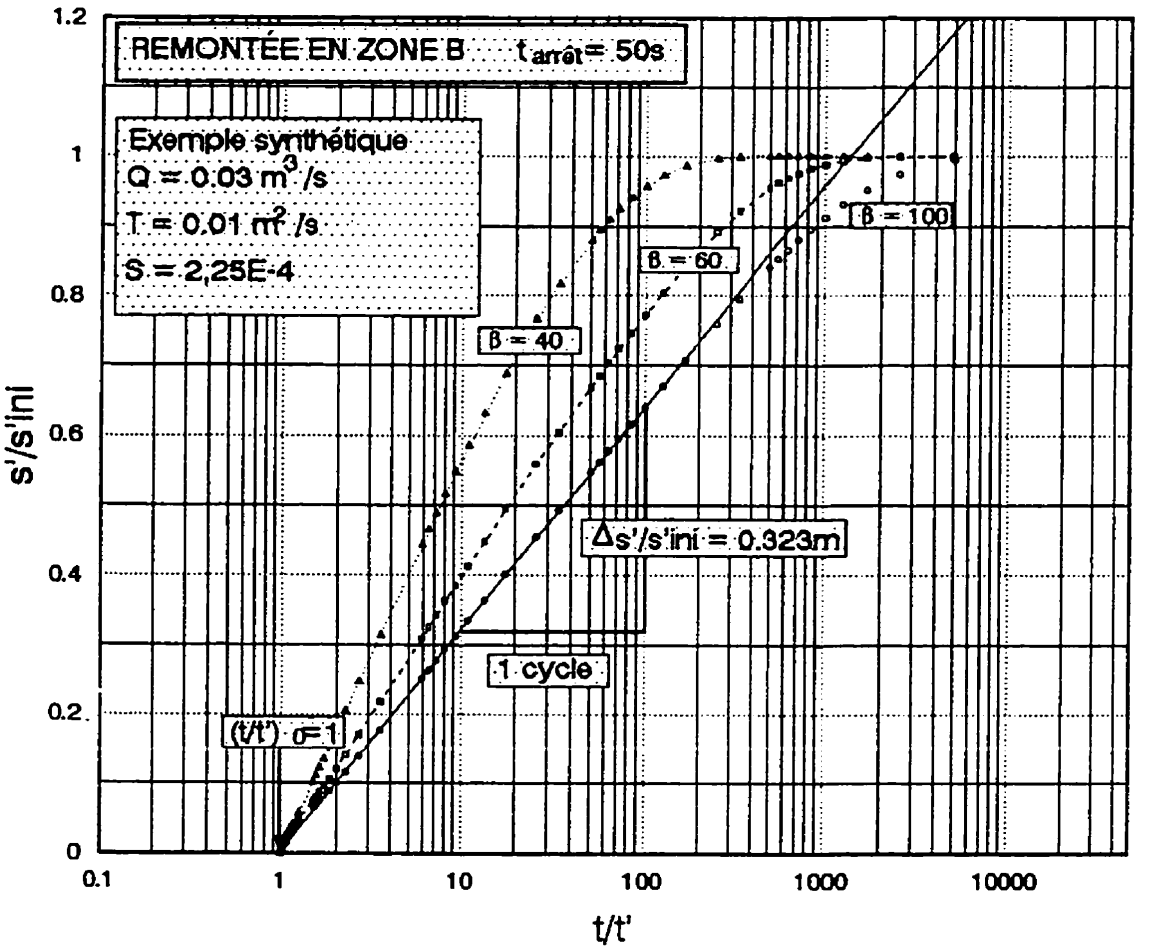


Figure 8.5: Remontée en ZONE B, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = S'.

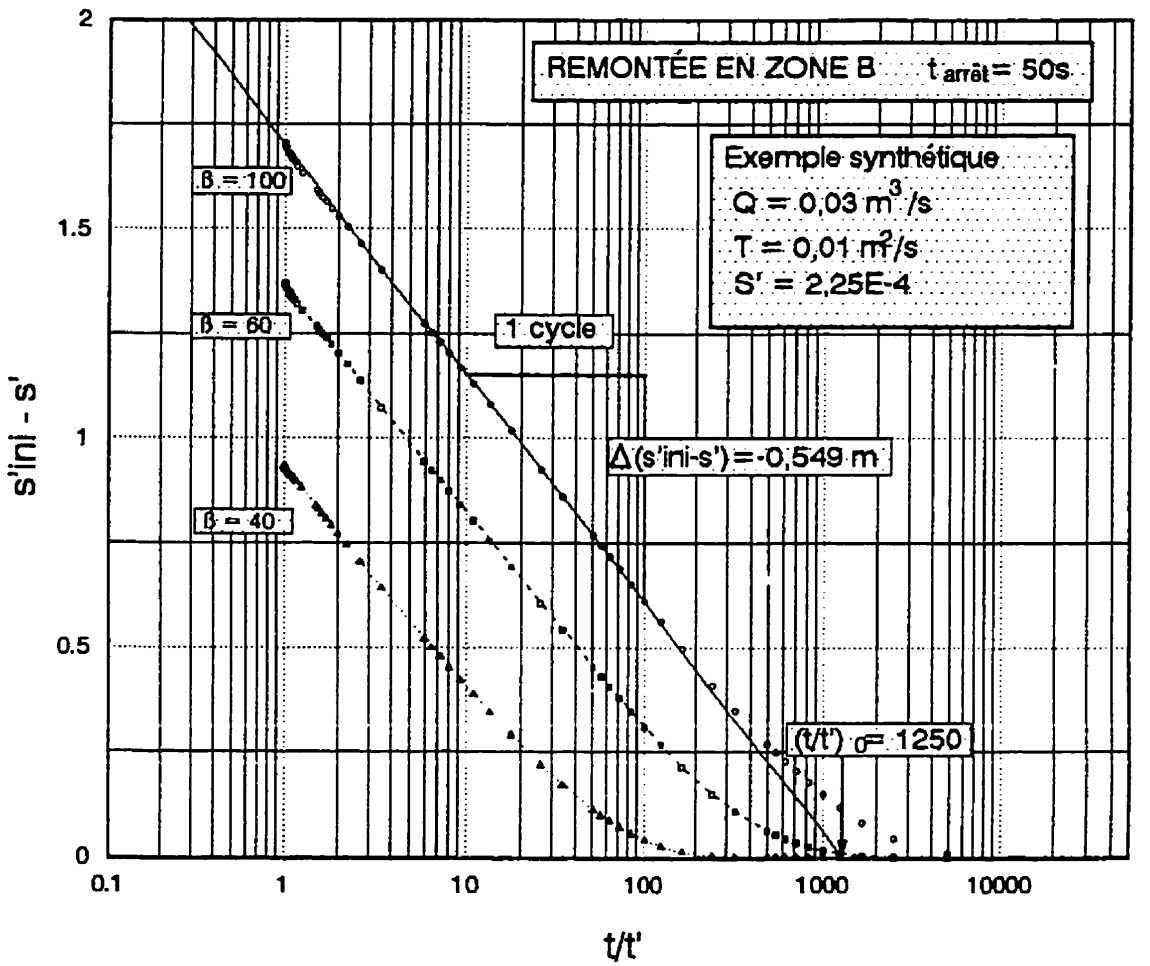


Figure 8.6: Remontée en ZONE B, (s'ini - s') vs logt/t'
Cas où S = S'.

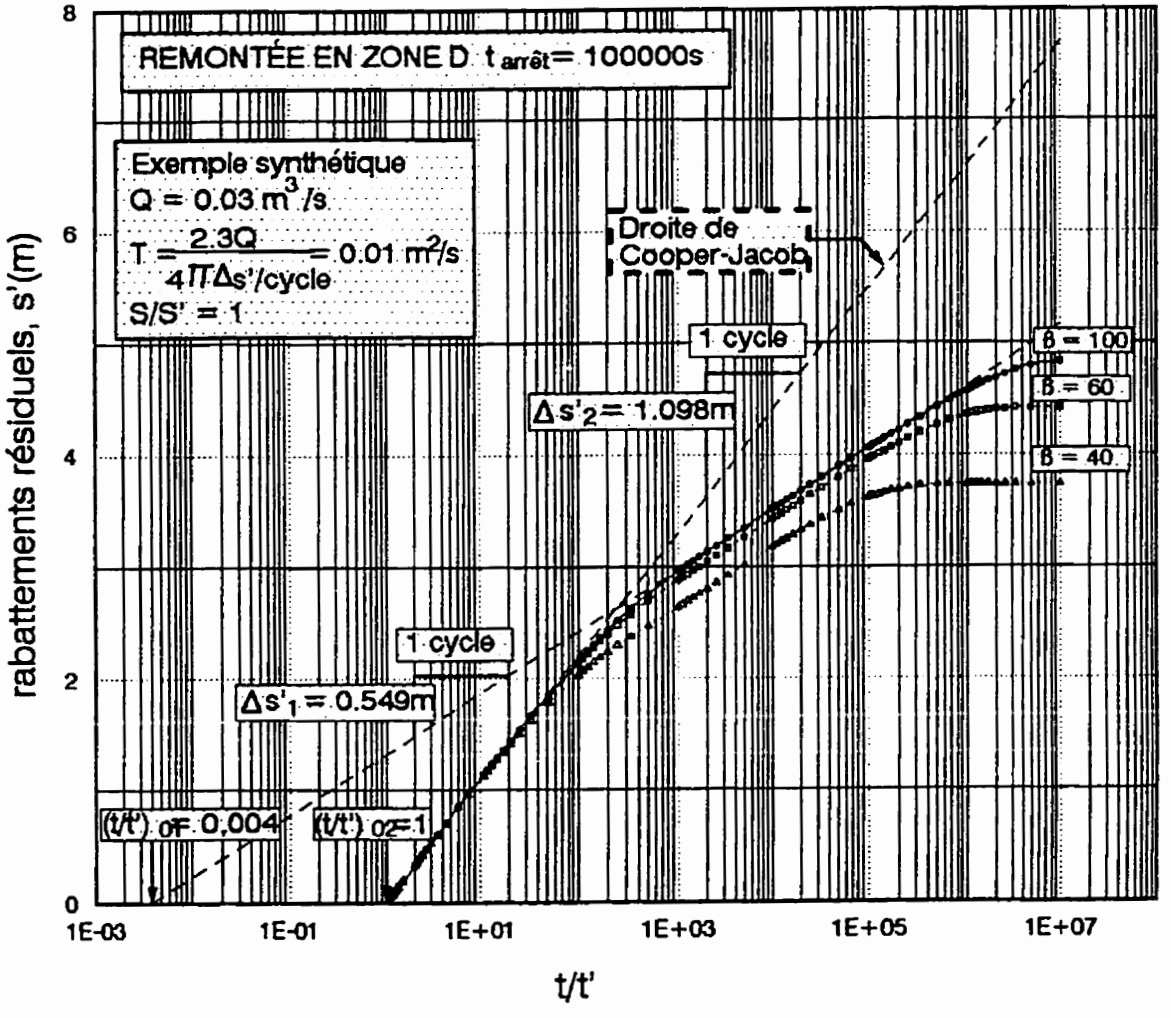


Figure 8.7: Remontée en ZONE D, s' vs logt/t'
Cas où S = S'.

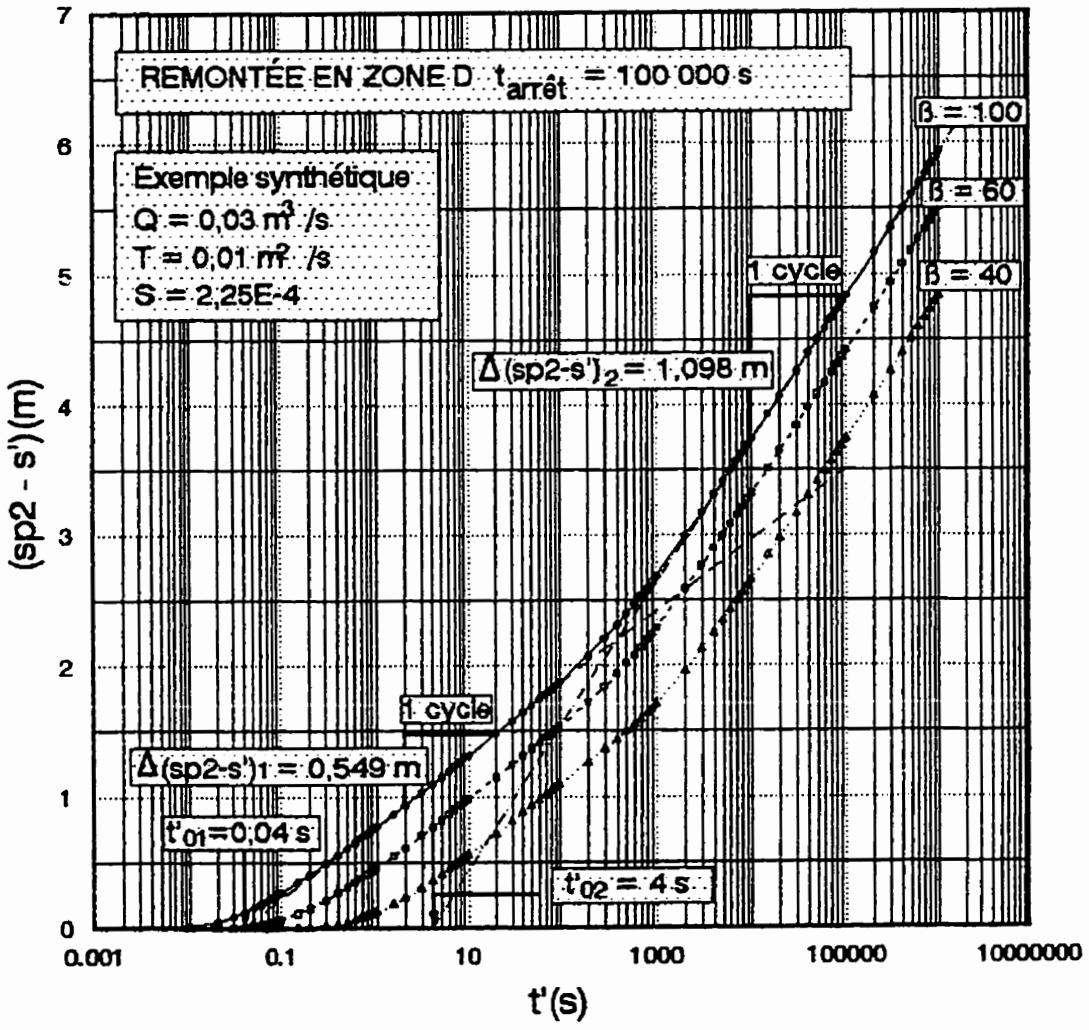


Figure 8.8: Remontée en ZONE D, (sp2 - s') vs logt'
Cas où S = S'.

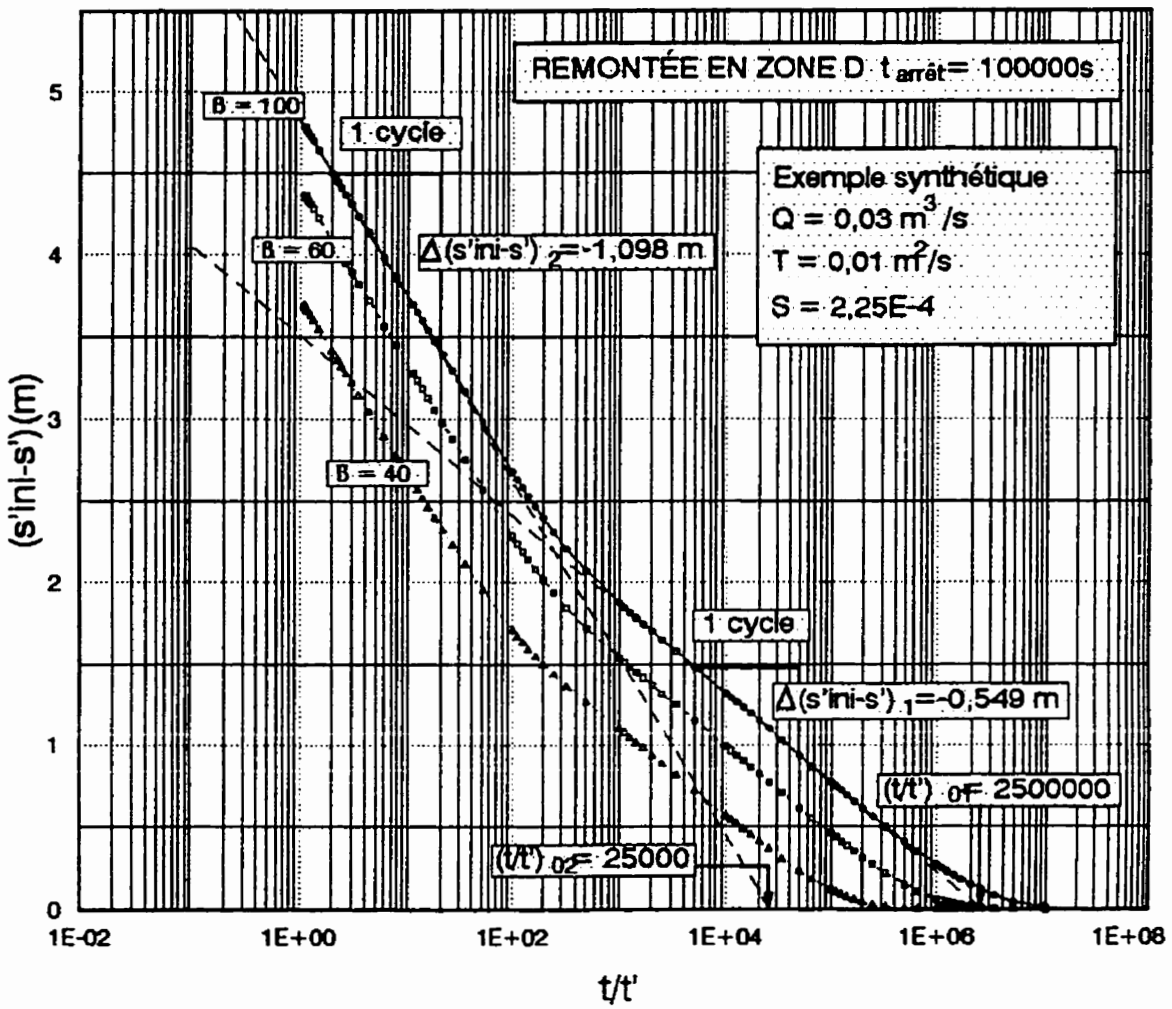


Figure 8.9: Remontée en ZONE D, (s'ini - s') vs logt/t'
Cas où S = S'.

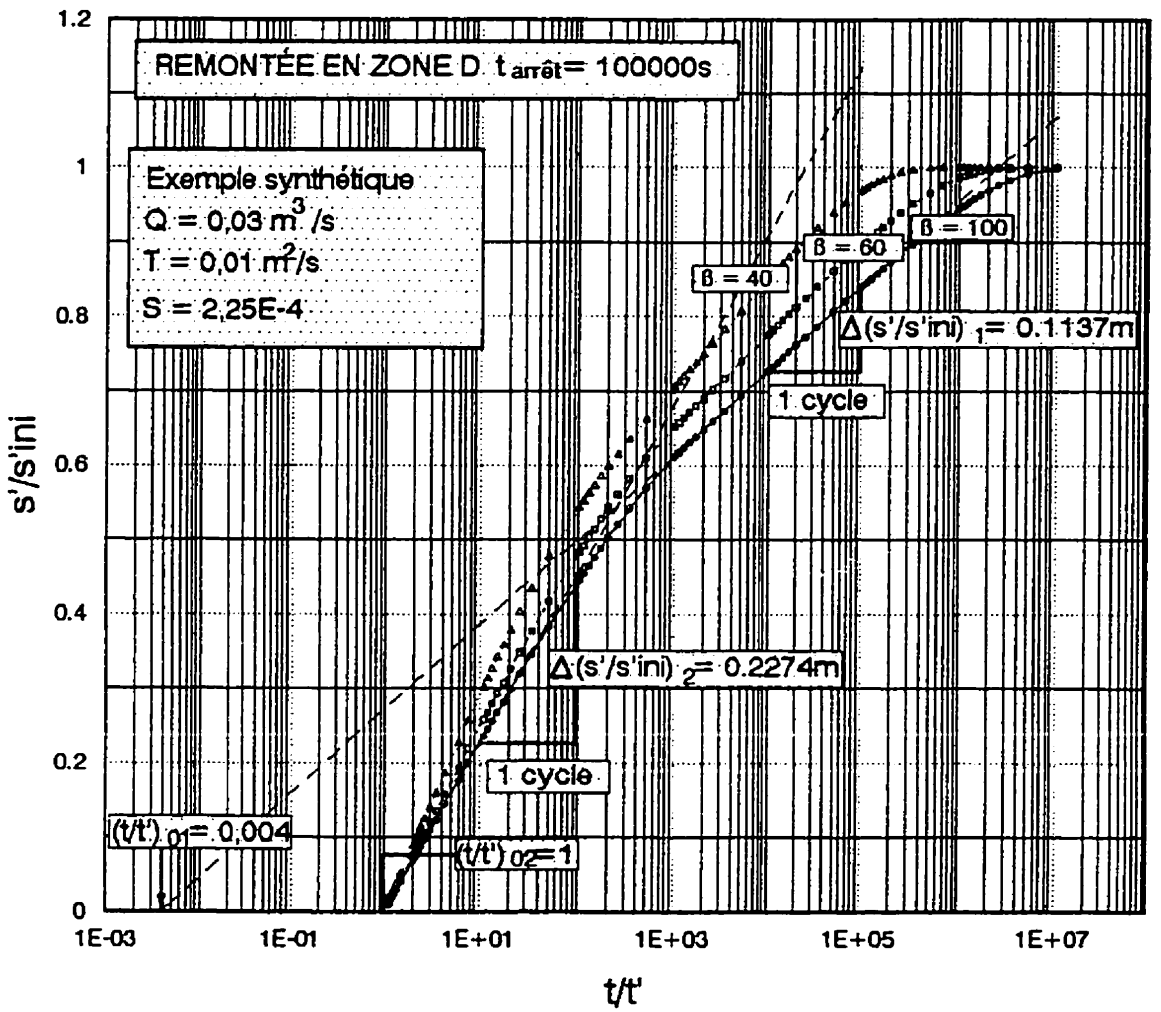


Figure 8.10: Remontée en ZONE D, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = S'.

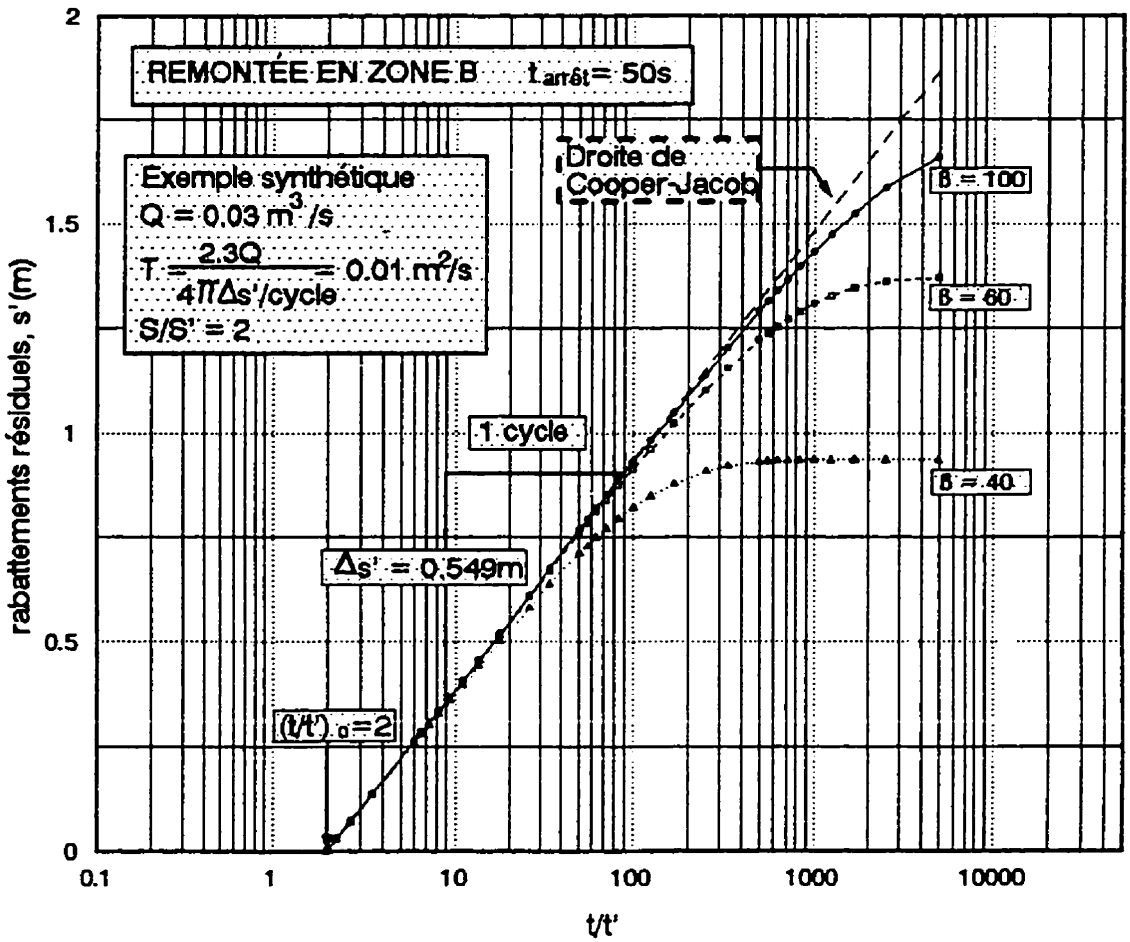


Figure 8.11: Remontée en ZONE B, s' vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

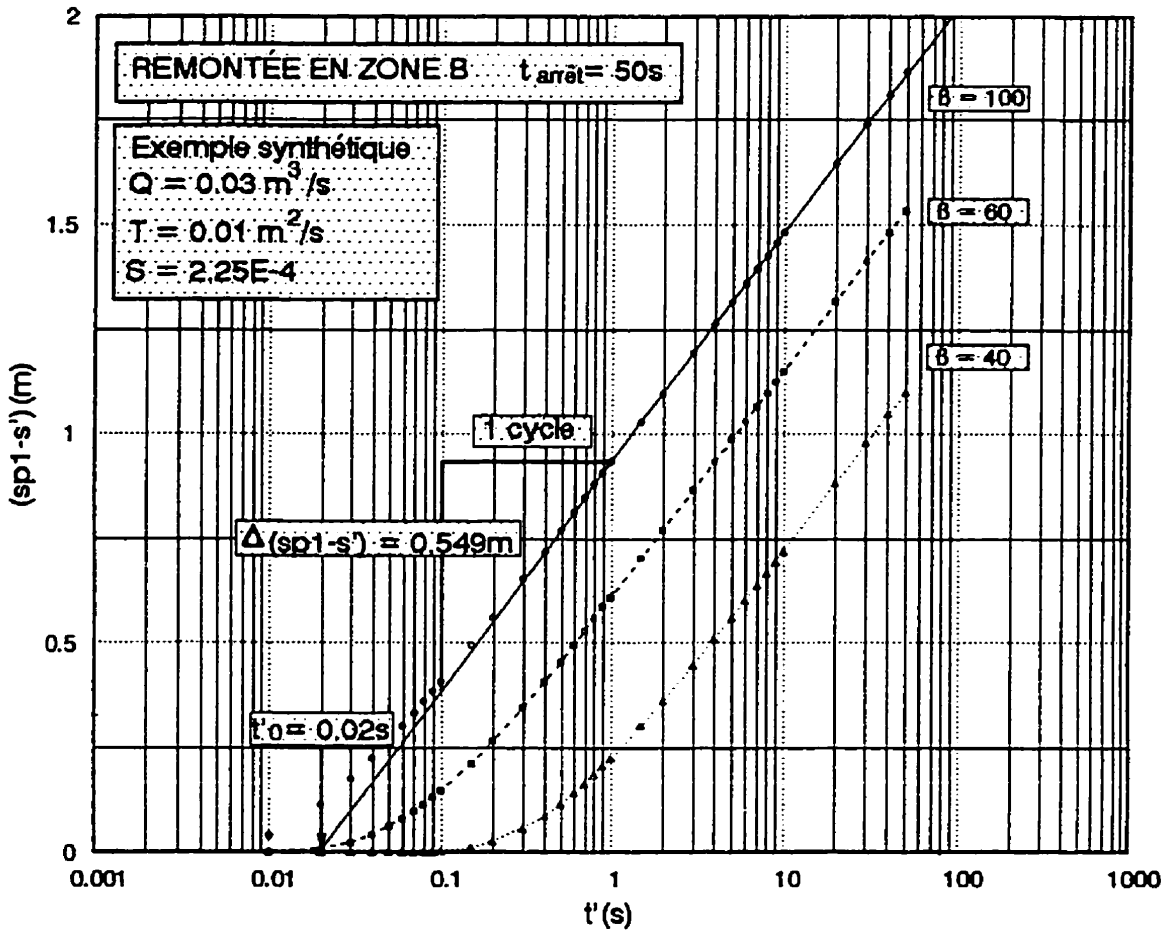


Figure 8.12: Remontée en ZONE B, (sp1 - s') vs logt'
Cas où S = 2S'

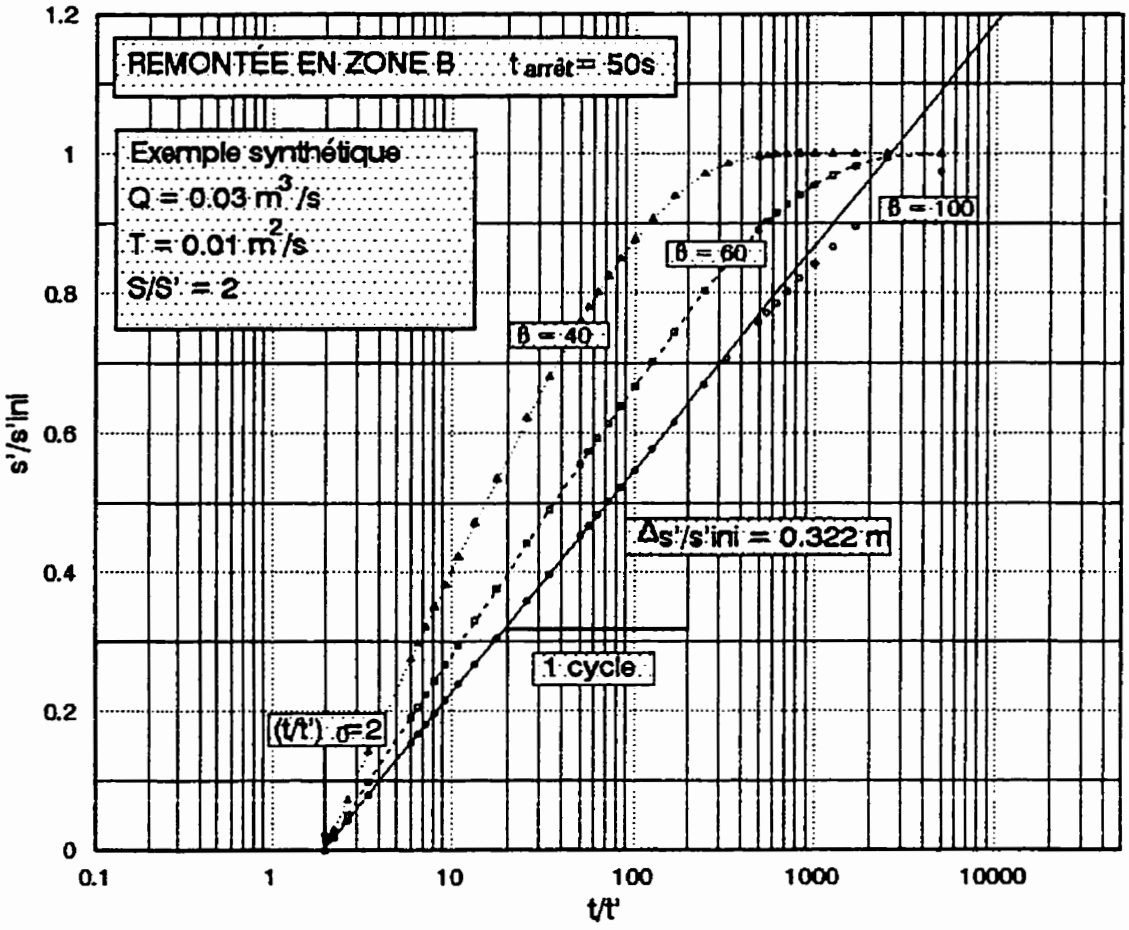


Figure 8.13: Remontée en ZONE B, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

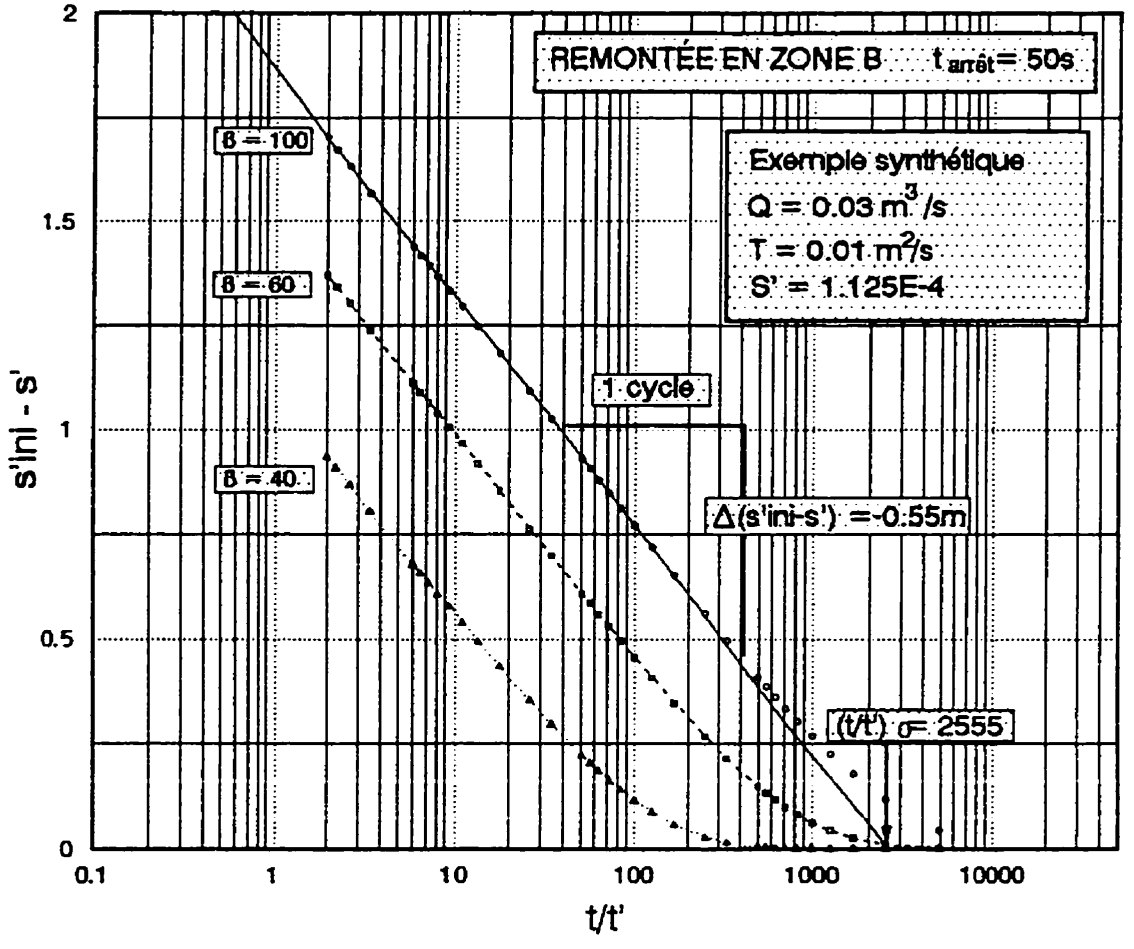


Figure 8.14: Remontée en ZONE B, (s'ini - s') vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

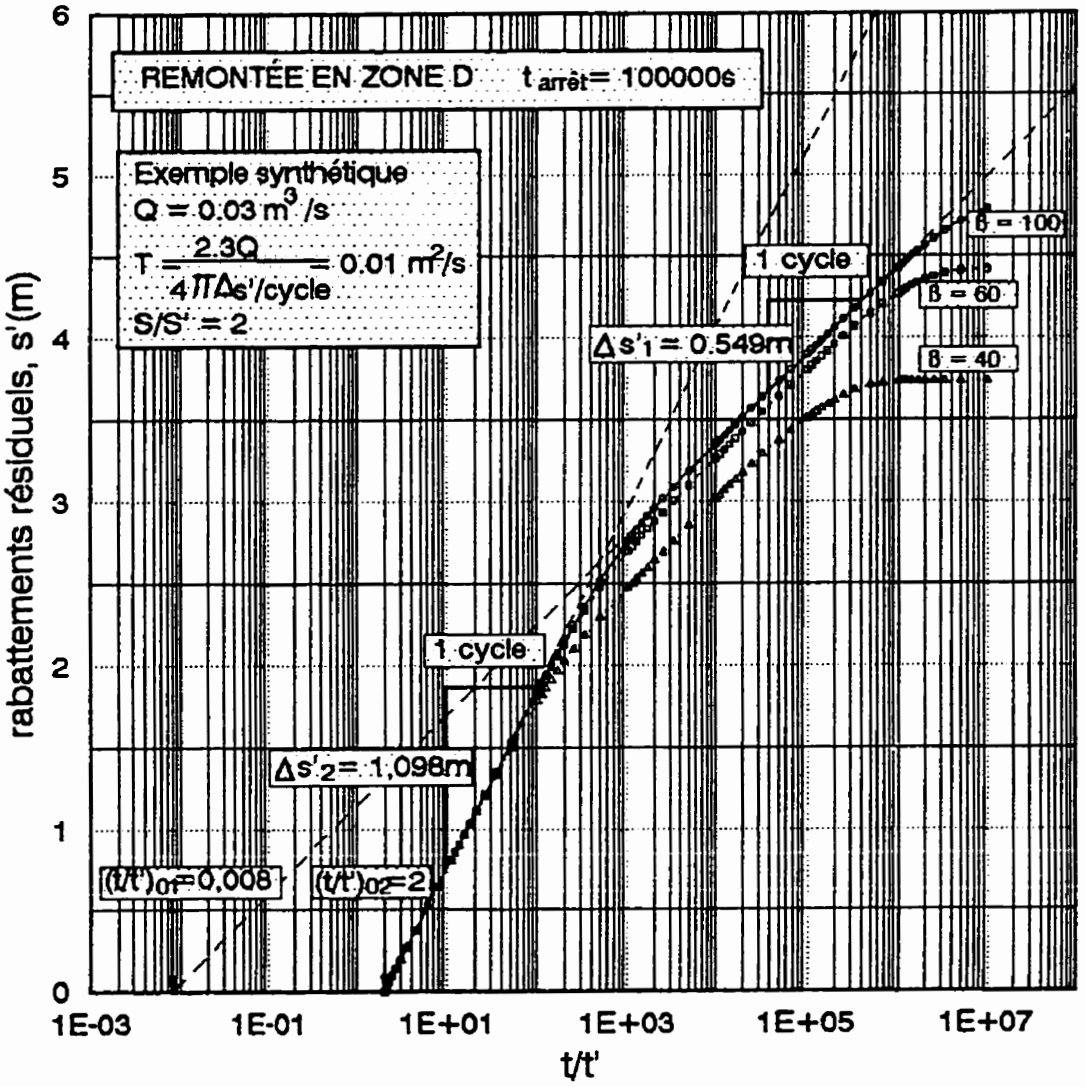


Figure 8.15: Remontée en ZONE D, s' vs logt/t'
Cas où S = 2S'.

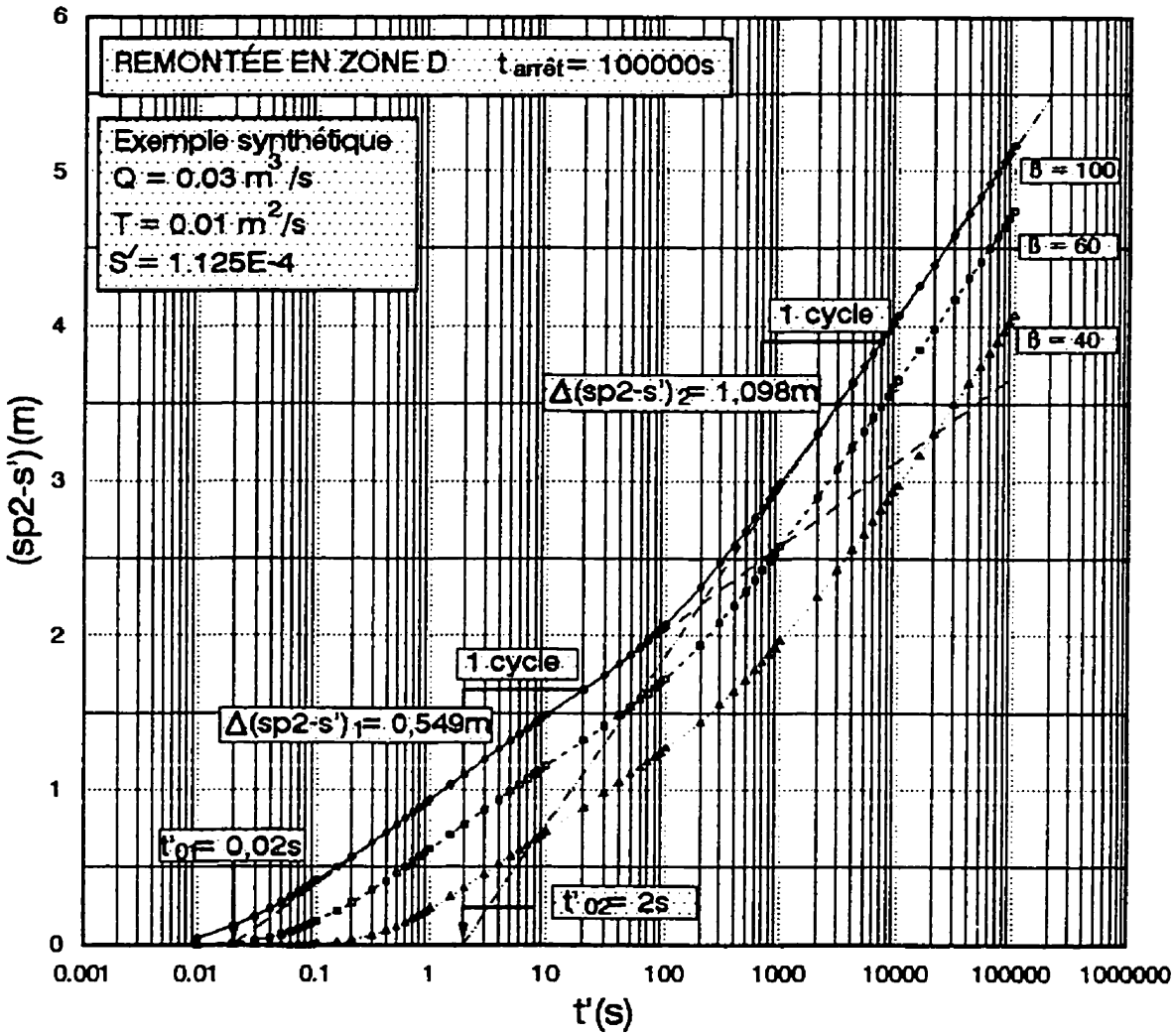


Figure 8.16: Remontée en ZONE D, (sp2 - s') vs logt'
Cas où S = 2S'

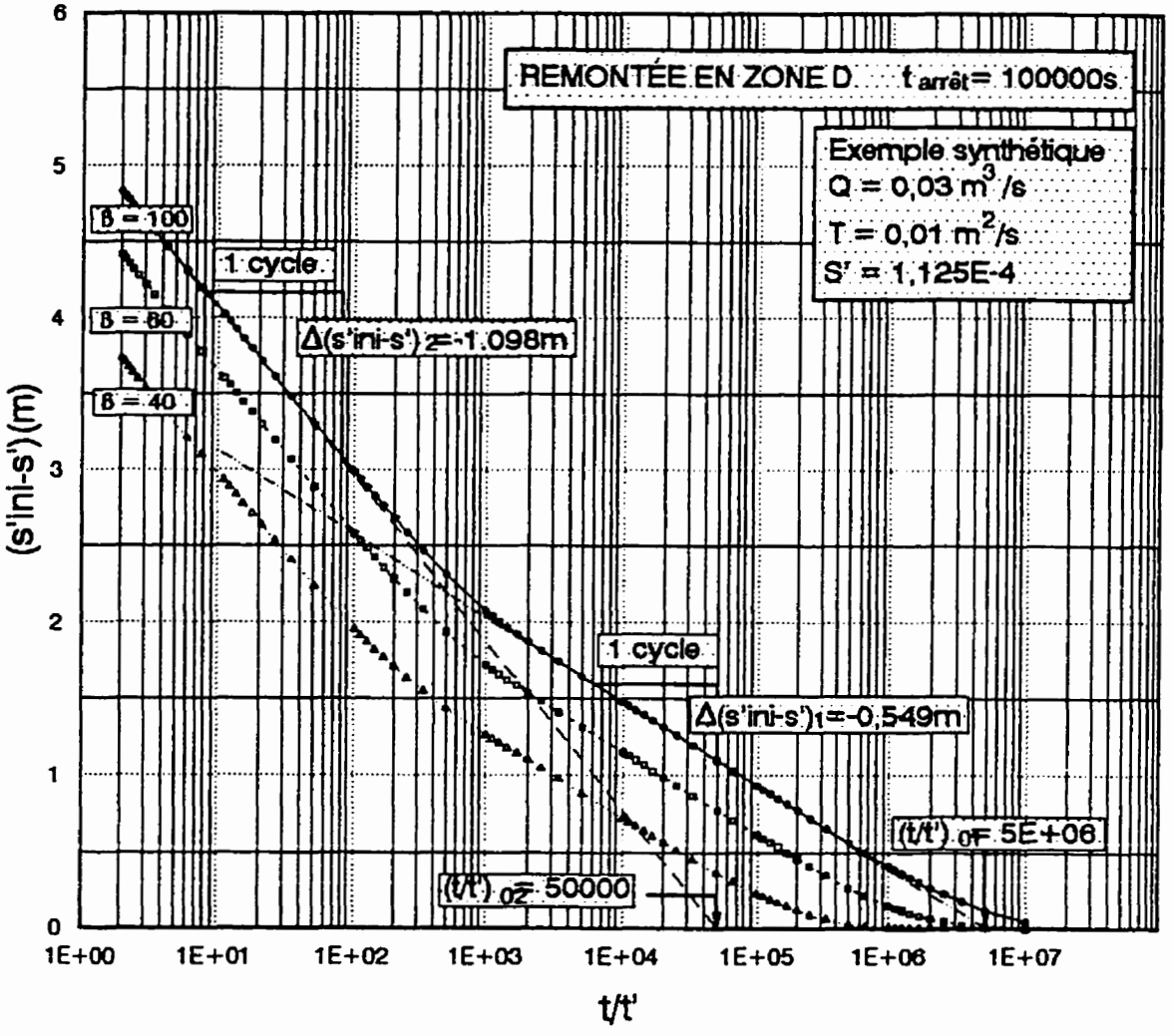


Figure 8.17: Remontée en ZONE D, (s'ini - s') vs logt/t'
Cas où S = 2S'

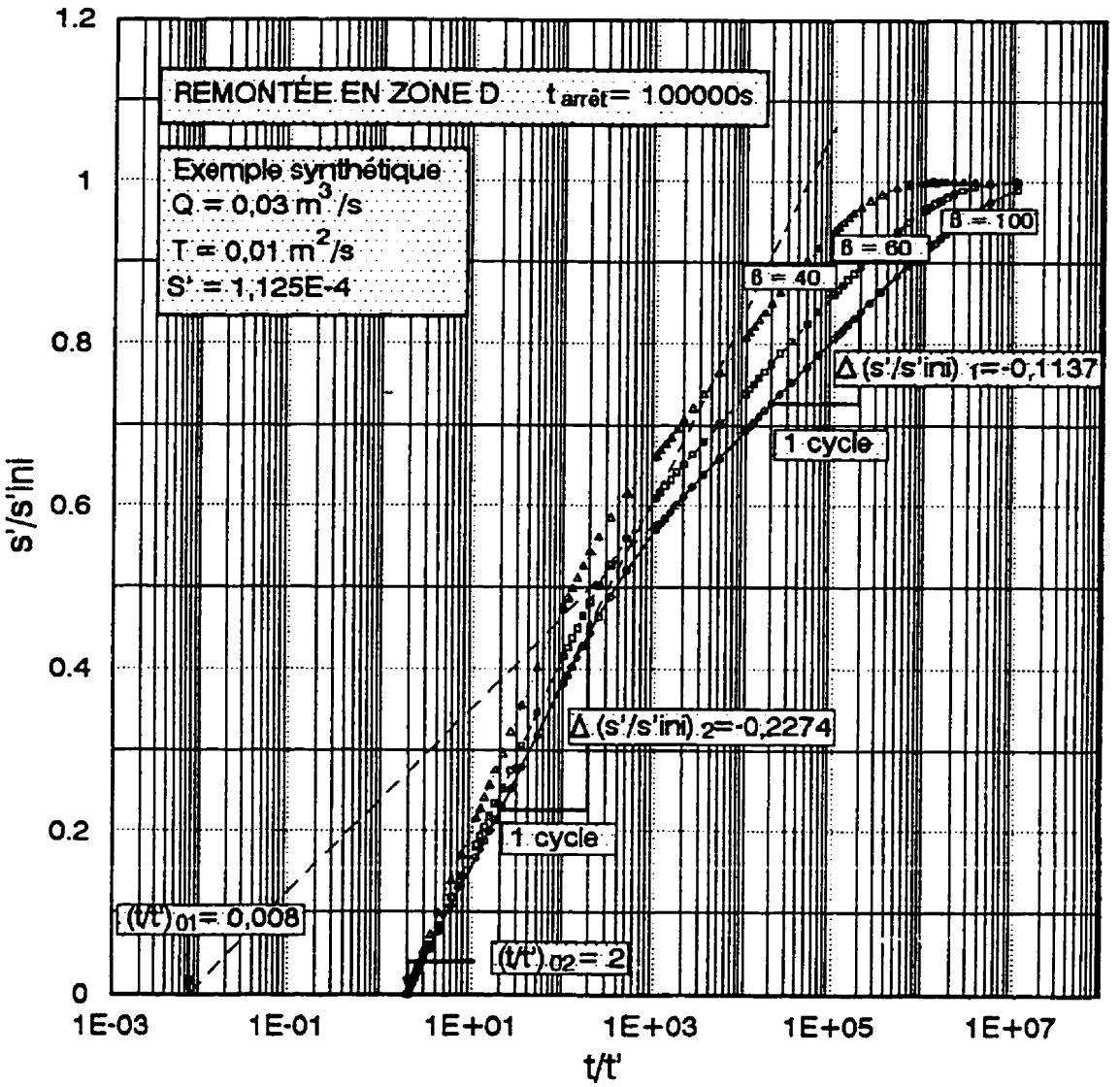


Figure 8.18: Remontée en ZONE D, s'/s'ini vs logt/t'
Cas où S = 2S'

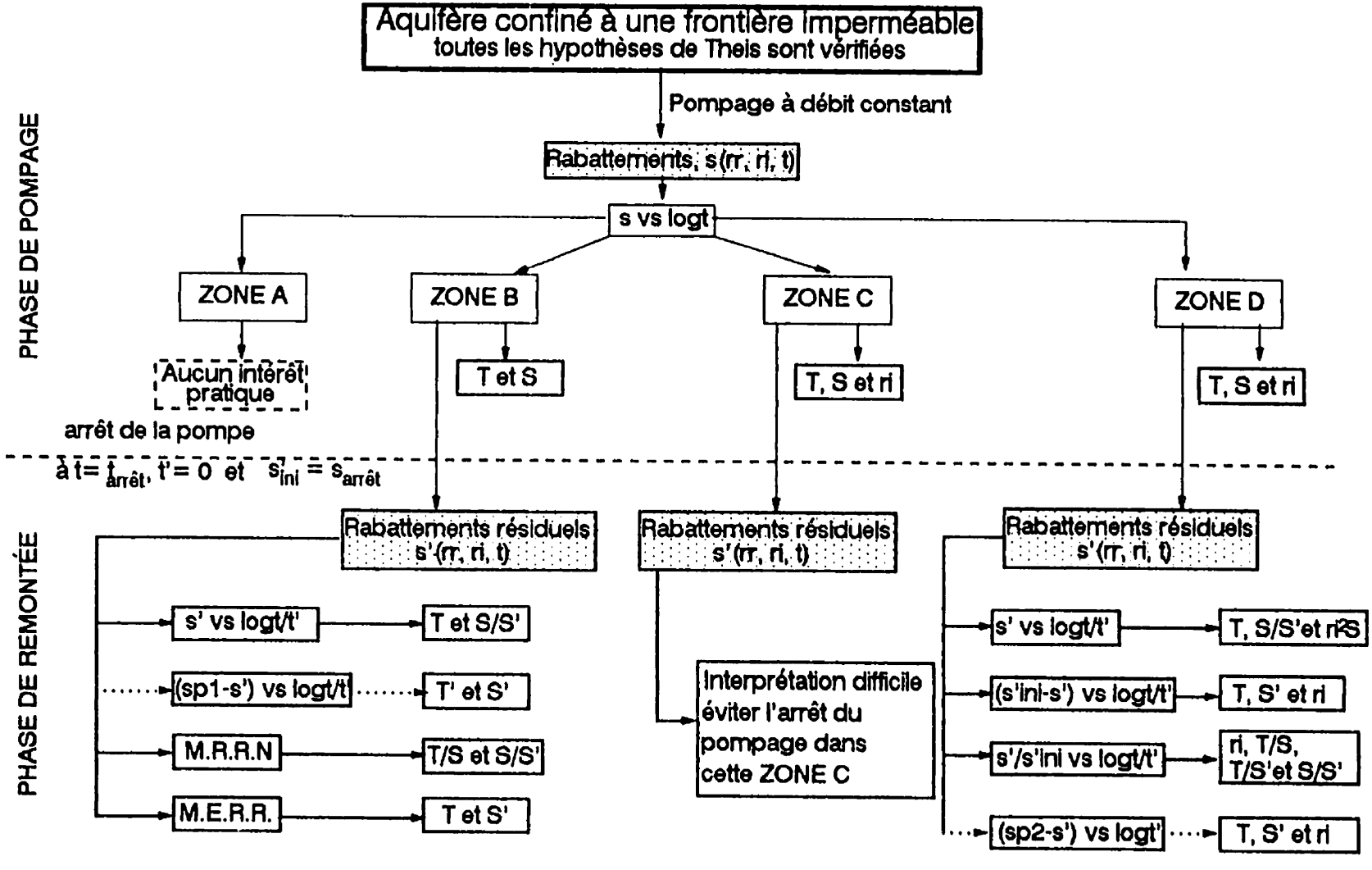


Figure 8.19: Méthodes d'interprétation des données de remontée dans le cas d'un aquifère confiné limité par une frontière imperméable.

CHAPITRE IX

CONCLUSIONS

Au terme de cette étude, nous disposons donc de plusieurs méthodes d'interprétation des données de remontée dans le cas d'un aquifère confiné. Ces méthodes illustrées par des exemples synthétiques et par quelques exemples de cas réels, se basent sur la théorie des images, la solution de Theis et l'approximation de Cooper-Jacob.

Dans le cas où l'aquifère est infini, deux méthodes sont mises au point. Elles constituent un réel progrès par rapport aux méthodes disponibles jusqu'alors. En effet, pour la première fois les coefficients d'emmagasinement en pompage (S) et en remontée (S') même si différents peuvent être déterminés.

Dans le cas complexe où une frontière linéaire de recharge ou imperméable limite l'aquifère testé, il devient également possible, par cette étude, en plus de S' et S de déterminer la transmissivité ainsi que la position et l'orientation de la frontière.

L'application du logiciel de calcul numérique par éléments finis SEEP/W , de plus en plus complet et sophistiqué, a pu d'une part nous guider à la mise au point de ces méthodes. En particulier, en mettant en évidence l'influence du temps à l'arrêt de la pompe sur la courbe usuelle de remontée s' vs *log* t/t'. D'autre part, il nous a permis une

meilleure compréhension du phénomène de transition pompage/remontée. Les principaux résultats qui se dégagent sont:

1. Les courbes de remontée dépendent du temps mis pour fermer la pompe. Plus la fermeture est rapide plus on s'approche de la courbe théorique.

2. Le début de la phase de la remontée (t' = 0) doit toujours correspondre au moment où la pompe est complètement fermée.

Parmi les autres résultats obtenus dans cette étude, il convient de souligner que:

- la courbe type d'un essai d'aquifère en phase de pompage en présence d'une frontière linéaire simple présentera au plus quatre zones différentes (ZONE A, ZONE B, ZONE C et ZONE D). Le développement de la ZONE B dépend de la valeur du facteur $ß = r_i / r_r$ soit de la position du piézomètre. Une valeur de $ß > 10$ est requise pour le cas de la frontière imperméable et $ß > 20$ pour le cas de la frontière de recharge.

- le choix de la zone où la pompe sera fermée a une grande influence sur les courbes de remontée et par conséquent sur la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

- si la pompe est arrêtée en ZONE B, tout se passe comme si l'aquifère est infini. Ainsi, on peut conclure qu'une frontière trop éloignée, non détectée pendant la phase de pompage qui peut durer juste 72 heures, ne peut l'être pendant la phase de remontée.

- si la ZONE C commence à se développer, il est recommandé de laisser l'essai se poursuivre jusqu'à atteindre la ZONE D. Dans ce cas, l'application des méthodes présentées dans cette étude nous permettra de déterminer les inconnus: T, S, S' et r_i.

Les vérifications de ces différents cas sont faites sur des essais synthétiques et des essais réels. Les organigrammes proposés permettent de contrôler la qualité des interprétations et leur cohérence (pompage/remontée).

RÉFÉRENCES

BALLUKRAYA, P.N. and SHARMA, K.K. (1991). Estimation of storativity from recovery data. Ground Water, Vol. 29, No. 4, pp. 495-498.

BANTON, O. and BANGOY, L.M. (1996). A new method to determine storage coefficient from pumping test recovery data. Ground Water, vol. 34, No. 5, pp. 772-777.

BARDSLEY, W.E. (1992). Discussion of "Estimation of storativity from recovery data", by Ballukraya, P.N. and Sharma, K.K. (1991). Ground Water, vol. 30, No. 2, pp. 272-273.

BARDSLEY, W.E.; SNEYD, A.D. and HILL, P.H.D. (1985). An improved method of least-squares parameter estimation with pumping-test data". Journal of Hydrology, v. 80, pp.271-281.

BATHE, K.J. (1982). Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, 735 p.

BIRSOY, Y.K. and SUMMERS, W.K., (1980). Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. Ground Water, Vol. 18, No. 2, pp. 137-146.

BOWEN, R. (1986). Groundwater. 2nd edition, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 427 p.

BRÉMOND, R. (1965). Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. Gauthier-Villars, Paris, 118 p.

CARMAN, P.C. (1956). Flow of gases through porous media. Butterworths, London.

CASE, C. M., PIDCOE, W. W. and FENSKE, P.R. (1974). Theis equation analysis of residual drawdown data. Water Resources Research, Vol. 10, No. 6, pp. 1253-1256.

CASTANY, G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université, Paris, 238 p.

CASTANY, G. (1967). Traité pratique des eaux souterraines. 2ème édition, Dunod, Paris, 661p.

CHAPUIS, R.P. (1994a). Assessment of methods and conditions to locate boundaries: I. One or two straight impervious boundaries. Ground Water, Vol. 32, No. 4, pp. 576-582.

CHAPUIS, R.P. (1994b). Assessments of methods and conditions to locate boundaries: II. One straight recharge boundary. Ground Water, Vol. 32, No. 4, pp. 583-590.

CHAPUIS, R.P., CRESPO, R., CHENAF, D. and AUBERTIN, M. (1993). Evaluation of a ground water f.e.m. software for steady and unsteady state conditions. Proceedings, 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, pp. 61-70.

CHAPUIS, R.P. (1993). Hydrogéologie appliquée. Notes de cours et de laboratoires GML 6106, 7.510 (non publiées). Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

CHAPUIS, R.P., (1992). Discussion of "Estimation of storativity from recovery data", by Ballukraya, P. N. and Sharma, K. K., (1991). Ground Water, Vol. 30, No. 2, pp. 269-272.

CHAPUIS, R.P. et MONTOUR, I. (1992). Évaluation de l'équation de Kozeny-Carman pour prédire la conductivité hydraulique. Proceedings, 45th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, pp. (78-1) - (78-9).

CHENAF, D., and CHAPUIS, R.P. (1994). Discussion of "Analysis of slope-matching methods for aquifer parameter determination", by Srivastava, R. Guzman, G. A. (1994). Ground Water, Vol. 33, No.3, pp. 503-506.

CHENAF, D., and CHAPUIS, R.P. (1995). Contribution to the analysis of aquifer tests in both pumping and recovery phases for the case of recharge boundary conditions. Proceedings, International Association of Hydrogeologists, Congress XXVI: Solutions' 95, Edmonton, Canada.

CHOW, V. T., (1952). On the determination of transmissivity and storage coefficient from pumping test data. Am. Geophys. Union Trans., Vol. 33, pp.397-404.

COOPER, H.H.Jr. and JACOB, C.E., (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. Am. Geophysical Union., Vol. 27, No. 4, pp. 526-534.

DE MARSILY, G., (1986). Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. ACADEMIC PRESS, INC., 440 P.

DRISCOLL, F.G. (1986). Groundwater and wells. 2nd edition. Johnson Division, St.Paul, Minnesota., 1089 p.

DUGUID, J.O. and J. ABEL (1974). Finite Element Galerkin method for flow in fractured porous media, in Finite Element Methods in Flow Problems. Edited by J.T. Oden, O.C. Zienkiewicz, R.H. Gallagher and C. Taylor, UAH Press, Huntsville, Ala, pp. 599-615.

DUPUIT, J. (1863). Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2e éd., Dunod, Paris, 304 p.

EARLOUGHER, R.C. (1977). Advances in well test analysis. Monograph, Vol. 5, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, TX. 264 p.

EL-KATIB, N.A.F. (1987). A new approach to interference test analysis. SPE Formation Evaluation., Vol. 2, pp. 609-610.

FAYERS, F.J., and SHELDON, J.W. (1962). The use of a high speed digital computer in the study of the hydrodynamics of geologic basins. J.G.R., vol. 67, pp. 2421-2431.

FORKASIEWICZ, J. (1972). Cahier de travaux pratiques d'interprétation des pompages d'essai. Doc. B.R.G.M., Orléans.

FORSYTHE, G.E. and WASOW, W.R. (1960). Finite difference methods for partial differential equations. John Wiley and Sons, 443 p.

FREDLUND, D.G. and MORGENSTERN, N.R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. Canadian geotechnical Journal, Vol. 13, No. 3, pp. 261-276.

FREEZE, R.A. and CHERRY, J.A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

FREEZE, R.A. and WITHERSPOON (1968). Theoretical analysis of regional groundwater flow. III. Quantitative interpretations. Water Resources Res., vol. 4, No. 3.

FREEZE, R.A. and WITHERSPOON (1967). Theoretical analysis of regional groundwater flow. II. Effect of water-table configuration and sub-surface permeability variation. Water Resources Res., vol. 3, No. 2.

FREEZE, R.A. and WITHERSPOON (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow. I. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resources Res., vol. 2, No. 4.

GEO-SLOPE Int, (1992). SEEP/W User's Guide for finite element seepage analysis. Version 2, Geo-Slope Int. Ltd. Calgary, Alberta, Canada.

GRINGARTEN, A.C. and WITHERSPOON, P.A. (1972). A method of analysing pump test data from fractured aquifers. Proc. Symp. on the Percolation through Fissured Rock. International Society for Rock Mechanics, Stuttgart, Germany.

HANTUSH, M.S., (1957). Nonsteady flow to a well partially penetrating an infinite leaky aquifer. Proc. Iraqi Sci. Soc., Vol. 1, pp. 10-19.

HANTUSH, M.S., (1964). Hydraulics of wells. In Advances in Hydroscience, Vol.1, Ven Te Chow Editor, Academic Press, New York and London, 1, pp. 281-432.

HANTUSH, M.S. and JACOB, C.E. (1955). Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 36, No.1, pp. 95-100.

HOLTZ , R.D. et KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 808p.

HUYAKORN, P.S., LESTER B.H. and FAUST, C.R. (1983). Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers. Water Resources Research, Vol. 19, No.4, pp. 1019-1035.

IMBEAUX, E. (1930). Essai d'hydrogéologie. Dunod, Paris, 704p.

JACOB, C.E. (1963). The recovery method for determining the coefficient of transmissivity. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I, pp. 283-292.

JACOB, C.E. (1950). Flow of groundwater. In Engineering Hydraulics, Proc. of the 4th. Hydraulic Conference, John Wiley & Sons, New York, N.Y., pp. 321-386.

JACOB, C.E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 2, pp. 574-586.

JAVANDEL, I. and WITHERSPOON, P. A. (1968a). Application of the finite element method to transient flow in porous media. Soc. Pet. Eng. J. 8(3), pp. 241-252.

KAWECKI, M. W. (1993). Recovery analysis from pumping tests with stepped discharge. Ground Water, Vol. 31, No. 4, pp. 585-592.

KAZEMY, H., SETH, M.S. et THOMAS, G.W. (1969). The interpretation of interference tests in naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution. Soc. Pet. Eng. J., Déc., 463 p.

KOZENY, J. (1927). Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akad. Wiss., Wien, 136(2a) : pp.271-306.

KRUSEMAN, G.P. and N.A. DE RIDDER (1991). Analysis and evaluation of pumping test data. Intern. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands. Pub. 47.

LENNOX, D. H. (1966). Analysis and application of step-drawdown test. ASCE, Proc., Vol. 92, No. 4967.

McCARTHY, D. F. (1988). Essentials of Soil Mechanics and Foundations, Basic Geotechnics. 3rd edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 614 p.

MEINZER, O. E. (1923). The occurrence of groundwater in the United States, with a discussion of principles. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 489, 321 p.

MUSKAT, M. (1937). The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y., 763 p.

NARASIMHAN, T. N. (1982). Multidimensional numerical simulation of fluid flow in fractured porous media. Water Resources Research, 18, pp. 1235-1247.

NEUMAN, S.P. and WITHERSPOON, P. A. (1969). Transient flow of ground water to wells in multiple-aquifer systems. Publ. 69-1, Dep. of Civ. Eng., Geotech. Eng., University of California, Berkeley, California.

OLIVER, D.S. (1993). The influence of nonuniform transmissivity and storativity on drawdown. Water Resources Research, Vol. 29, No. 1, pp. 169-178.

PAPADOPULOS, I.S., and COOPER, Jr.H.H. (1967). Drawdown in a well of large diameter. Water Resources Research, Vol. 3, No.1, pp. 241-244.

PINDER, G.F. and GRAY, W.G. (1977). Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press, New York.

RAI, S.P. (1985). Numerical determination of aquifer constants. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, pp. 1110-1114.

RAGHUNATH, H.M. (1982). Ground Water. A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 456p.

RORABAUGH, W.H. (1953). Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. ASCE, Proc., Vol. 79, No. 362.

SCHEIDEGGER, A. E. (1960). The physics of flow through porous media. MacMillan, 313 p.

SCHNEEBELI, G. (1956). Sur l'hydraulique des puits. Symposia Darcy, publication No.41 de l'A.I.H., tome 2, pp. 10-27.

SRIVASTAVA, R. and GUZMAN, G. A. (1994). Analysis of slope-matching methods for aquifer parameter determination. Ground Water, Vol. 32, No.4, pp.570-575.

STALLMAN, R.W. (1963). Type curves for the solution of single boundary problems. In: shortcuts and special problems in aquifer tests. Compiled by Ray Bentall. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1545-C, C45-C47.

STALLMAN, R.W. (1956). Use of numerical methods for analyzing data on groundwater levels. Symposia Darcy, Ass. Int. d'Hydrologie Scientifique, Publ. 41, pp. 227-231.

STERNBERG, Y. M. (1967). Transmissibility determination from variable discharge pumping tests. Ground Water, Vol. 5, No.4, pp.27-29.

STRACK, O.D.L. (1989). Groundwater Mechanics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 732 p.

STRAUSBERG, S. I. (1967). Estimating distances to hydrologic boundaries from discharging well data. Ground Water, Vol. 5, No. 1, pp. 5-8.

TERZAGHI, K. (1950). Mechanism of landslides, in "Berkley Volume" (application of geology to engineering practice). Geol. Soc. of Amer. Publ., pp. 83-123.

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. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 2, pp. 519-524.

THIEM, G. (1906). Hydrologische Methoden, Gebhardt, Leipzig, 56 p.

TODD, D.K. (1980). Groundwater Hydrology. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, N.Y, 539 p.

TYSON, H.N.Jr. and WEBER, E.M. (1964). Computer simulation of groundwater basins. Jour. Hydraulics Division, Proc. A.S.C.E., vol. 90, No. HY4, pp. 59-77.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR (1977). Ground Water Manual, a water resources technical publication. U.S. Government Printing Office, Washington, 480 p.

VANDEN BERG, A. (1977). Pump testing in heterogeneous reservoirs. Journal of Hydrol., 34, pp. 45-62.

VANDEN BERG, A. (1975). Determining aquifer coefficients from residual drawdown data. Water Resources Research, Vol. 11, No. 6, pp. 1025-1028.

VELA, S. And McKINLEY, R.M. (1970). How areal heterogeneities affect pulse-test results. Soc. Petrol. Eng. J., 10, pp. 181-191.

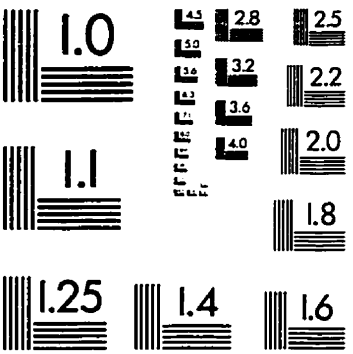
WALTON, W.C. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. I11. St. Water Survey, Bull. 49, 81 p.

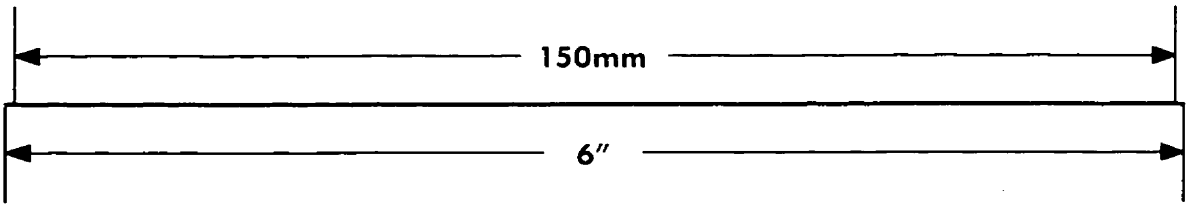
YEH, H.D. (1987a). Discussion of numerical determination of aquifer constants. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE., Vol. 113, pp. 948-951.

YEH, H.D. (1987b). Theis' solution by nonlinear least squares and finite-difference Newton's method. Ground Water, Vol. 25, pp. 710-715.

ZIENCKIEWICZ, O.C. and TAYLOR, R.L. (1991). La méthode des éléments finis: formulation de base et problèmes linéaires. Éditeur AFNOR, Paris, 620p.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)





APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved