

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATÉRIAUX DE GÉNIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT

Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Développement d'outils informatiques pour le génie
hydraulique : Outil informatique pour simulation
et interprétation des tests hydrauliques dans
les puits et forage d'eau**

Medjdoub Amel

Sous la direction de M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA MCA à l'ENP
Présenté et soutenu publiquement le (13/10/2020)

Composition du Jury :

Président	Mr. Belhadj Omar	MAA	ENP
Encadreur	Mr. Boukhemacha Mohamed Amine	MCA	ENP
Examineur	Mr. Benziada Salim	MAA	ENP

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATÉRIAUX DE GÉNIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT

Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Développement d'outils informatiques pour le génie
hydraulique : Outil informatique pour simulation
et interprétation des tests hydrauliques dans
les puits et forage d'eau**

Medjdoub Amel

Sous la direction de M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA MCA a l'ENP
Présenté et soutenu publiquement le (13/10/2020)

Composition du Jury :

Président	Mr. Belhadj Omar	MAA	ENP
Encadreur	Mr. Boukhemacha Mohamed Amine	MCA	ENP
Examineur	Mr. Benziada Salim	MAA	ENP

ENP 2020

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, puisse Dieu, les préserver et leur accorder santé, et longue vie.

Ma mère pour m'avoir mis au Monde, ces prières et ces bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. Ce travail est le fruit de ces sacrifices et ces efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Mon grand frère Amine et mes petites sœurs Assia et Yasmine et toute ma famille.

Mes très chers amis et mes camarades.

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie Allah, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances à mon promoteur Dr. BOUKHEMACHA M.A. pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. Je le remercie vivement pour sa patience et surtout pour ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également le président et les membres du jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.

A tous les enseignants du département d'hydraulique qui ont contribué à ma formation.

Enfin, Je voudrais remercier tous mes proches et mes amis qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

اهتمنا في هذا المشروع بتصميم برنامج لمحاكاة وتفسير الاختبارات الهيدروليكية في آبار المياه الجوفية المتواجدة في وسط مسامي مشبع، تم تطوير هذا البرنامج تحت لغة برمجة مفتوحة المصدر (بيثون). لتحقيق هذا العمل، تم تقسيم البرنامج إلى جزأين متميزين، جزء لمحاكاة اختبارات الضخ لمراقبة الهبوط ومخروط الانخفاض، تتم هذه المحاكات عن طريق حل المعادلات التحليلية، أما في الجزء الآخر نهتم بتفسير هذه الاختبارات و استنتاج الخصائص الهيدروليكية لخزانات المياه الجوفية، يتم هذا الجزء باستخدام طريقة المربعات الصغرى. يمكن استخدام هذا البرنامج لأنواع مختلفة من طبقات المياه الجوفية وتحت ظروف اختبار مختلفة.

الكلمات المفتاحية: الاختبارات الهيدروليكية في آبار المياه الجوفية، وسط مسامي مشبع، المعادلات التحليلية، طريقة المربعات الصغرى، الخصائص الهيدروليكية.

Abstract

In this project, we were interested in the design and the development of software for the simulation and interpretation of aquifer tests in a saturated porous medium. The software is developed under an open source programming language (python). To achieve this work, two distinct parts are established. The first part, is dedicated to simulate aquifer tests in order to analyze the evolution of drawdown and the cone of depression, by solving the analytical equations. The second part is dedicated to the interpretation of those tests and the calculation of the hydraulic characteristics of aquifers, and was based on nonlinear regression using the least squares method. The developed tool can be used for different types of aquifer and under different test conditions.

Key words : aquifer tests , saturated porous media, analytical equations, least squares adjustment method, hydraulics characteristics.

Résumé

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à la conception et le développement d'un logiciel pour la simulation et l'interprétation des tests hydrauliques dans les puits et forages d'eau à travers un milieu poreux saturé. Ce logiciel est développé sous un langage de programmation open source (python). Pour parvenir à ce travail, deux parties distinctes sont établies, une partie pour la simulation des essais de pompage et l'analyse de l'évolution de rabattement et le cône de dépression; réalisée à l'aide de résolutions des équations analytiques. La deuxième partie traite l'interprétation de ces essais et le calcul des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères; basée sur la régression non linéaire à l'aide de la méthode d'ajustement des moindres carrés. L'outil développé peut être utilisé pour différents types d'aquifère et dans diverses conditions d'essai.

Mots clés : tests hydraulique dans les puits et forages d'eau, milieu poreux saturé, équation analytique, méthode d'ajustement des moindres carrés, les caractéristiques hydrodynamiques.

Table des matières

Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	14
I. Etude bibliographique	16
I.1 Introduction.....	16
I.2 Ecoulement dans un milieu poreux saturé.....	16
I.2.1 Définition des milieux poreux	16
I.2.2 Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux.....	16
I.2.3 Différents types de nappes d'eau dans les milieux poreux.....	18
I.2.4 Variation des propriétés d'un milieu poreux	18
I.2.5 Equations de l'écoulement en milieu poreux saturé.....	19
I.3 Essais de pompage et leur interprétation	21
I.3.1 Le but d'un essai de pompage.....	21
I.3.2 Les types d'essais de pompage	22
I.3.3 L'interprétation des essais de pompage.....	24
I.3.4 Corrections des influences extérieures	27
I.3.5 Les méthodes d'interprétation.....	28
I.4 Slug tests et leur interprétation.....	37
I.4.1 Introduction.....	37
I.4.2 Avantages	38
I.4.3 Inconvénients	38
I.4.4 Les types de <i>slug test</i>	38
I.4.5 Les réponses d'un slug test.....	39
I.4.6 Méthodes d'interprétation.....	40
I.5 Conclusion	43
II. Modèle conceptuel et algorithme.....	45
II.1 Introduction.....	45
II.2 Paramètres statistiques de performance.....	45
II.3 Model conceptuel	46
II.4 Algorithmes et validation	48
II.4.1 L'outil d'interprétation	48
II.4.2 Outil de simulations.....	69
III. Application	79
III.1 Introduction.....	79
III.2 Influence de la durée de pompage sur le rayon d'action et le cône de dépression	79

III.3	Influence du coefficient d'emmagasinement sur le rayon d'action et le cône de dépression.....	80
III.4	Influence de la transmissivité sur le rayon d'action et le cône de dépression	81
III.5	Influence du débit de pompage sur le rayon d'action	82
III.6	Influence de la profondeur du puits sur le rayon d'action et le cône de dépression ..	83
III.7	Influence de Facteur de drainance sur le rayon d'action et le cône de dépression	84
III.8	L'effet de type d'aquifère sur le rabattement.....	85
III.9	L'effet du type du puits sur le rabattement	86
III.10	Conclusion.....	87
Conclusions et recommandations		88
Bibliographie.....		89
Annexe		92

Liste des abréviations

B : Perte de charge linéaire

b : Longueur du puits de pompage pénétré dans l'aquifère [m]

b' : Longueur du puits d'observation pénétré dans l'aquifère [m]

C : Perte de charge quadratique

C_D : Paramètre d'oscillation [-]

c : Résistance hydraulique verticale [j]

D : L'épaisseur saturé de l'aquifère [m]

D' : L'épaisseur de l'aquitard [m]

d : Longueur de la partie non ouverte du puits de pompage pénétré dans l'aquifère [m]

d' : Longueur de la partie non ouverte du puits d'observation pénétré dans l'aquifère [m]

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]

h : Charge hydraulique [m]

h_0 : Charge hydraulique dans le puits à $t = 0$ s [m]

K : Conductivité hydraulique de l'aquifère [m/j]

K' : Conductivité hydraulique de l'aquitard [m/j]

k : Perméabilité intrinsèque du milieu

L : Facteur de drainance [m]

l : Longueur de la crépine du puits [m]

L_e : Longueur effective de la colonne d'eau dans le puits

μ : Viscosité dynamique du fluide

ω : Porosité [-]

p : Pression

Q : Débit de pompage [m^3/j]

q_s : Débit par unité de volume d'eau prélevé [s^{-1}]

r : Distance entre le puits de pompage et le piézomètre d'observation [m]

r_c : Rayon intérieur du tubage du puits [m]

r_i : Distance entre le piézomètre et de le puits imaginaire [m]

r_w : Rayon du puits [m]

ρ : Masse volumique de l'eau

S : Coefficient d'emmagasinement [-]

S_s : Coefficient d'emmagasinement spécifique [m^{-1}]

S' : Coefficient d'emmagasinement en période de récupération [-]

s : Rabattement [m]

s' : Rabattement corrigé [m]

T : Transmissivité (égale à $K \cdot D$) [m^2/j]

t : Temps [j]

t_d : Paramètre adimensionnel de temps [-]

v : Vitesse d'écoulement

w : Changement du niveau d'eau par rapport au niveau d'eau statique

w_d : Forme adimensionnelle du changement du niveau d'eau par rapport au niveau d'eau statique

w_i : Largeur du canal

z : Cote définie selon un axe vertical

Liste des tableaux

Tableau I-1: Méthode de Theis et méthode de Jacob (Kruseman & De Ridder, 1994).	29
Tableau I-2: Méthode de Stallman (Kruseman & De Ridder, 1994)	30
Tableau I-3 : Modifications de Huntush sur la méthode de Theis et la méthode Jacob (Kruseman & De Ridder, 1994)	31
Tableau I-4: Méthode Theis et Birsoy-Summers (Duffield, 2007)	32
Tableau I-5: Méthode de Theis avec période de récupération (Duffield, 2007).....	32
Tableau I-6 : Méthode d'Eden-Hazel (Kruseman & De Ridder, 1994)	33
Tableau I-7: Méthode de Walton et la méthode de Huntush (Kruseman & De Ridder, 1994) ..	34
Tableau I-8: Méthode de Vandenberg (Kruseman & De Ridder, 1994).	35
Tableau I-9: Modifications de Weeks sur la méthode de Walton et Huntush (Kruseman & De Ridder, 1994).....	35
Tableau I-10: Méthode de Butler (1998) (Robbins, 2016)	42
Tableau II-1: Paramètres statiques de performance (Moriassi, 2007)	45
Tableau II-2: Niveau de performance selon des paramètres statistiques (Moriassi, 2007).....	45
Tableau II-3: Indicateur de performance d'un modèle de régression	49
Tableau II-4: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	52
Tableau II-5: Validation de l'algorithme: essai de pompage idéal dans une nappe captive.	53
Tableau II-6: Validation du modèle de régression.	53
Tableau II-7: Analyse des graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive, méthode de Theis).	54
Tableau II-8: Validation de l'ajustement.	55
Tableau II-9: Analyse des graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive méthode de Jacob).	55
Tableau II-10: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.	56
Tableau II-11: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	57
Tableau II-12: Validation de modèle d'ajustement.	57
Tableau II-13: Analyse des graphes (essai de pompage idéal, nappe semi-captive, méthode de Walton)	58
Tableau II-14: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe libre.	59
Tableau II-15: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe libre.	59
Tableau II-16: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméables dans une nappe captive.	60
Tableau II-17: Validation de l'algorithme : Essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméable dans une nappe captive.	60
Tableau II-18: Validation du modèle de régression.	61
Tableau II-19: Analyse des graphes des résidus : Essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméable, nappe captive, méthode de Stallman.....	62
Tableau II-20: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive.....	62
Tableau II-21: Validation de l'algorithme : essai de pompage dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive.	63
Tableau II-22: Variables d'entrée de l'algorithme (essai de pompage essai de pompage avec débit variable) dans une nappe captive.....	64
Tableau II-23: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	64
Tableau II-24: Variables d'entrée de l'algorithme essai de pompage avec période de récupération dans une nappe captive	65

Tableau II-25: Validation de l'algorithme : essai de pompage avec période de récupération dans une nappe captive.	65
Tableau II-26: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage par paliers dans une nappe captive.	65
Tableau II-27: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	66
Tableau II-28: Variables d'entrée de l'algorithme	67
Tableau II-29: Paramètres qui décrivent la construction du puits.	67
Tableau II-30: Validation de l'algorithme : slug test avec un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.	68
Tableau II-31: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans une nappe libre à conductivité hydraulique faible.	68
Tableau II-32: Paramètres qui décrivent la construction du puits.	68
Tableau II-33: Validation de l'algorithme: essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans une nappe libre à conductivité hydraulique faible.	69
Tableau II-34: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	71
Tableau II-35: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	71
Tableau II-36: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.	71
Tableau II-37: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.	72
Tableau II-38: Paramètres de simulation utilisée pour la validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.	72
Tableau II-39: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.	73
Tableau II-40: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage en présence de frontière dans une nappe semi-captive.	74
Tableau II-41: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de pompage en présence des frontières dans une nappe captive.	74
Tableau II-42: Validation de l'algorithme : essai de pompage en présence de frontières dans une nappe captive	75
Tableau II-43: Variables d'entrée de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.	75
Tableau II-44: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.	76
Tableau II-45: Validation de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.	76
Tableau II-46: Variables d'entrée de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans l'aquifère dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.	77
Tableau II-47: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans l'aquifère dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.	77
Tableau II-48: Validation de l'algorithme	77
Tableau III-1: Données utilisées pour l'étude de l'influence de la durée de pompage sur le rayon d'action et le cône de dépression.	79
Tableau III-2: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient d'emmagasinement sur le rayon d'action et le cône de dépression.	80
Tableau III-3: Données utilisées pour l'étude de l'influence de la transmissivité sur le rayon d'action et le cône de dépression.	81
Tableau III-4: Données utilisées pour l'étude de l'influence du débit de pompage sur le rayon d'action.	82

Tableau III-5: Données utilisées pour l'étude de l'influence de la profondeur du puits sur le rayon d'action et cône de dépression.....	83
Tableau III-6 : Données utilisées pour l'étude de l'influence du facteur de drainance sur le rayon d'action et le cône de dépression.	85

Liste des figures

Figure I-1: Courbes bi-logarithmiques et semi-logarithmiques théoriques du rabattement (A et A' : nappe captive, B et B' : nappe libre, C et C' : nappe semi-captive) (Kruseman & De Ridder, 1994).....	24
Figure I-2 : Effets de présence de frontières sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (A et A' : frontière d'alimentation, B et B' : frontière imperméable) (Kruseman & De Ridder, 1994).	26
Figure I-3 : Effet de la pénétration partiel du puits sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (Kruseman & De Ridder, 1994).	26
Figure I-4 : Effet du stockage d'eau dans les puits de grand diamètre sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (Kruseman & De Ridder, 1994).	27
Figure I-5 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe captive (Duffield, 2007).....	28
Figure I-6: Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe semi captive (Duffield, 2007).....	33
Figure I-7 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe libre (Duffield, 2007).....	36
Figure I-8 : Courbe du rabattement en fonction du temps pour les aquifère à faible conductivité hydraulique (Robbins, 2016).....	39
Figure I-9 : Courbe du rabattement en fonction du temps pour les aquifère à conductivité hydraulique importante (Robbins, 2016).	40
Figure I-10 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans (a) une nappe captive et (b) une nappe libre (Duffield, 2007).....	40
Figure II-1 : Structure global de l'outil	46
Figure II-2 : Etape de résolution du modèle (outil de simulation)	47
Figure II-3 : Etape de résolution du modèle (outil d'interprétation)	47
Figure II-4 : Algorithme général de l'interprétation des tests hydrauliques (essais de pompage /slug test).....	51
Figure II-5 : Essai de pompage idéal dans une nappe captive (Duffield, 2007).....	52
Figure II-6 : Courbe d'ajustement de la méthode de Theis aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.	53
Figure II-8 : Courbe d'ajustement de la méthode de Jacob aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.	55
Figure II-10 : Essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive (Duffield, 2007).....	56
Figure II-13 : Essai de pompage idéal dans une nappe libre (Duffield, 2007).	58
Figure II-15 : Graphes des résidus (essai de pompage en présence de frontière, nappe captive ,méthode de Stallman).	61
Figure II-17 : Réponse d'un essai de slug dans une nappe à conductivité hydraulique importante	67
Figure II-19 : Algorithme général de simulation des tests hydrauliques (essais de pompage /slug test).....	70
Figure II-20 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Theis.	71
Figure II-21 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Walton	72
Figure II-22 : Schéma des systèmes de puits-images d'une nappe comportant des limites hydrauliques (Kruseman & De Ridder, 1994).	73
Figure II-23 : Vue en plan d'un aquifère à chenal parallèle (Kruseman & De Ridder, 1994). ..	74
Figure II-25 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Hvorslev.....	76
Figure II-26 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Butler	77
Figure III-1 : Cône de dépression pour différentes valeurs de durée de pompage.....	80
Figure III-2 : Cône de dépression pour différentes valeurs de coefficient d'emmagasinement.	81

Figure III-3 : Cône de dépression pour différentes valeurs de transmissivité.	82
Figure III-4 : Courbe rabattement/distance pour différentes valeurs de débit de pompage.	83
Figure III-5 : Cône de dépression pour différentes configurations du puits de pompage et puits d'observation	84
Figure III-7 : Courbe rabattement/temps (a) nappe captive ; (b) nappe semi captive.....	86
Figure III-8 : Courbe rabattement/temps pour différentes profondeurs du puits.	86

Introduction générale

Les nappes souterraines représentent une réserve majeure d'eau douce sur Terre; ces nappes sont exploitées pour divers usages : pour la consommation humaine (eau potable), l'agriculture (irrigation) et l'industrie (eau industrielle). L'importance des eaux souterraines ne se limite pas à leur exploitation et leur usage par l'homme, mais elles jouent notamment un rôle important dans l'environnement surtout en période d'étiage où elles contribuent au maintien du niveau des lacs et le débit de base des cours d'eau. L'importance économique et environnementale des eaux souterraines fait de leur préservation un facteur de développement durable. Pour les générations futures, compte tenu des ressources qu'elles représentent, en quantité et en qualité, les eaux souterraines constituent un patrimoine essentiel. Il est nécessaire également de souligner leur fragilité et leur vulnérabilité.

De nos jours la surexploitation des eaux souterraines représente une menace principale sur ces nappes, la surexploitation signifie qu'on puise l'eau en plus grande quantité par rapport à la capacité de réalimentation. On ne laisse pas le temps à l'eau de pluie de s'infiltrer pour recharger la nappe. Le niveau de l'eau dans la nappe baisse alors avec parfois des conséquences désastreuses pour la nature et pour l'homme.

Avant d'exploiter les nappes souterraines et dans le but d'éviter leur surexploitation; des essais hydrauliques (essais de pompage, *slug test*, essais par palier, etc.) doivent être effectués afin d'explorer les propriétés hydrauliques des aquifères et proposer une exploitation optimale de ces derniers. Ils permettent également de vérifier la pérennité de la nappe exploitée.

Ce mémoire est un exposé sur la conception et l'élaboration d'un outil informatique - logiciel- pour la simulation et l'interprétation des testes hydrauliques dans les puits et forages d'eau à travers un milieu poreux saturé. Il a été scindé en quatre chapitres :

Le premier chapitre commence par donner quelques notions de base en hydrogéologie pour ensuite parler des types de tests hydrauliques en spécifiant les différentes méthodes utilisées pour le calcul des caractéristiques des formations aquifères sédimentaires. Ces méthodes sont par la suite utilisées pour développer les algorithmes de programmation.

Dans le deuxième chapitre, le code de calcul (logiciel) développé est présenté ; en commençant par la définition du modèle conceptuel, les cas abordés et les algorithmes développés. À la fin de ce chapitre les algorithmes sont validés avec des données de référence.

Le dernier chapitre est consacré à des applications sur le logiciel développé permettant a démontré l'utilité et la capacité de cet outil.

Enfin, une conclusion générale résumant les travaux réalisés lors de ce mémoire, et présentant des perspectives futures à ce travail est donnée. Ce mémoire se clôture par un manuel d'utilisation de logiciel réalisé à fin de faciliter son usage.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

I. Etude bibliographique

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les principales caractéristiques des milieux poreux saturés ainsi que les équations régissant l'hydrodynamique dans ces milieux. Nous présenterons ensuite les différents types d'essais de pompage, leur interprétation ainsi que les différentes méthodes utilisées pour le calcul des caractéristiques de ces milieux. La dernière partie de ce chapitre traite les *slug tests* et leur interprétation.

I.2 Ecoulement dans un milieu poreux saturé

I.2.1 Définition des milieux poreux

Le milieu poreux est l'ensemble des grains solides ou d'agrégats autour desquels existent des espaces vides appelés pores, qui peuvent être interconnectés ou non. Ces vides peuvent être occupés par de l'eau, de l'air ou par d'autres fluides. Les pores reliés entre eux permettent l'écoulement d'un ou plusieurs fluides. Lorsque les pores du milieu sont occupés par une seule phase fluide, le milieu est dit monophasique et lorsqu'ils sont occupés par plusieurs phases fluides, le milieu est dit multiphasique. Nous devons noter qu'un milieu occupé uniquement par la phase liquide est dit « saturé » et « insaturé » dans le cas contraire (Belmihoub & Mekhnache, 2017).

La phase solide d'un milieu poreux (matrice) ou squelette peut se présenter sous deux formes:

- **Milieu poreux non consolidé :**

La phase solide est faite de grains ou de fibres non soudés entre eux (graviers, sables, limons, billes de verre, etc.). Les billes de verre sont très couramment utilisées pour réaliser les appareils destinés à étudier les lois qui régissent les écoulements et les phénomènes de transfert. Quant aux fibres, nous pouvons rencontrer soit les fibres minérales (amiante, laine de verre), ou les fibres organiques (ex. coton).

- **Milieu poreux consolidé :**

Dans ce genre de milieu, la matière solide est compacte et ne peut se diviser en grains ou en fibres. À titre d'exemple, les roches calcaires qui présentent des séries de fissures reliées entrent elles ou encore les grès qui sont des roches constituées par des grains de sable soudés entrent eux par un ciment et des argiles.

I.2.2 Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux

- **Conductivité hydraulique K**

Le coefficient de conductivité hydraulique K d'un matériau représente son aptitude à laisser circuler l'eau à travers lui, cette conductivité hydraulique est définie comme le facteur de proportionnalité, relient le flux q (débit par unité de surface) au gradient de potentiel φ induisant l'écoulement.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Si le milieu est saturé, ce coefficient est égal au coefficient de perméabilité classique de Darcy. Si le milieu est anisotrope, K revêt la forme d'un tenseur.

- **Coefficient d'emmagasinement S**

Le coefficient d'emmagasinement est défini comme le volume d'eau libéré ou emmagasiné à travers une surface d'aire égale à l'unité, pour une unité de variation de la charge hydraulique normale à cette surface. Il est désigné par le symbole S , sans dimension. Le coefficient d'emmagasinement S des zones captives ou semi captive d'une nappe dépend de l'élasticité des roches et de l'eau, et sa grandeur est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} .

Le coefficient d'emmagasinement des nappes libres S_y équivaut en pratique à la porosité efficace (celle des pores ouverts) de la roche, car dans une nappe libre les effets de l'élasticité de la roche et de l'eau sont généralement négligeables.

- **Facteur de drainance L**

On appelle drainance les phénomènes d'échange d'eau entre la nappe principale et la couche semi-perméable. Le facteur de drainance, est une propriété des aquifères à nappe semi-captive, détermine la répartition de ces échanges dans cette dernière. En d'autres termes, il permet de connaître la provenance de l'eau tirée d'un puits. Une valeur élevée de ce facteur indique une grande résistance à l'écoulement dans la couche semi-perméable, par rapport à la résistance dans la nappe principale ; proprement dite; dans ce cas, l'influence de la drainance est faible.

Il est désigné par le symbole L , a la dimension d'une longueur.

Son équation est définit comme suite :

$$L = \sqrt{\frac{KDD'}{K'}} \quad \text{I-1}$$

Avec :

K : la conductivité hydraulique de l'aquifère, D : l'épaisseur de l'aquifère, K' : la conductivité hydraulique de l'aquitard, D' : l'épaisseur de l'aquitard.

- **Resistance hydraulique verticale c**

La résistance hydraulique verticale, encore appeler paramètre inverse de drainance, est une propriété des aquifères à nappe semi-captive. C'est le rapport entre l'épaisseur saturée D' de la couche semi-captive et sa conductivité hydraulique verticale K' , soit D'/K' . Elle caractérise la résistance de la couche semi-perméable à la drainance vers le haut ou vers le bas. On la désigne par le symbole c , qui a pour dimension le temps.

I.2.3 Différents types de nappes d'eau dans les milieux poreux

- **Nappe captive**

Un aquifère à nappe captive est une couche complètement saturée dont les limites supérieures et inférieures sont étanches. Naturellement, les couches parfaitement étanches sont rares dans la réalité. Dans une nappe captive, la pression, d'eau est normalement supérieure à la pression atmosphérique, et les écoulements souterrains s'y font sous pression.

- **Nappe semi-captive**

Un aquifère à nappe semi-captive ou à drainance est une couche complètement saturée, mais dont la limite supérieure est semi-perméable et la limite inférieure est soit étanche, soit semi-perméable. On appelle ici couche semi-perméable une couche ayant une conductivité hydraulique faible mais mesurable. Si l'on rabat le niveau piézométrique d'une telle nappe, par exemple par un pompage, il s'établit une circulation de l'eau entre la couche semi-perméable et l'aquifère ou l'on pompe. Cet écoulement est vertical car étant donné que le coefficient de perméabilité du toit est très faible, on peut y négliger la composante horizontale de l'écoulement.

- **Nappe libre**

Un aquifère à nappe libre est une couche limitée dans sa partie inférieure par un aquiclude (formation hydrogéologique imperméable) et ne présente aucune limite étanche dans sa partie supérieure, cette nappe est en équilibre de pression avec l'atmosphère.

I.2.4 Variation des propriétés d'un milieu poreux

- **Homogénéité/hétérogénéité**

Un milieu est dit homogène lorsqu'il représente les mêmes caractéristiques dans l'espace, le cas contraire est dit hétérogène.

Milieu homogène : $K(x,y,z)=\text{constant}$;

Milieu hétérogène : $K(x,y,z)\neq \text{constant}$.

- **Isotropie/anisotropie**

Un milieu isotrope représente les mêmes propriétés mécaniques et physiques dans toutes les directions, dans le cas contraire le milieu est considéré comme anisotrope

Le tenseur de la conductivité hydraulique dans le cas d'anisotropie est écrit sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} K_x & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_y & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_z \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un milieu isotrope $K_x=K_y=K_z=K_{xy}=K_{xz}=K_{yx}=K_{yz}=K_{zx}=K_{zy}=K$.

I.2.5 Equations de l'écoulement en milieu poreux saturé

La dynamique de l'eau en milieu poreux saturé est régie par la loi de Darcy et l'équation de continuité.

a) La loi de Darcy

L'eau souterraine s'écoule du niveau d'énergie haut vers des niveaux d'énergie plus bas. Cette énergie est essentiellement la somme des deux processus qui sont l'altitude et la pression.

La loi de Darcy en milieu poreux exprime la vitesse de filtration en régime permanent ou transitoire en fonction du gradient de pression et de la gravité. Pour un fluide compressible, la loi de Darcy s'écrit sous la forme générale :

$$v = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla z) \quad \text{I-2}$$

Avec :

v : vitesse;

k : la perméabilité intrinsèque du milieu ;

μ : viscosité dynamique du fluide ;

p : la pression ;

ρ : la masse volumique ;

z : cote définie selon un axe vertical ;

g : Accélération de la pesanteur.

En supposant que la masse volumique est invariable spatialement, la loi de Darcy se simplifie de la façon suivante :

$$v = -\frac{k\rho g}{\mu} \nabla \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) = -K \nabla h \quad \text{I-3}$$

Ou

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad \text{I-4}$$

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad \text{I-5}$$

h : est le potentiel hydraulique ou la charge piézométrique [m];

K : représente la conductivité hydraulique [L.T⁻¹].

b) Validité de la loi de Darcy

Pour que la loi de Darcy soit applicable c'est évident que l'écoulement doit rester en régime laminaire linéaire et de ne pas dépasser le seuil d'apparition de turbulence. Le deuxième critère dépend de l'échelle de l'écoulement, la loi de Darcy est applicable seulement sur l'échelle macroscopique.

c) L'équation de continuité

Le principe de conservation de la masse d'un fluide en mouvement est exprimé par l'équation de continuité. Au niveau d'un volume élémentaire, la somme de la variation de la masse du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des flux massiques traversant la surface de ce volume est égale à la masse du fluide prélevé ou injecté (Zaouali, 2015) :

$$\frac{\partial(\omega\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho v) = \rho q_s \quad \text{I-6}$$

Avec :

q_s : représente le débit par unité de volume prélevé [s⁻¹].

ω : porosité [-].

ρ : masse volumique de l'eau [kg/m³].

t : temps [s].

La porosité ω est indépendante du temps si le milieu poreux est indéformable. Si l'on ne considère que la partie hydrodynamique et pour une température constante, la masse volumique ρ ne dépend que de la pression p .

$$\frac{\partial(\omega\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\omega\rho)}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{S_s}{g} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{I-7}$$

Avec, S_s : coefficient d'emménagement spécifique [m⁻¹].

$$S_s = g \frac{\partial(\omega\rho)}{\partial p} \quad \text{I-8}$$

En introduisant cette dernière expression dans l'équation de continuité, on obtient une forme en fonction de la pression. Si l'on admet que la variation spatiale de la masse volumique est négligeable, en simplifiant par ρ , l'équation de continuité devient :

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$$\frac{S_s}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla v = f \quad \text{I-9}$$

La forme la plus courante de l'équation de continuité est une expression liant la variation temporelle de la charge et la variation spatiale de la vitesse de Darcy. La relation entre la charge et la pression est donnée par l'équation (I-3).

En négligeant le terme $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ par rapport aux autres termes, nous obtenons :

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{I-10}$$

Si on remplace la relation (I-10) dans l'équation I-9), l'équation de bilan de masse pour un fluide incompressible dans un milieu poreux indéformable s'écrit sous la forme générale:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla v = q_s \quad \text{I-11}$$

d) Ecoulements 3D

Dans un système de coordonnées cartésien 3D et pour un milieu anisotrope l'équation de régissant les écoulements saturés dans les milieux poreux s'écrit de la forme suivante (Boukhemacha, 2020):

Pour un régime non permanent :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(DK_{xx} \frac{dh}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_{yy} \frac{dh}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(DK_{zz} \frac{dh}{dz} \right) = DS_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad \text{I-12}$$

Pour un régime permanent :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(DK_{xx} \frac{dh}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_{yy} \frac{dh}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(DK_{zz} \frac{dh}{dz} \right) = Q \quad \text{I-13}$$

Avec :

D : l'épaisseur saturé de l'aquifère [m];

Q : débit [m³/s];

S_s : le coefficient d'emmagasinement spécifique [m⁻¹].

I.3 Essais de pompage et leur interprétation

I.3.1 Le but d'un essai de pompage

Avant d'exploiter l'eau d'une nappe, il est nécessaire de bien étudier l'aquifère afin de dimensionner les ouvrages d'exploitation. Une telle étude se fait sous forme d'essais de

Chapitre 1 : Etude bibliographique

pompage: étude de l'évolution de la charge hydraulique de la nappe dans le puits et/ou dans des piézomètres proches en fonction du débit prélevé et du temps écoulé. De manière très schématique, on dira que le premier but de l'essai de pompage sera de déterminer approximativement l'importance du rabattement de l'eau dans le puits d'exploitation en fonction du débit, afin de déterminer la profondeur de la pompe d'exploitation. Un second but important est de vérifier si le forage a été bien fait (pertes de charge raisonnables) et le troisième but est la mesure des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (T et S) afin de pouvoir proposer une exploitation optimale de l'aquifère (nature et distribution des forages exploitants).

I.3.2 Les types d'essais de pompage

Il existe de nombreux types d'essais parmi lesquels il faut choisir, les essais les mieux adaptés aux situations dans lesquelles travaillent l'ingénieur:

a) Essais par paliers

Un pompage par paliers, c'est un essai qui permet d'établir la courbe caractéristique de l'ouvrage : c'est la courbe des rabattements dans l'ouvrage en fonction des débits pompés. Elle constitue la fiche d'identité de l'ouvrage.

Objectif : déterminer le débit critique

Cette courbe présente généralement une première partie linéaire, puis une augmentation rapide du rabattement en fonction du débit, traduisant un passage en régime d'écoulement turbulent. Le passage d'un écoulement majoritairement linéaire à un écoulement turbulent correspond à un débit appelé « débit critique ». Il est parfois possible de mettre en évidence graphiquement le débit critique en repérant le point d'inflexion qui sépare les deux portions de courbes. Dans la pratique, cette détermination peut s'avérer subjective car elle est fortement liée à la position des points de l'essai par palier et elle dépendant de la bonne exécution du test. Pour vérifier que l'essai par paliers s'est déroulé sans perturbations (telles que des influences externes, le développement ou le colmatage de l'ouvrage pendant l'essai), le graphique des rabattements spécifiques (s/Q) en fonction du débit (Q) doit donner une droite.

Théorie

Le rabattement peut s'exprimer et se décomposer en deux termes :

$$s = B.Q + C.Q^2 \quad \text{I-14}$$

Avec :

s : rabattement;

Q : débit de pompage;

B : perte de charge linéaire;

C : perte de charge quadratique.

Le premier terme ($B.Q$) correspond au rabattement induit par des pertes de charge linéaires dues à la circulation de l'eau dans l'aquifère et à proximité du forage. Le deuxième terme ($C.Q^2$) correspond à un rabattement additionnel induit par des pertes de charge

Chapitre 1 : Etude bibliographique

quadratiques, c'est-à-dire proportionnelles au carré du débit (ou de la vitesse de l'eau). Ces pertes sont :

- provoquées par l'écoulement turbulent dans les crépines et dans le massif de gravier (mis en place dans le trou du forage, entre le tubage et le terrain naturel) ;
- négligeables dans l'aquifère, mais au-delà d'une certaine valeur, appelée débit critique, elles peuvent devenir prépondérantes et néfastes à proximité immédiate du forage ;
- dépendantes de l'équipement du captage (un équipement bien conçu réduit les pertes de charge quadratiques).

Il faut éviter de pomper au-delà du débit critique pour au moins 2 raisons :

- éviter l'augmentation de la dépense énergétique du pompage ;
- éviter les risques de détérioration de l'ouvrage : remaniement du massif de gravier avec perte de son rôle de filtre et venues d'eau turbide, érosion des crépines, usure de la pompe, etc.

b) Essais à débit constant

L'essai à débit constant est l'essai de pompage le plus couramment pratiqué, et son concept est très simple : on effectue des pompages à débit constant sur une longue durée (de plusieurs heures à plusieurs jours, voire plusieurs semaines) ; ce débit peut être constant sur toute la période de pompage ou par partie ; et en enregistrant les niveaux d'eau et les débits de pompage.

Pour que ces essais à débit constant aient une utilité maximale, il faudrait mesurer les niveaux d'eau à la fois dans un forage d'observation et dans le forage de pompage (ou mieux encore, dans plusieurs forages d'observation situés à des distances différentes du forage de pompage, pour plus de fiabilité dans les résultats). L'analyse des données des essais à débit constant permet de fournir des informations sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère.

c) Essai de remontée

L'essai de remontée n'est pas un essai de pompage au sens strict du terme, car il consiste à observer la remontée de l'eau après l'arrêt du pompage. Les essais de remontée sont dignes d'intérêt pour plusieurs raisons :

- ils permettent de vérifier les caractéristiques de l'aquifère déduites des essais de pompage, avec un minimum d'effort. Il suffit de prolonger l'observation après que la pompe a été débranchée.
- dans ce type de test, il n'y a pas de problème de perte de charge due à des turbulences.

Les différents types d'essai peuvent être réalisés individuellement ou combinés. En général, une suite complète d'essai commence par un essai par paliers, dont les résultats aident à déterminer le débit de pompage de l'essai à débit constant, et se termine par l'essai de remontée. Le concept de l'essai peut être adapté pour une utilisation dans des forages de tailles diverse (petite, moyenne ou grande), les différences principales étant le débit de pompage, la durée de l'essai et la complexité du système d'observation.

I.3.3 L'interprétation des essais de pompage

Le calcul des caractéristiques hydrauliques serait relativement facile si le système aquifère (le type d'aquifère) et du puits de pompage étaient connus avec précision. Ce n'est généralement pas le cas, donc interpréter un test de pompage consiste avant tout à identifier un système inconnu. L'identification du système repose sur des modèles mathématiques dont les caractéristiques sont supposées représenter les caractéristiques du système aquifère réel.

Dans un essai de pompage, les types d'aquifères et du puits affectent le comportement de rabattement de la nappe. Ainsi, pour identifier un système aquifère, il faut comparer son comportement de rabattement (la courbe du rabattement en fonction du temps $s=f(t)$) avec celui des différents modèles théoriques (les courbes théoriques). Le modèle qui se compare le mieux au système étudié est ensuite sélectionné pour le calcul des caractéristiques hydrauliques.

Pour identifier le système d'aquifère, deux types de graphe peuvent être utilisés. Des graphes bi-logarithmiques du rabattement en fonction du temps, ou des graphes semi-logarithmiques dont le rabattement est représenté sur une échelle linéaire.

a) Effet du type d'aquifère sur la courbe théorique de rabattement

Les courbes théoriques données dans Figure I-1 sont obtenues à partir des conditions idéales (aquifères homogènes et isotropes) dans un puits totalement pénétré dans l'aquifère sans l'influence de stockage d'eau dans le puits.

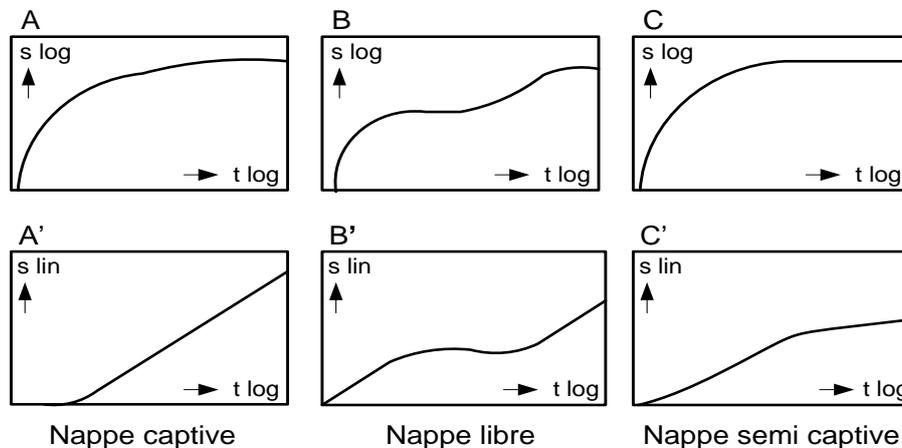


Figure I-1: Courbes bi-logarithmiques et semi-logarithmiques théoriques du rabattement (A et A' : nappe captive, B et B' : nappe libre, C et C' : nappe semi-captive) (Kruseman & De Ridder, 1994).

Aquifère à nappe captive

Pour un aquifère à nappe captive, l'eau pompée est entièrement retirée du stock de l'aquifère ou le pompage est effectué, l'écoulement vers le puits dans ce cas est horizontal. La courbe théorique de ce cas est représentée dans la Figure I-1(A et A').

Aquifère à nappe semi-captive

Pour un aquifère à nappe semi-captive, l'eau pompée provient non seulement de la nappe, mais aussi de la couche semi-perméable qui la couvre. Par conséquent, l'eau de la nappe libre

Chapitre 1 : Etude bibliographique

contenue dans cette couche rejoint la nappe principale, par un écoulement vertical et dirigé de haut en bas. La quantité d'eau ainsi mobilisée dans la couche supérieure est proportionnelle à la différence de charge entre l'eau du toit et celle de la nappe principale, et inversement proportionnelle à la résistance hydraulique verticale de la zone saturée de la couche semi-perméable.

Comme le montre Figure I-1(C et C'), le rabattement au début du pompage a le même comportement que dans un aquifère à nappe captive car, l'eau pompée ne provient que du stockage de l'aquifère où le pompage est effectué, après que l'eau de la couche semi-perméable rejoint l'aquifère le rabattement dans la nappe semi-captive tend à devenir horizontal.

Aquifère à nappe libre

Comme le montre Figure I-1(B et B'), on peut visualiser 3 étapes différentes dans la courbe théorique de rabattement d'un aquifère à nappe libre:

- *La première étape (premières minutes du pompage)* : dans cette période la nappe libre se comporte comme une nappe captive c'est-à-dire l'eau prévenant du pompage ce n'est que l'eau de stockage de l'aquifère, et l'écoulement vers le puits est horizontal, le rabattement à un comportement similaire à celui de la nappe captive ;
- *La deuxième étape* : reflète l'effet de la déshydratation qui accompagne la chute de la nappe phréatique. L'effet de la déshydratation sur le comportement du rabattement est comparable à celui de drainance (nappe semi-captive) caractérisé par une augmentation plus lente du rabattement qui tend à l'horizontale ;
- *La dernière étape* : l'écoulement dans cette étape redevient horizontal et la courbe de rabattement est de nouveau assimilable à celle dans une nappe captive.

b) Effet de certaines conditions sur la courbe théorique de rabattement

Aquifères limités par au moins une frontière

Le comportement du rabattement durant le pompage peut être affecté par la présence d'une frontière imperméable ou d'une frontière d'alimentation. Cela qui conduit à des modifications dans la forme de la courbe théorique. Comme le montre Figure I-2 la présence d'une frontière d'alimentation stabilise le rabattement dans le puits par contre la présence d'une frontière imperméable double ce dernier.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

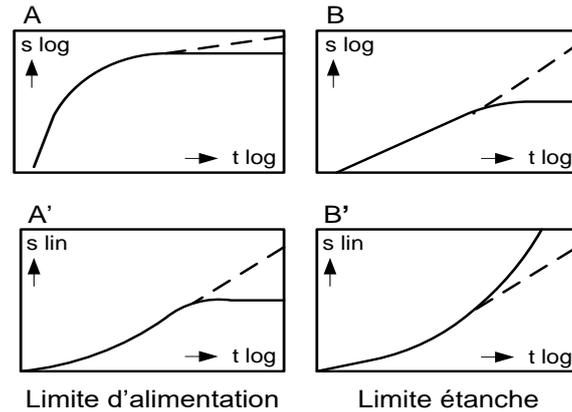


Figure I-2 : Effets de présence de frontières sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (A et A' : frontière d'alimentation, B et B' : frontière imperméable) (Kruseman & De Ridder, 1994).

Puits partialement pénétré

Les modèles théoriques supposent généralement que le puits de pompage pénètre complètement dans l'aquifère, de sorte que le flux vers le puits est horizontal. Avec un puits partialement pénétré, la condition d'écoulement horizontal n'est pas satisfaite, du moins pas à proximité du puits. Des composantes d'écoulement vertical sont ainsi induites dans l'aquifère, et celles-ci s'accompagnent avec des pertes de charge supplémentaires dans et à proximité du puits. Figure I-3 montre l'effet de la pénétration partielle. Les pertes de charge supplémentaires qu'il induit se reflètent clairement.

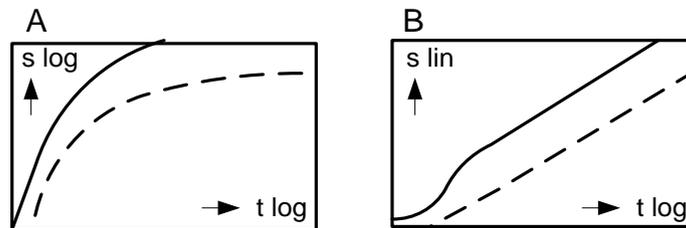


Figure I-3 : Effet de la pénétration partielle du puits sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (Kruseman & De Ridder, 1994).

Puits à grand diamètre

Tous les modèles théoriques supposent le puits est adimensionnel, ce qui signifie que les effets de stockage dans le puits de forage peuvent être négligés. Mais tous les puits ont une certaine dimension et stockent donc de l'eau qui doit d'abord être retirée au début du pompage. De toute évidence, les effets du stockage dans un puits de forage apparaîtront aux premiers temps de pompage et peuvent durer de quelques minutes à plusieurs minutes, selon la capacité de stockage du puits. Comme le montre Figure I-4 le rabattement est retardé par effet de stockage d'eau dans les puits de grand diamètre au début du pompage.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

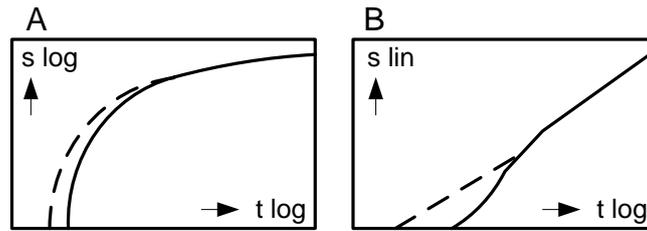


Figure I-4 : Effet du stockage d'eau dans les puits de grand diamètre sur la courbe théorique de rabattement d'une nappe captive (Kruseman & De Ridder, 1994).

I.3.4 Corrections des influences extérieures

Les rabattements observés peuvent être influencés par les facteurs dont on ne tient pas compte dans les méthodes d'interprétation; tels que la réalimentation ou le drainage de la nappe, les changements de pression atmosphérique, l'influence de la marée, etc.

Avant d'interpréter les données expérimentales, le rabattement doit être corrigé si l'aquifère est soumis à ces influences externes. Pour savoir si cette correction est nécessaire, une analyse des données prise avant et après le pompage doit être effectuée. Si après la période de récupération le niveau d'eau revient à son niveau initial, on dit que l'aquifère n'est pas sujet à une influence externe d'où y a pas de nécessité pour la correction du rabattement (Kruseman & De Ridder, 1994).

a) Variations dans un seul sens

La nappe peut être influencée par une alimentation ou une vidange naturelle, qui produit une élévation ou une baisse continue du niveau piézométrique.

Méthode de correction

La correction du rabattement se fait comme suit (Kruseman & De Ridder, 1994):

- Tracer la courbe du niveau d'eau en fonction du temps sur du papier arithmétique; cette courbe commence quelques jours avant le pompage d'essai et doit se poursuivre jusqu'à la fin de la remontée ;
- Interpoler les portions de cette courbe tracée avant le pompage et après la remontée ;
- Lire la valeur h_0 qui correspond au temps t_0 du début du pompage ;
- Lire la valeur h_1 qui correspond au temps t_1 s'il n'y avait pas de pompage à partir de la courbe interpolée;
- Calculer le changement de niveau d'eau due à la variation naturelle $\Delta h = h_1 - h_0$;
- Calculer le rabattement corrigé s' :
 - Dans le cas d'un drainage naturel: $s' = s - \Delta h$;
 - Dans le cas d'une réalimentation naturelle: $s' = s + \Delta h$.

b) Fluctuations périodiques

Les fluctuations périodiques peuvent être dues à l'influence de la marée ou des variations de niveau des rivières, à la différence d'évapotranspiration entre le jour et la nuit, ou encore aux

Chapitre 1 : Etude bibliographique

pulsations régulières de la pression atmosphérique. La courbe du niveau d'eau en fonction du temps, couvrant un pré-test suffisamment long et une post-récupération, fournira les informations nécessaires pour corriger le niveau de l'eau observé pendant le test (Kruseman & De Ridder, 1994).

c) Fluctuations régulières non périodiques

Les fluctuations régulières non périodiques, dues par exemple aux changements de pression atmosphérique ou l'influence du passage des trains, peuvent aussi être détectées à l'aide d'un diagramme du niveau d'eau en fonction du temps.

d) Fluctuations uniques

On désigne par une fluctuation unique, les fluctuations causées par un tremblement de terre, un terrain lourd ou la crue brutale d'une rivière en liaison hydraulique avec la nappe. Généralement dans ces cas on ne peut pas corriger le rabattement et les mesures prises doivent être recommencées une fois la situation redevenue normale.

I.3.5 Les méthodes d'interprétation

Dans ce qui suit, nous allons présenter une synthèse d'une série de méthodes d'interprétation des essais de pompages regroupés selon le type de nappe.

a) Aquifère à nappe captive

La Figure I-5 donne un schéma descriptif de la configuration et des paramètres d'un essai de pompage dans une nappe captive. Pour ce type d'aquifère, nous allons présenter les méthodes suivantes: la méthode de Theis (1935), la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946), la méthode de Stallman (Ferris et al. 1962), la méthode de Theis modifiée par Huntush (1961a; 1961b), la méthode de Cooper et Jacob modifiée par Huntush (1961b), la méthode de Birsoy-Summers (1980) et la méthode d'Eden Hazel (1973).

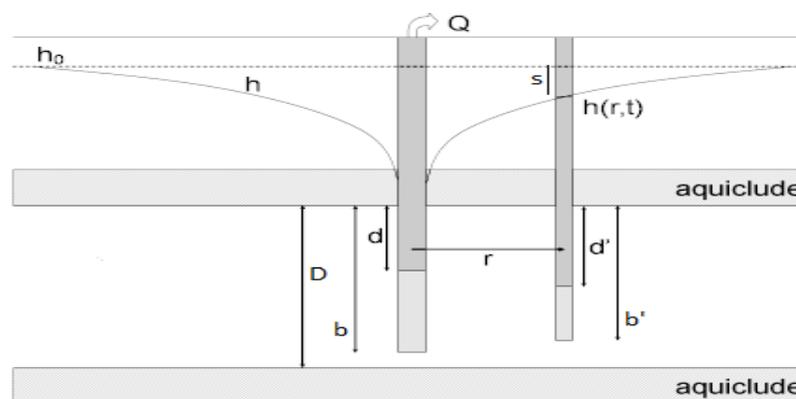


Figure I-5 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe captive (Duffield, 2007).

Essais dans des conditions idéales

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Les hypothèses générales utilisées dans l'interprétation de tels essais sont comme suit:

1. L'aquifère est d'une surface infinie ;
2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme sur toute la surface influencée par le pompage ;
3. Un essai de pompage avec un puits totalement pénétré dans la nappe ;
4. Le diamètre du puits de pompage est suffisamment petit que le stockage dans ce dernier est négligé ;
5. Un essai de pompage à débit constant ;
6. Régime transitoire.

Le Tableau I-1 donne une synthèse des quelques solutions analytiques décrivant le rabattement de la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Tableau I-1: Méthode de Theis et méthode de Jacob (Kruseman & De Ridder, 1994).

Méthode	Theis (1935)	Jacob (Cooper & Jacob, 1946)
Equations	$s = \frac{Q}{4\pi KD} w(u) \quad \text{I-15}$ $w(u) = \int_u^\infty \frac{\exp(-y)}{y} dy \quad \text{I-16}$ $u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad \text{I-17}$	$s = \frac{2.3 * Q}{4\pi KD} \log\left(\frac{2.25 KDt}{r^2 S}\right) \quad \text{I-18}$
Paramètres	s : rabattement [m], Q : débit [m ³ /j], t : temps [j], KD : transmissivité r : distance entre le puits de pompage et le piézomètre [m] S : coefficient d'emmagasinement [-]	

Essais avec frontière

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la première hypothèse par :

- a) Présence de limite dans la zone influencée par le pompage (frontière étanche ou d'alimentation).

Tableau I-2 résume les équations utilisées par la méthode de Stallman (Ferris, D.B.Knowless, R.H.Brown, & R.W.Stallman, 1962), cette dernière décrit le rabattement dans la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-2: Méthode de Stallman (Kruseman & De Ridder, 1994)

Méthode	Stallman (Ferris et al., 1962)
Equations	Une frontière rectiligne 1. Frontière d'alimentation $s = \frac{Q}{4\pi KD} [w(u) - w(r_{r1}^2 u)]$ <div style="text-align: right;">I-19</div>
	2. Frontière imperméable $s = \frac{Q}{4\pi KD} [w(u) + w(r_{r1}^2 u)]$ <div style="text-align: right;">I-20</div>
	Deux frontières rectilignes séparées par un angle droit 1. Une frontière d'alimentation et une imperméable $s = \frac{Q}{4\pi KD} [w(u) + w(r_{r1}^2 u) - w(r_{r2}^2 u) - w(r_{r3}^2 u)]$ <div style="text-align: right;">I-21</div>
	2. Deux frontières imperméables $s = \frac{Q}{4\pi kD} [w(u) + w(r_{r1}^2 u) + w(r_{r2}^2 u) + w(r_{r3}^2 u)]$ <div style="text-align: right;">I-22</div>
	3. Deux frontières d'alimentation $s = \frac{Q}{4\pi kD} [w(u) - w(r_{r1}^2 u) - w(r_{r2}^2 u) + w(r_{r3}^2 u)]$ <div style="text-align: right;">I-23</div>
	$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad \text{I-24} \quad r_{ri} = \frac{r_i}{r} \quad \text{I-25}$
Paramètres	s : rabattement [m]; Q : débit [m ² /j] ; t : temps [j]; KD : transmissivité; r : distance entre le puits de pompage et le piézomètre [m]; S : coefficient d'emmagasinement [-] ; r_i : la distance entre le piézomètre et de le puits imaginaire [m].

Essais avec puits partiellement pénétré

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la troisième hypothèse par :

- b) Un essai de pompage avec un puits partiellement pénétré dans la nappe ;

Le Tableau I-3 donne une synthèse des quelques solutions analytiques décrivant le rabattement de la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-3 : Modifications de Huntush sur la méthode de Theis et la méthode Jacob (Kruseman & De Ridder, 1994)

Méthode	Méthode de Theis modifié par Huntush (1961a; 1961b)	Méthode de Jacob modifié par Huntush (1961b)
Equations	$s = \frac{Q}{8\pi K(b-d)} E\left(u, \frac{b}{r}, \frac{d}{r}, \frac{a}{r}\right) \quad \mathbf{I-26}$	$s = \frac{Q}{4\pi KD} \left\{ w(u) + f_s\left(\frac{r}{D}, \frac{b}{D}, \frac{d}{D}, \frac{a}{D}\right) \right\} \quad \mathbf{I-35}$
	$a = \frac{b+d}{2} \quad \mathbf{I-27} \quad B1 = \frac{b+a}{r} \quad \mathbf{I-28}$	$f_s = \frac{4D^2}{\pi^2(b-d)(b'-d')} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2}\right) k_0\left(\frac{n\pi r}{D}\right) \quad \mathbf{I-36}$
	$B2 = \frac{L+a}{r} \quad \mathbf{I-29} \quad B3 = \frac{b-a}{r} \quad \mathbf{I-30}$	$\left\{ \sin\left(\frac{n\pi b}{D}\right) - \sin\left(\frac{n\pi d}{D}\right) \right\} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi b'}{D}\right) - \sin\left(\frac{n\pi d'}{D}\right) \right\}$
	$B4 = \frac{d-a}{r} \quad \mathbf{I-31}$	
	$M(u, B) = \int_u^{\infty} \frac{\exp(-y)}{y} \operatorname{erf}(B\sqrt{y}) dy \quad \mathbf{I-32}$	
	$E\left(u, \frac{b}{r}, \frac{L}{r}, \frac{a}{r}\right) = M(u, B1) - M(u, B2) + M(u, B3) - M(u, B4) \quad \mathbf{I-33}$	
	$u = \frac{r^2 S_s}{4Kt} \quad \mathbf{I-34}$	
Paramètres	s : rabattement [m], Q : débit [m ² /j], t : temps [j], K : conductivité hydraulique [m/j] r : distance entre le puits de pompage et le piézomètre [m], S_s : coefficient d'emménagement spécifique [m ⁻¹], b : la longueur du puits pénétré dans l'aquifère [m]; d : la longueur du puits pénétré dans l'aquifère (la partie non ouverte) [m]	

Essais de pompage à débit variable

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la cinquième hypothèse par :

- c) Un essai de pompage a débit variable

Le Tableau I-4 donne une synthèse des quelques solutions analytiques décrivant le rabattement de la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-4: Méthode Theis et Birsoy-Summers (Duffield, 2007)

Méthode	Theis (1935)	Birsoy-Summers (1980)
Equations	$s = \frac{Q}{4\pi KD} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1}) w(u) \quad \text{I-37}$	$s_n = \frac{2.3 * Q_n}{4\pi KD} \log\left(\frac{2.25 KD}{r^2 S} * \beta_t\right) \quad \text{I-39}$
	$u = \frac{r^2 S}{4KD(t - t_{i-1})} \quad t > t_i \text{ et } t_0 = 0 \quad \text{I-38}$	$\beta_t = \prod_1^N (t - t_n)^{\Delta Q_n / Q_i} \quad \text{I-40}$
Paramètres	s : rabattement, Q : débit, t : temps, r : distance entre le puits et le piézomètre KD : transmissivité, S : coefficient d'emmagasinement.	

Essais de pompage avec période de récupération

d) Pour un essai de pompage avec période de récupération.

Tableau I-5 résume l'équation utilisée par la méthode de Theis (1935) pour des essais de pompage avec période de récupération.

Tableau I-5: Méthode de Theis avec période de récupération (Duffield, 2007)

Méthode	Theis (1935)
Equations	$s' = \frac{Q}{4\pi KD} [\ln(t/t') - \ln(S/S')] \quad \text{I-41}$
Paramètres	s : rabattement, Q : débit, t : temps, r : distance entre le puits et le piézomètre KD : transmissivité, S : coefficient d'emmagasinement.

Essais de pompage par palier

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la cinquième hypothèse par :

e) Essais de pompage par paliers (débit variable croissant)

Tableau I-6 résume les équations utilisées par la méthode d'Eden-Hazel (1973) pour des essais de pompage par paliers, afin de déterminer le coefficient de perte de charge quadratique dans un puits de pompage.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-6 : Méthode d'Eden-Hazel (Kruseman & De Ridder, 1994)

Méthode	Eden-Hazel (1973)
Equations	$s_{(n)} = aQ_n + b \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \log(t - t_i) \quad \text{I-42}$
	$a = \frac{2.3}{4\pi KD} \log \frac{2.25 KD}{r_w^2 S} \quad \text{I-43}$
	$b = \frac{2.3}{4\pi KD} \quad \text{I-44}$
Paramètres	s : rabattement, Q : débit, t : temps, r_w : rayon du puits [m] , KD : transmissivité, S : coefficient d'emménagement.

b) Aquifère semi-captive

Figure I-6 donne un schéma descriptif de la configuration et des paramètres d'un essai de pompage dans une nappe semi captive. Pour ce type d'aquifère, nous allons présenter les méthodes suivantes: la méthode de Walton (Huntush & Jacob, 1955), la méthode de Huntush (1960), la méthode de Vandenberg (1976; 1977), la méthode de Walton modifié par Weeks (1969) et la méthode de Huntush modifié par Weeks (1969),.

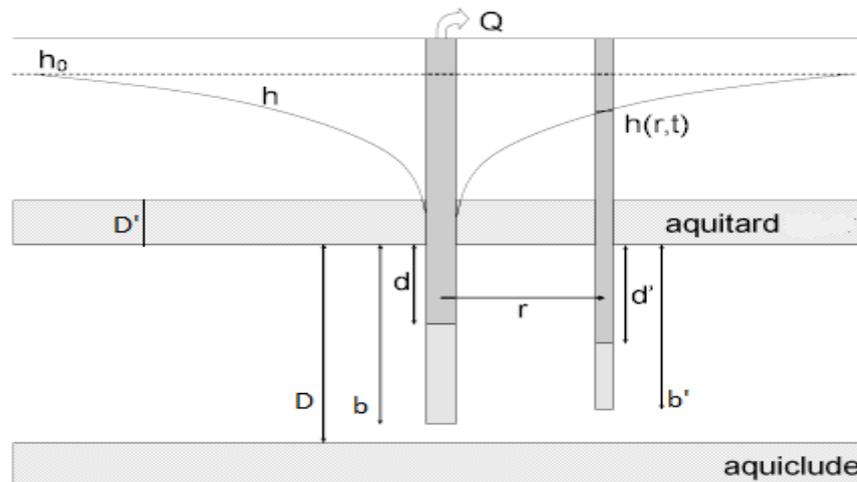


Figure I-6: Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe semi captive (Duffield, 2007).

Essais dans des conditions idéales

Les hypothèses générales

1. L'aquifère est d'une surface infinie ;
2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme sur toute la surface influencée par le pompage ;
3. Un essai de pompage avec un puits totalement pénétré dans la nappe ;

Chapitre 1 : Etude bibliographique

4. Le diamètre du puits de pompage est suffisamment petit que le stockage dans ce dernier est négligé ;
5. Un essai de pompage à débit constant ;
6. Régime transitoire.

Le Tableau I-7 donne une synthèse des quelques solutions analytiques décrivant le rabattement de la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Tableau I-7: Méthode de Walton et la méthode de Huntush (Kruseman & De Ridder, 1994)

Méthode	Walton (Huntush & Jacob, 1955)	Huntush (1960)
Equations	$s = \frac{Q}{4\pi KD} w(u, r/L) \quad \mathbf{I-45}$	$s = \frac{Q}{4\pi KD} w(u, \beta) \quad \mathbf{I-48}$
	$w(u, r/L) = \int_u^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4Ly}\right) dy \quad \mathbf{I-46}$	$w(u, \beta) = \int_u^\infty \frac{\exp(-y)}{y} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{u}}{\sqrt{y(y-u)}}\right) dy \quad \mathbf{I-49}$
	$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad \mathbf{I-47}$	$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad \mathbf{I-50}$
		$\beta = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{K' / D' S'}{KD S}} \quad \mathbf{I-51}$
Paramètres	s : rabattement [m], Q : débit [m ² /j], t : temps [j], KD : transmissivité r : distance entre le puits de pompage et le piézomètre [m] S : coefficient d'emmagasinement [-], L : facteur de drainance [m] S' : coefficient d'emmagasinement de l'aquitard [-], K' : conductivité hydraulique de l'aquitard [m/j], D' : l'épaisseur de l'aquitard [m]	

Essais avec deux frontières parallèles imperméables

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la première hypothèse par :

- a) Présence de limite dans la zone influencée par le pompage (deux frontières parallèles imperméables)

Tableau I-8 résume les équations utilisées par la méthode de Vandenberg (1976; 1977), cette dernière décrit le rabattement dans la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-8: Méthode de Vandenberg (Kruseman & De Ridder, 1994).

Méthode	Equations	Paramètre
Vandenberg (1976; 1977)	$s = \frac{Qx}{2KDw} F(u, x/L) \quad \text{I-52}$	<i>s</i> : rabattement [m] <i>Q</i> : débit [m ² /j] , <i>t</i> : temps [j], <i>KD</i> : transmissivité <i>x</i> : distance entre le puits de pompage et le piézomètre suivant la direction de la limite [m] <i>S</i> : coefficient d'emmagasinement[-], <i>L</i> : facteur de drainance [m] ; <i>w</i> : la distance qui sépare entre les deux limites parallèles [m]
	$F(u, x/L) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} y^{-3/2} \exp\left(-y - \frac{x^2}{4L^2 y}\right) dy \quad \text{I-53}$	
	$u = \frac{x^2 S}{4KDt} \quad \text{I-54}$	

Essais avec puits partiellement pénétré

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la troisième hypothèse par :

- b) Un essai de pompage avec un puits partiellement pénétré dans la nappe ;

Le Tableau I-9 donne une synthèse des quelques solutions analytiques décrivant le rabattement de la nappe pour la présente catégorie d'essais.

Tableau I-9: Modifications de Weeks sur la méthode de Walton et Huntush (Kruseman & De Ridder, 1994).

Méthode	la méthode de Walton modifié par Weeks (1969)	la méthode de Huntush modifié par Weeks (1969)
Equations	$s = \frac{Q}{4\pi KD} \left\{ w(u, r/L) + f_s \left(\frac{r}{D}, \frac{b}{D}, \frac{d}{D}, \frac{a}{D} \right) \right\} \quad \text{I-55}$	$s = \frac{Q}{4\pi KD} \left\{ w(u, \beta) + f_s \left(\frac{r}{D}, \frac{b}{D}, \frac{d}{D}, \frac{a}{D} \right) \right\} \quad \text{I-57}$
	$u = \frac{r^2 S}{4KDt} \quad \text{I-56}$	
Paramètres	<i>s</i> : rabattement [m] , <i>Q</i> : débit [m ² /j] , <i>t</i> : temps [j], <i>KD</i> : transmissivité <i>r</i> : distance entre le puits de pompage et le piézomètre [m] <i>S</i> : coefficient d'emmagasinement [-], <i>L</i> : facteur de drainance [m] <i>S'</i> : coefficient d'emmagasinement de l'aquitard [-], <i>K'</i> : conductivité hydraulique de l'aquitard [m/j] , <i>D'</i> : l'épaisseur de l'aquitard [m], <i>b</i> : la longueur du puits pénétré dans l'aquifère [m], <i>d</i> : longueur du puits pénétré dans l'aquifère (partie non ouverte) [m]	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Essais de pompage à débit variable/ Essais de pompage avec période de récupération

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant la cinquième hypothèse par :

c) un essai de pompage à débit variable

ou la sixième hypothèse par :

d) un essai de pompage avec période de récupération

La méthode de Theis (1935) utilisée précédemment pour une nappe captive à débit variable peut être utilisée pour interpréter les essais de pompage dans une nappe semi-captive à débit variable et les essais de pompage avec période de récupération.

c) Aquifère à nappe libre

Figure I-7 donne un schéma descriptif de la configuration et des paramètres d'un essai de pompage dans une nappe libre.

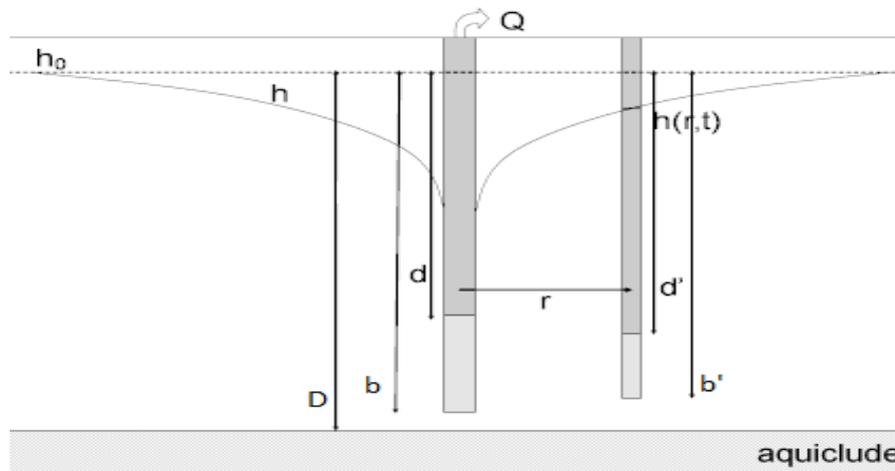


Figure I-7 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans la nappe libre (Duffield, 2007).

Essais dans des conditions idéales

Les hypothèses générales.

1. L'aquifère est d'une surface infinie ;
2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme sur toute la surface influencée par le pompage ;
3. Un essai de pompage avec un puits totalement pénétré dans la nappe ;
4. Un essai de pompage à débit constant ;

Chapitre 1 : Etude bibliographique

5. Le diamètre du puits de pompage est suffisamment petit que le stockage dans ce dernier est négligé ;
6. Régime transitoire.

Le rabattement de la nappe pour cette catégorie d'essai peut être décrit par eq.I-15 à I-17 de la méthode de Theis (1935) et eq.I-18 de la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946) , à condition d'effectuer une correction pour les valeurs du rabattement observées. Jacob (1944) a proposé la correction suivante :

$$s' = s - \frac{s^2}{2D} \quad \text{I-60}$$

Avec :

s' : Rabattement corrigé

s : Rabattement

D : Epaisseur de l'aquifère

En gardant les mêmes hypothèses générales et en remplaçant :

- a) la première hypothèse par : présence de limite dans la zone influencée par le pompage (frontière étanche ou d'alimentation)

La méthode de Stallman (Ferris et al., 1962) utilisée précédemment pour une nappe captive peut être utilisée pour cette catégorie d'essais.

- b) la troisième hypothèse par : un essai de pompage avec un puits partiellement pénétré dans la nappe ;

La méthode de Theis modifier par Huntush (1961a; 1961b) utilisée précédemment pour une nappe captive peut être utilisée pour cette catégorie d'essais.

- c) la cinquième hypothèse par : un essai de pompage à débit variable

La méthode de Theis (1935) et la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946) utilisée précédemment pour une nappe captive à débit variable peut être utilisée pour interpréter les essais de pompage dans une nappe libre.

I.4 Slug tests et leur interprétation

I.4.1 Introduction

Un *slug test* consiste à suivre dans un forage l'évolution du niveau d'eau dans le temps après avoir provoqué une brusque variation de ce niveau par apport ou extraction d'eau. L'interprétation d'un tel essai se fait par ajustement en coordonnées semi-logarithmiques ou

Chapitre 1 : Etude bibliographique

bi-logarithmiques de la courbe expérimentale de la variation de niveau en fonction du temps sur une courbe théorique. Ce type d'essai est bien adapté aux mesures des faibles conductivités hydrauliques et permet aussi de déterminer le coefficient d'emmagasinement.

I.4.2 Avantages

Le *slug test* est un essai facile à mettre en œuvre permettant d'accéder à la conductivité hydraulique de l'aquifère au voisinage d'un puits avec un minimum d'équipement (aucune pompe n'est requise, aucun piézomètre n'est nécessaire) et peut être effectué en quelques minutes. Le *slug test* est utile pour l'étude des aquifères à faible perméabilité pour lesquels les essais de pompage sont difficiles à réaliser. Ces essais sont très recommandés sur les sites de contamination comparant aux essais de pompage qui peuvent causer la diffusion de polluant.

I.4.3 Inconvénients

Malgré sa facilité, le slug test n'évalue qu'une petite partie de l'aquifère qui est directement adjacente au puits de forage ; il fournit une estimation des propriétés de la partie d'aquifère qui se trouve au-delà de la crépine de puits.

I.4.4 Les types de *slug test*

a) Le *slug test* traditionnel

Le slug test traditionnel consiste à relever ou injecter un volume d'eau à partir du puits d'une façon instantané. Après une période d'équilibrage, le puits retourne toujours vers son niveau statique, cela engendre un écoulement d'eau du puits vers l'aquifère pour le cas d'injection et de l'aquifère vers le puits dans le cas du relevage. Ce déplacement du niveau d'eau est enregistré à fin de visualiser la réponse de l'aquifère et de déterminer ces caractéristiques hydrodynamiques.

b) Le *slug test* mécanique

Lorsque des puits de surveillance environnementale sont testés, on ne peut pas ajouter (ou retirer) de l'eau du puits, car cela modifie la qualité de l'eau ambiante ou génère des déchets potentiellement dangereux. Il est rapidement devenu pratique d'utiliser un «slug mécanique» pour exécuter un test de slug. Il s'agit simplement d'une section cylindrique de 3 à 5 pieds de longueur en PVC rempli de sable et recouvert à chaque extrémité. Un cordon est attaché à une extrémité du bouchon mécanique afin qu'il puisse être rapidement abaissé sous le niveau statique de l'eau et puis rapidement élevé plus tard. La submersion et le retrait rapide de ce cylindre dans l'eau peuvent provoquer des éclaboussures dans le puits. Pour les slug test d'une longue durée, les éclaboussures ne présentent pas un problème important. Cependant, pour les puits qui se remettent en moins d'une minute, les éclaboussures affectent les résultats, de sorte qu'une bonne détermination des changements du niveau d'eau ne peut pas être faite. En raison de ces problèmes, la méthode dite «slug test pneumatique» a été développée. Dans cette méthode, la pression d'air est utilisée pour déplacer le niveau d'eau.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

c) Slug test pneumatique

Le *slug test* pneumatique est effectué en injectant de l'air comprimé dans le puits ce qui aide à abaisser le niveau d'eau statique à un niveau inférieur, car l'augmentation de la pression de l'air force l'eau à s'écouler hors du puits de forage vers l'aquifère. Après une période d'équilibrage, la colonne d'air est instantanément dépressurisée en ouvrant une vanne pour permettre à l'air comprimé de s'échapper dans l'atmosphère. La libération rapide du gaz génère un bouchon pneumatique dans le puits; sa dissipation temporelle est surveillée par un transducteur de pression, et la réponse de pression transitoire est utilisée pour déduire les propriétés de l'aquifère.

I.4.5 Les réponses d'un slug test

Pour les *slug tests*, deux réponses différentes peuvent apparaître : (1) un retour à l'équilibre sans oscillations et (2) un retour à l'équilibre avec oscillations.

- **Retour à l'équilibre sans oscillations**

Les *slug tests* ont été initialement développés comme une alternative aux essais de pompage pour les formations à faible conductivité hydraulique car de tels puits ne peuvent pas supporter le pompage ($k < 10^{-3}$ cm/s). Dans ce cas, le retour vers l'état initial est lent et le déplacement de l'eau prend une forme exponentielle qui décroît dans le temps ($h=f(t)$).

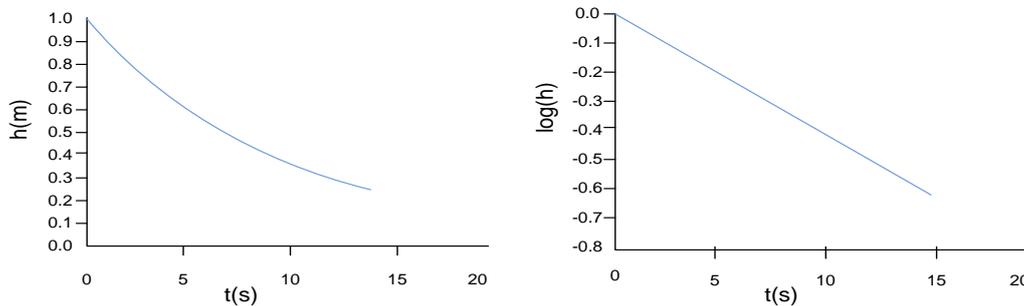


Figure I-8 : Courbe du rabattement en fonction du temps pour les aquifère à faible conductivité hydraulique (Robbins, 2016).

- **Retour à l'équilibre avec oscillations**

Dans les aquifères où la perméabilité est importante $K > 5 \times 10^{-3}$ cm/s (ou 4.3 m/j), le niveau d'eau dans le puits après injection ou relevage du slug retourne rapidement vers le niveau initial avec des oscillations amorties dans le temps. Bredehoeft et al (1966) était parmi les premiers à attribuer ces oscillations à des effets inertiels dans le puits et à montrer que cette oscillation dépendait fortement de la conductivité hydraulique de l'aquifère.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

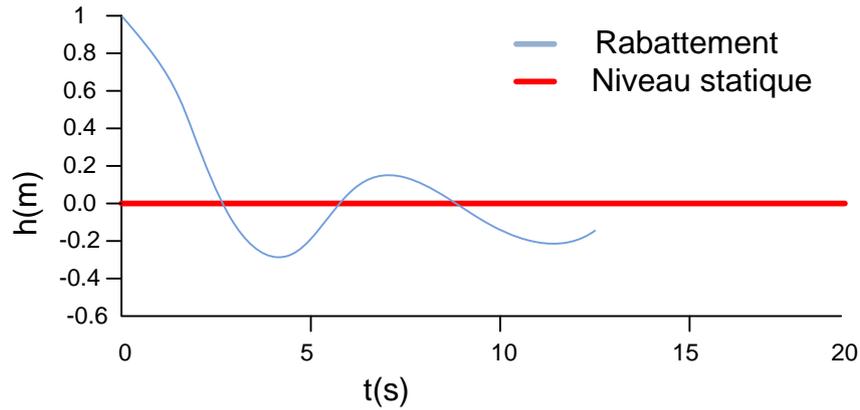


Figure I-9 : Courbe du rabattement en fonction du temps pour les aquifère à conductivité hydraulique importante (**Robbins, 2016**).

I.4.6 Méthodes d'interprétation

Selon les conditions du milieu et de l'essai, plusieurs méthodes sont utilisées pour l'interprétation des slug tests, et la détermination des paramètres hydrodynamiques. Figure I-10 schématise les paramètres principaux utilisés dans ces méthodes.

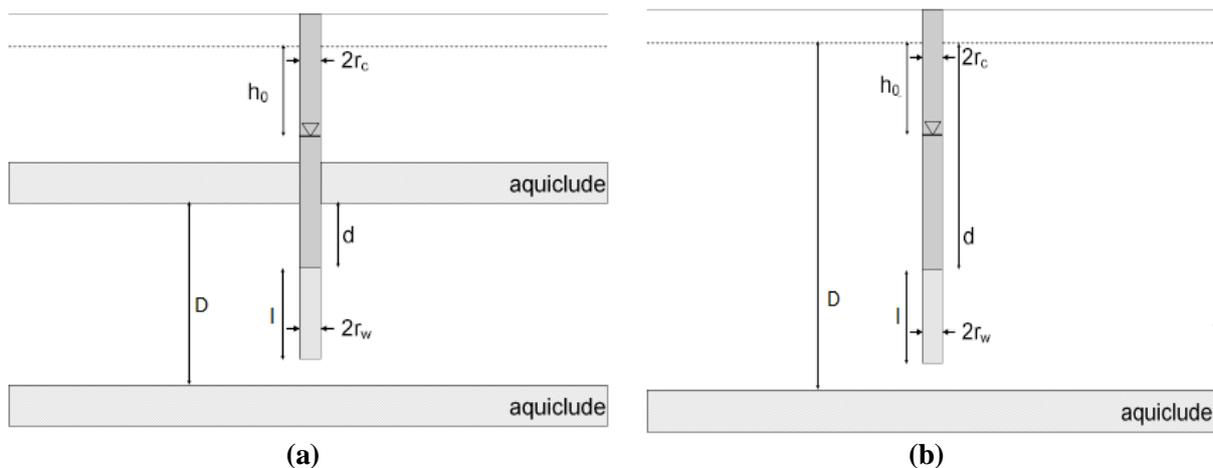


Figure I-10 : Schéma représentatif des paramètres utilisés dans les calculs dans (a) une nappe captive et (b) une nappe libre (**Duffield, 2007**).

Domaine d'application

Les méthodes d'interprétation des slug tests présentées dans ce qui suit ont été élaborées sous les hypothèses générales suivantes :

1. L'aquifère est d'une surface infinie ;
2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme sur toute la surface influencée par le test ;
3. Le changement dans la charge hydraulique se fait d'une manière instantanée à $t=0$;
4. Régime d'écoulement permanent ;

Chapitre 1 : Etude bibliographique

5. Le puits est partiellement ou totalement pénétré dans l'aquifère.

La méthode de Bouwer-Rice

La solution mathématique de Bouwer et Rice (1976) est utile pour déterminer la conductivité hydraulique (K) d'une nappe libre à partir d'un slug test à réponse non oscillatoire, effectué dans les mêmes hypothèses citées précédemment. L'analyse consiste à faire correspondre une ligne droite aux données de déplacement du niveau d'eau enregistré au fil du temps.

La méthode est décrite par l'équation I-61

$$\ln(h) = -\frac{2Klt}{r_c^2 \ln(R_e / r_w)} + \ln(h_0) \quad \text{I-61}$$

Pour une pénétration partielle du puits dans l'aquifère, le terme $\ln(R_e/r_w)$ est donné dans l'équation I-62

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln((l+d)/r_w)} + \frac{A+B*\ln[(D-(l+d))/r_w]}{l/r_w} \right]^{-1} \quad \text{I-62}$$

Pour une pénétration totale du puits dans l'aquifère, le terme $\ln(R_e/r_w)$ est donné dans l'équation I-63

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln((l+d)/r_w)} + \frac{C}{l/r_w} \right]^{-1} \quad \text{I-63}$$

Les paramètres adimensionnels A, B, C sont écrits de la forme suivante :

$$A = 1.472 + 3.537 * 10^{-2} * a - 8.148 * 10^{-5} a^2 + 1.028 * 10^{-7} a^3 - 6.484 * 10^{-11} a^4 + 1.573 * 10^{-14} * a^5 \quad \text{I-64}$$

$$B = 0.2372 + 5.151 * 10^{-3} * a - 2.682 * 10^{-6} a^2 - 3.491 * 10^{-10} a^3 - 4.738 * 10^{-13} a^4 \quad \text{I-65}$$

$$C = 0.792 + 3.993 * 10^{-2} * a - 5.743 * 10^{-5} a^2 + 3.858 * 10^{-8} a^3 - 9.659 * 10^{-12} a^4 \quad \text{I-66}$$

$$a = \frac{l}{r_w} \quad \text{I-67}$$

Avec :

h : charge hydraulique dans le puits à $t < 0$ s [m] ; h_0 : charge hydraulique dans le puits à $t = 0$ [m] ; r_c : rayon intérieur du tubage du puits [m] ; r_w : rayon du puits [m] ; t : temps [s] ; l : la longueur de la partie crépiné (ouverte) du puits [m] ; K : conductivité hydraulique [m/j] ; d : Longueur de la partie non ouverte du puits de pompage pénétré dans l'aquifère [m]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

La méthode de Hvorslev

La solution mathématique de Hvorslev (1951) est utile pour déterminer la conductivité hydraulique (K) d'une nappe captive à partir d'un slug test à réponse non oscillatoire, effectué dans les mêmes hypothèses citées précédemment. L'analyse consiste à faire correspondre une ligne droite aux données de déplacement du niveau d'eau enregistré au fil du temps.

Pour un puits partiellement pénétré dans l'aquifère, la méthode est décrite par l'équation I-68

$$\ln(h) = -\frac{2Klt}{r_c^2 \ln\left(\frac{l}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2r_w}\right)^2}\right)} + \ln(h_0) \quad \text{I-68}$$

Pour un puits totalement pénétré dans l'aquifère, la méthode est décrite par l'équation I-69

$$\ln(h) = -\frac{2Klt}{r_c^2 \ln(200)} + \ln(h_0) \quad \text{I-69}$$

Avec :

h : la charge hydraulique dans le puits à $t < 0$ s [m] ; h_0 : la charge hydraulique dans le puits à $t = 0$ s [m] ; r_c : rayon intérieur du tubage du puits [m] ; r_w : rayon du puits [m] ; t : temps [s] ; l : la longueur de la partie crépiné (ouverte) du puits [m] , K : conductivité hydraulique [m/j]

Méthode de Butler

La solution mathématique de Butler (1998) est utile pour déterminer la conductivité hydraulique (K) d'une nappe captive et libre à partir d'un slug test à réponse oscillatoire, effectué dans les mêmes hypothèses citées précédemment. Tableau I-2 résume les équations utilisées par cette méthode.

Tableau I-10: Méthode de Butler (1998) (Robbins, 2016)

Equations	Paramètres
$\left. \begin{cases} w_d(t_d) = e^{-\left(\frac{C_D}{2}\right)t_d} \left[\cos(\omega_d t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \sin(\omega_d t_d) \right], C_D < 2 \\ w_d(t_d) = e^{-t_d} (1 + t_d), C_D = 2 \\ w_d(t_d) = -\left(\frac{1}{\omega_d^+ - \omega_d^-}\right) \left[\omega_d^- e^{\omega_d^+ t_d} - \omega_d^+ e^{\omega_d^- t_d} \right], C_D > 2 \end{cases} \right\} \text{I-70}$	<p>w : le changement du niveau d'eau par rapport au niveau d'eau statique [m]</p> <p>w_d : le changement du niveau d'eau par rapport au niveau d'eau statique adimensionnel [-]</p> <p>t_d : paramètre du temps adimensionnel [-] ; t : temps [j]</p>
<p>Avec :</p> $t_d = t \sqrt{\frac{g}{Le}} \quad \text{I-71} \quad w_d = \frac{w}{h_0} \quad \text{I-72}$	<p>C_D : paramètre d'oscillation [-]</p> <p>h_0 : changement du niveau d'eau initial</p> <p>Le : la longueur effective de la colonne d'eau dans le puits</p>
<p>Et</p>	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$\omega_d = \sqrt{1 - (0.5C_D)^2} \quad \text{I-73} \quad \omega_d^\pm = -\frac{C_D}{2} \pm \omega_d \quad \text{I-74}$ <p>Pour une nappe captive Pour un puits partiellement pénétré</p> $\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln \left[\frac{l}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2r_w} \right)^2} \right]}{2LC_D}; r_w > 0.012\text{m} \\ K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln \left[\frac{l}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{2r_w} \right)^2} \right]}{2L \left(C_D - \frac{8\nu Le}{r_c^2 g} \sqrt{\frac{g}{Le}} \right)}; r_w < 0.012\text{m} \end{aligned} \right\} \text{I-75}$ <p>Pour un puits complètement pénétré</p> $\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln \left[\frac{l}{r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r_w} \right)^2} \right]}{2LC_D}; r_w > 0.012\text{m} \\ K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln \left[\frac{l}{r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r_w} \right)^2} \right]}{2L \left(C_D - \frac{8\nu Le}{r_c^2 g} \sqrt{\frac{g}{Le}} \right)}; r_w < 0.012\text{m} \end{aligned} \right\} \text{I-76}$ <p>Pour une nappe libre la méthode est appelé Spring and Gelhar (1991)</p> $\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln [R_e / r_w]}{2LC_D}; r_w > 0.012\text{m} \\ K &= \frac{\sqrt{\frac{g}{Le}} r_c^2 \ln [R_e / r_w]}{2L \left(C_D - \frac{8\nu Le}{r_c^2 g} \sqrt{\frac{g}{Le}} \right)}; r_w < 0.012\text{m} \end{aligned} \right\} \text{I-77}$ <p style="text-align: right;">(I-62et</p> <p>Le paramètre $\ln(R_e/r_w)$ est déjà calculé dans l'équation I-63)</p>	<p>ω_d : paramètre de fréquence sans dimension r_c : rayon intérieur du tubage du puits [m] r_w : rayon du puits [m], t : temps [s] l : la longueur de la partie crépiné (ouverte) du puits [m], K : conductivité hydraulique [m/j] g : Accélération de la pesanteur [m/s²]</p>
---	---

I.5 Conclusion

Ce chapitre, traite des concepts de base de l'hydrogéologie; il donne une introduction aux essais de pompage et aux tests de slug (leur principe et utilité). Et il présente par la suite une synthèse des différentes méthodes utilisées pour l'interprétation de ces essais qui seront exploités pour le reste du travail (dans l'élaboration de notre outil informatique).

Chapitre 1 : Etude bibliographique

**Chapitre 2 :
Modèle conceptuel et algorithme**

II. Modèle conceptuel et algorithme

II.1 Introduction

Ce chapitre présente le modèle conceptuel et les algorithmes développés pour la simulation et l'interprétation des essais des pompages et les slug tests. Pour cela, nous commençons par définir la structure globale de l'outil (détaillant les configurations abordées), et les algorithmes codés pour chaque configuration (résumant les variables d'entrée/de sortie du système et en expliquant le processus de calcul algorithmique). Enfin, une validation de ces algorithmes est faite avec des données de référence.

II.2 Paramètres statistiques de performance

Dans le but de valider les algorithmes de simulation, ces paramètres statistiques de performance sont utilisés (voir Tableau II-1) :

- Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe efficiency NSE);
- Pourcentage de biais (Percent Bias-PBIAS);
- Observations standard déviation ratio (rapport d'écart type d'observations- RSR- RMSE-).

Tableau II-1: Paramètres statistiques de performance (Moriassi, 2007)

Paramètre	Expression	Variable
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})^2}$	II-1 Y_{obs} : Résultats observés utilisés pour la validation.
PBIAS	$PBIAS = 100 \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})}{\sum (Y_{obs})}$	II-2 Y_{sim} : Nos résultats simulés.
RSR	$RSR = \sqrt{\frac{\sum (s_{obs} - s_{sim})^2}{\sum (s_{obs} - \overline{s_{obs}})^2}}$	II-3 $\overline{Y_{obs}}$: Moyenne des résultats observés.

Les paramètres statistiques précédents permettent de juger des niveaux de performance comme indiqué dans le Tableau II-2.

Tableau II-2: Niveau de performance selon des paramètres statistiques (Moriassi, 2007)

Niveau de performance	NSE	RSR	PBIAS
Très bien	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.5$	$ PBIAS \leq 10$
Bien	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$0.5 \leq RSR \leq 0.6$	$10 \leq PBIAS \leq 15$
Satisfaisant	$0.5 \leq NSE \leq 0.65$	$0.6 \leq RSR \leq 7$	$15 \leq PBIAS \leq 25$
Insatisfaisant	$NSE \leq 0.5$	$RSR \geq 0.7$	$ PBIAS \geq 25$

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

En plus des paramètres statistiques précédent, l'évaluation des solutions de régression réalisée a tenu compte de l'erreur relative définie comme suite :

$$er = \frac{|valeur_{calculé} - valeur_{reference}|}{valeur_{reference}} * 100 \quad \text{II-4}$$

Une erreur de 1% est acceptée pour la validation des calculs.

II.3 Model conceptuel

Dans le but de simplifier son utilisation, l'outil informatique élaboré s'est basé sur une architecture simple. La structure globale utilisée par ce code est donnée par le diagramme représenté par la Figure II-1 : Structure globale de l'outil

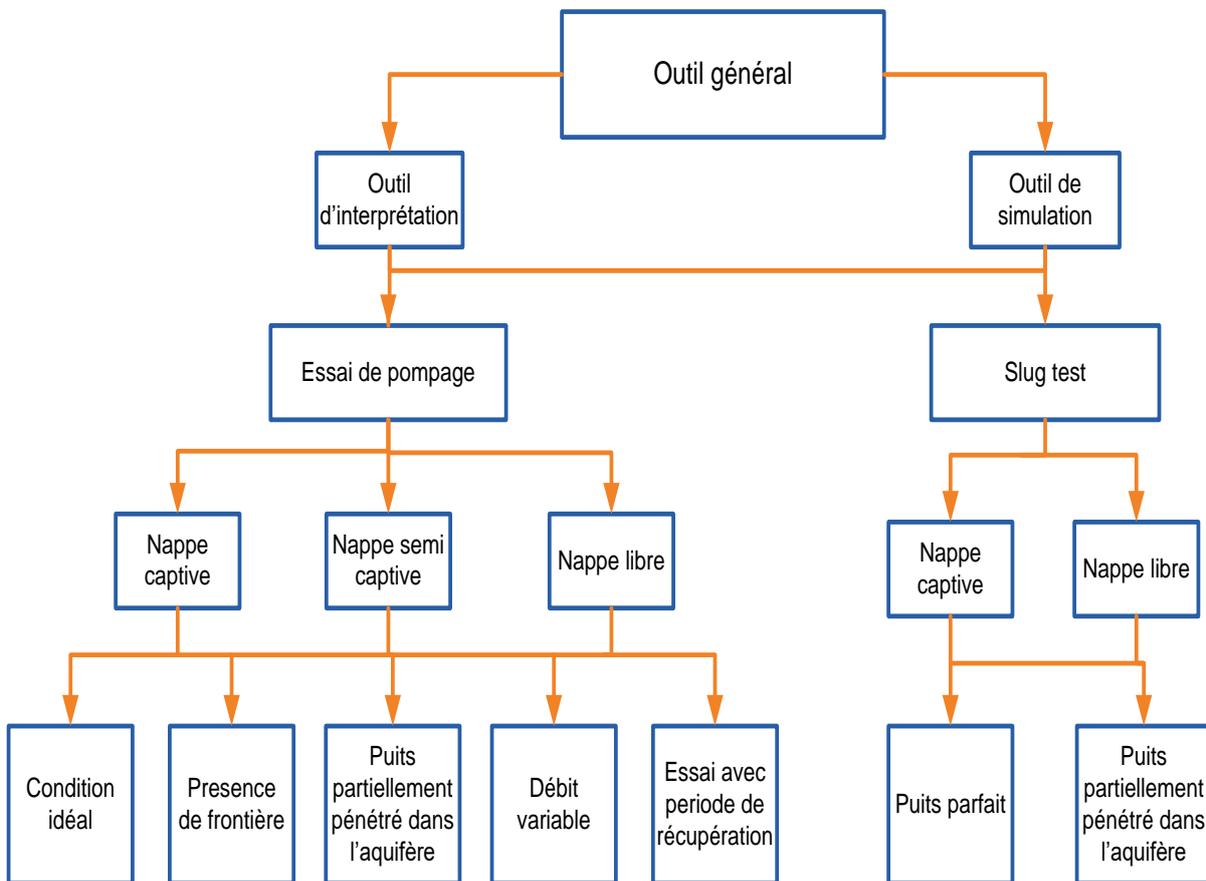


Figure II-1 : Structure globale de l'outil

Les étapes de résolution du modèle (prétraitement, traitement, post-traitement) sont schématisées dans les Figure II-3 et Figure II-3:

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

a) Pour l'outil de simulation

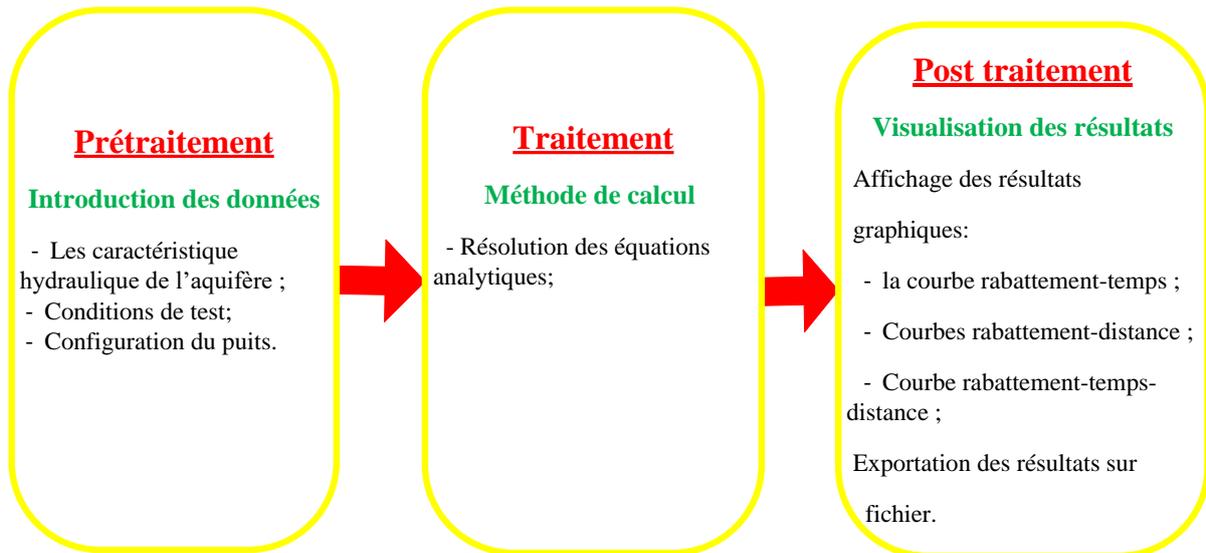


Figure II-2 : Etape de résolution du modèle (outil de simulation)

b) Pour l'outil d'interprétation

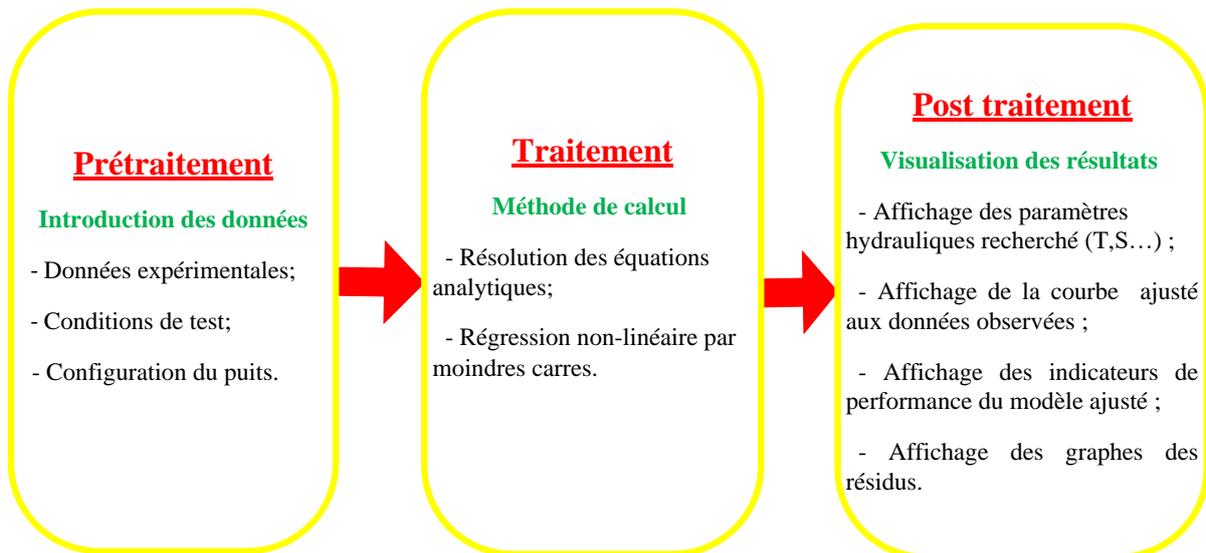


Figure II-3 : Etape de résolution du modèle (outil d'interprétation)

II.4 Algorithmes et validation

II.4.1 L'outil d'interprétation

II.4.1.1 Méthode des moindres carrés non linéaire

Un problème fondamental en sciences consiste à adapter un modèle à des observations qui sont entachées d'erreurs. Nous nous intéresserons ici au cas où le nombre d'observations est supérieur au nombre de paramètres. Ceci nous conduira à résoudre, suivant le choix du modèle, des systèmes non-linéaires surdéterminés. La meilleure solution d'un système surdéterminé peut être définie de plusieurs façons. Etant donné les observations y , les variables indépendantes X et le modèle $f(X, \beta)$ avec β le vecteur de paramètres, la solution retenue correspond à la solution du problème de minimisation du paramètre SSR (*sum squared error* ou la somme du carré des erreurs).

$$SSR = \text{sum}(y_{obs} - y_{sim})^2 \quad \text{II-5}$$

Dans notre cas :

$$SSR = \text{sum}(s_{obs} - s_{sim})^2 \quad \text{II-6}$$

Avec, s_{obs} : rabattement observe durant l'essai de pompage; s_{sim} : rabattement simulé par régression.

Le problème de la minimisation au sens des moindres carrés peut être résolue avec divers algorithmes, pour le développement de cet outil l'algorithme de Levenberg-Marquardt est utilisé dans l'ajustement des données aux équations non linéaires et linéaires.

II.4.1.2 Validation de la régression

L'outil développé permet à l'utilisateur de valider la régression non-linéaire des données expérimentales avec les solutions analytiques (convenable aux conditions d'essai) par deux méthodes:

- Indicateur de performance ;
- Analyse graphique des résidus.

a) Indicateur de performance

Les indicateurs de performance mesurent l'adéquation entre un modèle issu d'une régression et les données observées qui ont permis de l'établir. Certes, ils ont leurs imperfections, mais leurs utilités n'ont d'égale que leurs simplicités. Tableau II-5 présente trois indicateurs de performance.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-3: Indicateur de performance d'un modèle de régression

Indicateur	Expression	Validité	Variable
R ²	$R^2 = 1 - \frac{\sum (s_{obs} - s_{sim})^2}{\sum (s_{obs} - \overline{s_{obs}})^2}$ II-7	R ² tend vers 1	S _{obs} : rabatement observé S _{sim} : rabatement simulé par ajustement $\overline{s_{obs}}$: la moyenne des rabattements observés
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum (s_{sim} - s_{obs})^2$ II-8	MSE tend vers 0	
SE	$SE = \sum (s_{sim} - s_{obs})^2$ II-9	MSE tend vers 0	

b) Analyse graphique des résidus

Définition des résidus

On appelle résidus les erreurs observées ε définie par :

$$\varepsilon = s_{obs} - s_{sim} \quad \text{II-10}$$

Les résidus représentent la partie inexpliquée des données observées par la courbe de régression.

Etude des résidus

Pour qu'un modèle s'ajuste bien aux données observées les résidus doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Les résidus doivent suivre la loi normale ;
- La non-corrélation des résidus avec le temps et le rabatement (Independence des résidus).

En vue de s'assurer la fiabilité des résultats, l'outil construit trois graphes qui peuvent être utilisés pour tester la performance du modèle ajusté.

- *Graphique quantile-quantile*

C'est un graphe qui porte sur ces abscisses le quantile observé (les résidus) et sur ces ordonnées le quantile théorique. Les résidus suivent la loi normale si seulement si ces derniers s'ajustent bien à la droite de Henry qui s'écrit de la forme suivante :

$$y = \frac{x - \mu}{\delta} \quad \text{II-11}$$

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Avec, μ : la moyenne des résidus et δ : l'écart type des résidus.

- *Graphiques temps-résidus et rabattement-résidus*

L'information recherchée de ces deux graphes est la non-linéarité des résidus avec le temps et respectivement avec le rabattement. La non linéarité signifie que les résidus sont indépendants de ces paramètres.

II.4.1.3 Algorithme générale pour l'interprétation des essais de pompage

Comme le montre l'algorithme donné dans Figure II-4, l'interprétation d'un essai de pompage avec l'outil développé est menée comme suit :

- Introduction des données expérimentales (observées) du rabattement au cours du temps et les données de base de l'installation en spécifiant les conditions d'essai et le type d'aquifère dans lequel le test est effectué;
- Choix de la méthode appropriée aux conditions choisies ;
- Ajustement des paramètres de la solution analytique (méthode choisie) aux données observées en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt (**1944; 1963**) des moindres carrés.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

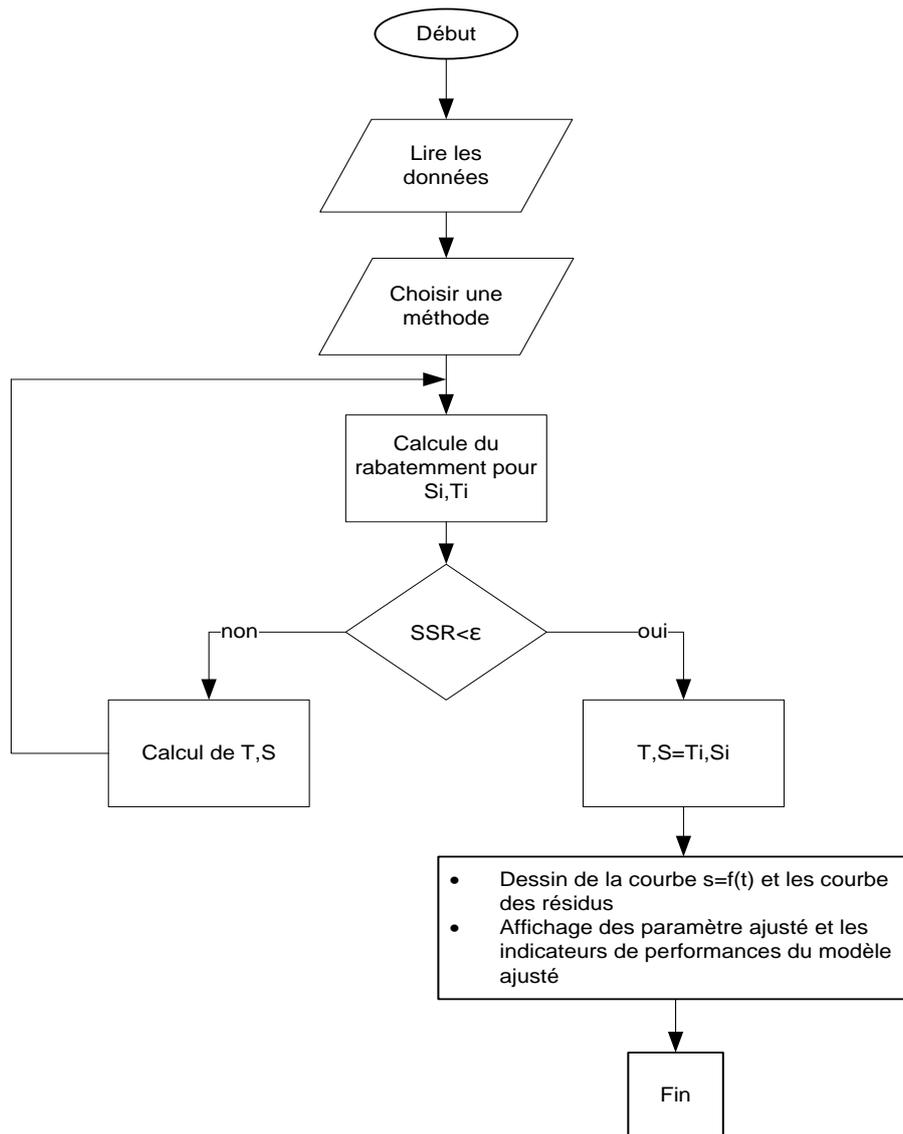


Figure II-4 : Algorithme général de l'interprétation des tests hydrauliques (essais de pompage /slug test).

II.4.1.4 Validations des algorithmes développés pour les essais de pompage

a) Essai de pompage idéal

Nappe captive

La Figure II-5 décrit les conditions d'un essai de pompage idéal dans une nappe captive en spécifiant les paramètres nécessaires pour l'interprétation.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

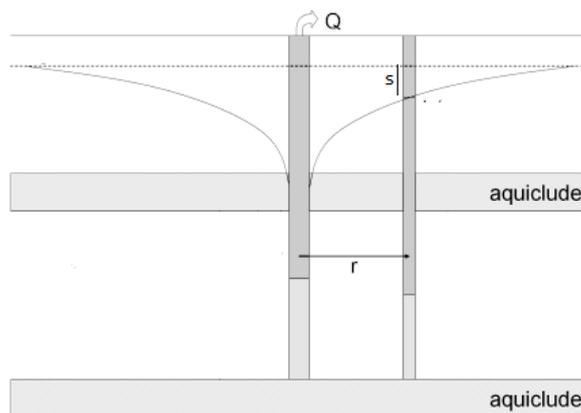


Figure II-5 : Essai de pompage idéal dans une nappe captive (Duffield, 2007).

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-15 à I-17 pour la méthode de Theis (1935) et eq. I-18 pour la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-4.

Tableau II-4: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec la version d'évaluation du logiciel AQTESOLV¹ « Aquifer Test SOLVer ».

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit constant $Q=788 \text{ m}^3/\text{j}$ tout au long du pompage avec un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=30\text{m}$ du centre du puits de pompage.

Dans le but d'éviter les erreurs de mesure qui peuvent être faites au début du pompage à cause du déplacement rapide du niveau d'eau dans le puits, un poids de 1 est affecté aux observations dont $t < 60 \text{ min}$ et un poids de 2 aux observations qui dépassent les 60 min.

Deux méthodes sont utilisées pour estimer les propriétés de cet aquifère :

- La méthode de Theis (1935) ;
- La méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946).

¹ AQESOLV est un logiciel basé sur la méthode des moindres carrés pour l'ajustement des données observées.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-5.

Tableau II-5: Validation de l'algorithme: essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Theis (1935)	T [m^2/j]	497.240	497.300	0.012	Erreur accepté
	S [-]	$9.890 \cdot 10^{-5}$	$9.889 \cdot 10^{-5}$	0.010	
Jacob (Cooper & Jacob, 1946)	T [m^2/j]	504.154	504.300	0.029	
	S [-]	$9.035 \cdot 10^{-5}$	$9.029 \cdot 10^{-5}$	0.066	

Qualité de la régression et courbes de résidus

- Méthode de Theis

Figure II-6 montre les résultats d'ajustements de la courbe théorique de Theis aux données observées de l'essai de 'Oude Korendijk' sur une échelle semi-logarithmique et linéaire. Les valeurs des indicateurs statistiques calculés pour cette régression sont données dans Tableau II-6. Ces indicateurs de performance montrent un bon ajustement du modèle aux données observées.

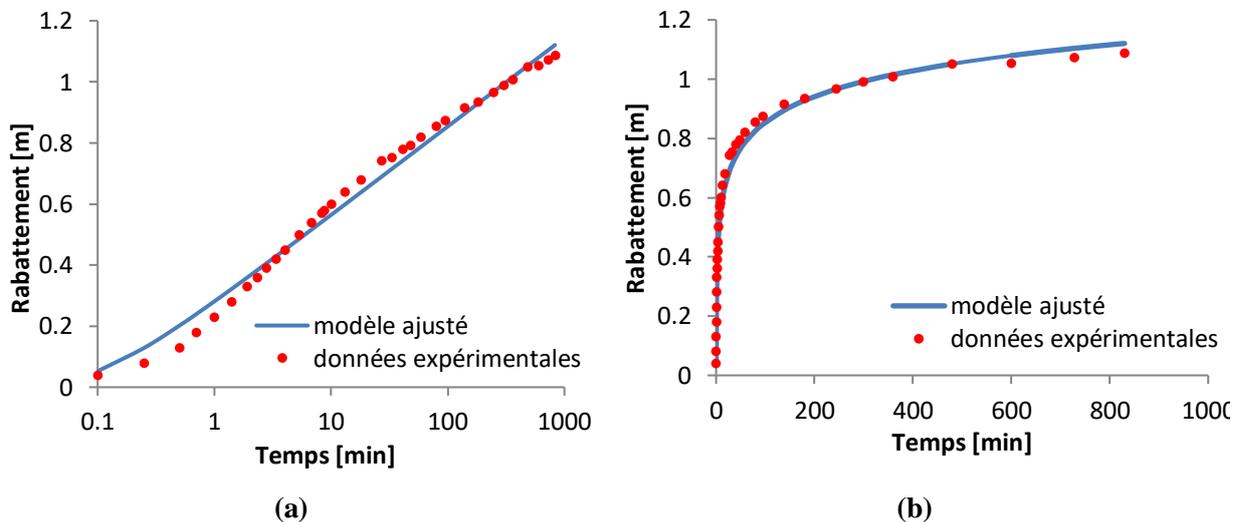


Figure II-6 : Courbe d'ajustement de la méthode de Theis aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.

Tableau II-6: Validation du modèle de régression.

Indicateur de performance	R^2	MSE	SE
Valeur	0.989	0.001	0.037

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Figure II-7 montre les graphes des résidus résultant de la régression et les résultats d'interprétation de ces graphes sont synthétisés dans Tableau II-7.

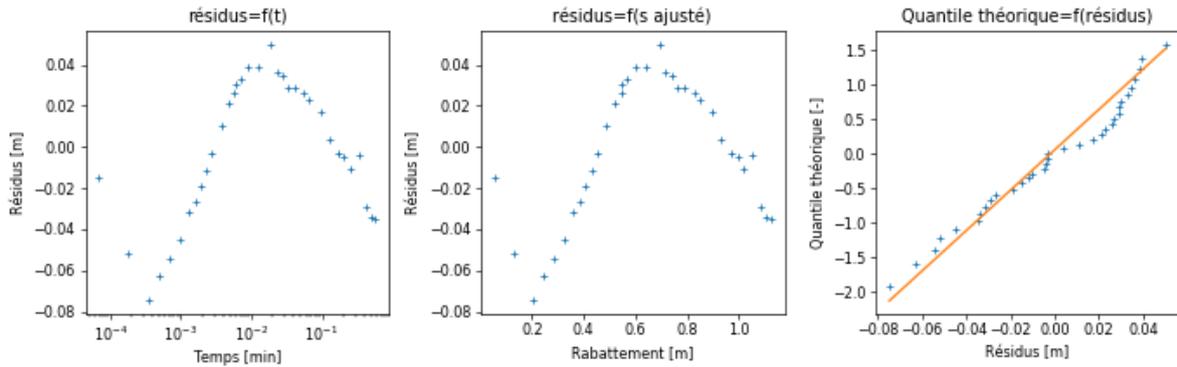


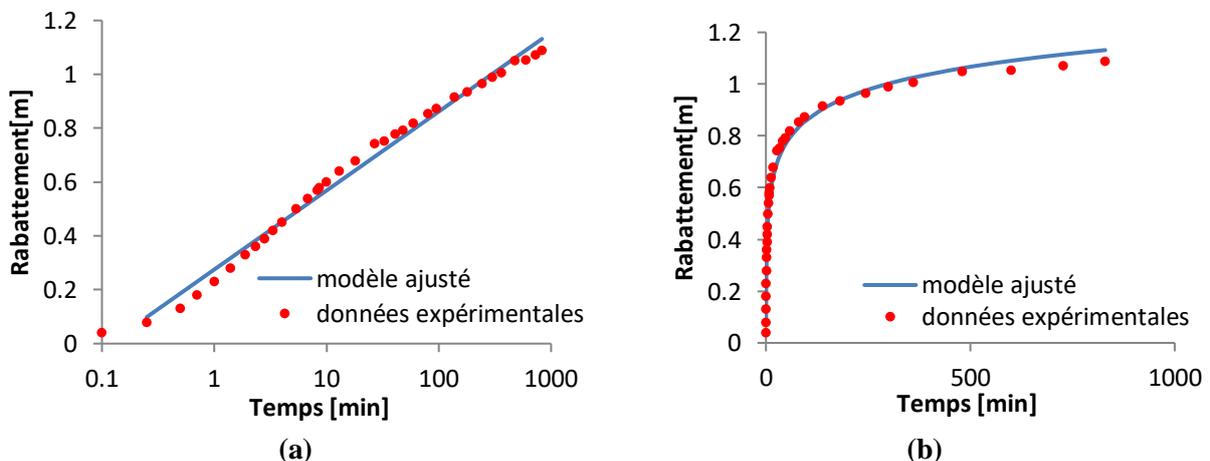
Figure II-7 : Graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive, méthode de Theis).

Tableau II-7: Analyse des graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive, méthode de Theis).

Graphe	Observation	Conclusion
Résidus =f(t)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du temps
Résidus =f(s ajusté)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du rabattement
Quantile théorique=f(résidus)	Courbe linéaire	Les résidus suivent la loi normale

- **Méthode de Jacob**

Figure II-8 montre les résultats d'ajustements de la courbe théorique de Jacob aux données observées de l'essai de 'Oude Korendijk' sur une échelle semi-logarithmique et linéaire. Les valeurs des indicateurs statistiques calculés pour cette régression sont données dans Tableau II-8. Ces indicateurs de performance montrent un bon ajustement du modèle aux données observées.



Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmique

Figure II-8 : Courbe d'ajustement de la méthode de Jacob aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.

Tableau II-8: Validation de l'ajustement.

Indicateur de performance	R ²	MSE	SE
Valeur	0.989	0.001	0.034

Figure II-9 montre les graphes des résidus résultant de la régression et les résultats d'interprétation de ces graphes sont synthétisés dans Tableau II-9.

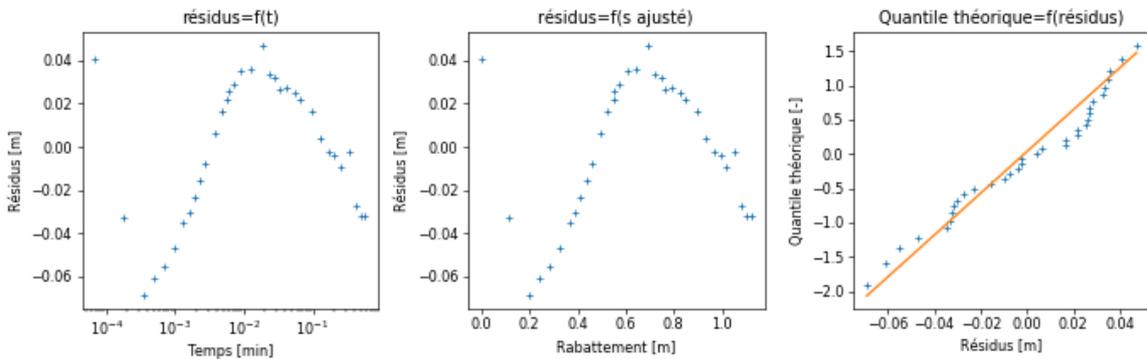


Figure II-9 : Graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive, méthode de Jacob).

Tableau II-9: Analyse des graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe captive méthode de Jacob).

Graphe	Observation	Conclusion
Résidus =f(t)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du temps
Résidus =f(s ajusté)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du rabattement
Quantile théorique=f(résidus)	Courbe non linéaire	Les résidus suivent la loi normale

- **Nappe semi-captive**

Figure II-10 décrit les conditions d'un essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive en spécifiant les paramètres nécessaires pour l'interprétation.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmique

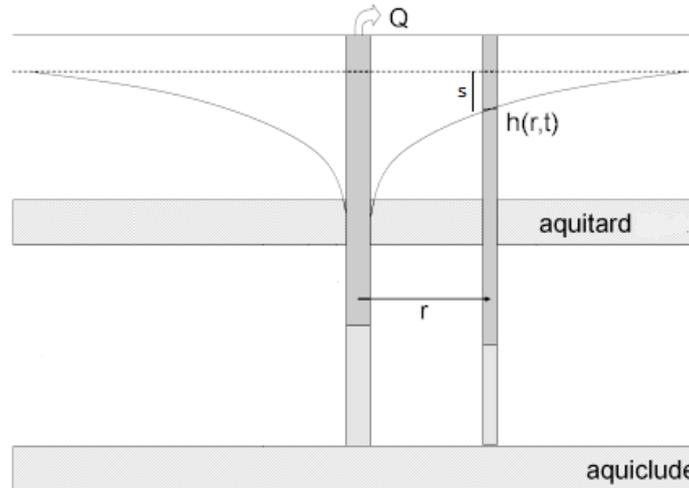


Figure II-10 : Essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive (Duffield, 2007).

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-45 à I-47 pour la méthode de Walton (Huntush & Jacob, 1955) et eq. I-48 à I-51 pour la méthode de Huntush (1960) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-10.

Tableau II-10: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé, avec les résultats estimés avec la version d'évaluation du logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe semi-captive avec un débit constant $Q=761 \text{ m}^3/\text{j}$, tout au long du pompage, avec un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=90\text{m}$ du centre du puits de pompage.

Deux méthodes sont utilisées pour connaître les propriétés de cet aquifère

- La méthode de Walton (Huntush & Jacob, 1955) ;
- La méthode de Huntush (1960).

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-11.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmme

Tableau II-11: Validation de l’algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d’erreur
Walton (Huntush & Jacob, 1955)	$T [m^2/j]$	1662.003	1662.300	0.018	Erreur accepté
	$S [-]$	$1.790 \cdot 10^3$	$1.790 \cdot 10^{-3}$	0	
	$L [m]$	738.025	738.31	0.038	

Qualité de la régression et courbes de résidus

- Méthode de Walton

Figure II-11 montre les résultats d’ajustements de la courbe théorique de Walton aux données observées de l’essai de ‘Dalem’. sur une échelle semi-logarithmique et linéaire. Les valeurs des indicateurs statistiques calculés pour cette régression son données dans Tableau II-12. Ces indicateurs de performance montrent un bon ajustement du modèle aux données observées.

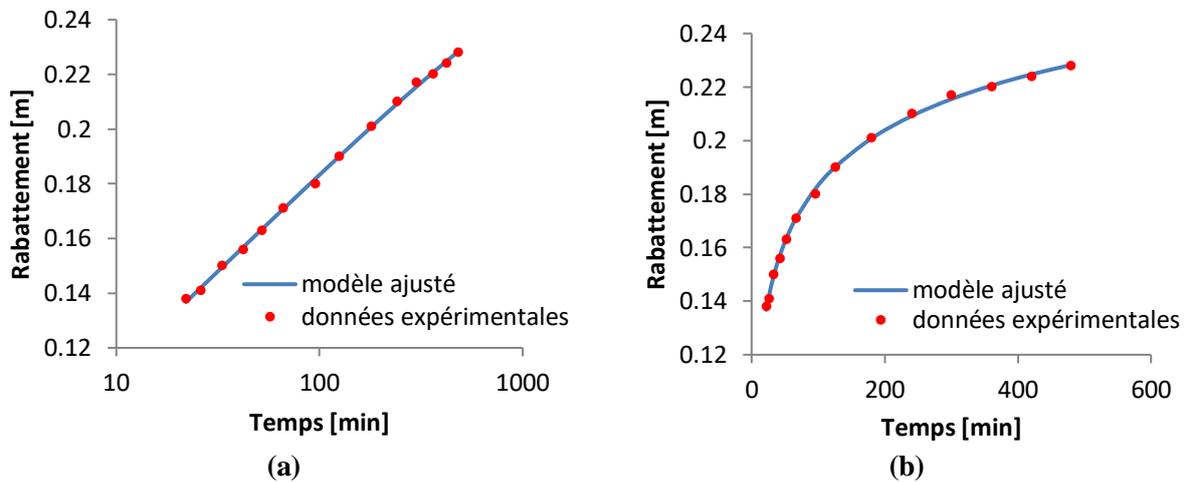


Figure II-11 : Courbe d’ajustement de la méthode de Walton aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.

Tableau II-12: Validation de modèle d’ajustement.

Indicateur de performance	R^2	MSE	SE
Valeur	0.999195	$7.726563 \cdot 10^{-7}$	$1.081719 \cdot 10^{-5}$

L’analyse graphique des résidus

Figure II-12 montre les graphes des résidus résultant de la régression et les résultats d’interprétation de ces graphes sont synthétisés dans Tableau II-13.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

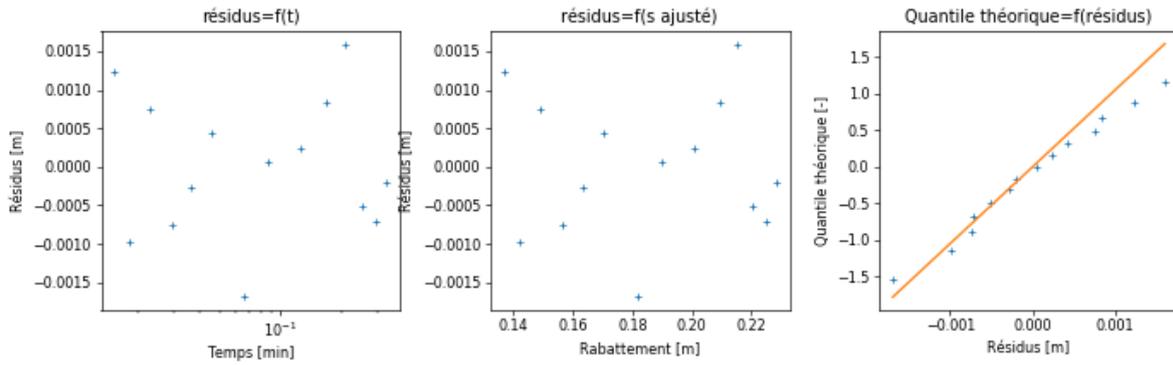


Figure II-12 : Graphes des résidus (essai de pompage idéal, nappe semi-captive, méthode de Walton).

Tableau II-13: Analyse des graphes (essai de pompage idéal, nappe semi-captive, méthode de Walton)

Graphe	Observation	Conclusion
Résidus =f(t)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du temps
Résidus =f(s ajusté)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du rabattement
Quantile théorique=f(résidus)	Courbe non linéaire	Les résidus suivent la loi normale

➤ Nappe libre

Figure II-13 décrit un essai de pompage idéal dans une nappe libre en spécifiant les paramètres nécessaires pour l'interprétation.

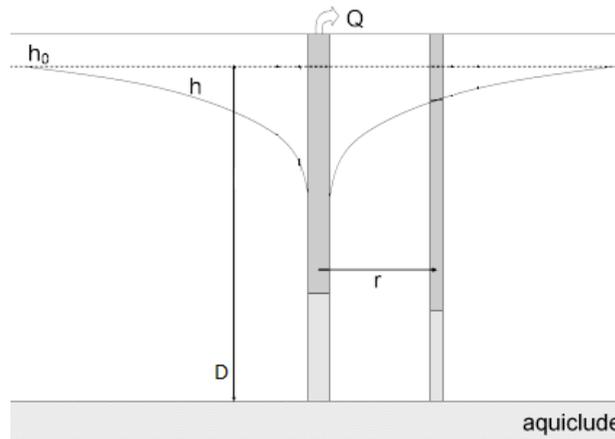


Figure II-13 : Essai de pompage idéal dans une nappe libre (Duffield, 2007).

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-15 à I-17 pour la méthode de Theis (1935) et eq. I-18 pour la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946), le rabattement dans présent cas est subit à la correction de Jacob donné par l'équation I-60 et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-14.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-14: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe libre.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre
D	[m]	L'épaisseur de l'aquifère

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec la version d'évaluation du logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe libre avec un débit constant $Q=873 \text{ m}^3/\text{j}$ tout au long du pompage avec un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=90\text{m}$ du centre du puits de pompage.

Deux méthodes sont utilisées pour connaître les propriétés de cet aquifère :

- La méthode de Theis (1935) ;
- La méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946).

Ces méthodes sont utilisables seule pour les parties de la courbe où l'effet de déshydratation est absent. Pour cela on donne un poids de 1 pour les 115 premières minutes et un poids de 0 pour ce qui suit.

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-15.

Tableau II-15: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe libre.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Theis (1935)	$T \text{ [m}^2/\text{j]}$	1841.15	1841.8	0.035	Erreur accepté
	$S \text{ [-]}$	$5.46 \cdot 10^{-4}$	$5.46 \cdot 10^{-4}$	0	
Jacob (Cooper & Jacob, 1946)	$T \text{ [m}^2/\text{j]}$	2043.434	2045.7	0.111	
	$S \text{ [-]}$	$4.12 \cdot 10^{-4}$	$4.12 \cdot 10^{-4}$	0	

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

b) Essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméable

L'algorithme d'interprétation se base sur la solution analytique donnée dans eq. I-19 à I-25 pour la méthode de Stallman (Ferris et al. 1962) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-16.

Tableau II-16: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméables dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre
r_i	[m]	Distance entre le piézomètre et le i ème puits imaginaire

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés de la méthode graphique.

Les données expérimentales de (Lang, 1960) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit constant $Q=5450 \text{ m}^3/\text{j}$, dans un puits totalement pénétré dans l'aquifère, en présence de deux frontières formant un angle droit, une frontière d'alimentation et une autre imperméable, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r= 152.4 \text{ m}$ du centre du puits de pompage.

La méthode utilisée pour ce cas est la méthode de Stallman (Ferris et al., 1962).

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus de la méthode graphique sont donnés dans Tableau II-17: .

Tableau II-17: Validation de l'algorithme : essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméable dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Méthode graphique	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Stallman (Ferris et al., 1962)	$T \text{ [m}^2/\text{j]}$	2094.62	2371.485	11.67476	la méthode graphique est relativement non précise ce qui justifie cet écart d'erreur entre les résultats
	$S \text{ [-]}$	$7.7 \cdot 10^{-5}$	$3.24 \cdot 10^{-4}$	76.23457	

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Qualité de la régression et courbes de résidus

Figure II-6 montre les résultats d'ajustements de la courbe théorique de Stallman aux données observées de l'essai de 'Oude Korendijk' sur une échelle semi-logarithmique et linéaire. Les valeurs des indicateurs statistiques calculés pour cette régression sont données dans Tableau II-18. Ces indicateurs de performance montrent un bon ajustement du modèle aux données observées.

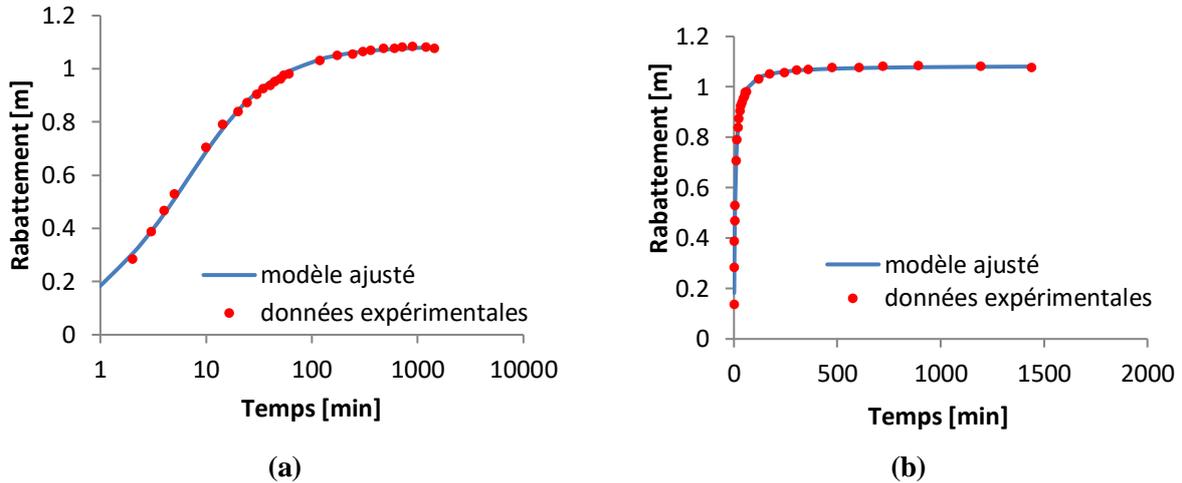


Figure II-14: Courbe d'ajustement de la méthode de Stallman aux données expérimentales sur une échelle (a) semi-logarithmique et (b) linéaire.

Tableau II-18: Validation du modèle de régression.

Indicateur de performance	R^2	MSE	SE
Valeur	0,998	0	0,004

Figure II-7 montre les graphes des résidus résultant de la régression et les résultats d'interprétation de ces graphes sont synthétisés dans Tableau II-19.

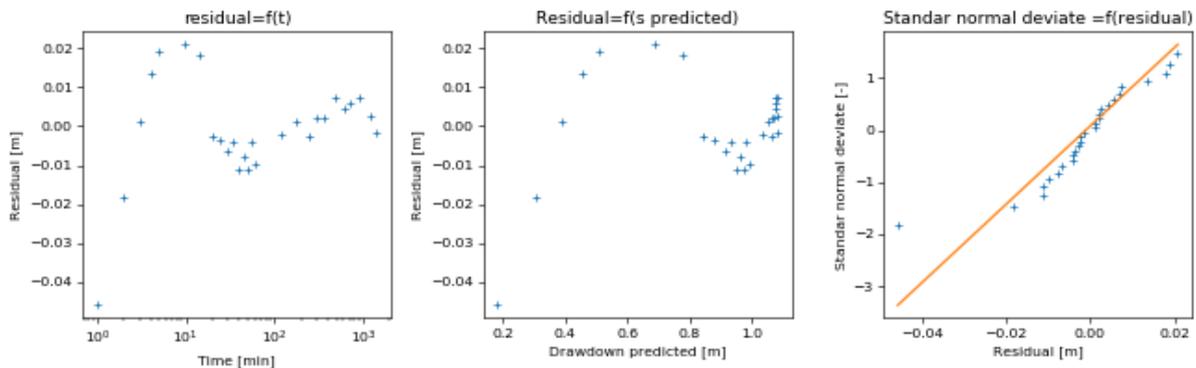


Figure II-15 : Graphes des résidus (essai de pompage en présence de frontière, nappe captive, méthode de Stallman).

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmme

Tableau II-19: Analyse des graphes des résidus : essai de pompage en présence des frontières d'alimentations /frontières imperméable, nappe captive, méthode de Stallman.

Graphe	Observation	Conclusion
Résidus =f(t)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendant du temps
Résidus =f(s ajusté)	Courbe non linéaire	Les résidus sont indépendants du rabattement
Quantile théorique=f(résidus)	Courbe linéaire	Les résidus suivent la loi normale

c) Essai de pompage dans un puits partiellement pénétré dans l'aquifère

La Figure II-16 décrit les conditions d'un essai de pompage dans un puits partiellement pénétré, dans une nappe captive en spécifiant les paramètres nécessaires pour l'interprétation.

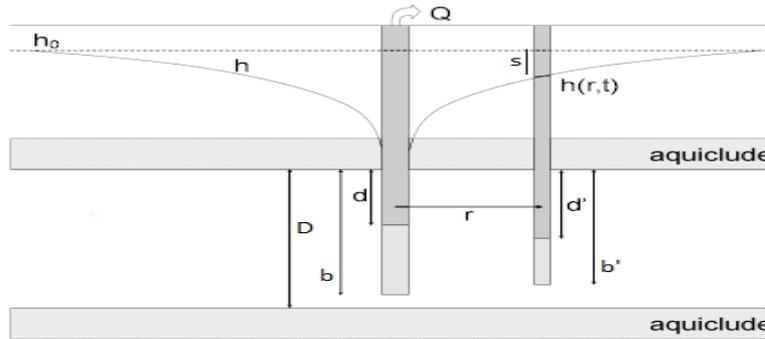


Figure II-16 : Essai de pompage dans un puits partiellement pénétré, dans une nappe captive (Duffield, 2007).

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-26 à I-34 pour la méthode de Theis modifié par Huntush (1961a; 1961b) et eq. I-35 et I-36 pour la méthode de Jacob modifié par Huntush (1961b) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-20.

Tableau II-20: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Poids
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre
D	[m]	L'épaisseur de l'aquifère
b	[m]	Longueur du puits de pompage pénétré dans l'aquifère [m]
d	[m]	Longueur de la partie non ouverte du puits du pompage pénétré dans l'aquifère [m]
b'	[m]	Longueur du puits d'observation pénétré dans l'aquifère [m]
d'	[m]	Longueur de la partie non ouverte du puits d'observation pénétré dans l'aquifère [m]

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés par la méthode graphique.

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit constant $Q=73.5$ l/s tout au long du pompage avec un puits partiellement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=30.5$ m du centre du puits de pompage.

Les données enregistrées par ce test présentent une déviation, on s'intéresse dans notre étude aux données avant déviation. Pour cela, on donne un poids de 1 pour les données avant déviation ($t < 400$ min), et un poids de zéro pour les restes.

Deux méthodes sont utilisées pour connaître les propriétés de cet aquifère :

- La méthode de Theis modifiée par Huntush (1961a; 1961b);
- la méthode de Jacob modifiée par Huntush (1961b)

Résultats

La comparaison est faite en termes de calcul d'erreur relatif entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus de la méthode graphique.

Tableau II-21: Validation de l'algorithme : essai de pompage dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Méthode graphique	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Theis modifié par Huntush (1961a; 1961b)	T [m^2/j]	37408.8	39124.8	4.386	la méthode graphique est relativement non précise ce qui justifie cet écart d'erreur entre les résultats
	S [-]	0.058	0.041	40.947	

d) Essai de pompage avec débit variable

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-37 et I-38 pour la méthode de Theis (1935) et eq. I-39 et I-40 pour la méthode de Birsoy-Summers (1980) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-22 .

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-22: Variables d'entrée de l'algorithme (essai de pompage avec débit variable) dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q_i	[m ³ /j]	Débit de pompage
t_i	[min]	Temps de début de pompage avec un débit Q_i
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre

Validation de l'algorithme

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec la version d'évaluation du logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit variable dans un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=5\text{m}$ du centre du puits de pompage.

Deux méthodes sont utilisées pour interpréter ces résultats.

- La méthode de Theis (Theis, 1935) ;
- La méthode de Birsoy-Summers (1980).

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-23.

Tableau II-23: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Theis (Theis, 1935)	T [m ² /j]	100.297	100.3	0.003	Erreur accepté
	S [-]	$9.92 \cdot 10^{-4}$	$9.92 \cdot 10^{-4}$	0	
Birsoy-Summers (1980)	T [m ² /j]	100.585	100.7	0.114	
	S [-]	$9.872 \cdot 10^{-4}$	$9.711 \cdot 10^{-4}$	1.658	

e) Essai de pompage avec période de récupération

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-41 pour la méthode de Theis (1935) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-24.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-24: Variables d'entrée de l'algorithme essai de pompage avec période de récupération dans une nappe captive

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
ts	[min]	Temps d'arrêt de la pompe
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec la version d'évaluation du logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Duffield, 2007) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit constant $Q=6642.45 \text{ m}^3/\text{j}$ tout au long du pompage (800 min) suivi d'une série de données après l'arrêt de la pompe, cet essai est réalisé dans un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans un piézomètre qui se trouve à une distance $r=30.48 \text{ m}$ du centre du puits de pompage.

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-25.

Tableau II-25: Validation de l'algorithme : essai de pompage avec période de récupération dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Theis (1935)	$T \text{ [m}^2/\text{j]}$	4765.797	4765.8	$6.29 \cdot 10^{-5}$	Erreur accepté
	$S/S' \text{ [-]}$	0.814	0.814	0	

f) Essai de pompage par paliers

L'algorithme d'interprétation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-37 à I-38 pour la méthode de Eden-Hazel (1973) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-26.

Tableau II-26: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage par paliers dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de pompage
s	[m]	Rabattement
w	[-]	Coefficient de pondération des données (poids)
Q_i	[m ³ /j]	Débit de pompage
t_i	[min]	Temps de début de pompage avec un débit Q_i
r_w	[m]	Rayon du puits du pompage

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Validation de l'algorithme

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec la méthode graphique.

Les données expérimentales de (Kruseman & De Ridder, 1994) consistent en un essai de pompage effectué dans une nappe captive avec un débit variable croissant dans un puits totalement pénétré dans l'aquifère dont lequel on s'intéresse à connaître ses propriétés hydrauliques, les observations de l'évolution de rabattement au cours du temps sont effectués dans le puits de pompage.

Une méthode est utilisée pour interpréter ces résultats.

- La méthode de Eden-Hazel (1973) ;

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus de la méthode graphique sont donnés dans Tableau II-23.

Tableau II-27: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat méthode graphique	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Eden-Hazel (1973)	$T [m^2/j]$	218.88	265	17.404	la méthode graphique est relativement non précise ce qui justifie cet écart d'erreur entre les résultats
	$S [-]$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$	12.360	
	$C [j^2/m^5]$	$1.34 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	4.285	

II.4.1.5 Validations des algorithmes développés pour slug tests

Nappe captive

- **Puits partiellement pénétré dans l'aquifère**

Deux méthodes sont disponibles pour cette configuration, et chaque méthode dépend de la réponse d'essai :

- La méthode de Hvorslev (1951) pour des aquifères à faible conductivité hydraulique (un retour à l'équilibre sans oscillation).
- La méthode de Butler (1998) pour des aquifères à des conductivités hydrauliques importantes (un retour à l'équilibre avec oscillation).

- **Un retour à l'équilibre avec oscillation**

L'algorithme d'interprétation se base sur la solution analytique donnée dans eq. I-41 à I-75 pour la méthode de Butler (1998) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-28

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-28: Variables d'entrée de l'algorithme

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de récupération.
h	[m]	La charge hydraulique.
r_c	[m]	Rayon intérieur du tubage du puits.
r_w	[m]	Rayon du puits.
l	[m]	La longueur de la partie ouverte du puits.
h_0	[m]	La charge hydraulique à $t=0$ min.
h_{stat}	[m]	La charge hydraulique statique.

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec le logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Duffield, 2007) décrit un slug test dans une nappe captive à conductivité hydraulique élevée, ayant une épaisseur saturée de 10,6 m. Le déplacement initial dans le puits était de 0,094 m. Le Tableau II-29 fournit des détails de construction du puits dans le présent test.

Tableau II-29 : Paramètres qui décrivent la construction du puits.

r_w [m]	r_c [m]	d [m]	L [m]
0.0127	0.0074	4.92	0.61

Une analyse de la réponse d'essai est recommandée afin de choisir la méthode convenable

La Figure II-17 montre la réponse de cet exemple au slug test

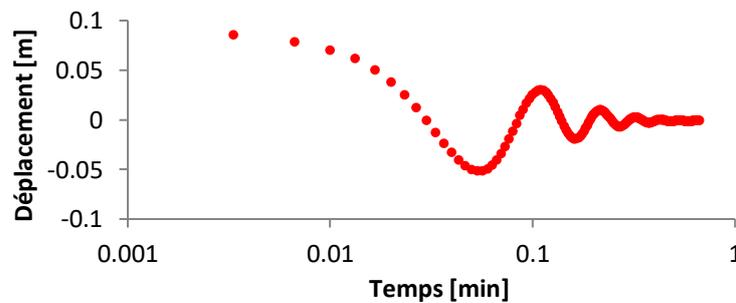


Figure II-17 : Réponse d'un essai de slug dans une nappe à conductivité hydraulique importante

L'allure de la courbe montre que l'aquifère est d'une conductivité hydraulique importante d'où la méthode utilisée pour ce cas est la méthode de Butler (1998).

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-30.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-30: Validation de l'algorithme : slug test avec un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Butler (1998)	K [m/j]	41.905	42.180	0.652	Erreur accepté
	Cd [-]	0.345	0.3453	0.087	

Nappe libre

- **Puits partiellement pénétré dans l'aquifère**

Deux méthodes sont disponibles pour cette configuration, et chaque méthode dépend de la réponse d'essai :

- La méthode de Bouwer-Rice (1976) pour des aquifères à faible conductivité hydraulique (un retour à l'équilibre sans oscillation).
- La méthode de Spring and Gelhar (1991) pour des aquifères à des conductivités hydrauliques importantes (un retour à l'équilibre avec oscillation).

- **Un retour à l'équilibre sans oscillation**

L'algorithme d'interprétation se base sur la solution analytique donnée dans eq. I-61 à I-67 pour la méthode de Bouwer-Rice (1976) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-31.

Tableau II-31: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans une nappe libre à conductivité hydraulique faible.

Variable	Unité	Description
t	[min]	Temps de récupération.
h	[m]	La charge hydraulique.
r_c	[m]	Rayon intérieur du tubage du puits.
r_w	[m]	Rayon du puits.
l	[m]	La longueur de la partie ouverte du puits.
h_0	[m]	La charge hydraulique à $t=0$ min.

La validation des résultats de cet algorithme se base sur la comparaison des valeurs obtenues par l'interprétation d'une série de tests (données expérimentales) en utilisant le code développé avec les résultats estimés avec le logiciel AQTESOLV.

Les données expérimentales de (Duffield, 2007) décrit un slug test dans une nappe libre à conductivité hydraulique faible, ayant une épaisseur saturée de 9.927m. Le déplacement initial dans le puits était de 0.451m. Le tableau Tableau II-32 fournit des détails de construction de puits dans le présent test.

Tableau II-32: Paramètres qui décrivent la construction du puits.

r_w [m]	r_c [m]	d [m]	L [m]
1.524	0.61	0.143	4.206

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Une analyse de la réponse d'essai est recommandée afin de choisir la méthode convenable

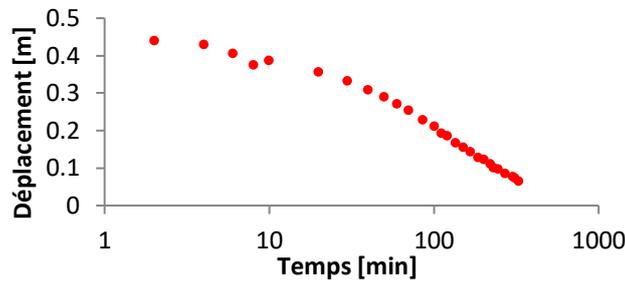


Figure II-18 : La réponse d'un essai de slug dans une nappe à faible conductivité hydraulique.

La courbe du rabattement en fonction du temps Figure II-18 montre un retour à l'équilibre du niveau d'eau sans oscillation se qui signifie que l'aquifère étudié est de faible conductivité hydraulique, d'où la méthode utilisée pour ce cas est la méthode de Bouwer-Rice (1976).

Résultats

Les résultats de l'interprétation des données expérimentales ainsi qu'une comparaison faite en terme d'erreur relative calculée entre les paramètres obtenus de l'algorithme et ceux obtenus du logiciel AQTESOLV sont donnés dans Tableau II-33.

Tableau II-33: Validation de l'algorithme: essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans une nappe libre à conductivité hydraulique faible.

Méthode	Paramètre	Résultat Outil	Résultat AQTESOLV	Erreur relative [%]	Interprétation d'erreur
Bouwer-Rice (1976)	K [m/j]	0.390	0.389	0.437	Erreur accepté

II.4.2 Outil de simulations

II.4.2.1 Algorithme générale

Comme le montre l'algorithme donné dans Figure II-19, la simulation d'un test hydraulique avec l'outil développé est menée comme suit :

- Introduction des données de base de l'installation et les caractéristiques hydraulique de l'aquifère en spécifiant les conditions d'essai et le type d'aquifère dans lequel le test est effectué;
- Choix de la méthode appropriée aux conditions choisies
- Résolution de l'équation analytique de la méthode choisie ;

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tous les algorithmes développés dans cet outil sont basés sur le même principe, la différence entre eux réside dans l'équation analytique utilisée et les paramètres d'entrées nécessaires.

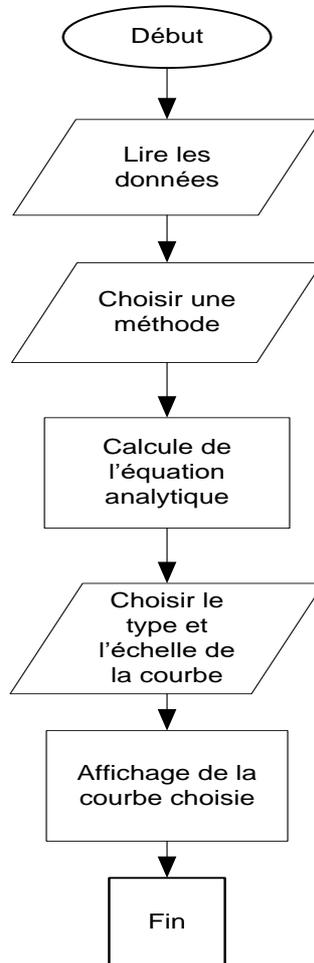


Figure II-19 : Algorithme général de simulation des tests hydrauliques (essais de pompage /slug test)

II.4.2.2 Validation de quelques algorithmes développés pour les essais de pompage

- a) **Essai de pompage idéal**
 - **Nappe captive**

L'algorithme de simulation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-15 à I-17 pour la méthode de Theis (1935) et eq. I-18 pour la méthode de Jacob (Cooper & Jacob, 1946) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-34.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-34: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Variable	Unité	Description
T	[m ² /j]	Transmissivité
S	[-]	Coefficient d'emmagasinement
t	[min]	Temps du pompage
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre le puits de pompage et le piézomètre

Afin de valider les résultats de simulations avec cet algorithme, des comparaisons sont effectuées entre les résultats de ce dernier et les résultats obtenus avec le logiciel OUAIP « Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai » (Klinka,2015). Les paramètres de simulation utilisés dans la validation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau II-35.

Tableau II-35: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Paramètre	T [m ² /j]	S [-]	t [min]	Q [m ³ /j]	r [m]
Valeur	1000	0.001	1000	600	30

Les 2 courbes de variation du rabattement dans le temps ainsi obtenues (avec le simulateur et OUAIP) sont données dans Figure II-20.

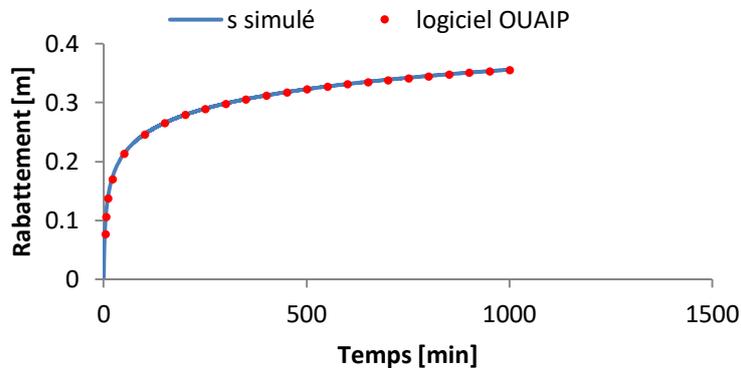


Figure II-20 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Theis.

Les résultats de simulation dans l'outil informatique développé (volé simulateur) avec la méthode de Theis (1935) coïncident pratiquement parfaitement (comme le montre Figure II-20 et l'indique les paramètres statistiques donnés dans Tableau II-36) avec les résultats obtenus avec le logiciel OUAIP.

Tableau II-36: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe captive.

Méthode	NSE	RSR	PBIA	Niveau de performance
Theis (1935)	1.000	0.002	0.030	Très bien

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

➤ Nappe semi-captive

L'algorithme de simulation se base sur les solutions analytiques données dans eq. I-45 à I-47 pour la méthode de Walton (Huntush & Jacob, 1955) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-37.

Tableau II-37: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.

Variable	Unité	Description
T	[m ² /j]	Transmissivité
S	[-]	Coefficient d'emmagasinement
t	[min]	Duré du pompage
Q	[m ³ /j]	Débit de pompage
r	[m]	Distance entre puits de pompage et piézomètre
L	[m]	Coefficient de drainance.

Afin de valider les résultats de simulations avec cet algorithme, des comparaisons sont effectuées entre les résultats de ce dernier et les résultats obtenus avec le logiciel open source OUAIP (Klinka,2015). Les paramètres de simulation utilisés dans la validation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau II-38.

Tableau II-38: Paramètres de simulation utilisée pour la validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.

Paramètre	T [m ² /j]	S [-]	t [min]	Q [m ³ /j]	r [m]	L [m]
Valeur	1000	0.001	1000	600	30	100

Les 2 courbes de variation du rabattement dans le temps ainsi obtenues (avec le simulateur et OUAIP) sont données dans Figure II-21.

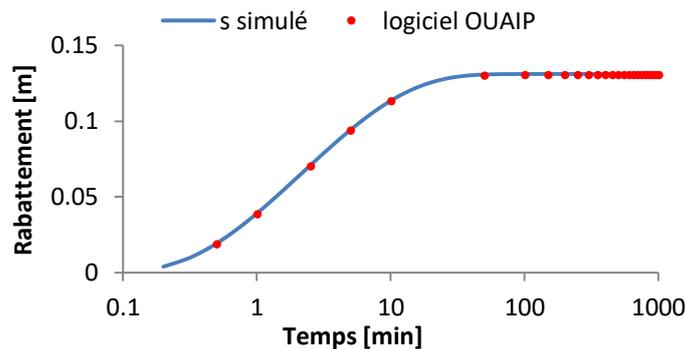


Figure II-21 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Walton

Les résultats de simulation dans l'outil informatique développé (volé simulateur) avec la méthode de Walton (Huntush & Jacob, 1955) coïncident pratiquement parfaitement (comme le montre Figure II-21 et l'indique les paramètres statistiques donnés dans Tableau II-39) avec les résultats obtenus avec le logiciel OUAIP.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-39: Validation de l'algorithme : essai de pompage idéal dans une nappe semi-captive.

Méthode	NSE	RSR	PBIA	Niveau de performance
Walton (Huntush & Jacob, 1955)	0.999	0.007	0.027	Très bien

b) Essai de pompage en présence de frontière

La présence des frontières dans un aquifère peut prendre diverses formes, l'outil de simulation développé peut traiter les 5 cas suivants pour une nappe captive et libre :

- Une limite rectiligne étanche ;
- Une limite rectiligne d'alimentation ;
- Deux limites étanches réparées par angle droit ;
- Deux limites d'alimentation réparées par angle droit ;
- Deux limites réparées par angle droit : une étanche et une d'alimentation.

La Figure II-22 montre les deux différentes formes que puissent les limites prendre dans un aquifère, en spécifiant la répartition des puits imaginaires pour le cas des limites d'alimentation.

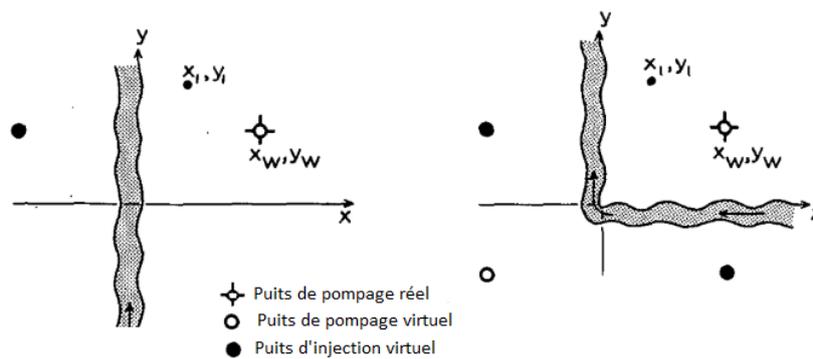


Figure II-22 : Schéma des systèmes de puits-images d'une nappe comportant des limites hydrauliques (Kruseman & De Ridder, 1994).

Par contre pour une nappe semi-captive seul le cas suivant est traité :

- Deux limites étanches parallèles (aquifère à chenal parallèle Figure II-23)

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

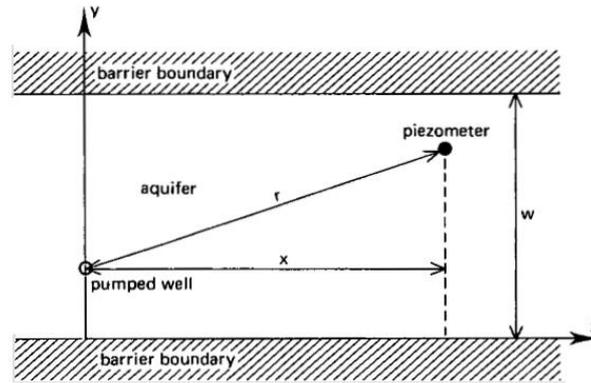


Figure II-23 : Vue en plan d'un aquifère à chenal parallèle (Kruseman & De Ridder, 1994).

➤ Nappe captive

L'algorithme de simulation se base sur la solution analytique donnée dans eq. I-19 à I-25 pour la méthode de Stallman (Ferris et al., 1962) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-40.

Tableau II-40: Variables d'entrée de l'algorithme : essai de pompage en présence de frontière dans une nappe semi-captive.

Variable	Unité	Description
T	$[m^2/j]$	Transmissivité
S	$[-]$	Coefficient d'emmagasinement
t	$[min]$	Temps du pompage
Q	$[m^3/j]$	Débit de pompage
r	$[m]$	Distance entre puits de pompage et piézomètre
r_i	$[m]$	Distance entre le piézomètre et le i ème puits imaginaire

Afin de valider les résultats de simulations avec cet algorithme, des comparaisons sont effectuées entre les résultats de ce dernier et les résultats obtenus avec le logiciel open source OUAIP (Klinka, 2015). Les paramètres de simulation utilisés dans la validation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau II-41.

Traitant les deux cas suivants :

- une limite rectiligne étanche;
- une limite rectiligne d'alimentation.

Tableau II-41: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de pompage en présence des frontières dans une nappe captive.

Paramètre	$T [m^2/j]$	$S [-]$	$t [min]$	$Q [m^3/j]$	$r [m]$	$r_l [m]$
Valeur	1512	0.01	1000	800	15	30

Les 4 courbes de variation du rabattement dans le temps ainsi obtenues (avec le simulateur et OUAIP) sont données dans Figure II-24.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmique

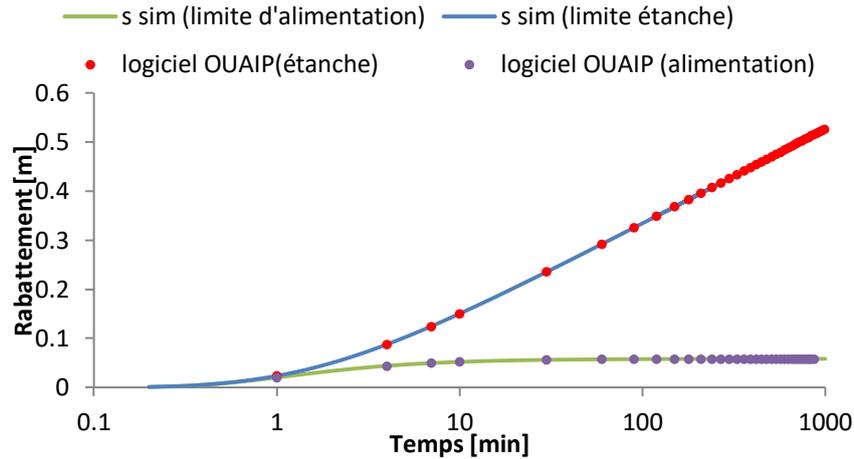


Figure II-24: Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Stallman dans le cas d'une frontière d'alimentation et une frontière étanche.

Les résultats de simulation dans l'outil informatique développé (volé simulateur) avec la méthode de Stallman (Ferris et al., 1962) coïncident pratiquement parfaitement (comme le montre Figure II-24 et l'indique les paramètres statistiques donnés dans Tableau II-42) avec les résultats obtenus avec le logiciel open source OUAIP.

Tableau II-42: Validation de l'algorithme : essai de pompage en présence de frontières dans une nappe captive

Méthode	NSE	RSR	PBIA	Niveau de performance
Stallman (Ferris et al., 1962)	1	0	0	Très bien

II.4.2.3 Validations de quelques algorithmes développés pour slug test

Essai dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive

- **Aquifère à faible conductivité hydraulique**

L'algorithme de simulation se base sur la solution analytique donnée dans eq I-68 pour la méthode de Hvorslev (1951) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-43 .

Tableau II-43: Variables d'entrée de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.

Variable	Unité	Description
k	[m/j]	Conductivité hydraulique
r_w	[m]	Rayon du puits
r_c	[m]	Rayon intérieur du tubage du puits
l	[m]	La longueur de la partie ouverte du puits
h_0	[m]	Charge hydraulique dans le puits à $t=0$ s [m]

Afin de valider les résultats obtenus de cet algorithme, des comparaisons sont effectuées entre les résultats de ce dernier et les résultats obtenus de la résolution de l'équation de Hvorslev

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

par la méthode graphique. Les paramètres de simulation utilisés dans la validation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau II-44 :

Tableau II-44: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.

Paramètre	$K[m/j]$	$r_c [m]$	$r_w [m]$	$l [m]$	$h_0 [m]$
Valeur	0.56	0.5	0.127	4	0.45

Les deux courbes de variation du rabattement dans le temps ainsi obtenues (avec le simulateur et la méthode graphique) sont données dans Figure II-25.

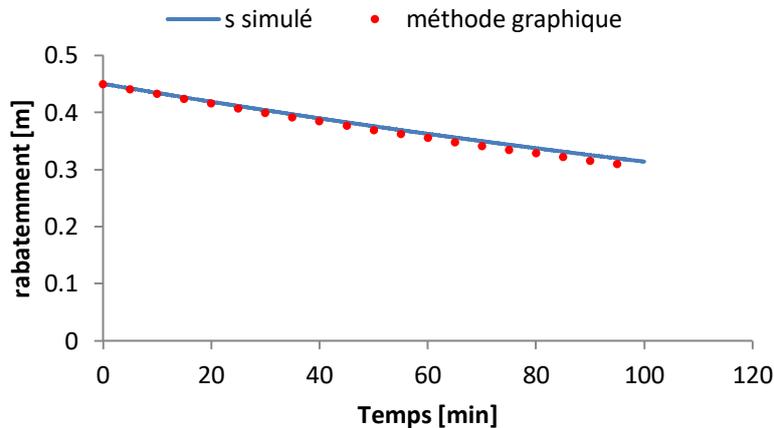


Figure II-25 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Hvorslev

Les résultats de simulateur basé sur la méthode de Hvorslev (1951) coïncident parfaitement avec le résultat obtenu de la résolution de l'équation de Hvorslev par la méthode graphique.

Tableau II-45: Validation de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans une nappe captive à faible conductivité hydraulique.

Méthode	NSE	RSR	PBIA	Niveau de performance
Hvorslev (1951)	0.977	0.151	1.541	Très bien

- **Aquifère à conductivité hydraulique importante**

L'algorithme de simulation se base sur la solution analytique donnée dans eq. I-41 à I-75 pour la méthode de Butler (1998) et fait recours aux variables/paramètres résumés dans le Tableau II-46.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Tableau II-46: Variables d'entrée de l'algorithme : slug test dans un puits partiellement pénétré dans l'aquifère dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.

Variable	Unité	Description
k	[m/j]	Conductivité hydraulique
r_w	[m]	Rayon du puits
r_c	[m]	Rayon intérieur du tubage du puits
l	[m]	La longueur de la partie ouverte du puits
h_0	[m]	Charge hydraulique dans le puits à $t=0$ s [m]
h_{stat}	[m]	La charge hydraulique statique.

Afin de valider les résultats obtenus de cet algorithme, des comparaisons sont effectuées entre les résultats de ce dernier et les résultats obtenus de la résolution de l'équation de Butler (1998) par la méthode graphique. Les paramètres de simulation utilisés dans la validation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau II-47:

Tableau II-47: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme : essai de slug dans un puits partiellement pénétré dans l'aquifère dans une nappe captive à conductivité hydraulique importante.

Paramètre	K [m/j]	r_c [-]	r_w [m]	l [m]	h_0 [m]	h_{stat} [m]
Valeur	41	0.0074	0.0127	0.61	0.094	11.13

Les 2 courbes de variation du rabattement dans le temps ainsi obtenues (avec le simulateur et la méthode graphique) sont données dans Figure II-26.

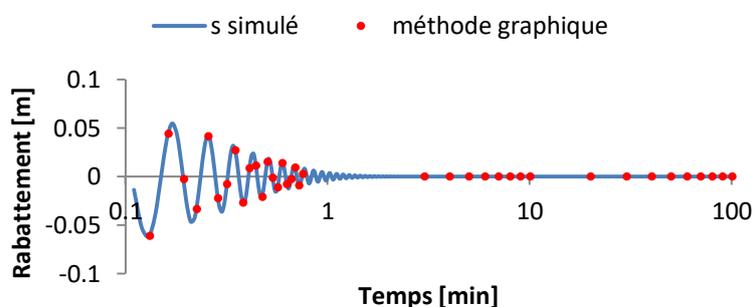


Figure II-26 : Comparaison des résultats obtenus de la méthode de Butler

Les résultats de simulateur basé sur la méthode de Butler (1998) coïncident parfaitement avec le résultat obtenu de la résolution de cette méthode par la méthode graphique.

Tableau II-48: Validation de l'algorithme

Méthode	NSE	RSR	PBIA	Niveau de performance
Butler (1998)	0.9772	0.151	1.5411	Très bien

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Chapitre 3 : Applications

III. Application

III.1 Introduction

Lorsque l'on pompe d'un puits, on produit un cône ou plus exactement une zone d'abaissement de pression, autour du puits. Dans le cas d'une nappe libre, cette zone de dépression se traduit par un abaissement de la surface de la nappe, tandis que dans une nappe captive il n'y a qu'un abaissement de la surface d'eau. Dans ce chapitre, nous allons utiliser l'outil développé dans une étude paramétrique de la manière dont le rayon d'action et le cône de dépression peuvent être influencés par la variation de certains paramètres (notamment la durée de pompage, coefficient d'emménagement, transmissivité, débit de pompage, la profondeur du puits et le facteur de drainance), ainsi que l'effet de type de puits et le type aquifère sur la réponse de l'essai de pompage.

III.2 Influence de la durée de pompage sur le rayon d'action et le cône de dépression

Pour étudier l'influence de la durée de pompage sur le rayon d'action, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Theis (1935) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe captive pour différentes durées de pompage. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-1.

Tableau III-1: Données utilisées pour l'étude de l'influence de la durée de pompage sur le rayon d'action et le cône de dépression.

Paramètre	Transmissivité	Coefficient d'emménagement	Débit de pompage	Durée de pompage
Symbole	T	S	Q	t
Unité	[m ² /j]	[-]	[m ³ /j]	[min]
Valeur	500	0.00005	100	10 100 500 1000 1440

Les résultats de simulations sont donnés dans Figure III-1 en terme de l'allure de la surface piézométrique dans l'aquifère à la fin du pompage pour différentes durées de pompage. Le rayon d'action (rayon d'influence) est proportionnel à la durée de pompage. Le cône de dépression est plus important pour des durées de pompage élevé et tend à se stabiliser plus grand est la durée (convergence vers le régime permanent).

Chapitre 3 : Application

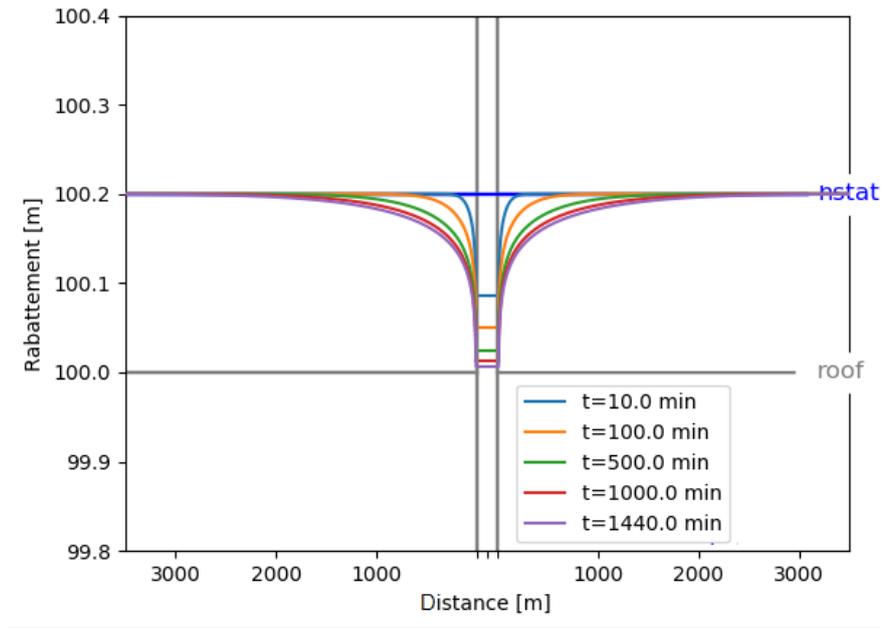


Figure III-1 : Cône de dépression pour différentes valeurs de durée de pompage.

III.3 Influence du coefficient d'emmagasinement sur le rayon d'action et le cône de dépression

Pour étudier l'influence du coefficient d'emmagasinement sur le rayon d'action, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Theis (1935) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe captive pour différents coefficients d'emmagasinement. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-2.

Tableau III-2: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient d'emmagasinement sur le rayon d'action et le cône de dépression.

Paramètre	Transmissivité	Coefficient d'emmagasinement	Débit de pompage	Durée de pompage
Symbole	T	S	Q	t
Unité	$[m^2/j]$	$[-]$	$[m^3/j]$	$[min]$
Valeur	500	0.0001 0.0005 0.00005 0.00001	100	1440

Chapitre 3 : Application

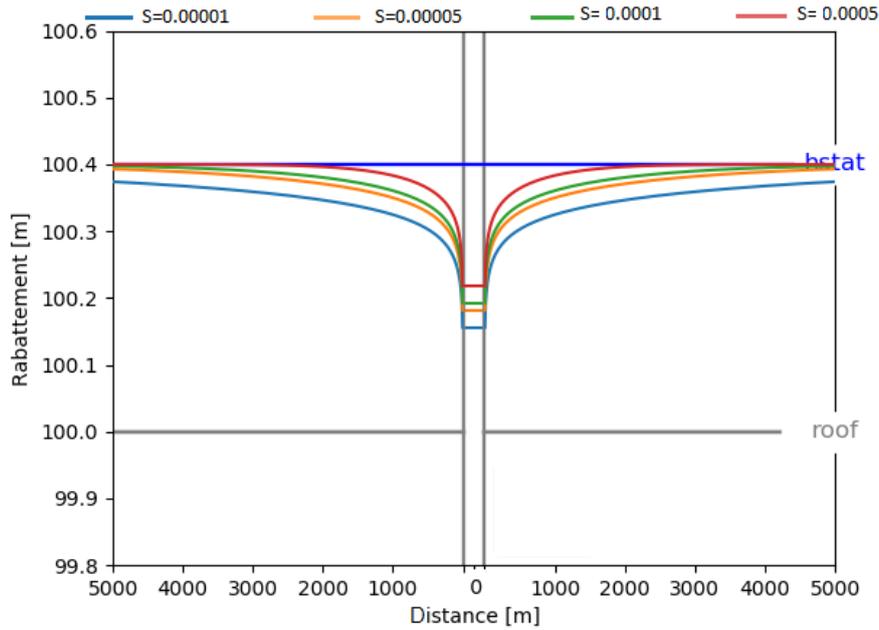


Figure III-2 : Cône de dépression pour différentes valeurs de coefficient d’emménagement.

Les résultats de simulation donnés par la Figure III-2 montrent que le rayon d’action est inversement proportionnel au coefficient d’emménagement, et le cône de dépression est plus important pour des coefficients d’emménagements plus faibles.

III.4 Influence de la transmissivité sur le rayon d’action et le cône de dépression

Pour étudier l’influence de la transmissivité sur le rayon d’action, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Theis (1935) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe captive pour différentes valeurs de transmissivité. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-3.

Tableau III-3: Données utilisées pour l’étude de l’influence de la transmissivité sur le rayon d’action et le cône de dépression.

Paramètre	Transmissivité	Coefficient d’emménagement	Débit de pompage	Temps de pompage
Symbole	T	S	Q	t
Unité	$[m^2/j]$	$[-]$	$[m^3/j]$	$[min]$
Valeur	10 50 100 1000	0.00005	100	1440

Les résultats de simulations sont donnés dans Figure III-3 en terme de l’allure de la surface piézométrique dans l’aquifère à la fin du pompage pour différentes valeurs de transmissivité.

Chapitre 3 : Application

Le rayon d'action (rayon d'influence) est proportionnel à la transmissivité de l'aquifère. Le cône de dépression est plus important pour des transmissivités plus faibles. Plus la transmissivité est élevée plus le débit d'eau entrant vers l'aquifère est grande, plus l'abaissement d'eau dans le puits est faible.

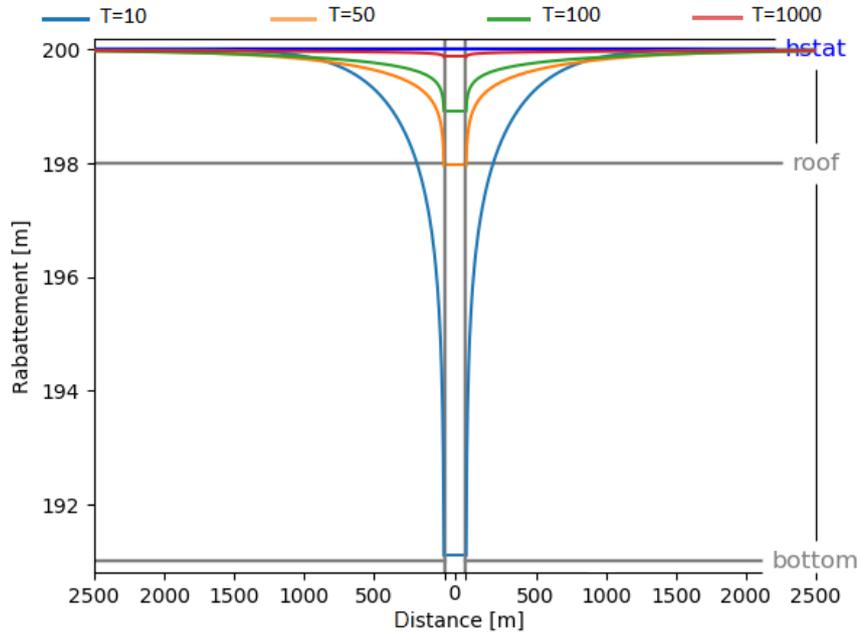


Figure III-3 : Cône de dépression pour différentes valeurs de transmissivité.

III.5 Influence du débit de pompage sur le rayon d'action

Pour étudier l'influence du débit de pompage sur le rayon d'action, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Theis (1935) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe captive pour différentes valeurs du débit de pompage. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-4.

Tableau III-4: Données utilisées pour l'étude de l'influence du débit de pompage sur le rayon d'action.

Paramètre	Transmissivité	Coefficient d'emmagasinement	Débit de pompage	Durée de pompage
Symbole	T	S	Q	t
Unité	$[m^2/j]$	$[-]$	$[m^3/j]$	$[min]$
Valeur	500	0.00005	100 500 1000 2000	1440

Chapitre 3 : Application

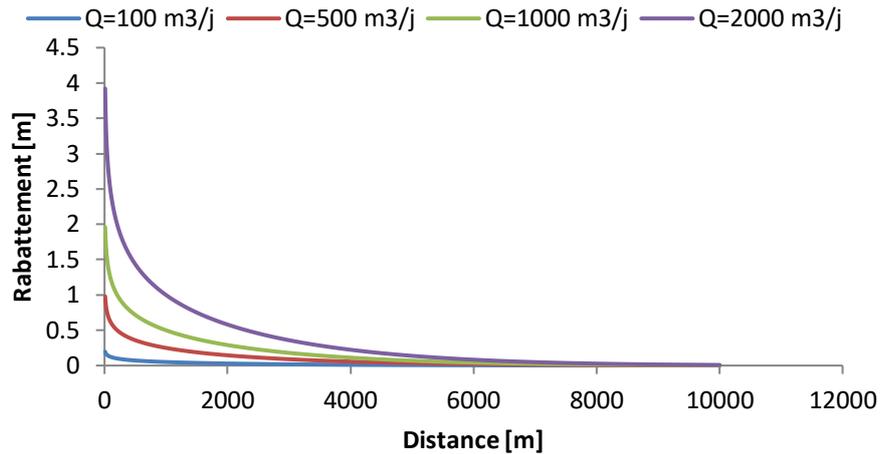


Figure III-4 : Courbe rabattement/distance pour différentes valeurs de débit de pompage.

Dans le but de mieux visualiser l'influence de débit de pompage sur le rayon d'action, les résultats de simulation sont données par la courbe rabattement-distance, comme le montre la Figure III-4, le rayon d'action est proportionnel au débit de pompage.

III.6 Influence de la profondeur du puits sur le rayon d'action et le cône de dépression

A l'aide de l'outil de simulation, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Theis modifié par Huntush (1961a; 1961b) dans un puits partiellement pénétré, dans une nappe captive, en variant la profondeur de puits et fixant les autres paramètres afin d'étudier l'influence de la profondeur du puits sur le rayon d'action. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-5.

Tableau III-5: Données utilisées pour l'étude de l'influence de la profondeur du puits sur le rayon d'action et cône de dépression.

paramètre	Transmissivité	Coefficient d'emmagasinement	L'épaisseur de l'aquifère	Longueur Du Puits pénétré dans l'aquifère (partie non ouverte)	Longueur de pénétration du puits	Longueur du puits d'observation pénétré dans l'aquifère	Longueur de pénétration de puits d'observation	Débit de pompage	Durée de pompage
Symbole	T	S	D	d	b	d'	b'	Q	t
Unité	$[m^2/j]$	$[-]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[m^3/j]$	$[min]$
Valeur	500	5×10^{-5}	20	0	1 5 10 20	0	1 5 10 20	100	1440

Chapitre 3 : Application

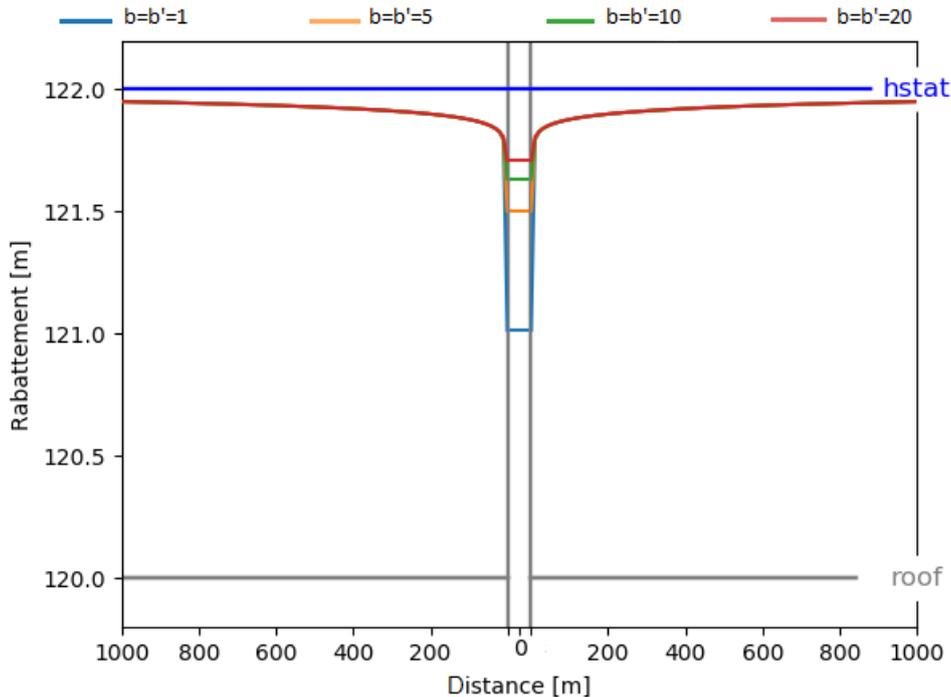


Figure III-5 : Cône de dépression pour différentes configurations du puits de pompage et puits d'observation

Les résultats de simulation donnés par la Figure III-5 montrent que : le rayon d'action est faiblement influencé par la longueur de pénétration de puits de pompage et du puits d'observation (une fois le régime permanent est atteint). Plus on s'éloigne du puits de pompage plus l'effet de la pénétration partielle tend à ce négligé, et les cônes de dépression prennent le comportement d'un puits totalement pénétré dans l'aquifère.

Remarque

Les mêmes résultats sont obtenus en utilisant l'équation de Jacob (Cooper & Jacob, 1946) ou en utilisant l'équation de Walton (Huntush & Jacob, 1955) pour une nappe semi-captive dans les simulations précédentes.

III.7 Influence de Facteur de drainance sur le rayon d'action et le cône de dépression

Pour étudier l'influence du facteur de drainance, nous allons simuler le rabattement en utilisant la solution analytique de Walton (Huntush & Jacob, 1955) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe semi-captive pour différentes valeurs du facteur de drainance. Les paramètres de cette étude paramétrique sont donnés dans Tableau III-6.

Chapitre 3 : Application

Tableau III-6 : Données utilisées pour l'étude de l'influence du facteur de drainance sur le rayon d'action et le cône de dépression.

Paramètres	Transmissivité	Coefficient d'emmagasinement	Débit de pompage	Facteur de drainance
Symbole	T	S	Q	L
Unité	$[m^2/j]$	$[-]$	$[m^3/j]$	$[m]$
Valeur	500	0.00005	100	50 100 400

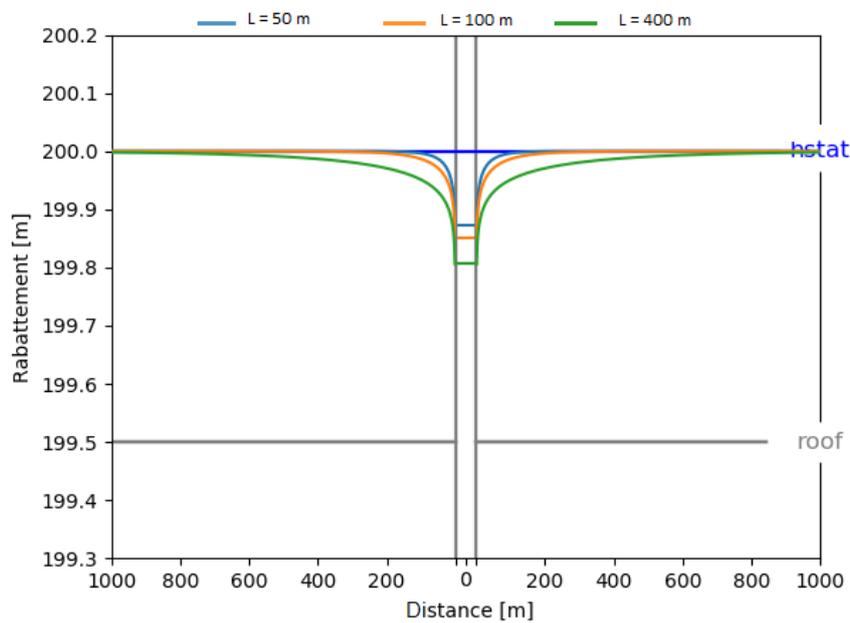


Figure III-6 : Cône de dépression pour différentes valeurs de facteur de drainance.

Les résultats de simulations donnés par la Figure III-6 montrent que le rayon d'action est proportionnel au facteur de drainance et le cône de dépression est plus important pour des valeurs de drainance plus élevées.

III.8 L'effet de type d'aquifère sur le rabattement

Utilisant les données du tableau III-6 afin d'étudier l'effet de la drainance sur l'évolution de rabattement dans l'aquifère. Pour mener à cette étude, nous allons simuler en parallèle le rabattement en utilisant la solution analytique de Walton (Huntush & Jacob, 1955) et la solution analytique de Theis (1935) pour un puits totalement pénétré avec un débit constant, dans une nappe semi-captive et captive respectivement.

Les résultats de simulations sont donnés dans Figure III-7. Ces résultats montrent que :

Chapitre 3 : Application

- Dans le régime transitoire, le rabattement dans une nappe semi-captive se stabilise par effet de draince contrairement à la nappe captive dont le rabattement s'accroît avec le temps ;
- Le rabattement est proportionnel au facteur de drainance ;
- Le temps nécessaire pour la recharge de la nappe par la nappe semi-perméable adjacente accroît avec l'augmentation de facteur de drainance.

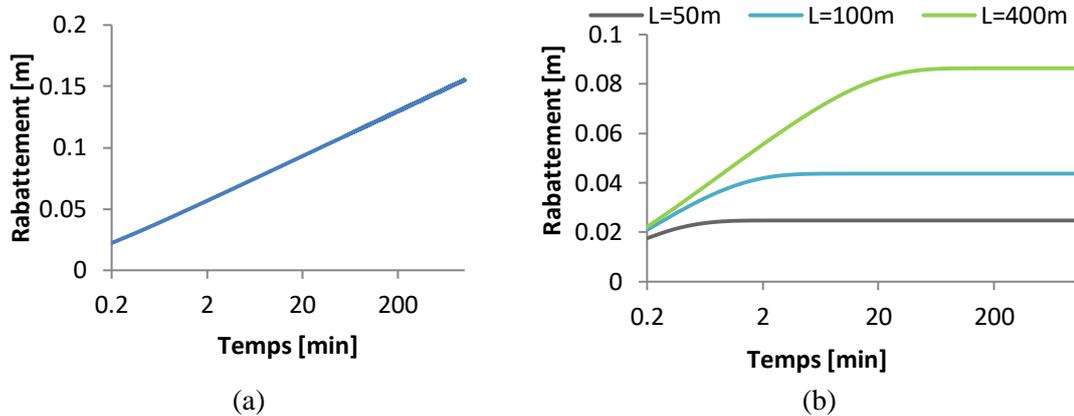


Figure III-7: Courbe rabattement/temps (a) nappe captive ; (b) nappe semi captive.

III.9 L'effet du type du puits sur le rabattement

Utilisant les données du Tableau III-5 afin d'étudier l'effet du type du puits (partiellement pénétré /totalement pénétré dans l'aquifère) sur la réponse du test.

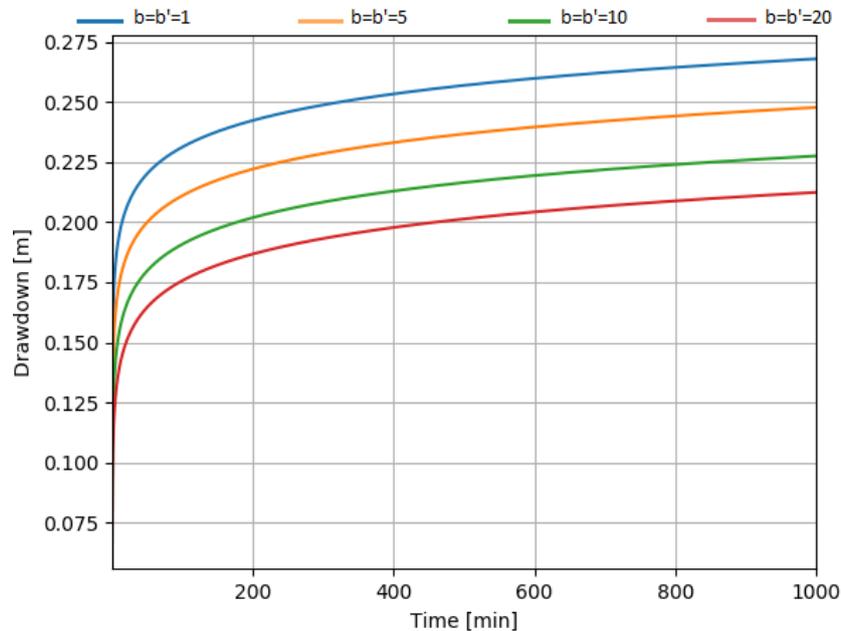


Figure III-8 : Courbe rabattement/temps pour différentes profondeurs du puits.

Chapitre 3 : Application

Les résultats de simulation donnés par la Figure III-8 montrent que le rabattement est inversement proportionnel à la profondeur de pénétration du puits de pompage et puits d'observation.

III.10 Conclusion

Le rayon d'influence est la distance à laquelle le rabattement est considéré nul, autrement dit au-delà de ce rayon d'action, la pompe n'a aucune influence sur le niveau d'eau. Il existe diverses formules qui permettent d'estimer ce rayon, comme par exemple la formule de Dupuit, Jacob... A partir de ces formules le rayon d'action est influencé par plusieurs paramètres (caractéristiques hydrodynamiques, configuration du puits, durée et débit de pompage) ce qui est en accord avec les résultats obtenus des simulations effectuées et prouve la fiabilité, capacité et l'utilité des fonctionnalités de l'outil développé.

Conclusions et recommandations

Dans cette étude, on s'est intéressé à élaborer un outil informatique (codé dans un langage *open source* - Python 3.7) capable de simuler et d'interpréter des essais hydrauliques dans les aquifères (essais de pompage/slug tests) pour différents types d'aquifères (nappe libre, semi-captive et captive) et sous différentes conditions d'essai :

- Condition idéale ;
- Pompages avec présence de limites dans la zone d'influence (frontière étanche ou d'alimentation) ;
- Pompage avec un puits partiellement pénétré dans la nappe ;
- Pompage à débit variable ;
- Pompage avec période de récupération.

L'outil se base sur la résolution des équations analytiques pour simuler la réponse d'un système donnée en vue d'analyser la dynamique du rabattement et le cône de dépression d'un côté. D'autre part, nous nous sommes intéressés à l'interprétation des données expérimentales (hydrogéologiques), à travers la régression non linéaire par moindres carrés de ces dernières solutions analytiques existantes. L'ensemble des algorithmes de l'outil développé ont été validés à partir d'une comparaison entre les résultats de ce dernier avec des résultats d'autres logiciels.

En termes prospectifs d'amélioration de l'outil développé, nous suggérons:

- Enrichir le logiciel avec plus de méthodes analytiques ;
- Étudier l'effet de stockage dans le puits de pompage ;
- Rajouter la possibilité d'interpréter les essais de pompage à partir des observations obtenues de plus qu'un piézomètre (puits d'observation) ;
- Introduire les courbes diagnostiques qui permettent d'identifier le système hydraulique inconnu ;
- Améliorer l'interface graphique.

Bibliographie

Belmihoub, Z., & Mekhnache, R. Effet de la dispersion thermique dans un milieu poreux non Darcéen en convection mixte et du masse simultanée. 81p .Mémoire de projet fin d'études. Bejaia: Département Génie Mécanique, Université Abderrahmane Mira: 2017.

Birsoy, Y., & Summers, W. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping. *Ground Water*. March-April, 1980, vol.18,n° 2, p.137-146.

Boukhemacha, M. Notes de cours modélisation hydraulique- partie hydrogéologie. Notes de cours, Alger, ENP : 2020.

Bouwer, H., & Rice, R. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, June, 1976, vol.12, n°3, p. 423-428.

Bredehoeft, J., Cooper, H., & Papadopoulos, I. Inertial and storage effects in well-aquifer systems : an analogue investigation *Water resources research*, 1966, vol. 2, n°4, p. 697-707.

Butler, J. The design, performance, and Analysis of Slug Tests. CRC Press. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers. 1997, ISBN 1-56670-230-5.

Cauchy, A. Méthode générale pour la résolution des systèmes d'équations simultanées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* , 1847, p. 536-538.

Cooper, H., & Jacob, C. A generalized graphical method for evaluating constants and summarizing well field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, January, 1946, vol.27, n°7, p.526-534.

Duffield, G. M. AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide. Reston: HydroSOLVE, Inc. 2007

Eden, R., & Hazel, C. Computer and graphical analysis of variable discharge pumping test of wells. *Inst. Engrs. Australia. Civil Engng. Trans* , April, 1973, pp.5-10.

Ferris, J.G, D.B.nowles, R.H.Brown, & R.W.Stallman. Theory of aquifer tests. U.S.Geological Survey, Water-Supply Paper 1536E , March, 1962 pp.1- 174

Gauss, C. F., & Newton, I. *Theoria motus corporum coelestium dans sectionibus conicis solem ambientum*. Reissue Edition. United State of America : Cambridge University Press, 1809. 268 p. ISBN-10: 1108143113.

Huntush, M. Drawdown around a partially penetrating well. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, April, 1961a, vol.87, n° HY4, p. 83-98.

Huntush, M. Drawdown around a partially penetrating well. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, May, 1961b, vol.87, n° HY5, p.171-195.

Huntush, M. Modification of the theory of leaky aquifer. *Journal of Geophysical Research*, November, 1960, vol.65, n°11, p.3713-3725.

- Huntush, M., & Jacob, C. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Transactions of the American Geophysical Union, February, 1955, vol.36, n° 1, p.95-100.
- Hvorslev, M. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations. 50 p. Bulletin N° 36, Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, :1951.
- Jacob, C. Notes on determining permeability by pumping tests under watertable conditions. 144 p. Report: United States Department of the Interior : U.S. Geol. Surv. 1944.
- Klinka, T. OUAIP for windows Version 1.9.3 User's Guide.2015
- Kruseman, G., & De Ridder, N. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. (2. nd, Éd.) Ede, The Netherlands: Veenman drukkers,1994. 377p, International Institute for Land Reclamation and Improvement. ISBN 90 70754 207.
- Lang, S. M. Interpretation of Boundary Effects From Pumping Test Data. Pumping test interpretation, March, 1960, vol. 5, n° 2, p. 356-364.
- Lefebvre-Brion, H., & Field, R. W. The Spectra and Dynamics of Diatomic Molecules. 1st Edition. Elsevier Academic Press. 2004, 786 p, ISBN: 9780124414563
- Levenberg, K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics. July, 1944, vol.2, n°2, p. 164-168.
- Marquardt, D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. Jun, 1963, vol. 11,n°2 , p 431-441.
- Moriasi, D.N. et al. Model Evaluation Guide Lines For Systematic. Transactions of the ASABE. 2007. vol 50,n°3. p. 885-900.
- Gary A. Robbins. A. Slug Test Review and Theory. Oscillatory response [en ligne] Copyright © 2016 Gary A. Robbins. 2016 Disponible sur: [http:// www.epoc.org / PSlugTest9-26-16](http://www.epoc.org/PSlugTest9-26-16)
- Springer, R., & Gelhar, L. Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response, p. 36-40. Water-Resources Investigations Report 91-4034: Department of Civil Engineering: Cambridge, Massachusetts Institute of Technology: 1991
- Theis, C. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions of the American Geophysical Union, August, 1935, vol.16,n° 2, p.519-524.
- Vandenberg, A. Table and type curve for analysis of pump tests in leaky parallel-channel aquifers. Bulletin N° 96. Ottawa: Inland Water Direction, Water Ressource branche. 1976
- Vandenberg, A. Type curves for analysis of pump tests in leaky strip aquifers. Journal of Hydrology , March, 1977, vol. 33,n°2, p. 15-26.
- Weeks, E. Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer-test analysis. Water resources research, February, 1969, vol.5, n°1, p.196-214.
- Wheatley, G. Applied Numerical Analysis. Seventh Edition. United States of America: Greg Tobin, 2004. 609 p. Pearson Education. ISBN 0-321-13304-8

Zaouali, J. Solutions analytique et numérique pour un essai de pompage dans un double milieu fractal. 88p. Mémoire de projet de fin d'études. Tuni: Département Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs: 2015.

Annexe

Manuel d'utilisation de l'application

« Aquifer Tests : Interpretation and Simulation Tools Kit »

1. Introduction

«*Aquifer Tests : Interpretation and Simulation Tools Kit*» est un outil développé sous python 3.7 un langage de programmation open source, et il est dédié à l'interprétation des essais hydrauliques dans les aquifères (essais de pompage, *slug tests*) et à la simulation de la dynamique du niveau d'eau sous différentes conditions d'essais.

2. Lancement de l'application

Une fois l'application est lancée la fenêtre principale s'affiche (Figure A. 1).

Cette application propose 2 modes d'utilisation

- Un mode «*Aquifer Tests Interpretation* » permettant d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères testés à partir des données expérimentales ;
- Un mode «*Aquifer Tests Simulation* » permettant de réaliser des simulations prévisionnelles des rabattements.

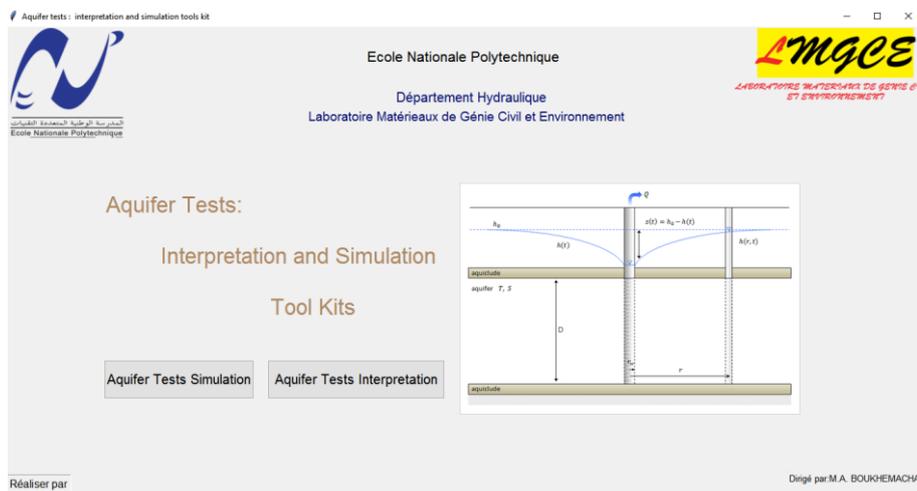


Figure A. 1 : Fenêtre principale de l'application.

3. Choix du type d'essai et le système aquifère

Après avoir choisi le mode de fonctionnement, l'utilisateur doit choisir le type d'essai et définir le système et les conditions sur lesquels l'essai est effectué.

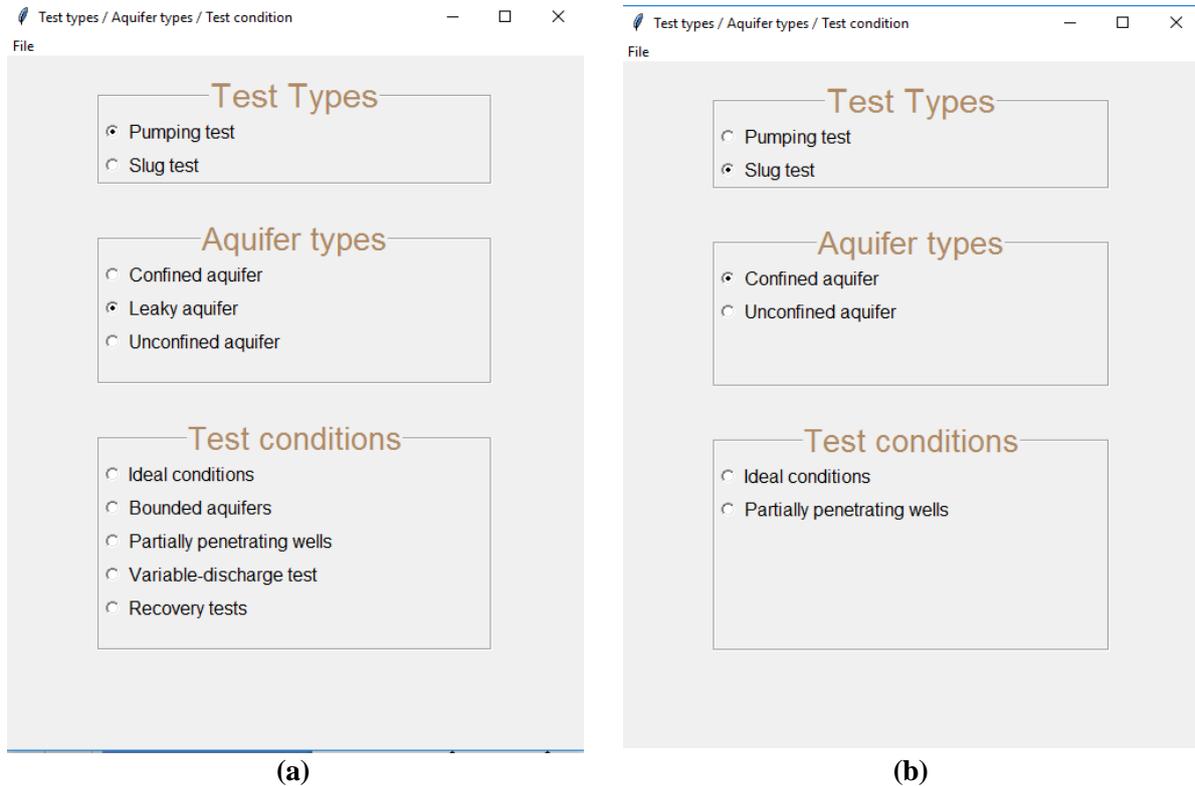


Figure A. 2 : Interface « choix du type de teste / type d'aquifère / condition d'essai » (a) essai de pompage, (b) slug test

a) Type de test

La première étape consiste à choisir le type de test, comme le montre la Figure A. 2, le logiciel traite deux types de tests :

- Essai de pompage ;
- *Slug test*.

b) type d'aquifère

La deuxième étape consiste à choisir le type d'aquifère, comme indiqué sur Figure A. 2 (a), ce logiciel traite des essais de pompage dans 3 types d'aquifères:

- Aquifère à nappe captive
- Aquifère à nappe semi-captive
- Aquifère à nappe libre

Due au manque des solutions analytiques pour le cas du slug test dans les aquifères semi-captives, seul les aquifères captives et libres sont étudiés (voir Figure A. 2 (b)).

c) Conditions d'essai

L'outil est capable d'étudier des testes hydrauliques (essais de pompage et *slug tests*) réalisés sous différentes conditions d'essai.

Pour un essai de pompage, comme indiqué par la Figure A. 2 (a), «*Aquifer tests : simulation and interpretation tool kits*» étudie les conditions suivantes :

- « **Idéal conditions** » : nous entendons par les conditions idéales les hypothèses suivantes :
 1. L'aquifère est d'une surface infinie ;
 2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme sur toute la surface influencée par le pompage ;
 3. Un essai de pompage avec un puits totalement pénétré dans la nappe ;
 4. Le diamètre du puits de pompage est suffisamment petit, que le stockage dans ce dernier est négligé ;
 5. Un essai de pompage à débit constant ;
 6. Régime transitoire
- « **Bounded aquifer** » : cette condition s'applique en cas de présence de l'effet de limite, en gardant les mêmes hypothèses citées précédemment et en remplaçant la première par : présence de limites dans la zone influencée par le pompage (frontières étanches ou d'alimentations).
- « **Partially penetrating wells** » : dans cette condition les mêmes hypothèses pour un essai dans des conditions idéales sont gardées, en remplaçant la troisième par : Un essai de pompage avec un puits partiellement pénétré dans la nappe.
- « **Variable discharge test** » : Dans cette condition les mêmes hypothèses pour un essai dans des conditions idéales sont gardées, en remplaçant la cinquième condition par un essai de pompage avec débit variable.
- « **Recovery test** » : Dans cette condition les mêmes hypothèses pour mener à un essai de pompage dans des conditions idéales sont gardées, en rajoutant la période de récupération dans l'analyse et la simulation de nos essais.
- « **Well performance test** » cette condition nous permet d'évaluer les pertes de charge dans un puits, mené sous des conditions d'essai idéales.

Pour un *slug test*, «*Aquifer tests : simulation and interpretation tools kit* » étudie les conditions suivantes (voir Figure A. 2 (b)):

«**Idéal conditions** » dans cette condition les essais sont effectués dans des puits complètement pénétrés dans l'aquifère.

«**Partially penetrating wells** » dans cette condition les essais sont effectués dans des puits partiellement pénétrés dans l'aquifère.

4. Interface graphique de l'outil d'interprétation

Dans le mode interprétation des essais, l'interface graphique est organisée en quatre parties distinctes.

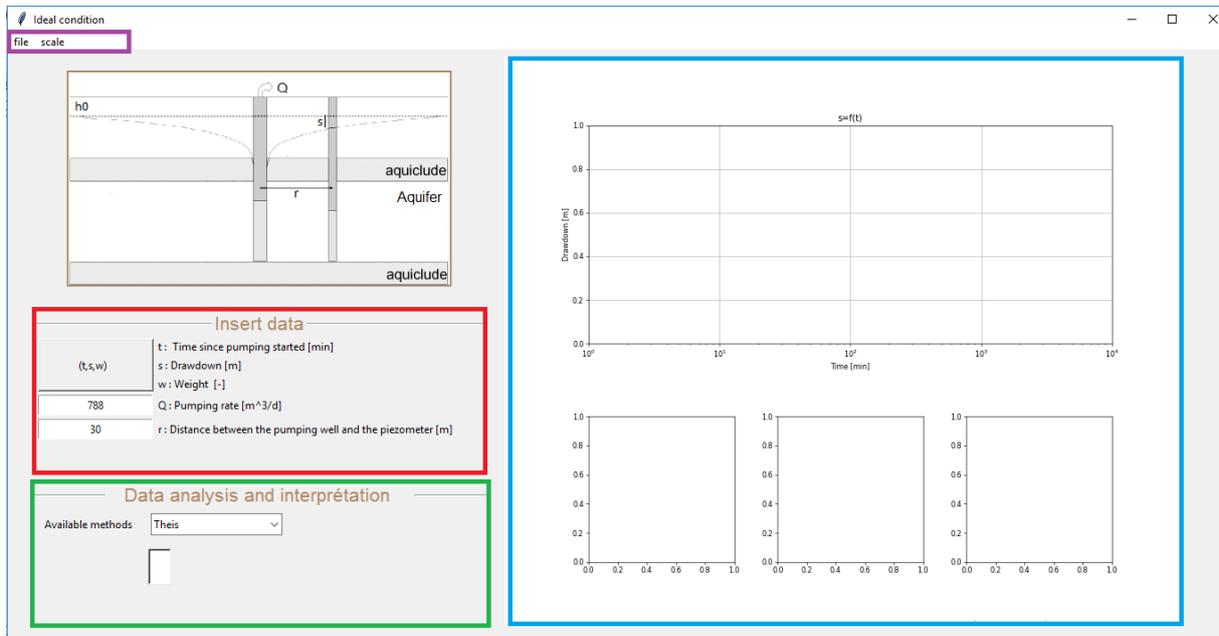


Figure A. 3: Interface graphique de l’outil d’interprétation.

- Partie 1 «*Insert Data*» (encadrée en rouge dans Figure A. 3) permet la saisie des données. Les données expérimentales (t,s) sont importées à partir d’un fichier Excel accompagner par le poids donner aux observations. La Figure A. 4 montre la structure que doit l’utilisateur respecté à fin d’assurer le bon fonctionnement de l’outil.

	A	B	C	D	E
1	0,1	0,04	1		
2	0,25	0,08	1		
3	0,5	0,13	1		
4	0,7	0,18	1		
5	1	0,23	1		
6	1,4	0,28	1		
7	1,9	0,33	1		
8	2,33	0,36	1		
9	2,8	0,39	1		
10	3,36	0,42	1		
11	4	0,45	1		
12	5,35	0,5	1		

Figure A. 4: Structure du fichier Excel à importer

- Partie 2 «*Data Analysis and Interpretation* » (encadrée en vert dans Figure A. 3) permet de choisir la méthode d'interprétation à utiliser et l'affichage des paramètres suivants :
 - Les paramètres hydrodynamiques résultant de la méthode choisie ;
 - Les erreurs statiques (R^2 , MSE, SE) .
- Partie 3 (encadrée en bleu dans Figure A. 3), **réservée aux graphiques**, de même cette partie est divisée en deux sous-parties :
 - Courbe en haut affiche les données d'observation en points rouge et le modèle ajusté en ligne continue en bleu ;
 - Partie de bas affiche trois graphes des résidus (la courbe résidus en fonction du temps, courbe résidus en fonction du rabattement ajusté, la courbe quantile-quantile) ces graphes permettes de faire une analyse graphique des résidus, autrement dis permet la validation du modèle d'ajustement
- Partie 4 (encadrée en violet dans Figure A. 3) représente la barre menue.

Clic sur menu déroulant «*file*» affiche les commandes suivantes:

- « **Clear** » : réinitialise la fenêtre graphique ;
- « **Previous** » : permet le retour vers la fenêtre précédente.

Clic sur menu déroulant «*scale*» affiche les commandes suivantes:

- « **Linear** » : affichage des graphes dans une échelle linéaire ;
- « **Semi logarithmic** » : affichage des graphes dans une échelle semi logarithmique ;

5. Interface graphique de l'outil de simulation

Dans le mode simulation, l'interface graphique est organisée en trois parties distinctes.

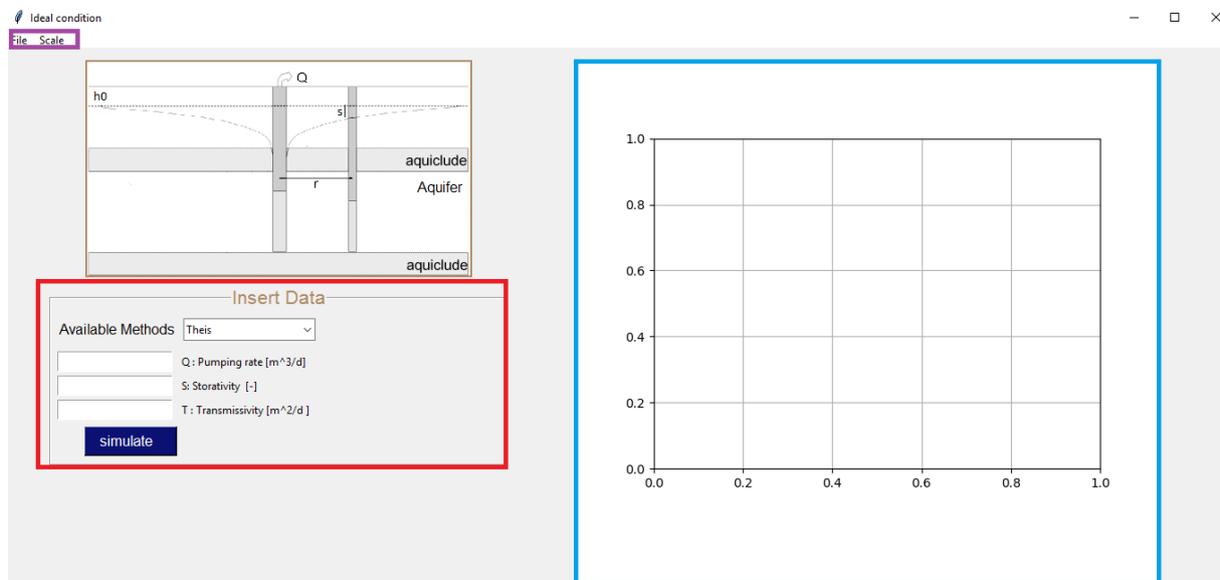


Figure A. 5 : Interface graphique de l'outil de simulation.

- Partie 1 «*Insert Data*» (encadrée en rouge dans Figure A.5) permet la saisie des données

Un bouton «*simulate*» est présent dans cette partie permet d'afficher une fenêtre «*curve*» Figure A. 6. Cette fenêtre donne la possibilité à l'utilisateur de choisir le graphe à afficher:

- Courbe de l'évolution de rabattement au cours du temps ;
- Courbe rabattement en fonction de la distance ;
- Courbe de rabattement en fonction du temps et de la distance (cône de dépression).

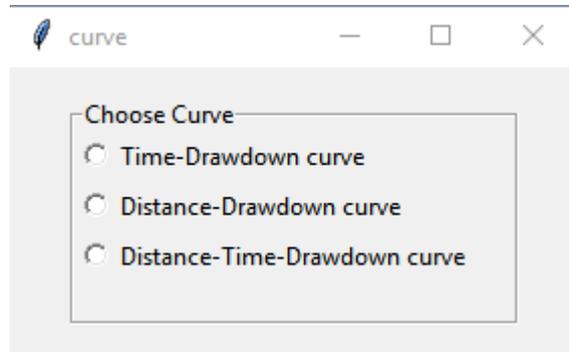


Figure A. 6 : Interface « choix de type de graphe ».

Après avoir choisi le type de courbe, un champ de données spécifique au graphe choisi apparaît au-dessous, comme indiqué dans la Figure A. 7.

Après avoir saisi les données nécessaires, une clique sur le bouton «*display*» permet d'afficher la courbe choisie dans la partie réservée au graphique.

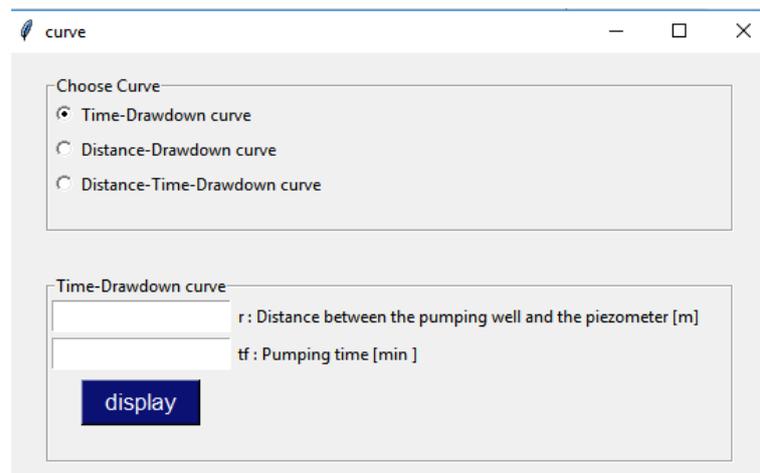


Figure A. 7 : Interface « choix de type de graphe et la saisie des données nécessaires »

- Partie 2 (encadrée en bleu Figure A.5) est réservée à l'affichage des graphes ;
- Partie 3 (encadrée en violet Figure A.5) représente la barre menu.

Clic sur menu déroulant «*file*» affiche les commandes suivantes:

- «*Clear*» : réinitialise la partie réservée au graphique ;
- «*Save as*» : pour sauvegarder les résultats dans un fichier Excel.
- «*Previous*» : permet le retour vers la fenêtre précédente.

Clic sur menu déroulant «*scale*» affiche les commandes suivantes:

- « *Linear* » : affichage des graphes dans une échelle linéaire ;
- « *Semi logarithmic* » : affichage des graphes dans une échelle semi logarithmique ;
- « *Log-log* » : affichage des graphes dans une échelle logarithmique.

Remarque: Le champ de saisie des données et les méthodes disponibles pour la simulation ou l'interprétation des essais changent selon les conditions d'essais et le type d'aquifère.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt

1. Introduction

L'algorithme de Levenberg-Marquardt, (1944; 1963) est une l'une des méthodes utilisées pour la résolution du problème de minimisation au sens des moindres carrés. Cet algorithme est adapté aux fonctions non linéaires mais peut être appliqué aussi aux fonctions linéaires. Il repose sur l'algorithme de Gauss-Newton (1809) et l'algorithme du gradient (Cauchy, 1847). Cependant, pour certaines fonctions très régulières, il peut converger légèrement moins vite. L'algorithme fut développé par Kenneth Levenberg, puis publié par Donald Marquardt.

2. Méthode de résolution (Wheatley, 2004; Lefebvre-Brion & Field, 2004)

Considérons l'ajustement de modèle non-linéaire $D = f(t, p)$, avec un certain nombre de paires de données expérimentales (t_i, D_i) .

Tout d'abord, nous définissons p , un vecteur qui contient tous les paramètres à ajuster. Le j ème paramètre, après $k + 1$ itérations est défini par :

$$p_j^k = p_j^{k-1} + \Delta p_j^{k-1} \quad \text{A1}$$

La procédure de l'algorithme est itérative. On part d'un vecteur de paramètre initial, que l'on suppose assez proche d'un minimum, et qui constituera le vecteur p de départ. À chaque itération, on remplace p par une nouvelle estimation $p + \Delta p$. Afin de déterminer Δp , les fonctions $f_i(p + \Delta p)$ sont approchées en étant linéarisées :

$$f(t_i + p^{k+1}) = f(t_i, p^k) + \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k \quad \text{A2}$$

La quantité à minimiser est le résidu :

$$D_i - f(t_i, p^{k+1}) = R_i^k = D_i - f(t_i, p^k) - \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k = r_i^k - \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k \quad \text{A3}$$

Nous voulons minimiser cette quantité :

$$\sum_i (R_i^k)^2 = \sum_i \left(r_i^k - \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k \right)^2 \quad \text{A4}$$

Plus cette somme est petite et plus le modèle représente au mieux les données. La seule variable dans l'équation A4 est le vecteur Δp^k . On dérive donc l'équation (A4) par rapport à chaque élément Δp_j^k et on essaye de trouver Δp_j^k qui annule la dérivée. Tout d'abord, on peut noter qu'au premier ordre :

$$\sum_i \sum_j \frac{\partial (R_i^K)^2}{\partial \Delta p_j^k} = \sum_i \sum_j \frac{\partial (r_i^K)^2}{\partial \Delta p_j^k} = 0 \quad \text{A5}$$

Car les résidus sont supposés représenter le minimum et leurs dérivées s'annulent (bien que ce ne soit pas exactement vrai, surtout lors des premières itérations). Deuxièmement, en notant que J ne dépend pas explicitement de Δp^k , il reste :

$$-2 \sum_i \sum_j \sum_m \frac{\partial J_{ij}^k \Delta p_j^k}{\partial \Delta p_m^k} \left(r_i^k - \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k \right) = 0 \quad \text{A6}$$

Si $m \neq j$, alors $\frac{\partial \Delta p_j^k}{\partial \Delta p_m^k} = 0$ Il nous reste donc :

$$\sum_i J_{ij}^k \left(r_i^k - \sum_j J_{ij}^k \Delta p_j^k \right) = 0 \quad \text{A7}$$

Ce qui est équivalent à écrire en termes matriciels :

$$(J^T J) \Delta p^k = J^T r^k \Rightarrow \Delta p^k = (J^T J)^{-1} J^T r^k \quad \text{A8}$$

Le point essentiel de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est d'approcher cette équation, en l'amortissant :

$$(J^T J - \lambda \text{diag}(J^T J)) \Delta p^k = J^T r^k \Rightarrow \Delta p^k = ((J^T J) - \lambda \text{diag}(J^T J))^{-1} J^T r^k \quad \text{A9}$$

Ce terme permet d'ajuster la fonction en utilisant les caractéristiques de la méthode du gradient (lorsque les valeurs des paramètres initiaux Δp^k sont loin des valeurs finales, avec λ large) ou les caractéristiques de la méthode de Gauss-Newton (lorsque Δp^k est proche des valeurs finales, avec λ petit). Une valeur typique de λ pour commencer l'ajustement est $\lambda = 0.001$. Ensuite, la RMSE, pour « root mean square error » doit être calculée plusieurs fois (et donc la fonction elle-même) afin de déterminer la nouvelle valeur de λ . À chaque itération, la RMSE est calculée pour $\lambda = \lambda_0$ et pour $\lambda = \lambda_0 / 10$. Ensuite, à chaque itération, on a les conditions :

si Δp^k conduit à une moins bonne RMSE que le Δp^k original, alors $\lambda = \lambda_0 * 10$ jusqu'à ce qu'une meilleure RMSE soit calculée et le « vieux » Δp^k n'est pas remplacé par le nouveau ;

si $\lambda = \lambda_0 / 10$ donne la meilleure RMSE, alors $\lambda_0 = \lambda_0 / 10$, Δp^k est remplacé et l'itération continue ; si $\lambda = \lambda_0$ donne la meilleure RMSE, alors on garde $\lambda_0 = \lambda_0$, Δp^k est remplacé et l'itération continue.

3. Algorithme

```
Debut  
// Initialisation des paramètres  
rmse=10 ; rmsea=15 ; kmax=50  
K=0  
Tant que abs(rmse-rmsea)>10-5 et k<kmax faire :  
    K=k+1 ;  
    R=D-f(ti,p) // Calcule des résidus  
    Si k=1 //Calcule de la RMSE lors de la première iteration  
        rmse= (ΣR2/N)0.5  
    Si non //mise a jour de lamda  
        lamda=lamda0; delta1= (JTJ-lamda*diag(JTJ))-1  
        lamda=lamda0/10 ;delta2=(JTJ-lamda*diag(JTJ))-1  
        p1=p ; p2=p  
        P1=p1+delta1 //Mise à jour des paramètres dans un nouveau vecteur  
        //Calcule des nouveaux résidus et la nouvelle rmse pour lamda = lamda0  
        R=D-f(ti,p1)  
        rmse1=(ΣR2/N)0.5  
        //Calcule des nouveaux résidus et la nouvelle rmse pour lamda = lamda0/10  
        p2=p2+delta2  
        R=D-f(ti,p2)  
        rmse2=(ΣR2/N)0.5  
        Si rmse1>rmse && rmse2 >rmse  
            lamda0 = lamda0*10  
        Sinon rmse2 < rmse1  
            Lamda0=lamda0/10 ; p =p2 ; rmsea= rmse ; rmse= rmse2  
        Sinon rmse2 >= rmse1  
            p=p1 ; rmsea=rmse ; rmse=rmse1  
        Fin si  
Fin tant que  
fin
```

Figure A. 8 Algorithme de Levenberg-Marquardt (Wheatley, 2004; Lefebvre-Brion & Field, 2004)