



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**Université Amar Thelidji Laghouat**  
FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT DUGENIER CIVILE

## MÉMOIRE DE MASTER

**Présenté par : Seife-edine Medjlida**

Domaine : TECHNOLOGIE

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressources en eau

### Thème

Interprétation automatique des essais de  
pompage à l'aide d'une approche  
métaheuristique Application aux  
nappes captives et semi-captive

#### Jury de soutenance :

Nom et prénom	Gard	Qualité
Mr. Chettih Mohammed	<i>Prof</i>	Président
Mr. Bouach Mohammed	Dr	Examineur
Mr. Tadj Walid	Dr	Promoteur

**Promotion : 09-2018**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents que je ne remercierai jamais assez pour toute l'aide qu'ils

m'ont prodiguée,

À tous mes frères,

À tous mes collègues de la promotion 2017/2018 sans exception,

À tous mes amis,

À tous les membres de ma famille,

À toutes les personnes que je connais et que je n'ai pas citées.

## Remerciements

Je souhaite, avant tout, remercier Dieu pour me soutenir et m'a permis de terminer ce travail.

Je tiens à remercier mon encadreur, **Mr.Tadj walid**, qui n'a pas ménagé son temps et ses efforts pour me guider, pour ses Remarques objectives, ses encouragements ininterrompus et le climat agréable de travail qu'il crée.

Je remercie du fond du cœur et avec un grand amour mes parents qui n'ont jamais cessé de croire en moi pendant toutes mes années d'études.

Merci aussi à mes sœurs et frères, et à toute la famille qui m'a toujours Encouragés.

Mes remerciements vont aussi à mes amies qui m'ont encouragé pour Réaliser ce travail.

Je remercie les membres jury Mr. Chettih Mohammed et Mr. Bouach Mohammed.

## ملخص

إن تحليل البيانات المسجلة خلال اختبارات الضخ ذو أهمية كبيرة في مجال الهيدروجيولوجيا. تقليديا، يتم ذلك ذاتيا باستخدام المنحنيات المرجعية. في هذا العمل، تم اقتراح طريقة تحليل تلقائي لبيانات اختبارات الضخ، وذلك باستخدام خوارزمية جينية ذات تشفير حقيقي. تركز المنهجية المقترحة على الدمج بين الخوارزمية و نموذج تحليلي مناسب لانخفاض سطح المياه الجوفية حسب طبيعة الخزان الجوفي. بالنسبة لجميع بيانات اختبارات الضخ التي تم تحليلها، قدم التفسير التلقائي المقترح معاملات هيدروليكية دقيقة للغاية، مماثلة لتلك التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج **AquiferTest**.

**الكلمات المفتاحية:** تجربة الضخ، التحليل التلقائي، خوارزمية جينية ذات تشفير حقيقي، المعاملات الهيدروليكية.

## Résumé

L'interprétation des données issues des essais de pompage est d'une importance majeure en hydrogéologie. Traditionnellement, elle est effectuée d'une façon subjective au moyen de courbes types standards. Dans ce travail, une interprétation automatique des données temps-rabattement a été proposée en employant un Algorithme Génétique à Codage Réel (AGCR). L'approche proposée combine l'algorithme métaheuristique (RCGA) avec une solution de rabattement analytique appropriée selon la nature du système aquifère analysé, captif ou semi-captif. Pour toutes les données de tests de pompage analysées, l'interprétation automatique proposée a fourni des paramètres hydrauliques très précis, similaires à ceux obtenus en utilisant le logiciel Aquifer Test.

**Mots clés:** Essai de pompage ; Interprétation automatique; Algorithme Génétique à Codage Réel, Paramètres hydrauliques.

## Abstract

Pumping tests data interpretation is of major importance in groundwater engineering. It is traditionally performed in a subjective manner by means of standard type curves. In this work, an automatic interpretation of time-drawdown data has been proposed based on a Real Coded Genetic Algorithm (RCGA). The proposed approach combines the metaheuristic algorithm (RCGA) with an appropriate analytical drawdown solution depending upon the nature of the analyzed aquifer system, confined or leaky aquifers. For all analyzed pumping tests data, the proposed automatic interpretation yielded very accurate aquifer parameters which were similar to those obtained by using AquiferTest software.

**Keywords:** Pumping test; Automatic interpretation; Real Coded Genetic Algorithm; Aquifer parameters.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1</b> .....	3
<b>1. L'essai de pompage</b> .....	3
<b>1.1 Introduction</b> .....	3
<b>1.2 Conduite d'un essai de pompage</b> .....	3
<b>1.3 Différents types d'aquifères</b> .....	4
1.3.1 Aquifères à nappe captive .....	5
1.3.2 Aquifères à nappe semi-captive .....	6
<b>1.4 Solutions analytiques de rabattement</b> .....	7
1.4.1 Solution de Theis .....	7
1.4.2 Solution de Hantush et Jacob .....	10
<b>1.5 Interprétation automatique des essais de pompage</b> .....	13
<b>Chapitre 2</b> .....	14
<b>2. Algorithmes Génétiques à Codage Réels</b> .....	14
<b>2.1 Introduction</b> .....	14
<b>2.2 Population et codage</b> .....	15
<b>2.3 Sélection</b> .....	16
2.3.1 Sélection par roulette .....	16
2.3.2 Sélection par tournoi.....	17
<b>2.4 Croisement</b> .....	17
2.4.1 Croisement arithmétique.....	18
2.4.2 Croisement binaire simulé .....	18
2.4.3 Croisement de Laplace.....	19
<b>2.4 Mutation</b> .....	19
2.4.1 Mutation aléatoire.....	19
2.4.2 Mutation cyclique non uniforme.....	19
<b>2.5 Performance de l'AGCR</b> .....	20
2.5.1 Courbe de performance .....	20
<b>2.6 Application des algorithmes génétiques dans les ressources en eau</b> .....	21
<b>Chapitre 3</b> .....	24

---

## Table des matières

---

<b>3</b>	<b>Interprétation automatique des données temps-rabatement</b> .....	24
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b> .....	24
<b>3.2</b>	<b>Processus automatique d'interprétation</b> .....	24
<b>3.3</b>	<b>Logiciel AquiferTest</b> .....	24
<b>3.4</b>	<b>Applications</b> .....	25
3.4.1	Interprétation par la solution de Theis .....	26
3.4.2	Interprétation par la solution de Hantush et Jacob .....	29
<b>3.5</b>	<b>Graphes de performances</b> .....	34
3.5.1	Graphes de performances AGCR- Theis.....	35
3.5.2	Graphes de performances AGCR- Hantush et Jacob .....	37
<b>3.6</b>	<b>Rapport d'interprétation généré par le logiciel AquiferTest</b> .....	40
	<b>Conclusion générale</b> .....	41
	<b>Références bibliographiques</b> .....	42

## Liste des figures

Figure	Pages
1.1: Ecoulement dans un aquifère captif (Kresic, 2007)	5
1.2: Ecoulement dans un aquifère semi-captif (Kresic, 2007)	6
1.3: Courbe théorique de la fonction de puits, $W(u)=f(1/u)$ (Kresic, 2007)	8
1.4: Superposition de la courbe théorique et la courbe temps- rabattement observée (Kresic, 2007)	9
1.5 : Courbes théoriques de la fonction de puits, $W(u,r/B)=f(1/u)$ (Kresic, 2007)	11
1.6: Superposition de la courbe théorique et la courbe temps- rabattement observée (Kresic, 2007)	12
2.1: Optimum local et global d'une fonction à une variable.	15
2.2: Codage binaire d'un individu (chromosome) à 16 bits	15
2.3: Structure matricielle d'un AGCR	15
2.4: Sélection par roulette (Negnevitsky, 2005)	17
2.5: Organigramme de l'AGCR	
<b>Error! Bookmark not defined.</b>	
3.1: Organigramme d'interprétation automatique	25
3.2: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T1]	26
3.3: Coupe du site d'Oude-Korendijk (Kruseman et de Ridder, 1990).	27
3.4: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T2]	28
3.5: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T3]	29
3.6: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H1]	30
3.7: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H2]	31
3.8: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H3]	32
3.9: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H4]	33
3.10: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H5]	34
3.11: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T1]	35
3.12: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T2]	36
3.13: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T3]	36
3.14: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H1]	37
3.15: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H2]	37
3.16: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H3]	38
3.17: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H4]	38
3.18: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H5]	39
3.19: Rapport d'interprétation de la série [H1], par AquiferTest	40



## Liste des tableaux

Tableau	Pages
<b>1.1:</b> Intervalles de temps recommandés pour mesurer les rabattements	4
<b>2.1:</b> Performances de l'AGCR sur 5 fonctions tests à deux paramètres.	21
<b>3.2:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: T1]	26
<b>3.3:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest, [Série: T2].	28
<b>3.4:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: T3].	29
<b>3.5:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H1].	30
<b>3.6:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H2].	31
<b>3.7:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H3].	32
<b>3.8:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H4].	33
<b>3.9:</b> Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H5].	34

### Introduction générale

L'eau souterraine est une source importante d'eau potable qui doit être gérée de manière appropriée et responsable. En générale, la gestion des eaux souterraines est effectuée au moyen de modèles mathématiques qui requièrent des paramètres hydrauliques de l'aquifère, en dépit du fait qu'ils ne sont pas directement accessibles (Samuel and Jha 2003). L'essai de pompage est la pratique la plus courante pour estimer ces paramètres hydrauliques. C'est une technique in situ basée sur l'extraction d'un débit constant depuis le puits de pompage, tout en mesurant la réponse du niveau d'eau à différents pas de temps au puits d'observation. Les paramètres hydrauliques de l'aquifère sont obtenus en interprétant les données enregistrées durant l'essai de pompage qui sont les vecteurs temps-rabattements. L'interprétation est traditionnellement effectuée d'une façon manuelle, qui prend du temps et qui n'est pas exempte de jugement subjectif.

Le nombre de paramètres hydrauliques à estimer dépend de la nature du système aquifère considéré (aquifère captif, semi-captif, ...etc) et de la solution analytique de rabattement adoptée (Theis, Hantush,...etc). L'estimation des paramètres hydrauliques peut être considérée comme un problème d'optimisation qui nécessite une méthode de résolution appropriée. Depuis le début des années 1970 jusqu'à présent, différentes techniques informatiques ont été proposées pour interpréter automatiquement les données des essais de pompage. Ces techniques visent à minimiser une fonction objective, qui est la différence entre les rabattements observés et ceux calculés par une solution de rabattement appropriée.

En examinant la littérature, nous remarquons que les méthodes d'interprétation automatique des essais de pompage peuvent être classées comme des méthodes à gradient ou sans gradient. Les méthodes basées sur le gradient nécessitent le calcul des dérivées de la fonction objective par rapport aux différents paramètres hydrauliques. En raison de l'aspect fortement non linéaire et non convexe des problèmes d'eaux souterraines, ces méthodes peuvent converger vers un optimum local, ou ne pas converger du tout lorsque les estimations initiales sont lointaines. Les méthodes sans gradient sont plus intéressantes car elles ne nécessitent aucune information sur les dérivées, seule l'évaluation de la fonction objective est nécessaire. Le succès de l'interprétation des données

---

## Introduction générale

---

temps-rabatement est principalement lié à la performance de la technique d'optimisation adoptée avec laquelle la solution de rabattement considérée est couplée.

Dans le présent travail, nous utilisons un Algorithme Génétique à Codage Réel (AGCR) pour interpréter automatiquement quelques données issues des essais de pompages réalisés dans des systèmes aquifères captifs et semi-captifs. L'AGCR est un algorithme métaheuristique connu pour sa capacité à résoudre des problèmes non linéaires complexes, et son codage en point flottant le rend appropriés pour une optimisation continue. l'AGCR proposé a été couplé avec la solution de rabattement de Theis lorsqu'un aquifère captif est considéré, et avec la solution de rabattement de Hantush et Jacob lorsqu'il s'agit d'un aquifère semi-captif. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus en utilisant le logiciel d'interprétation automatique AquiferTest 2016.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est dédié aux notions essentielles sur les essais de pompage.
- Le deuxième chapitre, présente les algorithmes génétiques.
- Le troisième chapitre présente l'approche d'interprétation automatique, ainsi que les résultats obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des recommandations futures.

# Chapitre 1

## 1. L'essai de pompage

### 1.1 Introduction

Les essais de pompage font partie des tâches couramment pratiquées par les hydrogéologues. Un essai de pompage est une technique *in situ* qui consiste à pomper l'eau souterraine d'un puits à un débit constant, et à mesurer la variation du niveau d'eau (rabattement) dans le puits de pompage ou dans les puits d'observation (piézomètres). Les essais de pompage peuvent durer de quelques heures à quelques jours, selon le but de l'essai, mais les essais de pompage traditionnels durent généralement de 24 à 72 heures. Généralement, les données issues d'un essai de pompage sont les vecteurs temps-rabattement, le débit de pompage, et la distance entre le puits de pompage et le puits d'observation. Les données issues d'un essai de pompage doivent être interprétées afin d'identifier les paramètres hydrauliques de l'aquifère pompé. L'interprétation d'un essai de pompage se fait en choisissant un modèle de rabattement analytique en fonction de la nature du système aquifère étudié. Dans ce travail on se limite à l'analyse des données de pompage pour les aquifères à nappes captives et semi-captives.

### 1.2 Conduite d'un essai de pompage

Les essais de pompage ont pour but d'acquérir des données permettant d'identifier certaines constantes physiques de l'aquifère étudié. L'obtention de données fiables à partir d'un essai de pompage implique donc un programme soigneusement planifié, impliquant les instruments de mesure, le personnel disponible et la prise en compte des contraintes physiques du terrain, tel que le risque d'inondation des terres adjacentes par l'eau extraite du puits de pompage. Avant de commencer le test, il est essentiel que tout l'équipement d'essai soit en bon état de fonctionnement, cela comprend l'installation d'une pompe de taille appropriée. Une vanne de régulation de décharge appropriée est nécessaire pour contrôler le débit de pompage, ainsi qu'un débitmètre. Pour les mesures de niveau d'eau, une sonde étalonnée doit être installée correctement avant de commencer les mesures. Le nombre de personnes impliquées dans l'essai de pompage, dépendent de l'objectif et de la durée de l'essai. Par exemple, les essais impliquant des changements rapides des niveaux

---

## Chapitre 1: L'essai de pompage

---

d'eau avec plusieurs puits d'observation à proximité nécessitent plus de personnel que des mesures périodiques dans seul puits. Sachant que des équipements d'enregistrement automatique de données existent dans le marché. La durée de l'essai de pompage dépend des propriétés hydrauliques de l'aquifère, car le cône de dépression (c'est-à-dire, les rabattements) entourant le puits de pompage dépend du temps depuis le début de pompage, et de la distance entre le puits de pompage et le piézomètre. Au début de l'essai, le cône de dépression s'étend rapidement car l'eau pompée provient du voisinage immédiat du puits de pompage. Comme le pompage est continu, l'expansion radiale du cône se produit à un rythme faible à mesure que de plus grands volumes d'eau deviennent disponibles. Le cône de dépression continuera de s'étendre jusqu'à ce que la recharge du cône soit égale à la décharge du puits, dans ce cas, le régime permanent est atteint. Dans certains puits, la condition d'équilibre peut être atteinte quelques heures après le début du pompage, alors que dans d'autres cas, elle peut se produire après des jours, des semaines ou peut-être jamais. Il n'est pas nécessaire d'atteindre le régime permanent, car des solutions analytiques de rabattement en régime transitoire existent dans la littérature. Le tableau 1.1 présente des d'intervalles pratiques de temps pour mesurer les rabattements au voisinage de puits de pompage.

**Tableau 1.1 :** Intervalles de temps recommandés pour mesurer les rabattements

Temps écoulé depuis le début de pompage	Fréquence de mesure
0 - 10 min	2 min
10 - 30 min	5 min
30 - 1 h	10 min
1 h -12 h	30 min
12 h - 48 h	1 h

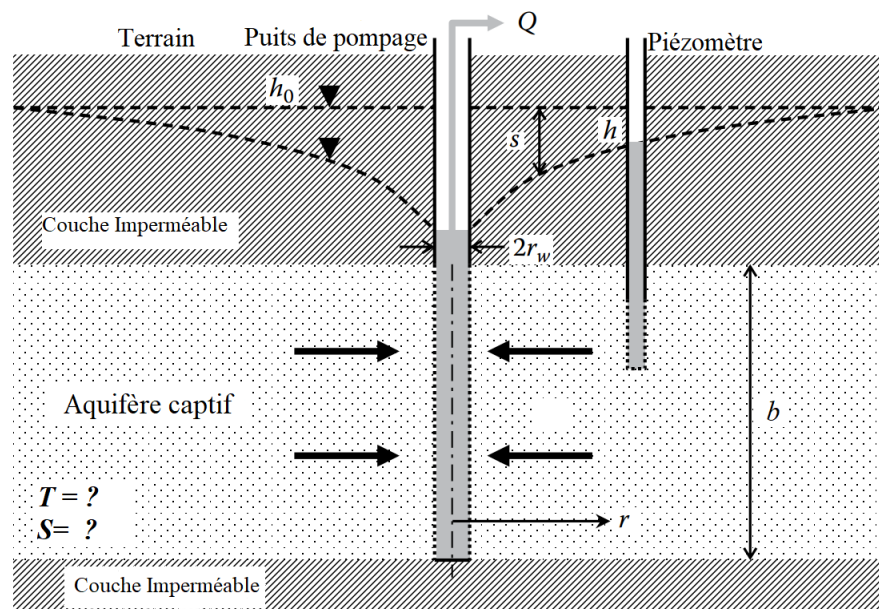
### 1.3 Différents types d'aquifères.

Les aquifères sont des gisements souterrains qui stockent et transmettent l'eau en quantités utilisables. Les aquifères peuvent être identifiés comme libres, captifs ou semi-captifs, selon la nature de leur configuration. Dans ce mémoire, nous nous limitons aux aquifères à nappes captive et semi-captive.

### 1.3.1 Aquifères à nappe captive

Un aquifère anappe captive (Figure 1.1) est une couche de sol entièrement saturée dont les limites supérieures et inférieures sont imperméables. Dans une nappe captive, l'eau est sous pression. La surface imaginaire de l'aquifère à nappe captive est appelée surface piézométrique, cette surface imaginaire se trouve au-dessus de la limite supérieure de l'aquifère captif et peut être localisée en fonction des mesures de la charge hydraulique dans les puits d'observation. Les paramètres hydrauliques à identifier à partir des données issues d'un essai de pompage réalisé dans un aquifère captif, sont la transmissivité ( $T$ ) et le coefficient d'emmagasinement ( $S$ ).

- La transitivity ( $T$ ) représente la facilité avec laquelle l'eau s'écoule à travers l'épaisseur la l'aquifère. En termes quantitatifs, la transmissivité est le produit de la conductivité hydraulique  $K$  de l'aquifère et de l'épaisseur saturée de l'aquifère  $b$ ;  $T = K b$ .



**Figure 1.1:** Écoulement dans un aquifère captif (Kresic, 2007)

- Le coefficient d'emmagasinement ( $S$ ) représente le volume d'eau libéré par un volume unitaire du milieu poreux en raison d'une baisse unitaire de la charge hydraulique, et il dépend de la compressibilité du milieu poreux.

### 1.3.2 Aquifères à nappe semi-captive

Un aquifère à nappe semi-captive (Figure 1.2) est caractérisé par des couches de confinements (Aquitards) suffisamment perméables pour permettre un écoulement vertical (fuite) depuis les aquifères adjacents. Le taux de fuite peut augmenter considérablement durant le pompage en raison de l'accroissement du gradient hydraulique entre l'aquifère pompé et l'aquitard ou l'aquifère adjacent. Pour de longues périodes de pompage, le taux de fuite équilibre le débit de pompage, ce qui stabilise le rabattement à un niveau fixe, et le rayon d'influence du puits cessera de s'étendre. Les paramètres hydrauliques à identifier à partir des données issues d'un essai de pompage réalisé dans un aquifère semi-captif, sont la transmissivité ( $T$ ), le coefficient d'emmagasinement ( $S$ ) et le facteur d'égouttement ( $B$ ) de l'aquitard;  $B = \sqrt{Tb'/K'}$ , avec  $b'$  and  $K'$  sont respectivement l'épaisseur et la perméabilité verticale de l'aquitard.

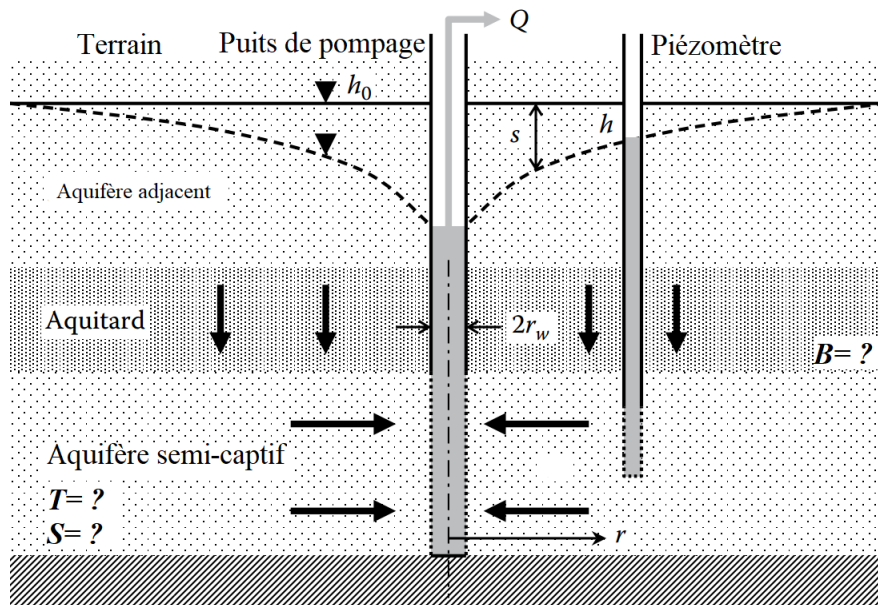


Figure 1.2: Ecoulement dans un aquifère semi-captif (Kresic, 2007)

### 1.4 Solutions analytiques de rabattement

De nombreuses solutions analytiques sont disponibles dans la littérature correspondent aux différentes configurations d'aquifères. Chaque solution analytique a été dérivée en considérant quelques hypothèses simplificatrices. Généralement, leurs expressions mathématiques contiennent des intégrales singulières. Selon son expérience et selon la courbe temps-rabattement observée, l'ingénieur doit choisir parmi les solutions analytiques disponibles celle qui est représentative du système aquifère étudié. Dans cette section, nous présentons les solutions analytiques de rabattement utilisées dans ce travail.

#### 1.4.1 Solution de Theis

L'équation de Theis (1935) décrit l'écoulement transitoire d'eau souterraine vers un puits pénétrant complètement un aquifère captif. Elle constitue la base de la plupart des méthodes d'analyse des essais de pompage transitoires. La transmissivité et le coefficient d'emménagement peuvent être déterminés à partir des mesures temps-rabattement sans que le régime permanent soit établi.

Les hypothèses sur lesquelles la solution de Theis repose sont les suivantes:

- Aquifère à nappe captive
- Nappe homogène, isotrope, de dimension infinie ayant une épaisseur constante.
- Puits de pompage complet, c'est-à-dire qu'il pénètre tout l'aquifère.
- Régime d'écoulement transitoire.
- Ecoulement horizontal vers le puits.

L'équation de Theis (Equation 1.1) calcul le rabattement  $s$  à tout moment après le début du pompage.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1.1)$$

où  $Q$  [ $L^3/T$ ] est le débit de pompage, maintenu constant durant le test,  $T$  [ $L^2/T$ ] est la transmissivité, et  $W(u)$  est appelée fonction de Theis, ou simplement fonction de puits. Le paramètre adimensionnel  $u$  est donné par.

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (1.2)$$

où  $r$  [L] est la distance entre le puits de pompage et le piézomètre dans lequel le rabattement est mesuré.  $S$  [-] est le coefficient d'emménagement, et  $t$  [T] représente le temps écoulé depuis le début de pompage. La fonction de puits  $W(u)$  est donnée par l'équation suivante:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1.3)$$

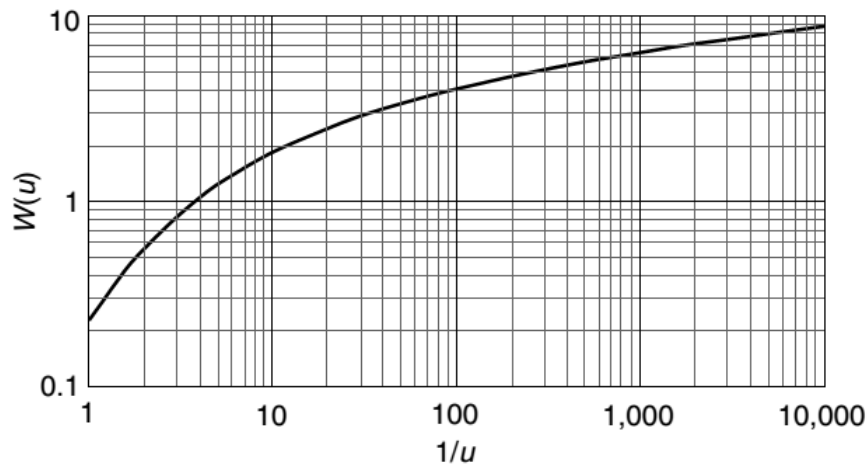
L'équation (1.3) est évaluée numériquement à l'aide de l'équation suivante (Tseng and Lee, 1998):

$$W(u) = \begin{cases} -\gamma - \ln(u) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} u^i}{i \cdot i!}, & u < 1 \\ \frac{e^{-u}}{u} \left( \frac{a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + u^4}{b_0 + b_1 u + b_2 u^2 + b_3 u^3 + u^4} \right), & u \geq 1 \end{cases} \quad (1.4)$$

Avec  $\gamma=0.57721566490153286$ ,  $a_0=0.2677737343$ ,  $a_1= 8.6347608925$ ,  $a_2= 18.059016973$ ,  $a_3= 8.5733287401$ ,  $b_0= 3.9584969228$ ,  $b_1= 21.0996530827$ ,  $b_2= 25.6329561486$ ,  $b_3= 9.5733223454$ .

Notons que la variable  $u$  est généralement inférieur à 1 (Maliva, 2016).

Les valeurs de la fonction  $W(u)$  sont tabulées ou représentées sous forme d'un graphique  $W(u) = f(u)$  ou  $W(u) = f\left(\frac{1}{u}\right)$  comme le montre la figure 1.3 ci-dessous.



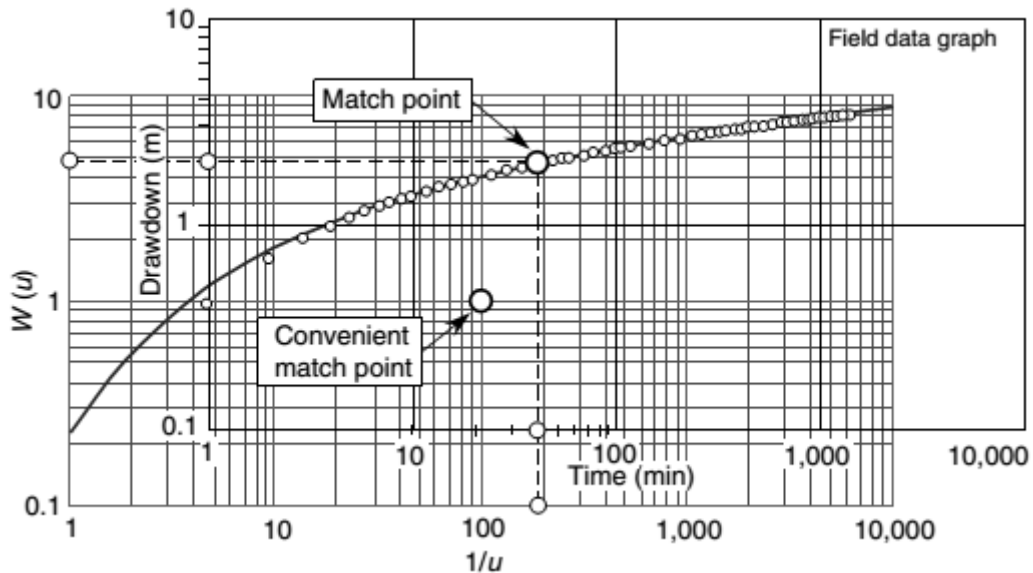
**Figure 1.3:** Courbe théorique de la fonction de puits,  $W(u)=f(1/u)$  (Kresic, 2007)

## Chapitre 1: L'essai de pompage

L'identification des paramètres hydrauliques à partir des données issues d'un essai de pompage se fait traditionnellement d'une façon manuelle selon les étapes suivantes:

- Les données temps-rabatement sont tracées sur un transparent ayant une échelle identique à celle de la courbe théorique de la figure 1.3;
- Cette courbe est ensuite superposée à la courbe théorique.
- On fait un ajustement manuel entre les deux courbes tout en gardant les axes parallèles.
- Une fois un ajustement satisfaisant est obtenu, un point d'ajustement (match point) sera alors choisi arbitrairement (Figure 1.4).

À partir de l'équation (1.1) et la valeur de rabattement  $s$  du point d'ajustement (match point), on peut écrire  $T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$ . Le coefficient d'emménagement  $S$  est calculé à partir de l'équation (1.2), de la valeur  $1/u$  du point d'ajustement et le temps  $t$ ;  $S = \frac{4Ttu}{r^2}$ .



**Figure 1.4:** Superposition de la courbe théorique et la courbe temps- rabattement observée (Kresic, 2007)

Selon la figure 1.4, les coordonnées du point de d'ajustement sont:  $W(u) = 4.75$ ,  $\frac{1}{u} = 180$ ,  $u = 0.0055$ ,  $s = 2.0\text{m}$ ,  $t = 39\text{ min} = 2340\text{ s}$ . Si le débit de pompage  $Q = 0.008\text{ m}^3/\text{s}$ , et la distance  $r = 40.5\text{m}$ , alors:  $T = \frac{0.008}{4 \times \pi \times 2.0} \times 4.75 = 1.51 \times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}$  et  $S = \frac{4 \times 1.51 \times 10^{-3} \times 2340 \times 0.0055}{(40.5)^2} = 7.4 \times 10^{-5}$ .

### 1.4.2 Solution de Hantush et Jacob

Les données obtenues à partir d'un essai de pompage transitoire réalisé dans un aquifère semi-captif peuvent être interprétées à l'aide de la solution analytique de Hantush et Jacob (1955).

Les hypothèses sur lesquelles repose la solution de Hantush et Jacob sont les suivantes:

- Aquifère à nappe semi-captive.
- Nappe homogène, isotrope, de dimension infinie ayant une épaisseur constante.
- Effet de drainance à travers l'aquitard.
- Le coefficient d'emménagement de l'aquitard est négligeable.
- Écoulement à travers l'aquitard est vertical.
- Puits de pompage complet.
- Régime d'écoulement transitoire.

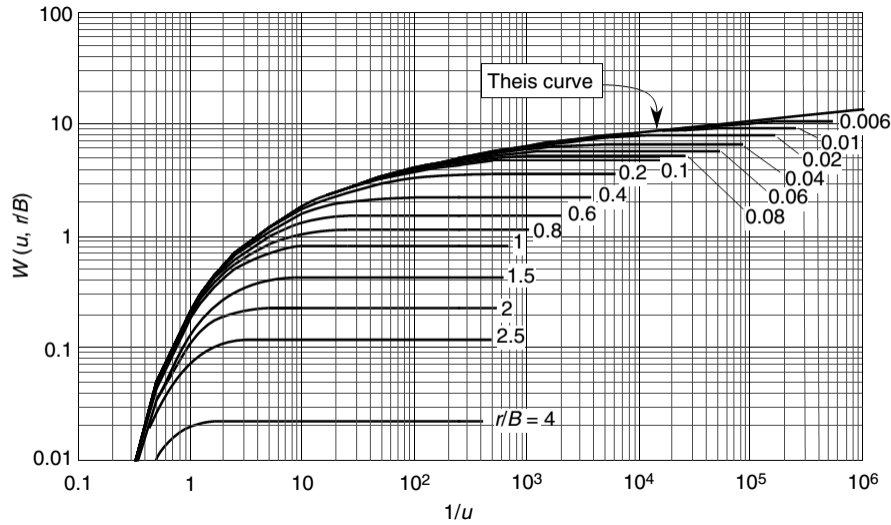
L'équation de Hantush et Jacob est donnée par l'équation suivante:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad (1.5)$$

$W(u, r/B)$  est la fonction de Hantush à deux arguments, donnée par:

$$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \int_u^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4B^2y}\right) dy \quad (1.6)$$

La solution de Hantush et Jacob est un modèle à trois paramètres  $T$ ,  $S$  et  $B$ . Les valeurs de la fonction  $W(u, r/B)$  sont tabulées ou représentées sous forme d'un graphique  $W(u, r/B) = f(1/u)$  ou comme le montre la figure 1.5 ci-dessous.



**Figure 1.5 :** Courbes théoriques de la fonction de puits,  $W(u, r/B)=f(1/u)$  (Kresic, 2007)

L'estimation des paramètres hydrauliques à partir des données issues d'un essai de pompage se fait manuellement selon les étapes suivantes:

- Les données temps-rabattement sont tracées sur un transparent ayant une échelle identique à celle de la courbe théorique de la figure 1.5.
- Cette courbe est ensuite superposée à la courbe théorique.
- On fait un ajustement manuel entre les deux courbes tout en gardant les axes parallèles.

Une fois un ajustement satisfaisant est obtenu, un point d'ajustement sera alors choisi arbitrairement (Figure 1.6).

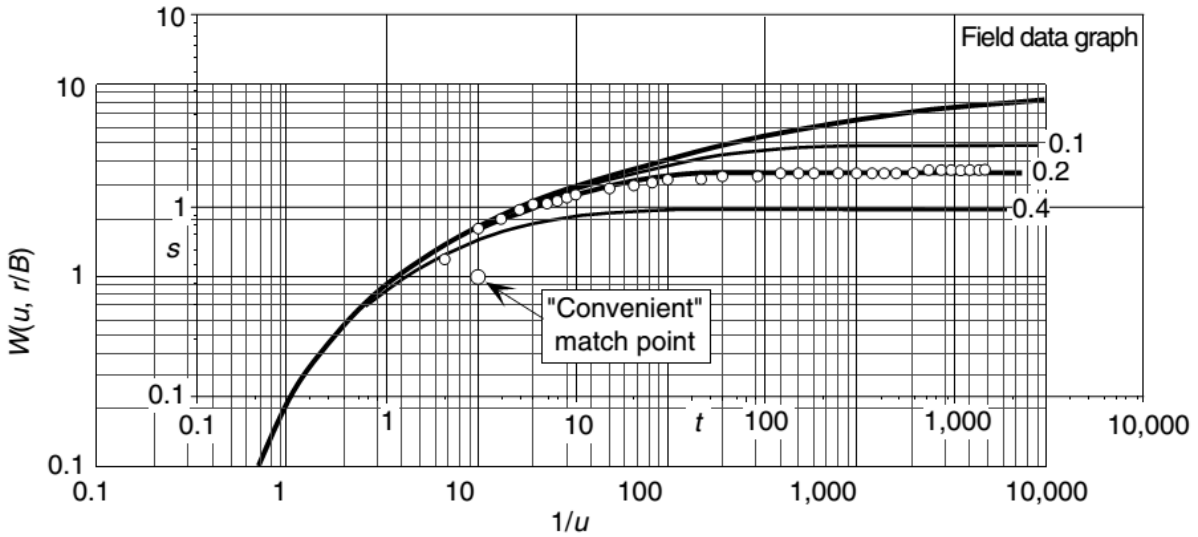


Figure 1.6: Superposition de la courbe théorique et la courbe temps- rabattement observée (Kresic, 2007)

Cinq valeurs seront donc déterminés,  $s$ ,  $t$ ,  $W(u, r/B)$  et  $1/u$  et  $r/B$ . À partir de l'équation (1.5), on peut écrire  $T = \frac{Q}{4\pi s} W(u, r/B)$ . Le coefficient d'emmagasinement  $S = \frac{4Ttu}{r^2}$ . La perméabilité verticale de l'aquifard sera alors :  $K' = Tb'(r/B)^2/r^2$

#### 1.4.2.1 Evaluation numérique de la fonction de Hantush

L'évaluation de la fonction de Hantush est fondamentale pour estimer les paramètres des aquifères semi-captifs. L'intégration de la fonction de puits de Hantush est habituellement effectuée en évaluant sa forme tronquée (Chander et al., 1981, Samuel et Jha, 2003); cela peut conduire à de grandes erreurs lorsque le calcul est effectué dans certaines plages d'arguments ( $u, r/B$ ) de la fonction (Yeh et Huang 2005). Dans cette section, nous présentons brièvement les séries infinies de Hunt (1977) ainsi que l'approximation rapide de Veling et Maas (2010).

- **Séries infinies de Hunt**

Pour calculer la fonction du puits de Hantush, Hunt (1977) a présenté deux expressions analytiques sous forme de séries alternées infinies convergentes données par:

$$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\varepsilon/u)^n}{n!} E_{n+1}(u) \text{ pour } 0 \leq \varepsilon/u < \infty \quad (1.7)$$

$$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = 2K_0(2\sqrt{\varepsilon}) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-u)^n}{n!} E_{n+1}\left(\frac{\varepsilon}{u}\right) \text{ pour } 0 \leq u < \infty \quad (1.8)$$

avec  $\varepsilon = (r^2/4B^2)$ ,  $K_0$  est la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce d'ordre zéro,  $E_n(u)$  peut être calculé explicitement à partir de l'intégrale exponentielle  $E_1(u)=W(u)$  en utilisant la formule de récurrence donnée par:

$$E_{n+1}(u) = \frac{1}{n} [e^{-u} - uE_n(u)] \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1.9)$$

Hunt (1977) a souligné que l'équation (1.7) devrait être utilisée lorsque  $u < \varepsilon/u$  et l'équation (1.8) quand  $\varepsilon/u < u$ .

- **Approximation rapide de Veling and Maas**

Veling et Maas (2010) ont publié une formule approximative pour calculer la fonction de Hantush en fonction de la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce d'ordre zéro  $K_0$  et de l'intégrale exponentielle  $E_1(u)=W(u)$ . Leur formule est donnée par:

$$W(u, b) = \begin{cases} K_0(2\sqrt{b}) - \left[ \frac{E_1(2\sqrt{b}) - K_0(2\sqrt{b})}{E_1(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})} \right] E_1\left(\frac{b}{u}\right) + \left[ \frac{K_0(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})}{E_1(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})} \right] E_1\left(u + \frac{b}{u}\right) & \text{si } u < \sqrt{b} \\ \left[ \frac{E_1(2\sqrt{b}) - K_0(2\sqrt{b})}{E_1(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})} \right] E_1(u) + \left[ \frac{K_0(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})}{E_1(2\sqrt{b}) - E_1(\sqrt{b})} \right] E_1\left(u + \frac{b}{u}\right) & \text{si } u \geq \sqrt{b} \end{cases} \quad (1.10)$$

### 1.5 Interprétation automatique des essais de pompage

Dans la section précédente, on a pu constater que la qualité de l'interprétation est basée sur une superposition de courbes que l'opérateur effectue d'une façon manuelle en se basant sur l'inspection visuelle de la qualité d'ajustement, ce qui lui laisse une part de subjectivité. Depuis 1970 jusqu'à présent, différentes techniques informatiques ont été proposées pour interpréter automatiquement les données des essais de pompage. Plusieurs logiciels d'interprétation commerciaux ont été développés, et leur utilisation a permis d'augmenter considérablement la précision des paramètres hydrauliques et à réduire le temps d'interprétation. Parmi les logiciels les plus utilisés on peut citer, AquiferTest, AQTESOLVTM, MLU, ANSDIMAT,..etc. D'autres applications libres sont

---

## Chapitre 1: L'essai de pompage

---

disponibles sur le net tel que les feuilles de calcul AQTESTSS de l'U.S. Geological Survey (Halford and Kuniansky, 2002). Chacun de ces logiciels utilise une technique d'optimisation visant à minimiser les écarts entre les rabattements mesurés et ceux calculés par une solution de rabattement analytique appropriée. Donc plus la technique d'optimisation employée est performante, plus les paramètres hydrauliques sont précis.

Notre travail développe un cadre d'optimisation basé sur une métaheuristique appelé Algorithme Génétique à Codage Réel (AGCR). L'AGCR alimente la solution analytiques de rabattement avec les meilleurs paramètres hydrauliques qui donnent le meilleure ajustement entre les valeurs observées et calculées.

Le prochain chapitre, présente un bref aperçu sur les algorithmes génétiques et leurs applications liés à la gestion des ressources en eau.

## Chapitre 2

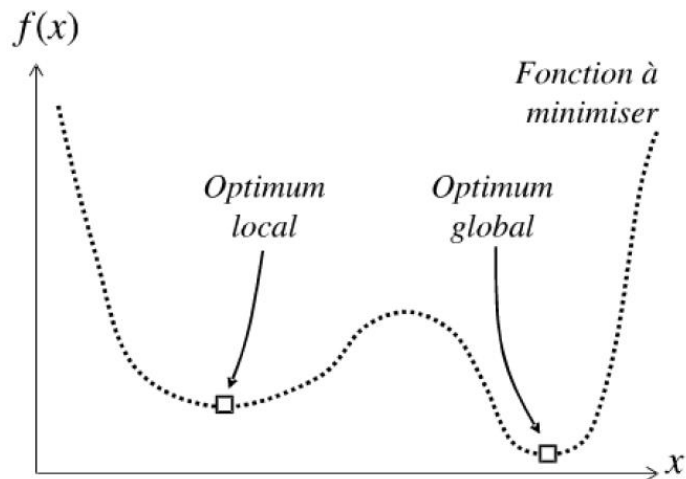
### 2. Algorithmes Génétiques à Codage Réels

#### 2.1 Introduction

Ces dernières années, des méthodes d'optimisation ont été développées et appliquées à divers problèmes complexes. De nombreux cas réussis ont démontré que les techniques d'optimisation ont une capacité exceptionnelle à résoudre les problèmes de minimisation ou de maximisation. Les techniques d'optimisation existantes peuvent être divisées en deux catégories: (1) techniques d'optimisation déterministes; et (2) les techniques d'optimisation stochastiques.

Certains chercheurs ont abordé le problème d'interprétation des essais de pompage en couplant les solutions analytiques de rabattement avec des méthodes déterministes comme la méthode des moindres carrés ou celle de Gauss Newton (Mania et Sucche 1978). Ces méthodes nécessitent le calcul des dérivées de la fonction objective (fonction à minimiser) par rapport aux différents paramètres. En raison de l'aspect fortement non linéaire et non convexe des problèmes d'hydraulique souterraine, ces méthodes ne peuvent converger que vers un optimum local, ou peuvent diverger lorsque les estimations initiales sont lointaines. Donc, la plupart de ces méthodes ne permettent pas de garantir l'optimum global (Figure 2.1). La meilleure façon d'identifier l'optimum global est de sonder l'ensemble de l'espace de recherche admissible. C'est ce que tente de faire, dans une certaine mesure un algorithme génétique par exemple. Un algorithme génétique (GA) peut y parvenir car il comporte une composante aléatoire que n'ont pas les méthodes déterministes.

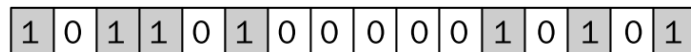
Les algorithmes génétiques proposés en 1975 par John Holland, sont des outils d'optimisation basés sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution. L'algorithme génétique opère sur une population d'individus durant plusieurs générations.



**Figure 2.1:** Optimum local et global d'une fonction à une variable.

## 2.2 Population et codage

Un algorithme génétique (AG) conventionnel utilise un codage binaire pour représenter les individus (Figure 2.2). La représentation binaire limite la précision de l'AG et requiert un temps de calcul supplémentaire pour coder et décoder les chaînes binaires. L'Algorithme Génétique à Codage Réel (AGCR) surmonte ces inconvénients en codant les individus en tant que vecteurs à éléments réels  $x = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ , ce qui permet à l'algorithme de traiter plus naturellement les problèmes d'optimisation continue avec une haute précision (Sawyer et al. 2014).



**Figure 2.2:** Codage binaire d'un individu (chromosome) à 16 bits

L'AGCR (Figure 2.3) commence par générer une population initiale,  $P_{G=0}$  de taille  $NP$  individus où chacun représente une solution potentielle.

	Paramètres (1,2,...,Npar)	Fonction objective
Individus (1,2,..., NP)	$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \dots & x_{1,Npar} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \dots & x_{2,Npar} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{NP,1} & x_{NP,2} & x_{NP,3} & \dots & x_{NP,Npar} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \vdots \\ f(x_{NP}) \end{bmatrix}$

**Figure 2.3:** Structure matricielle d'un AGCR

La population initiale  $P_{G=0}$  est générée de telle sorte que les paramètres  $x_{ij}$  couvrent l'espace de recherche d'une façon uniforme (Equation 2.1).

$$x_{i,j} = x_j^L + r \times (x_j^U - x_j^L) \quad \forall i \in [1, NP]; \quad \forall j \in [1, Npar] \quad (2.1)$$

avec  $r$  est un nombre aléatoire uniformément distribué sur l'intervalle  $[0,1]$ ,  $Npar$  est le nombre de paramètres à identifier.  $x^u$  et  $x^L$  sont respectivement les limites inférieure et supérieure de l'espace de recherche.

Une fois la population initiale générée, trois étapes permettent de passer d'une génération  $G$  à une autre jusqu'à la dernière génération  $G_{max}$ . Ces étapes sont : la sélection, le croisement et la mutation. Durant le processus d'évolution, la taille de la population reste constante au fil des itérations:

$$P_G = x_{i,j,G} (i = 1, NP ; j = 1, Npar ; G = 0, G_{max}) \quad (2.2)$$

A la fin de chaque génération, les individus sont arrangés selon leur qualité, c'est à dire classés en ordre croissant en fonction de la valeur de la fonction objective des individus (le meilleur individu est celui qui possède une fonction objective minimale).

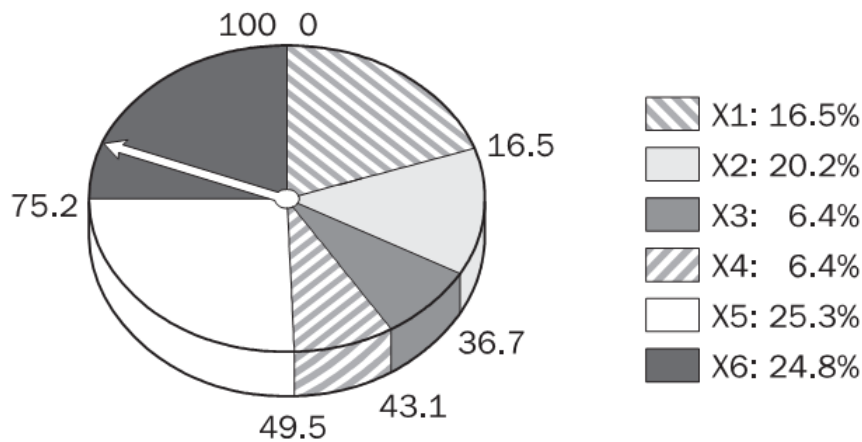
La population est ensuite divisée en deux ensembles, le premier ensemble contient les meilleurs individus, et le second contient les individus restants à remplacer totalement à la fin de chaque génération. Dans ce travail chaque ensemble présente 50% de la population  $NP$

### 2.3 Sélection

La sélection est un processus probabiliste basé sur la génération de nombres aléatoires pour créer une nouvelle population où les individus les mieux adaptés possèdent un nombre plus important de descendants. L'évaluation de la fonction objective se fait pour chaque individu, donc  $NP$  valeurs au total pour l'ensemble de la population. Plusieurs méthodes de sélection existent dans la littérature dont les plus populaires sont la sélection par roulette et la sélection par tournoi (Negnevitsky, 2005).

#### 2.3.1 Sélection par roulette

La figure 2.4 illustre le processus de sélection par roulette. Le disque est divisé en autant de tranches qu'il y a d'individus, donc chacun des six individus reçoit une tranche de la roulette circulaire. La surface attribuée à un individu est proportionnelle à sa fitness.



**Figure 2.4:** Sélection par roulette (Negnevitsky, 2005)

Par exemple, les individus X5 et X6 (les individus les plus adaptés) occupent les plus grandes surfaces, alors que les individus X3 et X4 (les moins adaptés) ont des portions beaucoup plus petites dans la roulette. Les individus dont les tranches sont les plus grandes, ont plus de chance d'être sélectionnés par rapport aux autres. On simule la rotation de la roue par génération de nombres aléatoires et on observe l'individu en face le quel l'aiguille s'est arrêtée, comme dans le jeu télévisé "la roue de la fortune". La probabilité pour qu'un individu soit sélectionné est  $p_i = f_i / \sum_{i=1}^{NP} f_i$ .

### 2.3.2 Sélection par tournoi

A chaque génération, le mécanisme de sélection par tournoi choisit aléatoirement parmi le premier ensemble (voir section 2.2), deux individus, celui qui a la fonction objective minimale sera choisi et appelé parent  $P$ , cette opération est répétée deux fois pour créer deux parents ( $P_1$  et  $P_2$ ). Les deux parents choisis seront immédiatement croisés pour générer deux enfants ( $E_1$  et  $E_2$ ) directement injecté dans le deuxième ensemble de remplacement. La pression de sélection peut être facilement ajustée en changeant la taille du tournoi, c'est à dire ajouter plusieurs rounds de compétitions (comme dans un tournoi de football) .Si la taille du tournoi est plus grande, les individus les moins adaptés ont moins de chances d'être sélectionnés. Pour sa facilité d'implémentation, le schéma de sélection par tournoi est utilisé dans le présent travail.

## 2.4 Croisement

Le croisement est un opérateur qui permet l'échange de l'information entre deux individus ( $P_1$  et  $P_2$ ). Si ces individus contiennent des informations génétiques importantes alors leur

combinaison peut engendrer des chromosomes encore plus performants appelés enfants ( $E_1$  et  $E_2$ ), ce qui augmente le taux d'exploration du domaine de recherche. Les enfants issus de croisement sont insérés dans le deuxième ensemble qui contient les individus les moins performants (Section 2.1).

Plusieurs schémas de croisement sont possibles, nous citons dans ce qui suit les schémas de croisements populaires.

### 2.4.1 Croisement arithmétique

En croisement arithmétique, deux parents produisent deux enfants selon la combinaison suivante:

$$\begin{cases} E_1(i) = \alpha P_1(i) + [(1 - \alpha)P_2(i)] \\ E_2(i) = \alpha P_2(i) + [(1 - \alpha)P_1(i)] \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec  $\alpha$  un nombre aléatoire compris entre  $[0,1]$  qui peut être maintenu constant

### 2.4.2 Croisement binaire simulé

Le croisement binaire simulé (SBX) (Deb et Agrawal, 1995) génère deux enfants  $E_1(i)$  et  $E_2(i)$  à l'aide de la relation suivante:

$$\begin{cases} E_1(i) = \frac{1}{2}[(1 + \beta)P_1(i) + (1 - \beta)P_2(i)] \\ E_2(i) = \frac{1}{2}[(1 - \beta)P_1(i) + (1 + \beta)P_2(i)] \end{cases} \quad (2.4)$$

avec  $\beta$  est un facteur de dispersion défini par:

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{si } u < \frac{1}{2} \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.5)$$

où  $u$  est une variable aléatoire uniformément répartie dans l'intervalle  $[0, 1]$  et  $\eta$  un paramètre réel non négatif caractérisant la forme de la distribution des enfants par rapport aux parents. Le croisement simulé est utilisé dans plusieurs applications pour ses propriétés intéressantes d'auto-adaptation.

### 2.4.3 Croisement de Laplace

Pour notre algorithme génétique à codage réel, on a implanté le croisement binaire simulé

Proposé par Deep et Takhur (2007), le schéma de croisement de Laplace (LX) commence par la génération d'un nombre aléatoire  $u \in [0,1]$ . Ensuite, un nombre aléatoire  $b$  est généré qui suit la distribution de Laplace0.

$$\beta = \begin{cases} a - b \log(u), & u \leq \frac{1}{2} \\ a + b \log(u), & u > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec  $a \in R$  est appelé paramètre d'emplacement, et  $b > 0$  un paramètre d'échelle.

Les enfants sont donnés par les équations suivantes:

$$\begin{cases} E_1(i) = P_1(i) + \beta |P_1(i) - P_2(i)| \\ E_2(i) = P_2(i) + \beta |P_1(i) - P_2(i)| \end{cases} \quad (2.7)$$

## 2.4 Mutation

La mutation permet d'explorer des régions de l'espace de recherche que le croisement ne peut y'accéder. Elle agit contre la stagnation des solutions dans les optimaux locaux, ce qui permet au processus de recherche d'éviter la convergence prématurée. D'une manière générale la mutation est appliquée avec un taux faible aux quelques paramètres sélectionnés aléatoirement. De toute évidence, le croisement et la mutation peuvent conduire à des solutions meilleures ou pires. C'est leur combinaison avec la sélection qui entraîne une amélioration générale de la population. Plusieurs schémas de mutations existent dans la littérature telle que la mutation aléatoire, mutation cyclique non uniforme,...etc.

### 2.4.1 Mutation aléatoire

La mutation aléatoire implique simplement une réinitialisation aléatoire des valeurs des paramètres choisis. Le paramètre sélectionné reçoit une valeur aléatoire dans les limites de l'espace de recherche du paramètre Eq.(1).

### 2.4.2 Mutation cyclique non uniforme

L'opérateur de mutation non-uniforme réduit l'amplitude moyenne des mutations au fur et à mesure que l'analyse progresse et il a été démontré qu'il contribue à augmenter la précision et le taux de convergence dans les problèmes d'optimisation mathématique.

### 2.5 Performance de l'AGCR

La performance de l'algorithme génétique est jugée par sa capacité à localiser la région de l'optimum global. Afin de tester l'efficacité de l'algorithme génétique à codage réel (Figure 2.5), une suite de fonctions tests a été choisie, l'intérêt de ces fonctions tests est de mettre à l'épreuve l'algorithme génétique devant les difficultés classiques des problèmes d'optimisation de façon isolée.

Le Tableau 2.1 montre la faculté de l'AGCR à localiser l'optimum sur des problèmes de nature très variée. Notons que le schéma de croisement utilisé est le croisement binaire simulé (SBX), la taille de la population utilisée est  $NP=300$ . Le croisement de Laplace génère des résultats similaires même en employant une population de taille réduite. Les résultats obtenus en utilisant le croisement de Laplace ne sont pas présentés dans ce manuscrit.

#### 2.5.1 Courbe de performance

Les algorithmes génétiques sont des techniques de recherche stochastique, leur performance

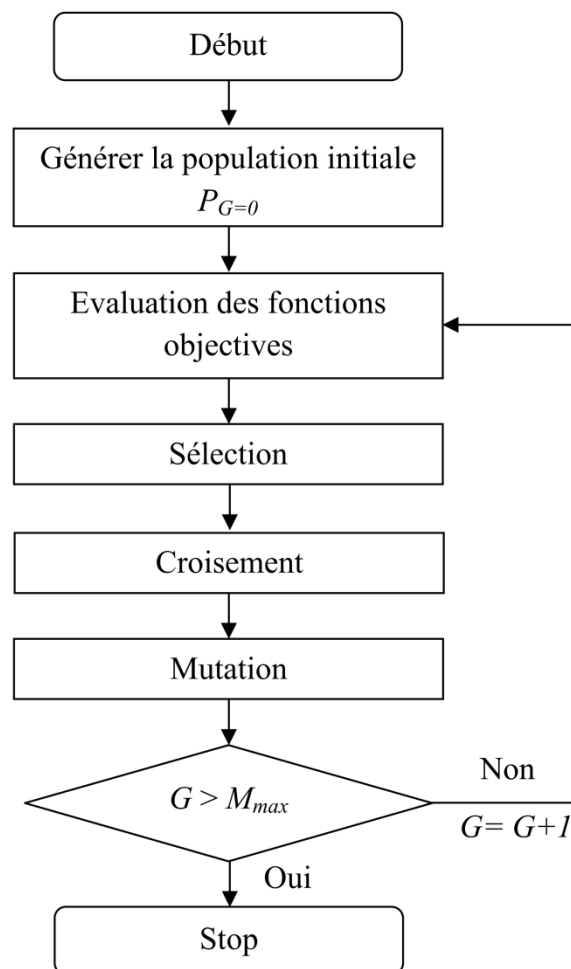


Figure 2.5: Organigramme de l'AGCR

## Chapitre 2: Algorithmes Génétiques à Codage Réels

**Tableau 2.1 :** Performances de l'AGCR sur 5 fonctions tests à deux paramètres.

Fonctions tests $f(x_1, x_2) =$	Espace de recherche	Coordonnées du minimum global	Coordonnées du minimum par AGCR	Erreurs relative (%)
$100\sqrt{ x_2 - 0.01x_1^2 } + 0.01 x_1 + 10 $	$x_1 \in [-15., -5.]$ $x_2 \in [-3., 3.]$	$x_1 = -10.$ $x_2 = -1.$	$x_1 = -10.$ $x_2 = -1.$	0. 0.
$\sin(x_1 + x_2) + (x_1 - x_2)^2 - 1.5x_1 + 2.5x_2 + 1$	$x_1 \in [-1.5., 4.]$ $x_2 \in [-3., 4.]$	$x_1 = -0.54719$ $x_2 = -1.54719$	$x_1 = -0.5452$ $x_2 = -1.546$	0.36 0.07
$\sin^2(3\pi x_1) + (x_1 - 1)^2[1 + \sin^2(3\pi x_2)] + (x_2 - 1)^2[1 + \sin^2(2\pi x_2)]$	$x_1 \in [-10., -10.]$ $x_2 \in [-3., 4.]$	$x_1 = 1.$ $x_2 = 1.$	$x_1 = 1.$ $x_2 = 1.$	0. 0.
$-\cos(x_1)\cos(x_2) \exp(-(x_1 - \pi)^2 - (x_2 - \pi)^2)$	$x_1 \in [-100., 100.]$ $x_2 \in [-100., 100.]$	$x_1 = \pi$ $x_2 = \pi$	$x_1 = 3.142$ $x_2 = 3.142$	0.01 0.01
$(x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2 - 5)^2$	$x_1 \in [-10., 10.]$ $x_2 \in [-10., 10.]$	$x_1 = 1.$ $x_2 = 3.$	$x_1 = 1.$ $x_2 = 3.$	0. 0.

varie généralement de génération en génération. En conséquence, une courbe montrant la performance moyenne de l'ensemble de la population ainsi qu'une courbe montrant la performance du meilleur individu dans la population est un moyen utile d'examiner le comportement d'un AG au cours de son évolution.

### 2.6 Application des algorithmes génétiques dans les ressources en eau

Au cours des dernières années, les applications des AG ont énormément progressées dans de nombreux domaines et notamment les ressources en eau. Dans cette section, les applications des AG dans le domaine des ressources en eau ont été classées en différents groupes.

- **Dimensionnement et gestion des réseaux d'AEP**

De nombreux chercheurs ont développé et appliqué les AG afin d'améliorer la conception et la performance des systèmes de distribution d'eau potable. L'une des premières applications des AG dans l'hydraulique était l'optimisation des programmes de pompage dans des réseaux complexes. Simpson et al. (1994) ont été les premiers à utiliser les AG pour les systèmes de distribution d'eau. Mackle et al. (1995) ont appliqué un AG à codage binaire pour résoudre les problèmes de planification des stations de pompage pour minimiser les coûts énergétiques sous les contraintes de remplissage et de vidange des réservoirs de stockage. Atkinson et al. (2000) ont appliqué leur les AGs à un système de distribution d'eau en Royaume-Uni et ont réduit le coût opérationnel annuel de près de 20%, grâce à une meilleure utilisation des périodes de tarifs d'électricité hors pointe. Munavalli et Mohan-Kumar (2003) ont présenté une étude sur l'utilisation d'un AG pour estimer le dosage optimal de chlore dans des multiples emplacements de trois systèmes d'AEP réels.

- **Conception et optimisation des systèmes d'assainissement**

Face aux contraintes budgétaires croissantes et à une réglementation environnementale plus rigoureuse, les gestionnaires des systèmes d'assainissement sont confrontés à des défis importants. Au stade de la conception, le problème consiste à rechercher des scénarios optimaux pour le bien configurer les systèmes d'assainissement. La conception optimale d'un réseau d'assainissement vise à minimiser les coûts de construction tout en assurant une performance adéquate du système selon des critères spécifiques. Au niveau de la gestion, le problème est de développer des alternatives optimales pour l'exploitation et la maintenance, telles que le contrôle en temps réel et la gestion des coûts globaux. Les AGs sont les techniques d'optimisation les plus populaires pour la conception et la gestion des systèmes d'assainissement. A titre d'exemple, Suggala et Bhattacharya 2003 ont appliqué un AG pour identifier les paramètres d'un procédé d'épuration afin d'éliminer de façon rentable les matières organiques des eaux usées pour répondre efficacement aux normes d'élimination des polluants.

- **Hydrologie**

L'application des AGs pour la planification des bassins versants a été introduite par Yeh et Labadie (1997). Perez-Pedini et al. (2005) ont développé un modèle hydrologique distribué d'un bassin versant urbain dans le nord-est des États-Unis, et ils l'ont combiné avec un AG pour bien gérer des eaux pluviales. Wang (1991) a appliqué un GA à calibrer d'un modèle conceptuel d'écoulement. Le modèle comportait sept paramètres. Les valeurs de ces paramètres ont été optimisées en minimisant la somme des carrés des différences entre les débits calculés et ceux observés. Jain et Srinivasalu (2004) ont utilisé avec succès les AGs à codage réel pour entraîner des modèles pluie-débit à réseaux de neurones.

- **Hydraulique souterraine**

Les AGs ont été appliqués intensivement dans le domaine de l'hydraulique souterraine. McKinney et Lin (1994) ont couplé des modèles de simulation des eaux souterraines avec un AG pour résoudre des problèmes de gestion des eaux souterraines. Les résultats ont montré que les AGs peuvent être utilisés de manière efficace et efficiente pour obtenir des solutions quasi optimales aux problèmes de gestion des eaux souterraines. Katsifarakis et al. (1999) ont combiné des modèles aux éléments finis avec des AG, pour trouver des solutions optimales dans plusieurs classes de problèmes courants d'écoulement des eaux souterraines et de transport, à savoir: l'identification de la transmissivité dans les aquifères zonés; minimisation du coût de pompage

---

## **Chapitre 2: Algorithmes Génétiques à Codage Réels**

---

sous diverses contraintes. Les paramètres hydrauliques d'aquifères ont été également identifiés avec succès en couplant des modèles analytiques de rabattement avec des AGs (Yeh et Huang 2007; Batini et al. 2015).

Les AGs sont devenus un outil populaire pour résoudre une grande variété de problèmes de gestion des ressources en eau. Le prochain chapitre sera dédié à l'interprétation des données issues des essais de pompage réalisés dans des aquifères captifs et semi-captifs. Dans ce chapitre on a présenté un bref aperçu de la théorie des algorithmes génétiques et de leurs applications liées à la gestion des ressources en eau.

## Chapitre 3

### 3. Interprétation automatique des données temps-rabattement

#### 3.1 Introduction

On présente dans ce chapitre, les résultats d'interprétations des courbes temps-rabattement issues des essais de pompages. L'AGCR présenté dans le chapitre précédent a été couplé avec la solution de Theis lorsqu'il s'agit d'un aquifère à nappe captive, et avec la solution de Hantush et Jacob lorsque l'aquifère est à nappe semi-captive. Les résultats obtenus sont comparés à ceux calculés en utilisant le logiciel d'interprétation automatique "AquiferTest 2016.1".

#### 3.2 Processus automatique d'interprétation

Le problème d'estimation des paramètres hydrauliques d'un aquifère est un problème d'optimisation, formulé comme suit:

$$\text{Minimiser } f(x_i) \text{ avec : } x_i^L < x_i < x_i^U ; \quad i = 1, 2, \dots, N_{par} \quad (3.1)$$

Avec  $f(x_i)$  est la fonction objective à minimiser,  $x_i^L$  et  $x_i^U$  sont respectivement les limites inférieure et supérieure des espaces de recherche, qui doivent être suffisamment larges pour inclure toutes les valeurs réalisables des paramètres (Tableau 3.1).

La solution de Theis est un modèle à deux paramètres  $x = [TS]^T$ , alors que la solution de Hantush et Jacob est à trois paramètres  $x = [TSB]^T$ .

Dans ce travail, la fonction objective est formulée comme une erreur standard d'estimation (SEE) définie par :

$$f(x) = SEE = \sqrt{\frac{1}{(N - N_{par})} \sum_{i=1}^N (s^o(t_i) - s^c(t_i))^2} \quad (3.2)$$

Avec  $N$  est la dimension du vecteur des rabattements observés,  $s^o(t_i)$  et  $s^c(t_i)$  sont respectivement les rabattements observés et calculés à un temps de pompage  $t_i$  donné. L'organigramme d'interprétation automatique est donné par la figure 3.1.

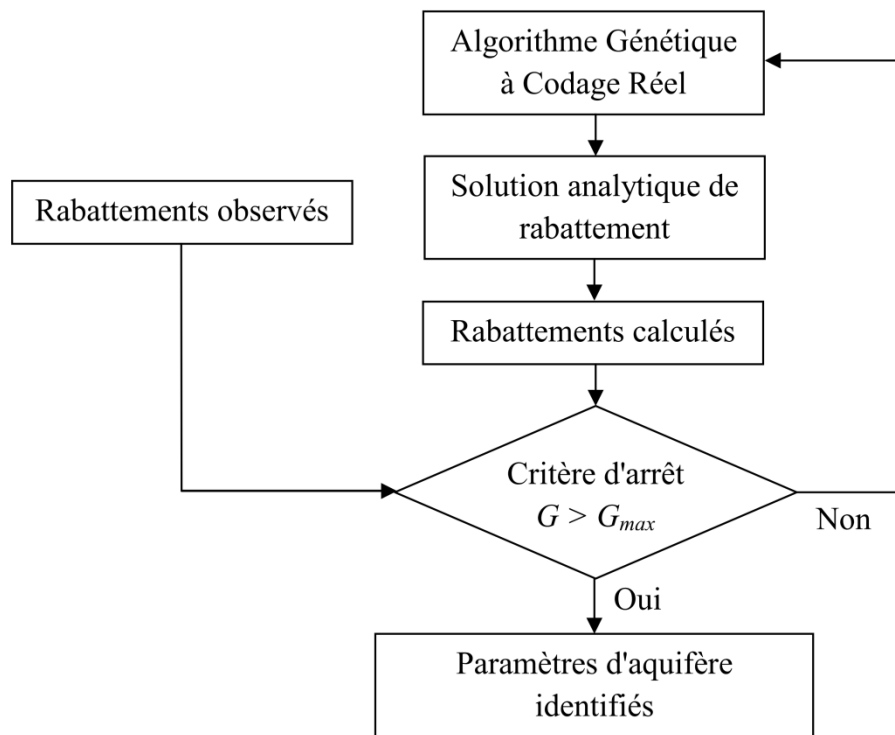
#### 3.3 Logiciel AquiferTest

AquiferTest est le progiciel le plus populaire pour l'analyse graphique des données issues des essais de pompage. Ce logiciel commercial développé par Waterloo Hydrogéologique Software, offre plusieurs solutions analytiques couramment utilisées pour l'analyse des données telles que : Theis, Hantush et Jacob, Warren et Root...etc, et cela, dans un environnement Microsoft

Windows facile. AquiferTest ajuste les **paramètres de la solution** par ajustement graphique interactif aux rabattements observés. Les données peuvent être saisies directement dans AquiferTest ou, importées à partir d'un fichier de données.

**Tableau 3.1** :Espaces de recherche.

Paramètres hydrauliques d'aquifère ( $x_{i=1,2,\dots,Npar}$ )	$x_i^L$	$x_i^U$
$x_1 = T$ [m <sup>2</sup> /s]	$10^{-9}$	$10^{-1}$
$x_2 = S$ [-]	$10^{-6}$	$10^{-1}$
$x_3 = B$ [m]	$10^{-9}$	$10^3$



**Figure 3.1:** Organigramme d'interprétation automatique

### 3.4 Applications

Plusieurs séries de données d'essais de pompage obtenues à partir des aquifères captifs et semi-captifs ont été choisies pour examiner la capacité de la technique d'interprétation proposée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux calculés par AquiferTest 2016.1. Les résultats sont présentés sous forme de courbes temps-rabattement, tableaux comportant les paramètres hydrauliques identifiés, et des graphes de performance de l'AGCR.

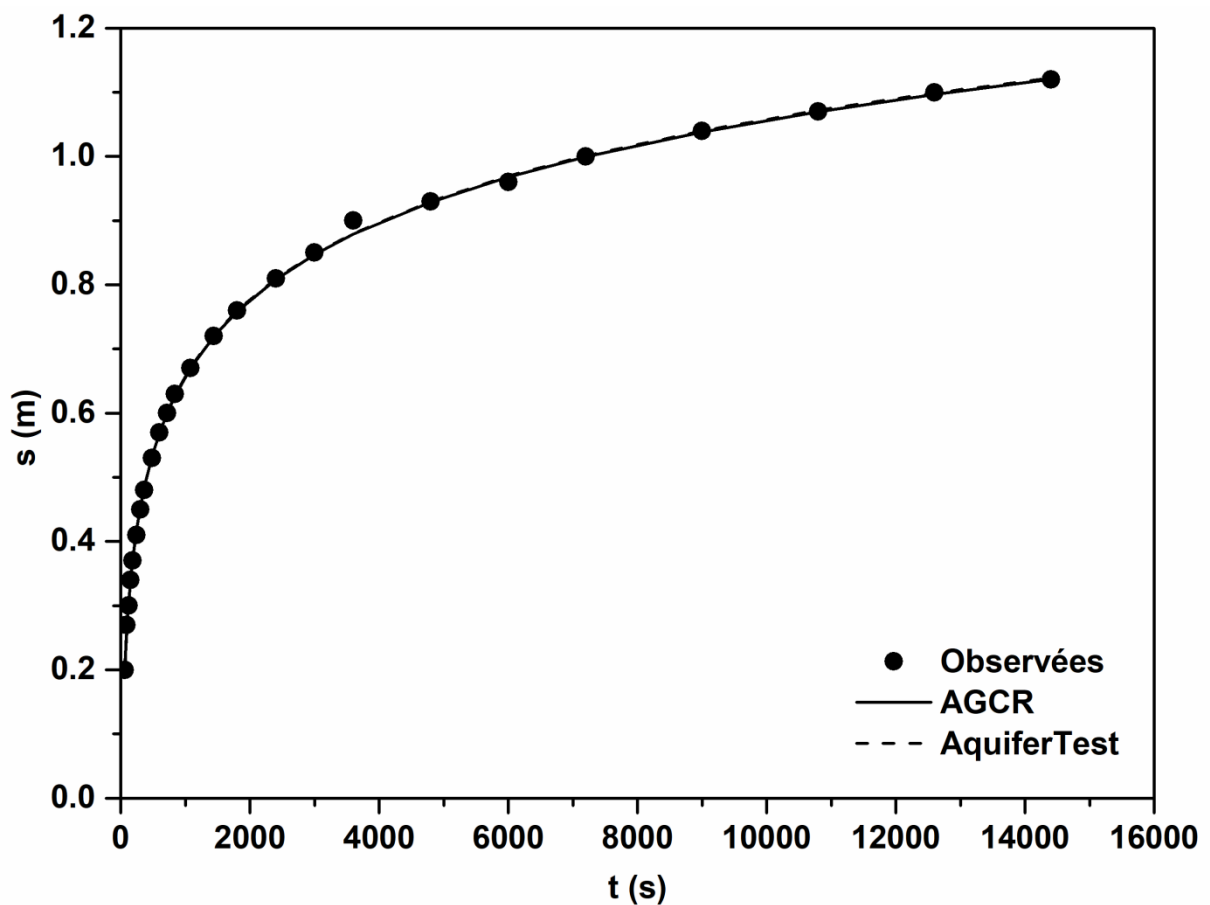
**3.4.1 Interprétation par la solution de Theis**

Trois séries de données ont été interprétées par la solution de Theis.

- **Série de Todd (1980) [T1]**

La première série analysée [T1] est obtenue par Todd (1980). Le puits a été pompé à un débit constant de 2500 m<sup>3</sup>/jour, la distance entre le puits de pompage et d'observation est de 60m.

La figure 3.2 compare les courbes temps-rabattement obtenues à partir des paramètres hydrauliques identifiés par AGCR et le logiciel AquiferTest présentés dans le tableau 3.2



*Figure 3.2: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T1]*

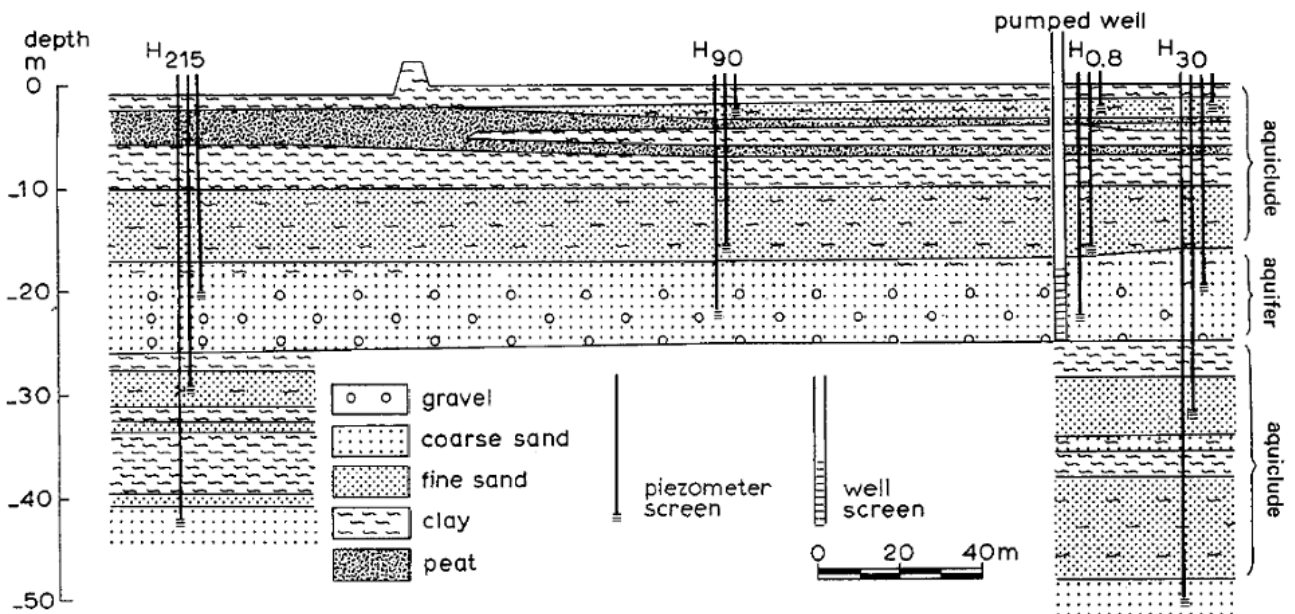
*Tableau3.2 : Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: T1]*

Techniques	$T (\times 10^{-2}) (m^2/s)$	$S (\times 10^{-4})$	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	1.32	1.93	<b>5.45</b>
AquiferTest	1.32	1.93	5.57

Huang et al. (2007) ont cités dans leur article les valeurs des paramètres hydrauliques obtenues en utilisant la méthode d'ajustement manuelle, ( $T= 1.28 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $S= 2.06 \times 10^{-4}$ ;  $SEE= 8.85 \times 10^{-3}$ ).

- **Série de Kruseman et de Ridder (1990) [T2]**

L'essai de pompage réalisé à OudeKorendijk aux Pays-Bas, comporte quatre piézomètres, situés respectivement à 0.8, 30, 90 et 215 m du puits de pompage (Figure 3.3).



**Figure 3.3:** Coupe du site d'Oude-Korendijk (Kruseman et de Ridder, 1990).

Les 18 premiers mètres sous la surface, forment une couche de confinement imperméable. L'aquifère pompé est situé entre 18 et 25 m, il est constitué essentiellement de sable grossier, et surmonte une couche de sédiments argileux. Le puits de pompage (pumpedwell) capte l'eau le long de l'épaisseur de l'aquifère. L'essai de pompage a duré 14 heures avec un débit constant de  $788 \text{ m}^3/\text{jour}$ . On a interprété les données enregistrées dans le piézomètre situé à 30 m du puits de pompage, série [T2].

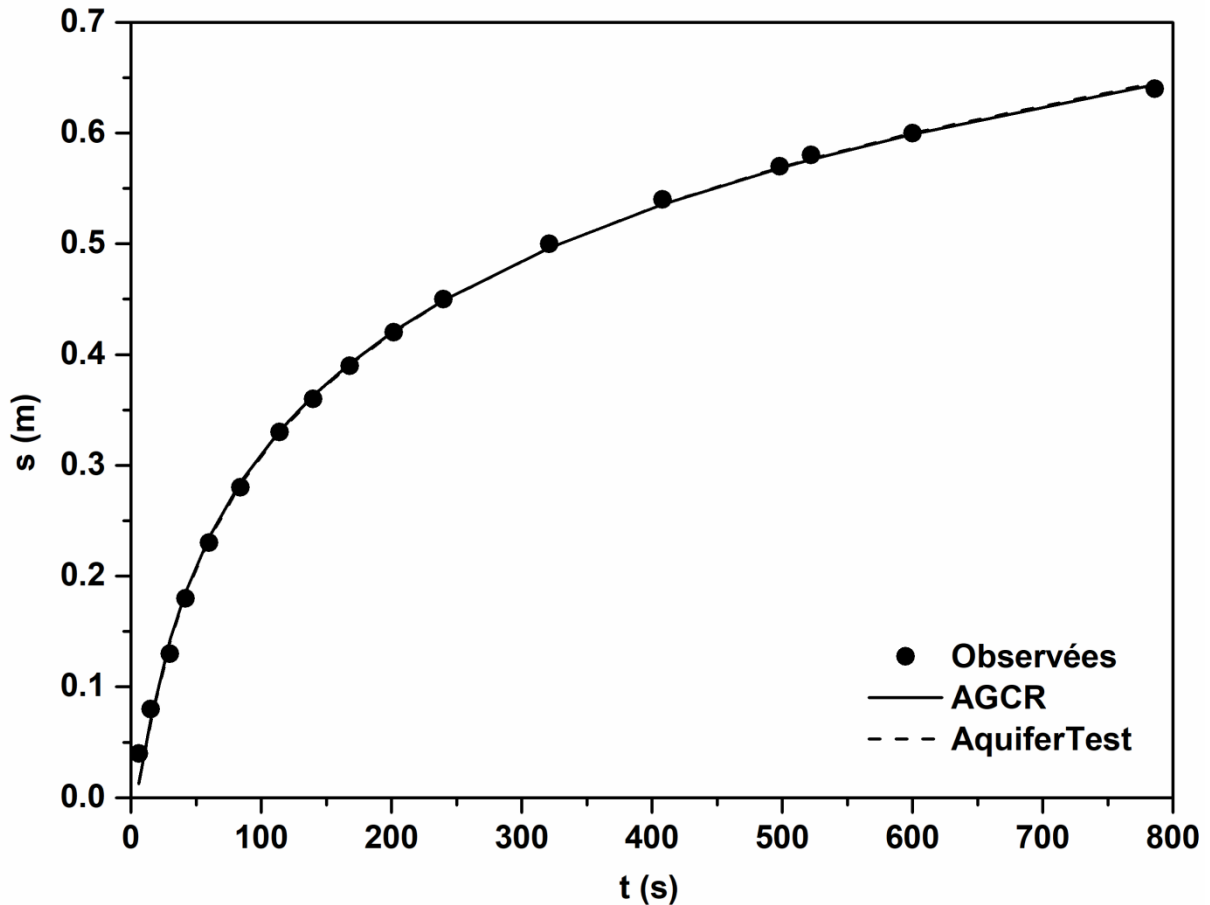


Figure 3.4: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T2]

Tableau 3.3 : Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest, [Série: T2].

Techniques	$T (\times 10^{-3}) \text{ (m}^2\text{/s)}$	$S (\times 10^{-4})$	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	4.32	1.86	9.01
AquiferTest	4.28	1.90	<b>8.54</b>

- Série de Hongfeia et Jianqingb (2012) [T3]

Cette série de données a été obtenue en pompant un aquifère à nappe captive avec un débit de 6642.4 m<sup>3</sup>/jour durant 13 heures. La distance entre le piézomètre et le puits de pompage est de 30.48m.

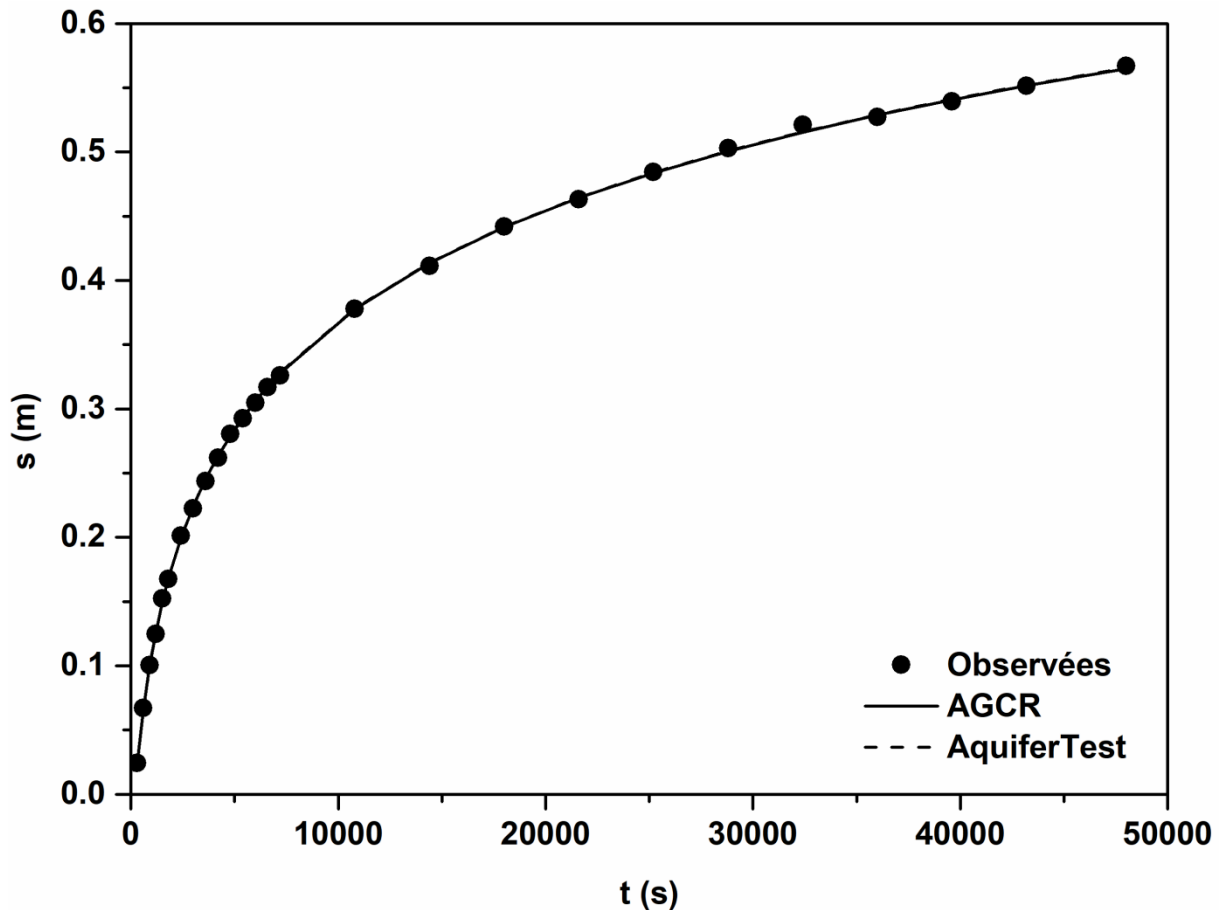


Figure 3.5: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: T3]

Tableau 3.4: Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: T3].

Techniques	$T (\times 10^{-2})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S (\times 10^{-2})$	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	4.80	6.66	<b>1.94</b>
AquiferTest	4.79	6.66	1.95

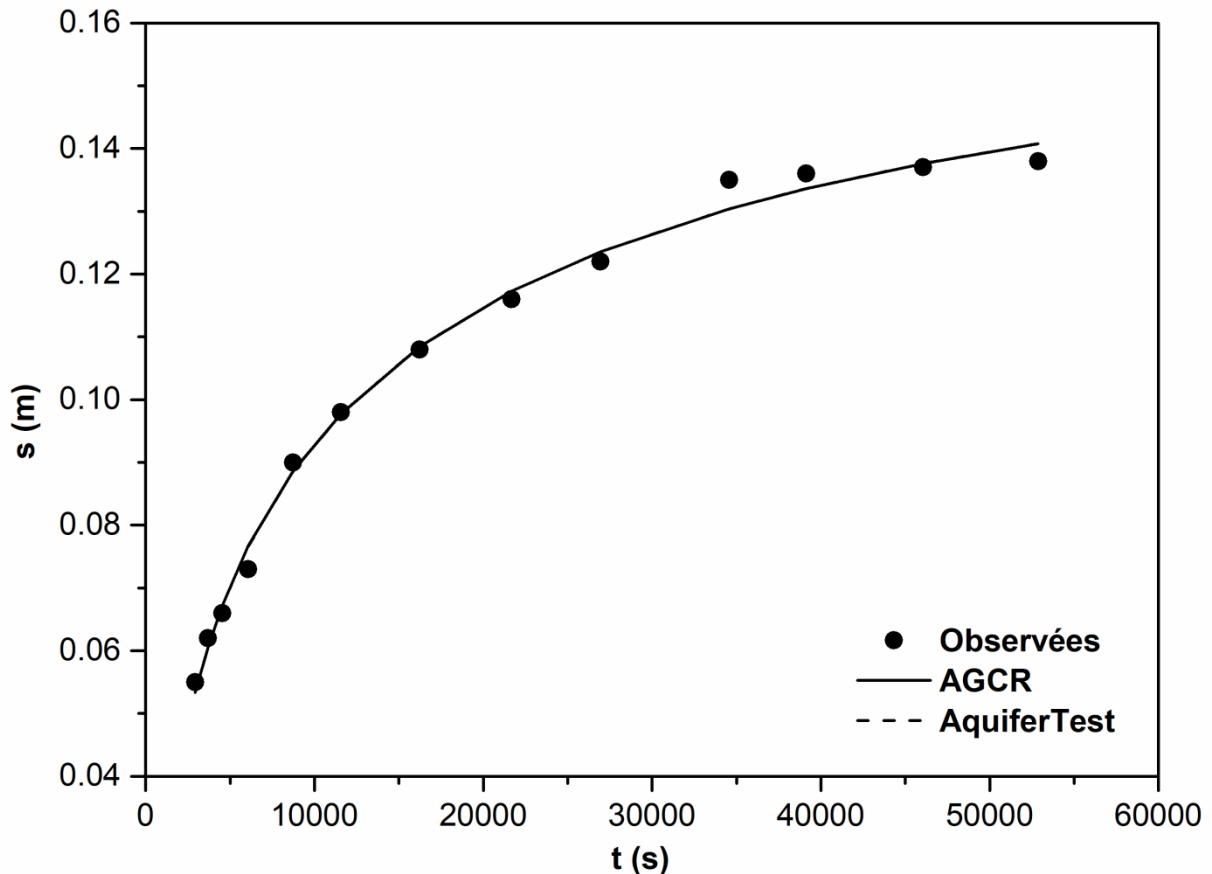
D'après les figures temps-rabattement des séries [T1, T2 et T3], il est clair que les valeurs des rabattements calculés correspondent bien aux valeurs des rabattements observées. Les résultats obtenus indiquent que la procédure automatique d'interprétation proposée, sont similaires à ceux obtenus par AquiferTest.

### 3.4.2 Interprétation par la solution de Hantush et Jacob

Dans cette section, on applique la procédure d'interprétation basée sur le couplage de l'AGCR avec la solution de Hantush et Jacob sur cinq séries de données de pompage.

- Série de Batu (2012) [H1]

Pour les données de Batu (1998), l'aquifère semi-captif est pompé à un débit constant de 625 m<sup>3</sup>/jour. Le piézomètre se trouve à 105m loin du puits de pompage. Les épaisseurs de l'aquifère et de l'aquitard sont respectivement 80 et 28 m.



**Figure 3.6:** Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H1]

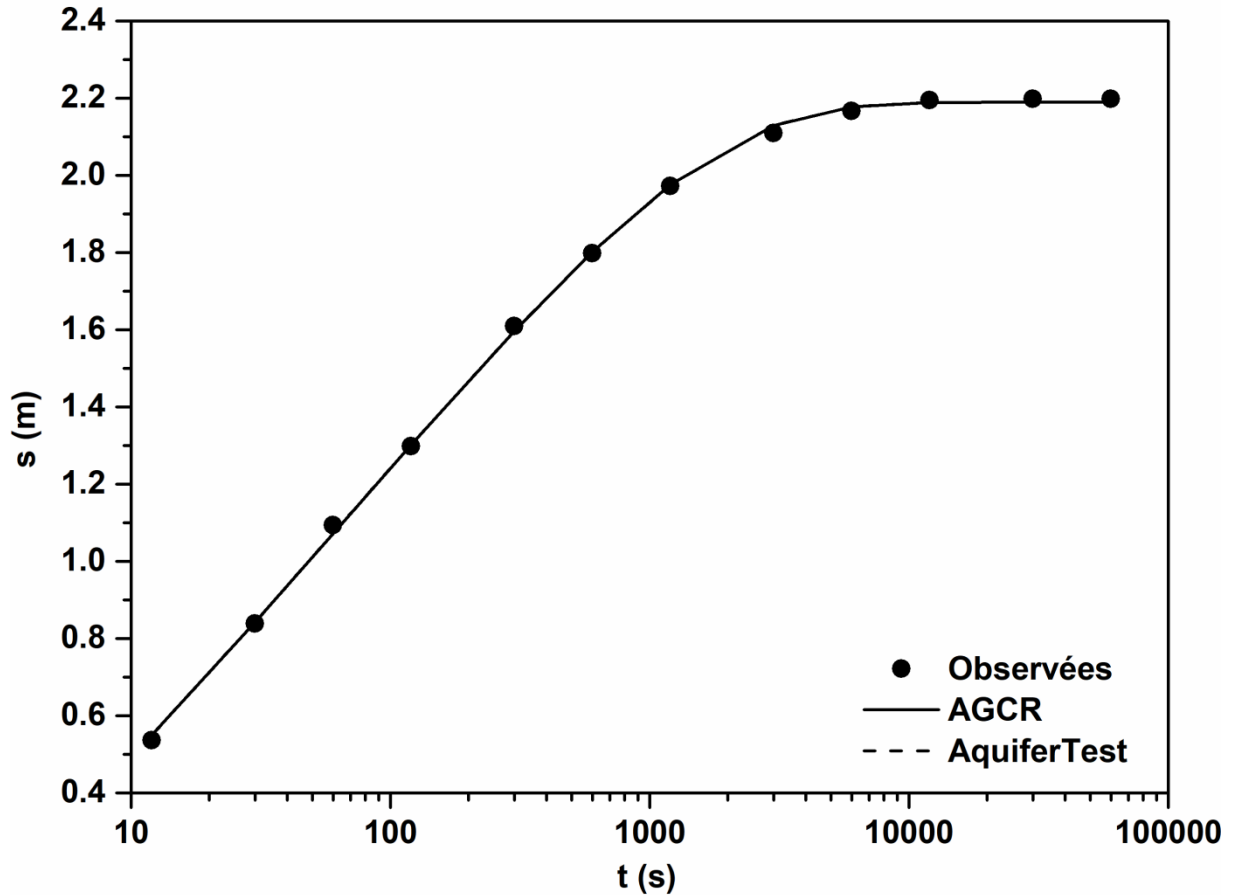
**Tableau 3.5:** Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest, [Série: H1].

Techniques	$T (\times 10^{-2})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S (\times 10^{-3})$	$B$ (m)	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	1.54	2.52	792.33	2.47
AquiferTest	1.54	2.52	793.64	2.47

Notons que deux ajustements manuels ont été effectués pour analyser la série de données [H1], ils ont donné deux différentes valeurs de l'erreur standard d'estimation SEE à savoir :  $1.19 \times 10^{-2}$  et  $1.55 \times 10^{-2}$  (Yeh et Huang 2005).

- Séries de Cooper (1963) [H2, H3 et H4]

Cooper (1963) a réalisé un essai de pompage dans un aquifère semi-captif, surmonté d'un aquitard de 30.4m d'épaisseur. Les rabattements ont été mesurés dans trois différents piézomètres situés respectivement à 30.48 [H2], 152.4 [H3] et 304.8m [H4] loin du puits de pompage. La nappe semi-captive a été pompée à un débit de 5450.98 m<sup>3</sup>/jour durant 17 heures. On a interprété les données enregistrées dans les trois différents piézomètres.



**Figure 3.7:** Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H2]

**Tableau 3.6 :** Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H2].

Techniques	$T (\times 10^{-2})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S (\times 10^{-5})$	$B$ (m)	$SEE (\times 10^{-2})$
AGCR	1.43	9.80	617.28	1.35
AquiferTest	1.43	9.79	616.75	<b>1.34</b>

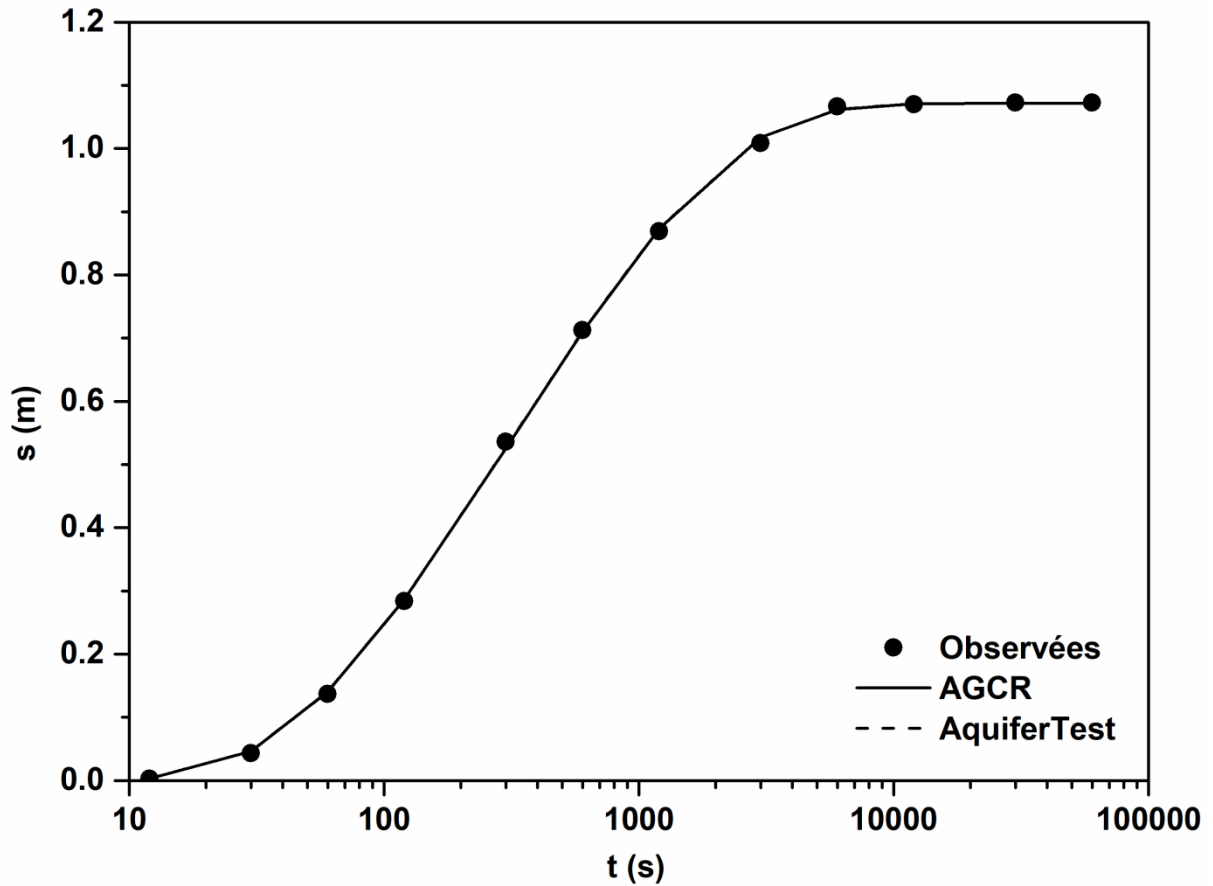


Figure 3.8: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H3]

Tableau 3.7 : Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H3].

Techniques	$T(\times 10^{-2})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S(\times 10^{-5})$	$B$ (m)	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	1.44	9.71	604.42	<b>5.53</b>
AquiferTest	1.44	9.71	604.78	5.55

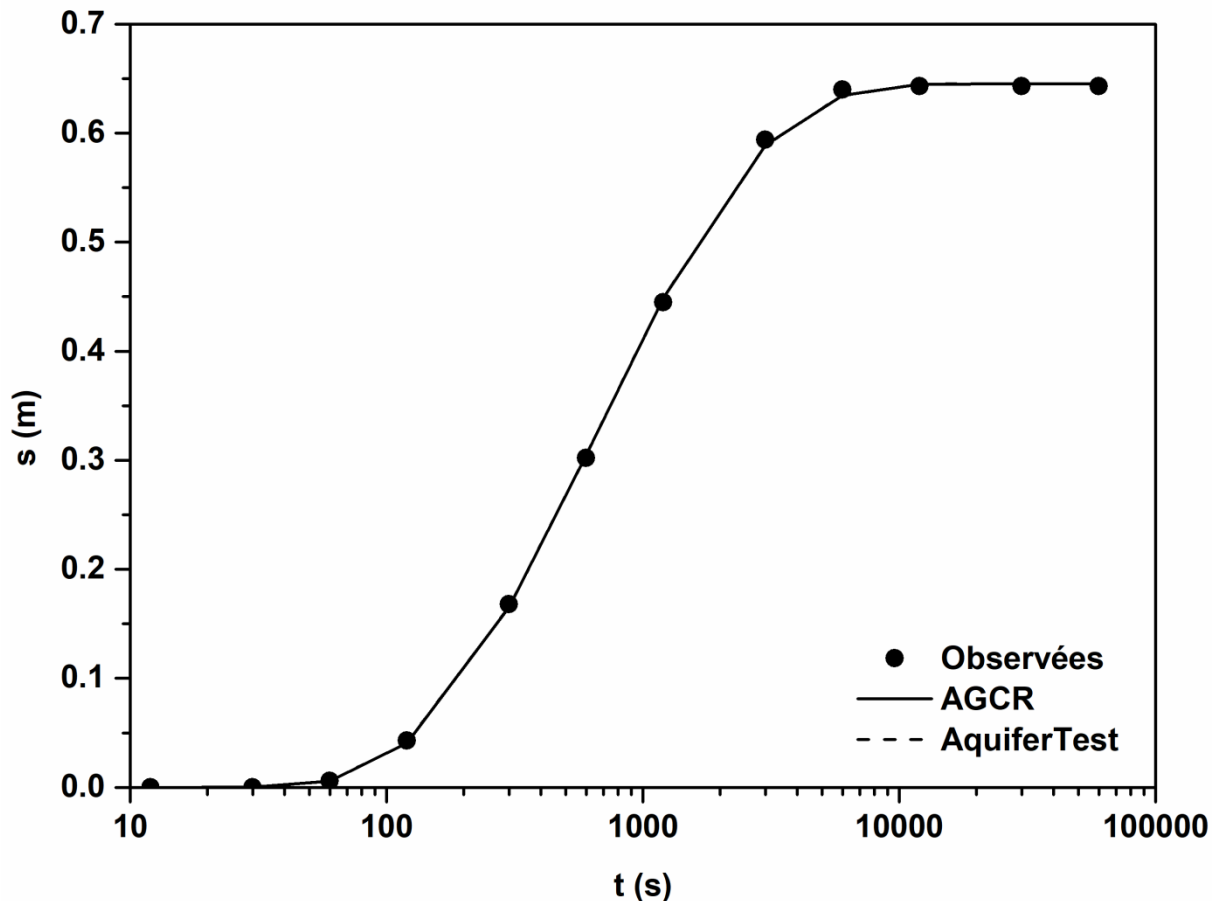


Figure 3.9: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H4]

Tableau 3.8 : Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H4].

Techniques	$T (\times 10^{-2})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S (\times 10^{-4})$	$B$ (m)	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	1.41	1.01	597.52	<b>3.38</b>
AquiferTest	1.41	1.01	596.09	3.42

Les transmissivités identifiées par l'AGCR à partir des trois piézomètres d'observation varient entre  $1.41 \times 10^{-2}$  à  $1.44 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s; les coefficients d'emmagasinement varient entre  $9.71 \times 10^{-5}$  à  $1.1 \times 10^{-4}$ ; et le facteur  $B$  est compris entre 597.52 et 617.28 m. Ces résultats indiquent que le système aquifère présente une bonne homogénéité.

- **Série de Sridharan et al. (1987) [H5]**

Sridharan (1987) à réaliser un essai de pompage dans un aquifère à nappe captive qui a duré 20 heures avec un débit de 136.26 m<sup>3</sup>/jour. La série [H5], comporte les données temps-rabattement enregistrées dans un piézomètre localisé à 29m du puits de pompage.

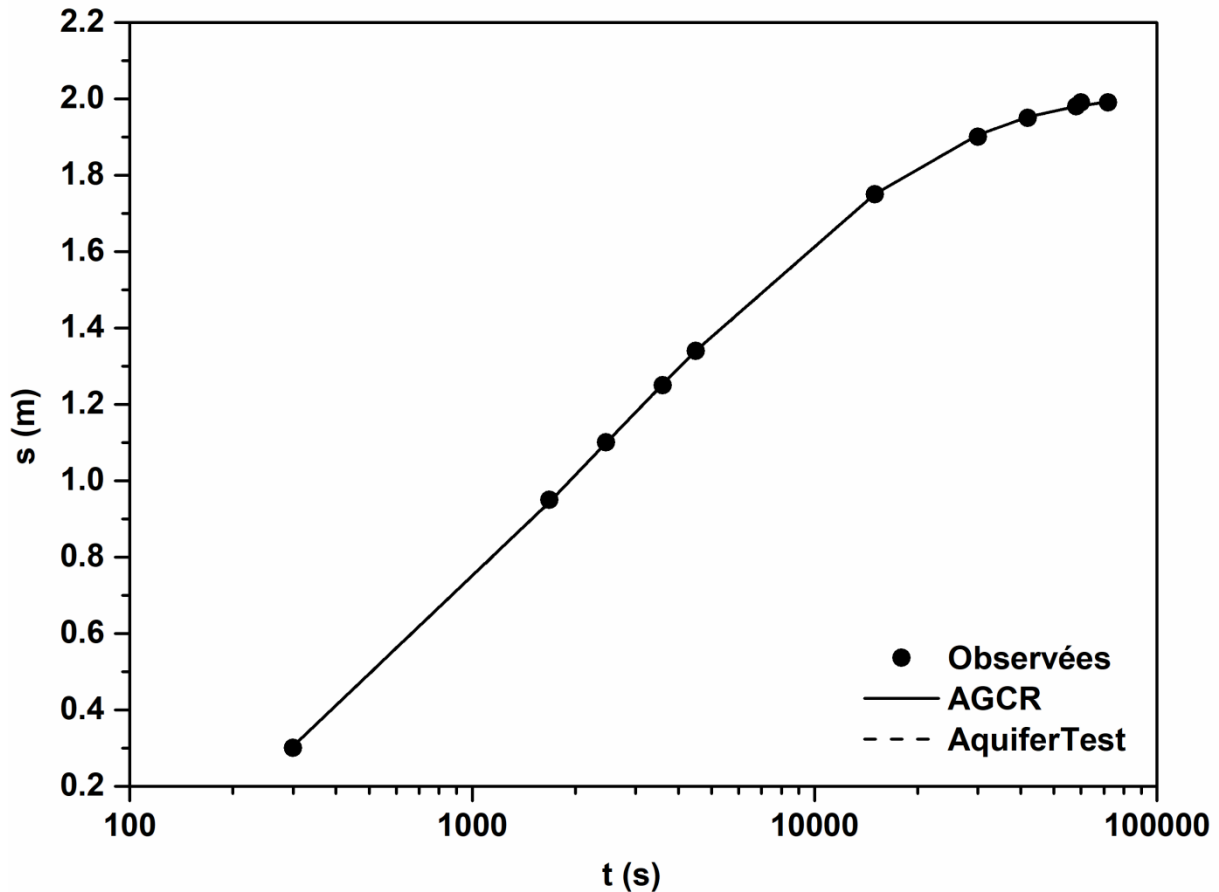


Figure 3.10: Comparaison entre les valeurs observées et celles calculées, [Série: H5]

Tableau 3.9: Paramètres hydrauliques identifiés par AGC et AquiferTest , [Série: H5].

Techniques	$T (\times 10^{-4})$ (m <sup>2</sup> /s)	$S (\times 10^{-4})$	$B$ (m)	$SEE (\times 10^{-3})$
AGCR	2.69	1.64	219.48	<b>2.62</b>
AquiferTest	2.69	1.63	220.05	2.62

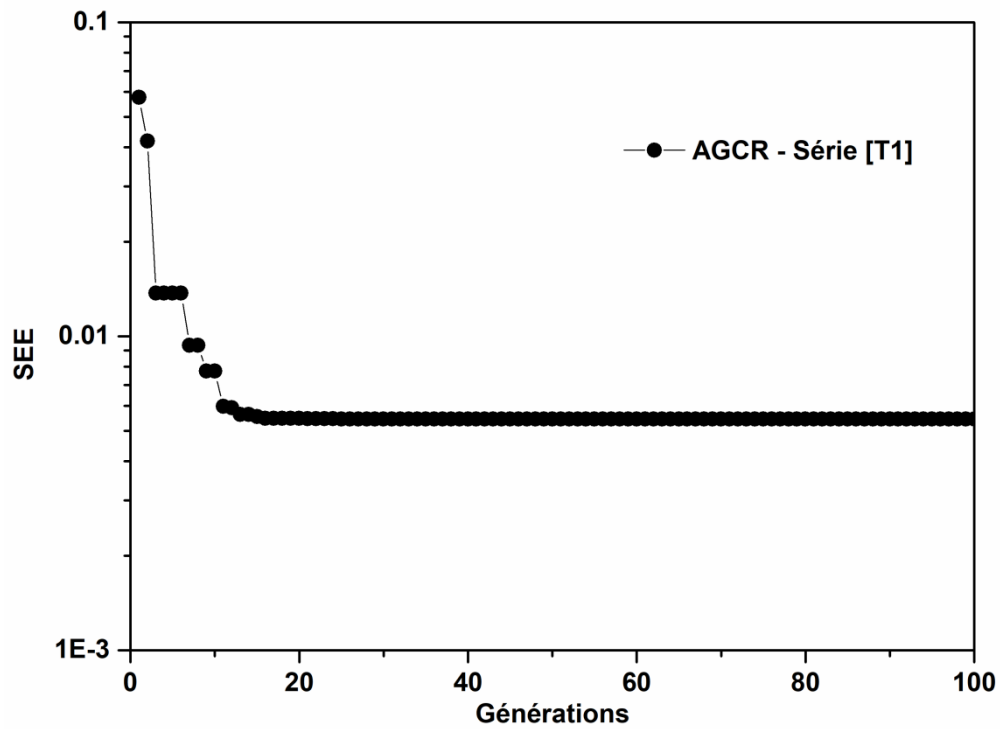
Les résultats d'interprétation au moyen de l'AGCR, obtenus pour les différentes séries de données temps-rabattement [H1-H5], sont en bon accord avec ceux obtenus par le logiciel AquiferTest.

### 3.5 Graphes de performances

Un graphe de performance, montre la convergence de l'AGCR vers la solution optimale. Il présente la variation de la fonction objective en fonction des générations. Le nombre maximum de générations fixé pour le couplage AGCR-solution de Theis est  $G_{max}=100$ , alors que pour le couplage AGCR-solution de Hantush et Jacob est  $G_{max}=300$ . Ces valeurs maximales de générations ont été obtenues par des tests expérimentaux, c'est à dire qu'on a jugé que ces valeurs

sont suffisantes pour que la procédure d'interprétation automatique converge vers la solution optimale. Le nombre de population utilisé est  $NP=100$  individus, avec une probabilité de mutation de 0.04.

### 3.5.1 Graphes de performances AGCR- Theis



**Figure 3.11:** Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T1]

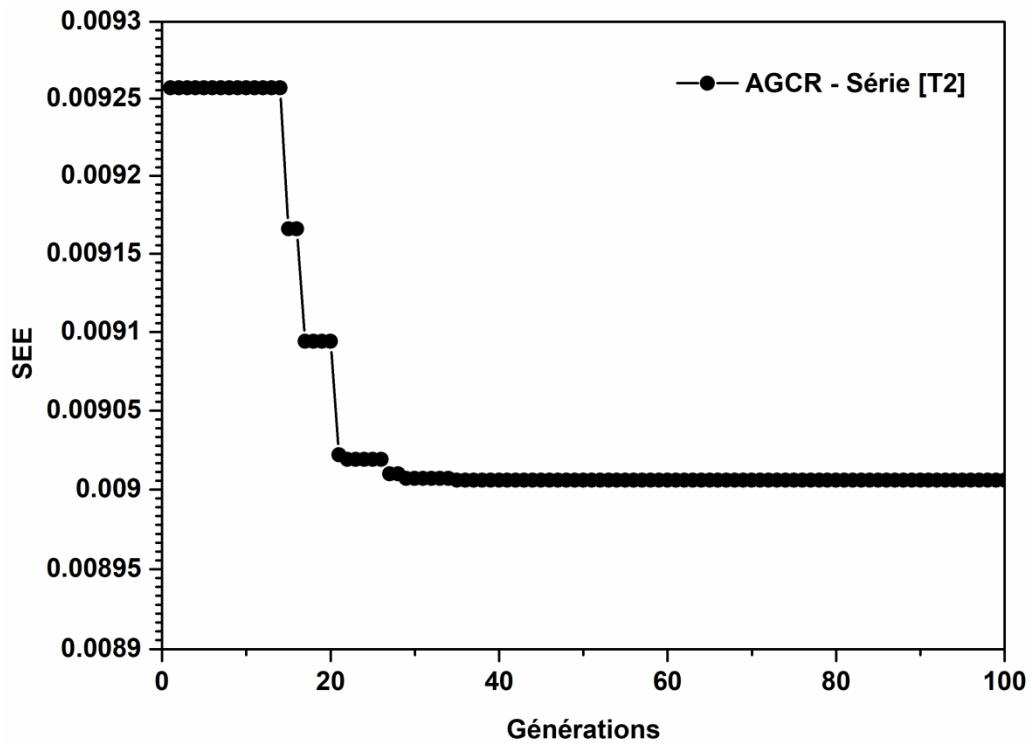


Figure 3.12: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T2]

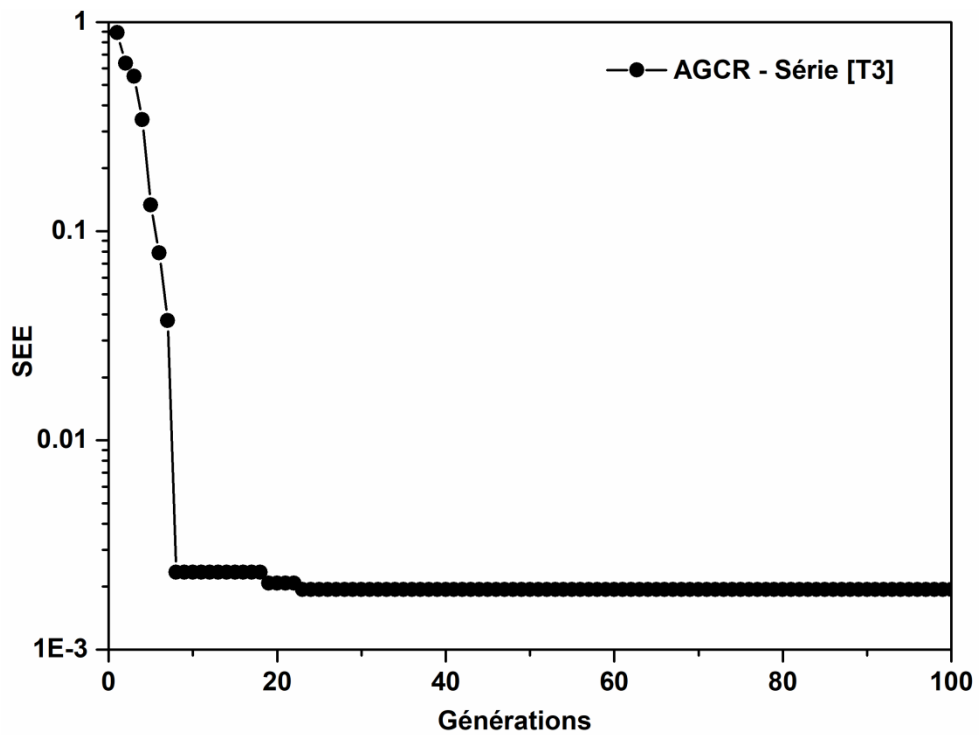


Figure 3.13: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: T3]

3.5.2 Graphes de performances AGCR- Hantush et Jacob

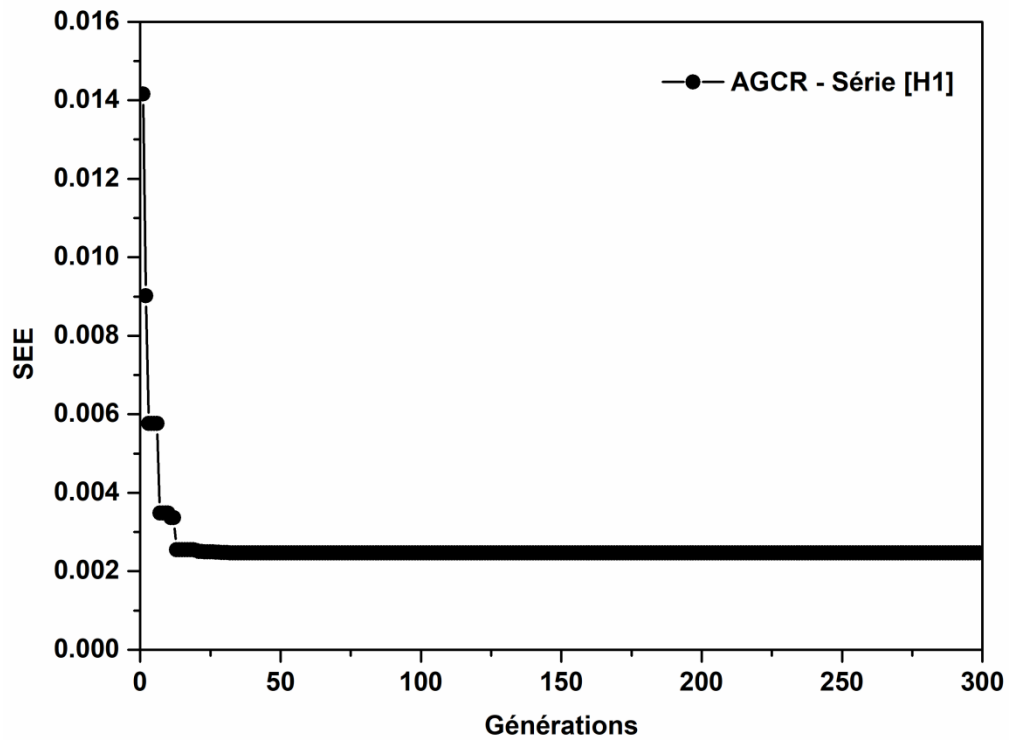


Figure 3.14: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H1]

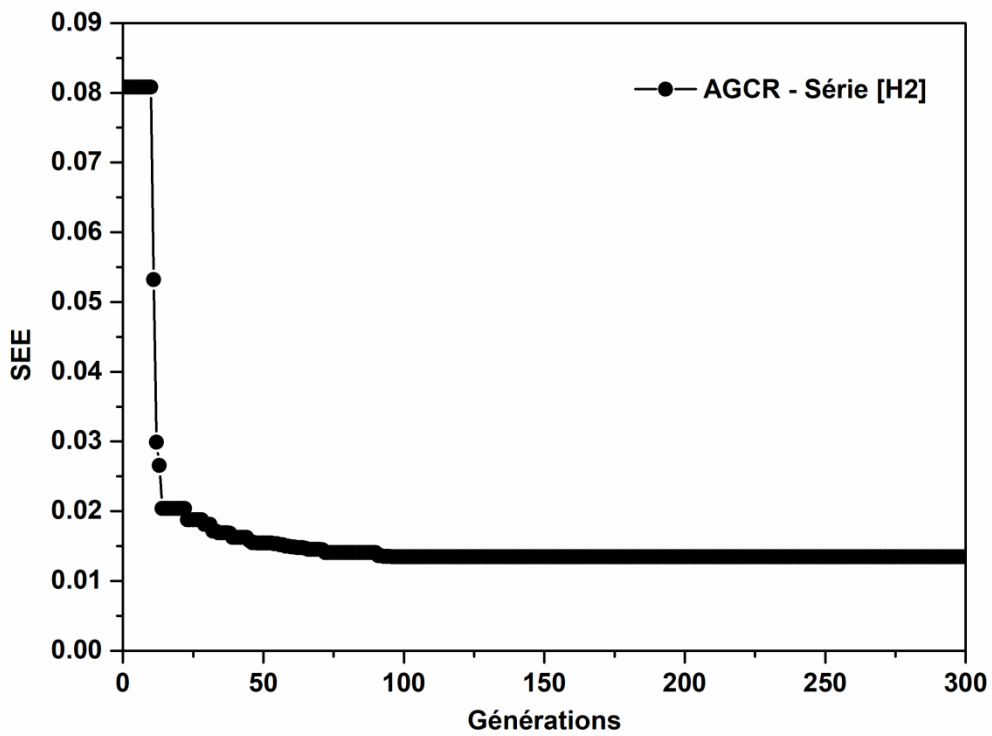


Figure 3.15: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H2]

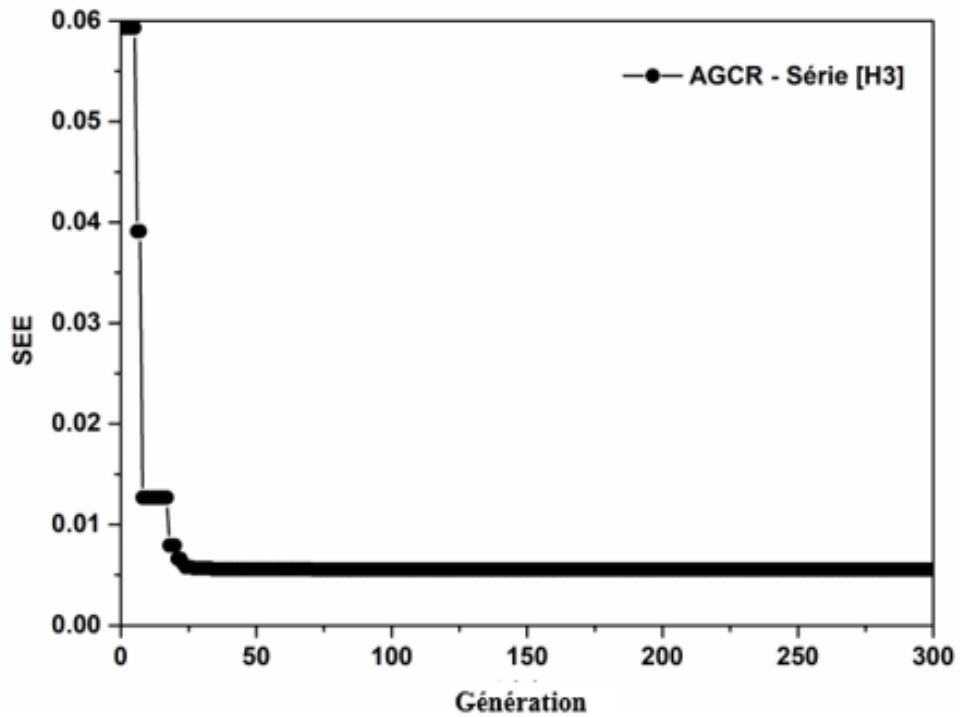


Figure 3.16: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H3]

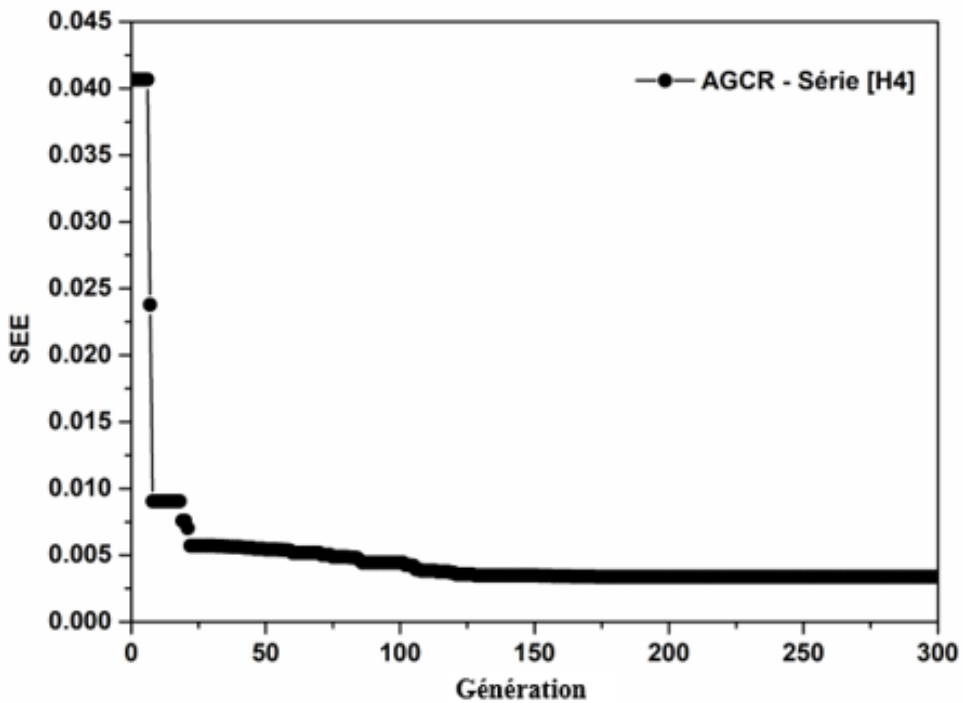
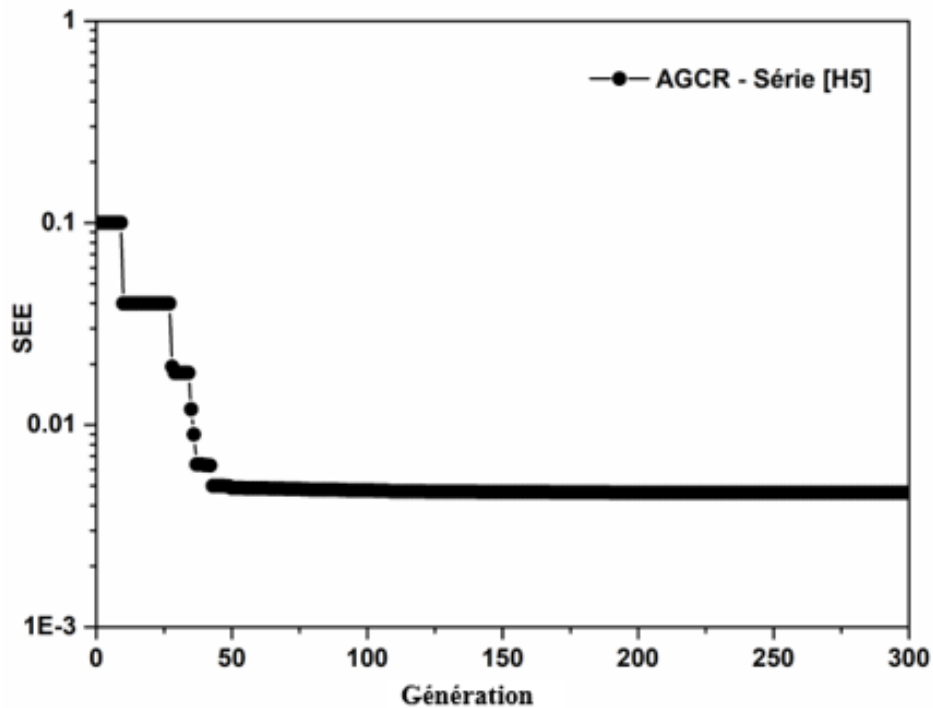


Figure 3.17: Graphe de performances du meilleur individu, [Série: H4]



**Figure 3.18:** *Graphique de performances du meilleur individu, [Série: H5]*

Les graphes de performances montrent que la valeur de la fonction objective SEE diminue rapidement au cours des premières générations, puis lentement durant les dernières générations. Les solutions optimales lorsque la solution de Theis est utilisée, sont obtenues respectivement à 25,27 et 23 générations pour les séries **T1**, **T2** et **T3**. Pour l'interprétation par la solution de Hantush et Jacob, les solutions optimales sont obtenues respectivement à 62, 93, 71, 226 et 204 pour les séries **H1**, **H2**, **H3**, **H4** et **H5**.

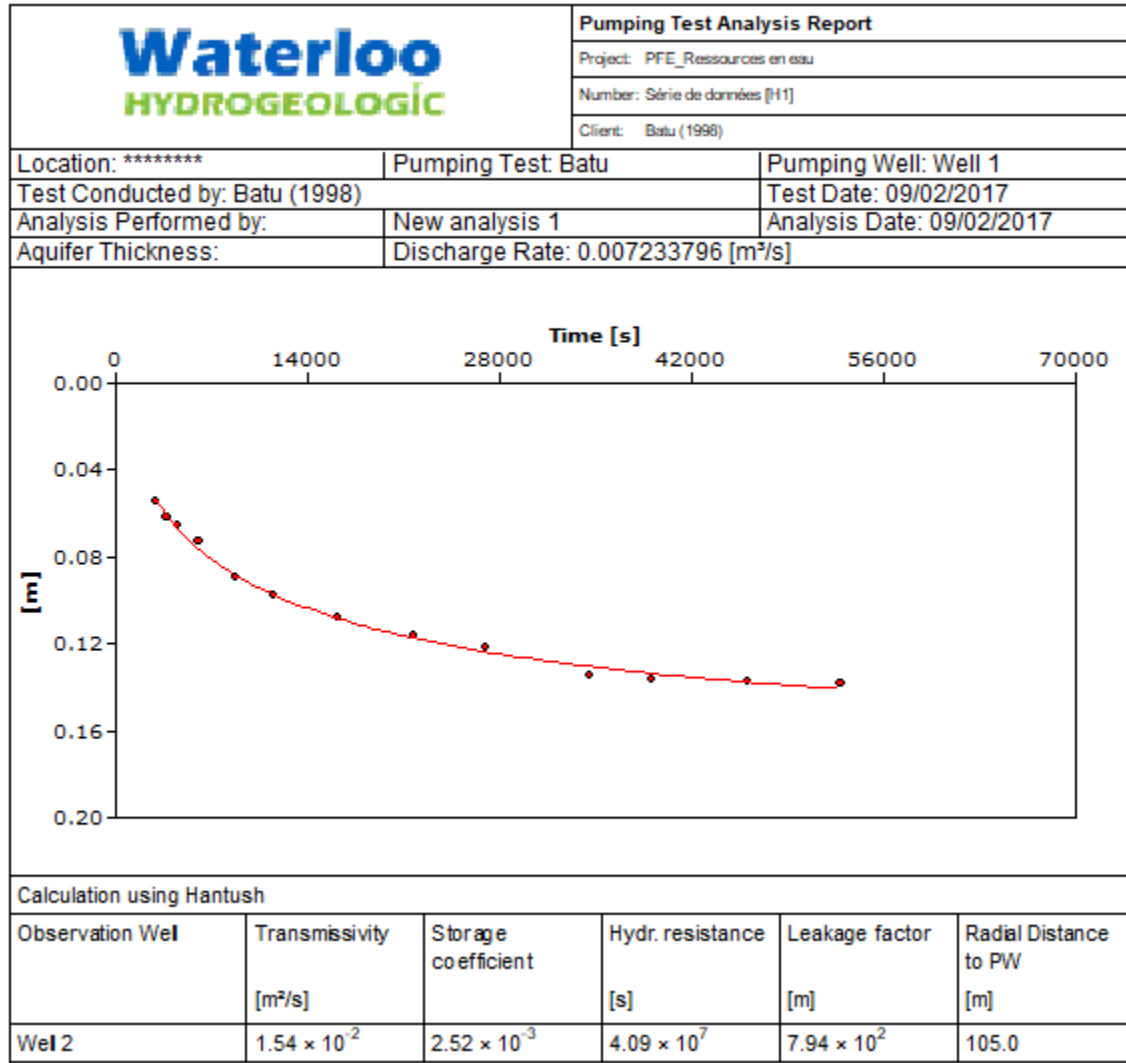
Rappelons que l'AGCR utilisé pour l'interprétation comprend 100 individus. Il est clair que lorsqu'une grande taille de population est utilisée, de meilleures solutions seront générées, mais cela augmente considérablement le temps de calcul qui est un facteur important que nous n'avons pas abordé dans ce mémoire.

Les résultats présentés dans ce chapitre, montrent la faculté de l'AGCR à interpréter les données issues des essais de pompages réalisés dans des aquifères captifs et semi-captifs. Sachant que la qualité d'ajustement des solutions analytiques aux données observées, dépend aussi de la capacité des solutions analytiques à supporter les conditions hydrogéologiques du terrain, ainsi que de la qualité de mesure des rabattements.

### **Génération**

**3.6 Rapport d'interprétation généré par le logiciel AquiferTest**

La figure 3.19 ci-dessous, présente le rapport d'interprétation de la série [H1] obtenue par Batu (1998), généré par le logiciel AquiferTest



**Figure 3.19:** Rapport d'interprétation de la série [H1], par AquiferTest

Notons qu'AquiferTest donne la résistance hydraulique de l'aquitard  $C$  [s], calculée par la relation:  $C = \sqrt{B^2/T}$ .

### Conclusion générale

L'interprétation des données (temps-rabatement) issues des essais de pompage est le meilleur moyen pour identifier les paramètres hydrauliques d'un aquifère. De nos jours, l'interprétation manuelle en utilisant des courbes standards est toujours utilisée, même si elle dépend de l'inspection visuelle de l'opérateur, ce qui lui donne un aspect subjectif.

Dans ce travail on a automatisé l'interprétation des courbes temps-rabatement en utilisant un algorithme d'optimisation stochastique. Les courbes standards qui sont des solutions graphiques des fonctions spéciales tels que  $W(u)$  et  $W(u,r/B)$  ont été remplacées par leur équations mathématiques. En se basant sur son expérience et sur l'apparition de la courbe temps-rabatement observée, l'ingénieur choisit parmi les solutions analytiques disponibles celle qui est la plus représentative du site étudié. Puisque à part la capacité de la technique d'optimisation à alimenter les modèles analytiques par les meilleurs paramètres (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, ...etc), la qualité de l'interprétation dépend également de la capacité de la solution analytique adopté à supporter les conditions hydrogéologiques du terrain.

Dans ce mémoire, on a couplé un algorithme génétique à codage réel (AGCR) avec des solutions analytiques de rabattement de Theis et d'Hantush afin d'interpréter automatiquement des données issues des essais de pompage réalisés dans des aquifères à nappes captives et semi-captives. L'erreur standard d'estimation (SEE) a été utilisée comme critère de performance pour évaluer les écarts entre les rabattements calculés et ceux observés durant l'essai de pompage.

Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats obtenus en utilisant le logiciel d'interprétation automatique AquiferTest 2016.1. Les paramètres obtenus, ainsi que les erreurs entre les valeurs observées et celles calculés sont similaires. La méthodologie métaheuristique utilisée dans ce travail est encourageante, et s'avère un bon outil d'interprétation des essais de pompages.

Enfin, et afin de développer un logiciel général d'interprétation automatique, l'extension de ce travail inclura d'autres solutions analytiques disponibles dans la littérature.

## Références bibliographiques

- Atkinson R, van Zyl JE, Walters GA, Savic DA (2000) Genetic algorithm optimisation of level- controlled pumping station operation. *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, Centre for Water Systems, Exeter, UK, pp. 79–90
- Bateni SM, Mortazavi-Naeini M, Ataie-Ashtiani B, Jeng DS, Khanbilvardi R (2015) Evaluation of methods for estimating aquifer hydraulic parameters. *Appl Soft Comput J* 28:541–549
- Batu V (1998) *Aquifer Hydraulics*. Wiley, New York
- Cooper Jr, HH (1963) Type curves for nonsteady radial flow in an infinite leaky artesian aquifer. In: Bentall,
- Deb k et Agrawa RB (1995) Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. *Complex systems*, 9(2).
- Deep K, Thakur M (2007) A new mutation operator for real coded genetic algorithms. *Appl Math Comput* 193(1):211–230
- *Halford KJ, Kuniansky EL (2002) Documentation of spreadsheets for the analysis of aquifer-test and slug-test data. USGS, Report 2002-197*
- Hantush MS, Jacob CE (1955) Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans Am Geophys. Union* 36(1):95–100
- Holland JH (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*. MITpress, Cambridge, Massachusetts
- HongfeiaZ ,Jianqingb G (2012) Chaotic Sequence Optimization Algorithm for Estimation of Aquifer Parameters from Data of Pumping Test. *Procedia Environmental Sciences* 12 ( 2012 ) 528 – 536
- Hunt B (1977) Calculation of The Leaky Aquifer Function. *J Hydrol* 33(1-2):179–183
- Jain A, Sudheer KP, Srinivasulu S (2004) Identification of physical processes inherent in artificial neural network rainfall runoff models. *Hydrolog. Process.* 18, 571 581
- Kruseman GP, de Ridder NA (1990) *Analysis and evaluation of the pumping test data*. Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands
- Kresic N (2007) *Hydrogeology and groundwater modeling*. (2nd ed), CRC Press, Boca Raton
- Mackle G, Savic DA, Walters GA (1995) Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. In: *Proceedings of Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*. GALEZIA '95, IEE, London, pp. 400405
- Maliva RG (2016) *Aquifer characterization techniques*, Schlumberger Methods in Water Resources. Evaluation Series No. 4, Springer International Publishing, Switzerland

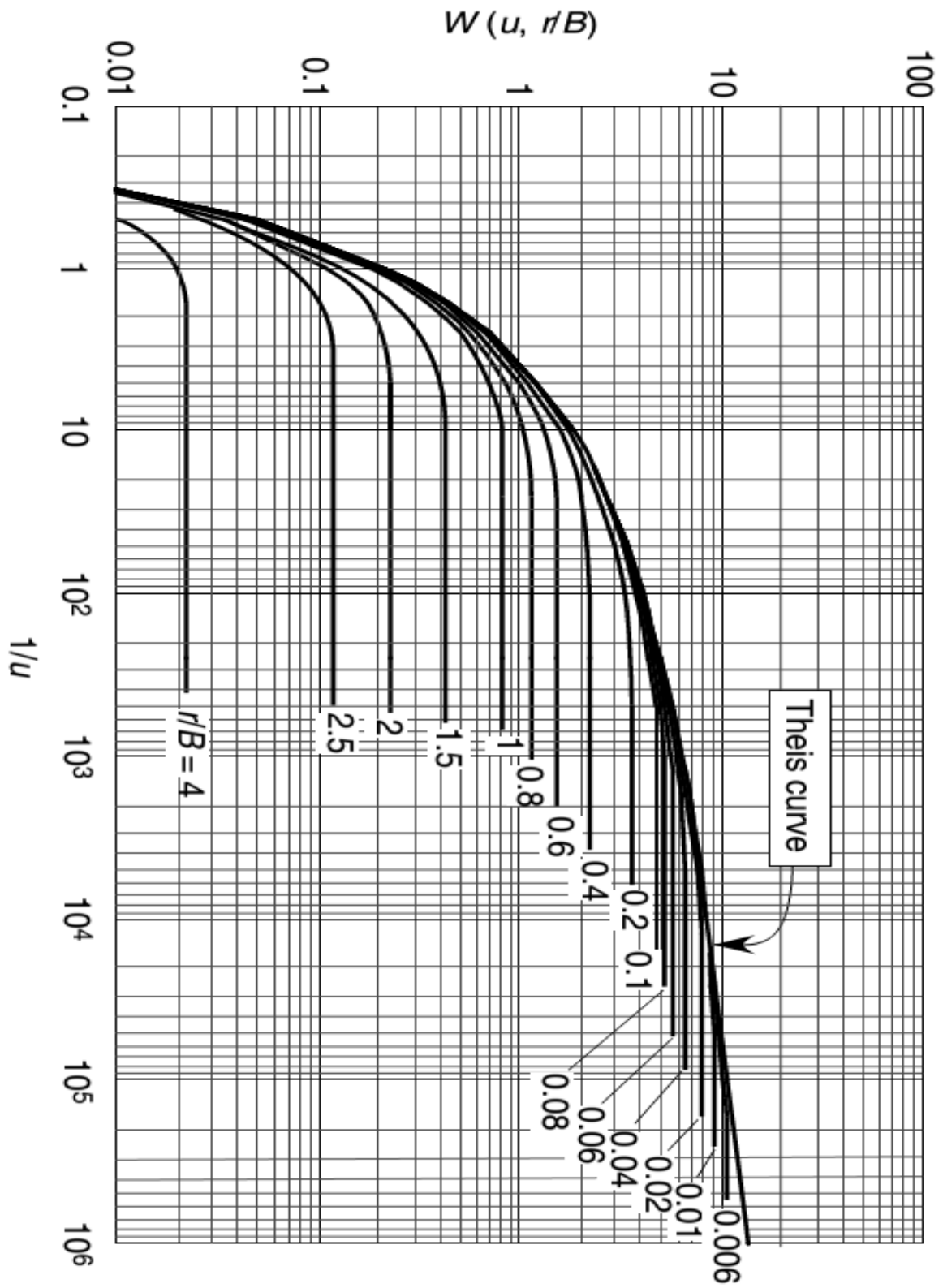
---

## Références bibliographiques

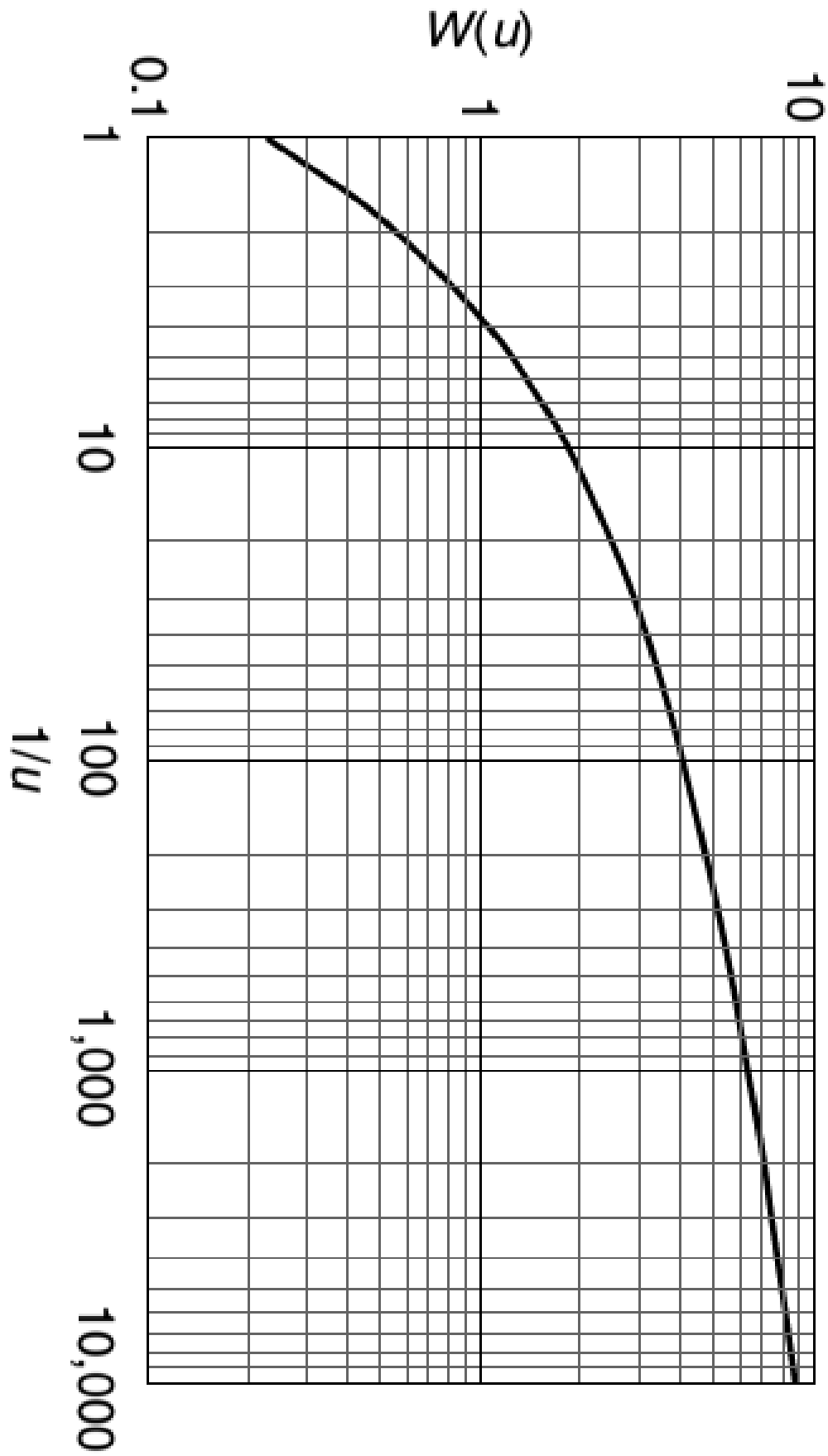
---

- Mania J, Sucche M (1978) Analyse automatique des données de pompage d'essai - Application aux hypothèses de Boulton et d'Hantush. *J Hydrol* 37(1-2):185-194
- McKinney DC, Lin MD (1994) Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resour. Res.* 30 (6), 1897-1906
- Negnevitsky M (2005) *Artificial Intelligence*. (2nd Ed), Addison Wesley, England
- Perez-Pedini C, Limbrunner JF, Vogel RM (2005) Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *J. Water Resour. Planning Manage.* 131 (6), 441-448
- Samuel MP, Jha MK (2003) Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique. *J Hydrol Eng* 129(5):348-359
- Sawyerr BA, Adewumi AO, Ali MM (2014) Real-coded genetic algorithm with uniform random local search. *Appl Math Comput* 228:589-597
- Simpson AR, Dandy GC, Murphy LJ (1994) Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *J. Water Resour. Planning Manage.* 120 (4), 423-443
- Sridharan K, Ramaswamy R, Lakshmana Rao N.S (1987) Identification of parameters in semiconfined aquifers. *J. Hydrol.* 93, 163-173
- Suggala SV, Bhattacharya PK (2003) Real coded genetic algorithm for optimization of pervaporation process parameters for removal of volatile organics from water. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (13), 3118-3128
- Theis CV (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Am Geophys Union Trans* 16(2):519-524
- Todd DK (1980) *Ground Water Hydrology*. (2nd edn), Wiley, New York
- Munavalli GR, Mohan MS (2003) Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems. *J. Water Resour. Planning Manage.* 129 (6), 493-504
- Wang QJ (1991) The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 27 (9), 2467-2477
- Yeh CH, Labadie JW (1997) Multiobjective watershed-level planning of storm-water detention basins. *J. Water Resour. Planning Manage.* 123 (6), 336-343
- Yeh HD, Lin YC, Huang YC (2007) Parameter identification for leaky aquifers using global optimization methods. *Hydrol Process* 21(7):862-872

Annexe



Courbes théoriques de la fonction de puits,  $W(u, r/B) = f(1/u)$  (Kresic, 2007)



*Courbe théorique de la fonction de puits,  $W(u)=f(1/u)$  (Kresic, 2007)*