



## Full Length Research Paper

## Méthode expérimentale d'interprétation des données des essais de pompage des forages d'eau exploitant les formations aquifères continues

Adolphe DIATTA<sup>1,2</sup>, Soussou SAMBOU<sup>2</sup>, Baba SARR<sup>3</sup>, Moustapha DIENE<sup>4</sup>, Alassane THIAM<sup>5</sup>, Cheikh Hamidou KANE<sup>5</sup>, Daouda Badiane<sup>1</sup>, Didier Maria NDIONE<sup>2</sup>, Seydou KANE<sup>2</sup>, Issa LEYE<sup>2</sup>, Moussé Landing SANE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar (ESP), Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO/SF), Sénégal,

<sup>2</sup>Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Faculté des Sciences Techniques (FST), Laboratoire d'Hydraulique et Mécanique des Fluides (LHMF), Sénégal

<sup>3</sup>Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN) Cheikh Anta Diop, Département de Géologie, Sénégal

<sup>4</sup>Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Faculté des Sciences et Techniques (FST), Département de Géologie, Sénégal

<sup>5</sup>Université Iba Der Thiam de Thiès, Département de Géologie, Sénégal

Received April 2024 – Accepted June 2024



\*Corresponding author. ...dadhit69@yahoo.fr

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

### Résumé / Abstract:

After the execution of drilled wells, pumping tests are carried out during their provisional site handover. The main goal of these pumping tests is to determine the characteristics of the structure-aquifer complex and the hydrodynamic parameters of the aquifer formations. However, most of the operating flow rates being different from those of the provisional site handover pumping tests, few studies are interested in determining the dynamic water levels in the borehole and the depth of their operating pumps; particularly in case of increasing the pumping time to satisfy the daily water needs of an agglomeration, an agricultural area or a factory in extension. The aim of the current paper is to derive mathematical formulas from those of Theis and Cooper-Jacob to solve these problems.

**Mots clés/Keyword:** borehole, pumping tests, mathematical formulas, dynamic water level

### Cite this article:

Adolphe DIATTA, Soussou SAMBOU, , Baba SARR., Moustapha DIENE, , Alassane THIAM, Cheikh Hamidou KANE, Daouda BADIANE, Didier Maria NDIONE, Seydou KANE, Issa LEYE, Moussé Landing SANE (2024). Méthode expérimentale d'interprétation des données des essais de pompage des forages d'eau exploitant les formations aquifères continues. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol.6(1), pp. 17-32. ISSN 2630-1164.

### 1. Introduction

Après la réalisation d'un forage d'eau, il est procédé aux essais de pompage de sa réception provisoire. Ces essais de pompage sont généralement constitués de deux types. Le premier consiste à réaliser des pompages à différents paliers de débits Q1, Q2, Q3 ...etc. successivement alternés ou non et des suivis de remontée de la nappe ([1] , [2], [3], [4], [5] ,[6] ,[7],

[8] , [9], [10]) pour déterminer les caractéristiques du complexes ouvrage/aquifère (débit critique, débit d'exploitation, débit spécifique, rabattement spécifique, courbe caractéristique) ([11] ; [12], [13], [14], [15] , [16] ,[17] ; [18] , [19]). Quant au second, il consiste à effectuer des essais de pompage de longue durée à débit constant et un suivi de la remontée pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de

l'aquifère (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) ([20], [21], [11], [22], [13], [3], [23],[24], [25],[26],[27],[28]). Cependant, la plupart des débits et des temps d'exploitation sont différents de ceux des essais de pompage de réception provisoire. Il se pose alors le problème de la détermination des niveaux dynamiques de l'eau dans les ouvrages et de calage de la profondeur d'installation des pompes d'exploitation, particulièrement quand il s'agit d'accroître le temps ou le débit de pompage pour satisfaire les besoins quotidiens croissants d'une agglomération, d'un périmètre agricole ou d'une industrie en extension. Certains utilisent une règle de trois pour interpoler ou extrapoler ladite profondeur ; tandis que d'autres préfèrent utiliser celle de la réception provisoire. Ainsi des ouvrages sont surexploités et s'ensablent prématurément ou leur pompe d'exploitation déjauge et se détériore si elle n'est équipée d'une sonde de sécurité "niveau d'eau bas dans le forage". Il faut alors mobiliser régulièrement des moyens matériels, humains et financiers pour résoudre le problème de dysfonctionnement du service de distribution d'eau. Peu d'études s'intéressent à la question.

L'objet de ce présent papier est d'utiliser les formules de Theis et Cooper – Jacob pour prédéterminer les rabattements des nappes dans les forages d'eau et optimiser les profondeurs d'installation de leurs pompes d'exploitation.

## 2. Outils et méthodologie

### 2.1. Outils

#### 2.1.1. Présentation des formules mathématiques utilisées

Dans les formations aquifères continues, les forages d'eau sont supposés verticaux. Ils pénètrent partiellement ou totalement l'aquifère et leurs diamètres sont infiniment petits par rapport à la formation ([20], [21], [25], [27]). Le pompage du forage y entraîne un rabattement du niveau de l'eau, mais aussi un cône de dépression dans la nappe. Au fur et à mesure que le pompage dure, la dépression se propage et le régime est transitoire ([29]). Cette dépression est observable dans les puits d'observations (piézomètres) par une baisse (rabattement) du niveau de l'eau (Figure 1).

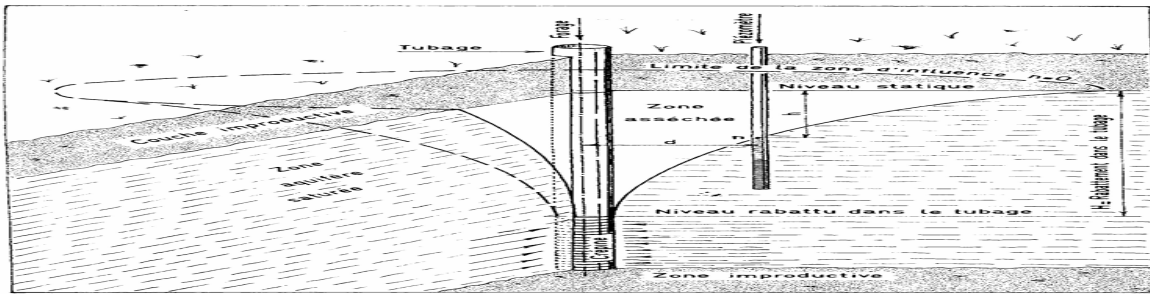


Figure 1 : Illustration du cône de dépression lors du pompage d'un forage – Soucre : Mabillot 1971

En supposant la nappe horizontale, isotrope et infiniment étendue, l'équation locale de conservation pour un écoulement souterrain s'écrit ([20],[21], [29]) :

$$\text{div}(\mathbf{V}_h) = \frac{S}{r} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Eq.1})$$

Soit en coordonnées polaires :

$$\frac{\partial h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Eq.2})$$

Avec  $h$  la charge (potentiel) hydraulique,  $r$  la distance entre l'axe du forage et celui du puits d'observation (piézomètre),  $S$  le coefficient d'emmagasinement et  $T$  la transmissivité.

En utilisant des solutions mathématiques pour l'écoulement de la chaleur, THEIS ([20]) a obtenu une solution valable pour le rabattement  $s(t)$  de l'eau dans les ouvrages d'observations :

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{+\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (\text{Eq.3})$$

Où :

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

$$W(u) = \int_u^{+\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (\text{Eq.5})$$

- $W(u)$  est appelée la fonction de puits,
- $Q$  est le débit moyen de pompage ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),
- $T$  est la transmissivité en  $\text{m}^2/\text{s}$ ,
- $S$  est le coefficient d'emmagasinement en %,
- $r$  est la distance entre l'axe du forage et celui de l'ouvrage d'observation.

Cette solution n'est pas valable en cas de présence d'une frontière imperméable (barrière étanche) ou d'une frontière de recharge (drainage de points d'eau ou d'une nappe sus-jacente) ([7]). La fonction de puits est donnée dans des tableaux ([23]).

En 1946, Cooper et Jacob ont développé en série la fonction puits :

$$W(u) = -0.5772 - Lnu - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n u^n}{n! n} \quad (Eq. 6)$$

Ils concluent que lorsque  $u$  est inférieure à 0.02, la somme de l'équation Eq.6 est négligeable devant la valeur de  $Lnu$  et la fonction de puits peut être tronquée sous la forme :

$$W(u) = -0.5772 - Lnu \quad (Eq.7)$$

Soit en remplaçant la fonction de puits par sa valeur de l'équation Eq.7 dans l'équation Eq.3:

$$s(r) = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right) \quad (Eq.8)$$

Plus connu sous :

$$s(r) = \frac{0.183Q}{T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right) \quad (Eq.9)$$

Cependant la valeur usuelle de 0.02 donnée par Cooper et Jacob [21] n'est pas la valeur la plus couramment utilisée pour vérifier la validité du critère de Cooper – Jacob. Le critère usuel est  $u < 0.01$  pour lequel l'erreur relative avec l'équation de Theis est de 0.25% et un critère plus pratique est  $u < 0.1$  pour lequel l'erreur relative est de 5.4% ([25]).

L'application des équations Eq.3 et Eq.9 est problématique, particulièrement dans les pays en voie de développement où, les projets d'Hydraulique Rurale et Urbaine, comme privés de réalisation de forages d'eau intégrant des ouvrages d'observations (piézomètres) sont très rares. Tout se fait dans l'ouvrage de pompage. Certains auteurs remplacent la distance  $r$  par le rayon du forage ([17]) ; tandis que d'autre rejettent catégoriquement l'idée même si les résultats de l'application desdites formules aux ouvrages de pompage semblent satisfaisants.

Dans un souci de résoudre ces problèmes, nous avons simplifié l'équation (Eq.9) en supposant que le forage est suffisamment développé et la transmissivité relativement constante. Ainsi, l'équation (Eq.9) devient :

$$s(t) = A(Q) * \log(K_d t) \quad (Eq.10)$$

Où :

$$A(Q) = \frac{0.183Q}{T} \quad (Eq.11)$$

$$K_d = \frac{2.25T}{r^2 S} \quad (Eq.12)$$

$A$  est en mètre ; tandis que le coefficient  $K_d$  est en  $mn^{-1}$ .

L'équation Eq.10 est validée si et seulement si l'erreur relative (Eq.13) commise sur la valeur réellement mesurée dans le forage est inférieure ou égale à 10%. Ladite erreur relative est calculée avec :

$$ER (\%) = \frac{100 * |s_c - s_m|}{s_m} \quad (Eq.13)$$

Où  $s_c$  est le rabattement calculé avec l'équation Eq.10 et  $s_m$  le rabattement réellement mesuré dans le forage.

### 2.1.2. Données de validation de la formule expérimentale (Eq.10)

Afin de valider la formule expérimentale (Eq.10) nous avons utilisé les données des essais de pompage de 20 forages exploitant les formations aquifères du Maastrichtien, de l'Oligo-Miocène, du Continental Intercalaire et du Continental Terminal au Sénégal et au Niger.

Le tableau 1 ci-après donne la liste des forages dont les données ont servi à la validation des formules expérimentales avec les formations aquifères exploitées, la profondeur équipée, le niveau statique de réception provisoire et la localisation administrative.

**Tableau 1. – Liste des forages dont les données ont servi à la validation de la formule expérimentale**

N°	FORAGE	PAYS	REGION	DEPARTEMENT	AQUIFERE	PROFONDEUR EQUIPEE (M)	NIVEAU STATIQUE (M/SOL)
01	Kignabour	Sénégal	Thiès	Mbour	Maastrichtien	157.00	29.59
02	Gandigal	Sénégal	Thiès	Mbour	Maastrichtien	180.00	19.10
03	Rickou	Sénégal	Louga	Linguère	Maastrichtien	298.89	47.95
04	Naydé Guèye	Sénégal	Louga	Linguère	Maastrichtien	280.71	54.75
05	Missirah Thioyène	Sénégal	Kaffrine	Koungheul	Maastrichtien	328.44	64.44
06	Diaga Keur Sérigne Niang	Sénégal	Kaffrine	Kaffrine	Maastrichtien	267.00	51.24
07	Boulel Demba Bâ	Sénégal	Kaffrine	Kaffrine	Oligo-Miocène	119.85	47.90
08	Darou Salam Chérif	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Oligo-Miocène	107.86	8.79
09	Dombondir	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Oligo-Miocène	87.49	7.58
10	Kataba 1	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Oligo-Miocène	107.80	8.37
11	Séléty	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Continental	53.77	10.80

N°	FORAGE	PAYS	REGION	DEPARTEMENT	AQUIFERE	PROFONDEUR EQUIPEE (M)	NIVEAU STATIQUE (M/SOL)
12	Albadar F3C	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Terminal Continental	29.50	10.93
13	Baranlir	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Terminal Continental	56.24	16.49
14	Kabiline	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Terminal Continental	42.07	10.82
15	Djinaky	Sénégal	Ziguinchor	Bignona	Terminal Continental	56.82	20.35
16	Allakaye	Niger	Tahoua	Bouza	Terminal Intercalaire Continental	506.09	178.28
17	Bagadichiri	Niger	Tahoua	Illéla	Terminal Intercalaire Continental	580.00	52.73
18	Baga	Niger	Tahoua	Tahoua	Terminal Intercalaire Continental	634.00	60.54
19	Barmou	Niger	Tahoua	Illéla	Terminal Intercalaire Continental	712.80	129.00
20	Dan Gona	Niger	Tahoua	Illéla	Terminal Intercalaire Continental	741.00	- 0.50 (Artésien)

Ces données ont été mesurées à l'aide de sondes piézométriques, de fûts de 220 L, de chronomètres et/ou de compteurs volumétriques. Elles sont traitées avec le logiciel EXCEL.

## 2.2. Méthodologie

### 2.2.1. Détermination de la transmissivité $T_i$ et simulation des rabattements $s_{ej}$

On porte sur un papier semi-logarithmique les données  $s_m(t)$  d'un palier  $i$  donné. Puis on trace la droite qui

passé par le maximum de points (Figure 3). Soit  $M_1(t_1, s_1)$  et  $M_2(t_2, s_2)$  deux points de la droite, on calcule la transmissivité correspondant à ce palier en appliquant la formule (Eq. 16) :

$$T_i = \frac{0.183Q_i}{s_2 - s_1} * \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (Eq. 14)$$

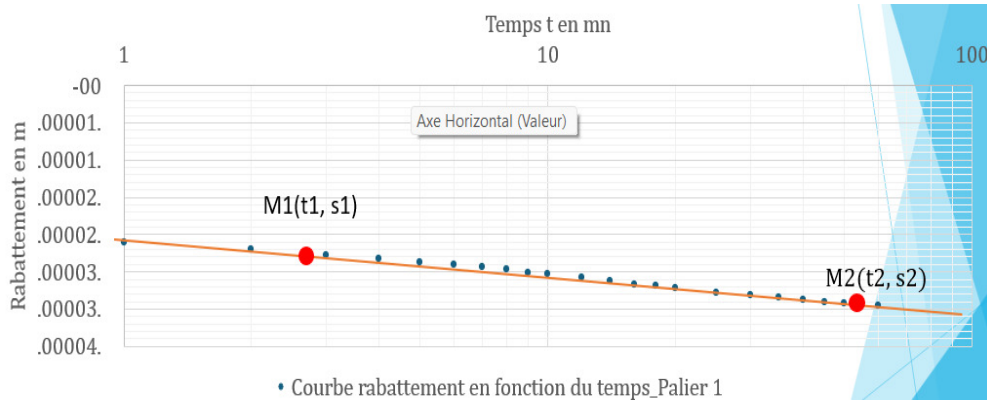


Figure 3 : Illustration de la méthodologie utilisée

En supposant le forage suffisamment développé et la transmissivité  $T$  quasi-constante, on calcule pour chaque palier  $(Q_j, s_{ej})$  le coefficient  $A(Q_j)$  avec la formule:

$$A(Q_j) = \frac{0.183Q_j}{T} \quad (Eq. 15)$$

A partir de l'équation Eq. 10, on déduit :

$$K_{di} = \frac{10^{\frac{s_{ej}}{A(Q_j)}}}{t_k} \quad (Eq. 16)$$

Avec  $i = 1$  ou  $2$ ,  $1 \leq i \leq N$  et  $1 \leq j \leq N$ ;  $N$  nombre total de paliers à réaliser :  $3 \leq N \leq 6$ .

**Remarque :** Pour valider le choix des points  $M_1$  et  $M_2$ , il faut calculer  $K_{d1}$  et  $K_{d2}$ . Normalement, on doit avoir  $K_{d1} = K_{d2}$ . Si  $K_{d1} \neq K_{d2}$  il y a une erreur de saisie

d'une des formules. Il faut la corriger pour poursuivre le processus.

Suite à la détermination de  $A(Q_j)$  et  $K_{d1}$ , on simule avec la formule expérimentale Eq. 10 les rabattements prévisionnels des autres paliers, celui du pompage de longue durée à débit constant et les erreurs relatives

$ER_j$  (Eq. 13). On vérifie la validité de la formule expérimentale (Eq. 10). Le tableau 2 ci-après résume les opérations de validation de la formule expérimentale (Eq. 10).

Tableau 2. - Récapitulatif des activités de validation des formules

Débit $Q_j$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5=LD$
Rabattement mesuré $s_{mj}$ (m)	$s_{m1}$	$s_{m2}$	$s_{m3}$	$s_{m4}$	$s_{m5}$
Transmissivité $T_j$ (m <sup>2</sup> /h)	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
Coefficient Kd (mn <sup>-1</sup> )	$K_{d1}$	$K_{d2}$	$K_{d3}$	$K_{d4}$	$K_{d5}$
Coefficient A (m)	$A(Q_1, T_1, K_{d1})$	$A(Q_2, T_2, K_{d2})$	$A(Q_3, T_3, K_{d3})$	$A(Q_4, T_4, K_{d4})$	$A(Q_5, T_5, K_{d5})$
Rabattement calculé $s_{cj}$ (m)	$s_c(Q_1, T_1, K_{d1})$	$s_c(Q_2, T_2, K_{d2})$	$s_c(Q_3, T_3, K_{d3})$	$s_c(Q_4, T_4, K_{d4})$	$s_c(Q_5, T_5, K_{d5})$
Erreur Relative $ER_j$ (%)	$ER_i(Q_1, T_1, K_{d1})$	$ER_i(Q_2, T_2, K_{d2})$	$ER_i(Q_3, T_3, K_{d3})$	$ER_i(Q_4, T_4, K_{d4})$	$ER_i(Q_5, T_5, K_{d5})$

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1. Validation de la formule expérimentale (Eq.10)

Le tableau 3 ci-après résume les résultats obtenus en appliquant la formule expérimentale aux données des essais de pompage de longue durée à débit constant des forages exploitant les formations aquifères du Maastrichtien, de l'Oligo-Miocène, du Continental Intercalaire et du Continental Terminal

Les résultats obtenus montrent que la formule expérimentale est applicable aux forages exploitant les formations aquifères continues sénégalais et du Continental intercalaire nigérien.

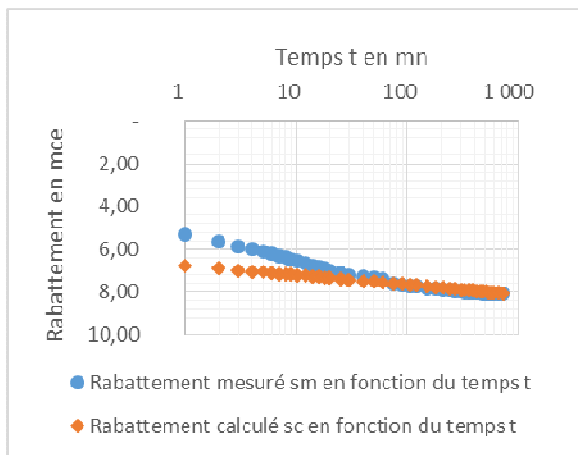
Elle permet de déterminer le rabattement du pompage de longue durée avec beaucoup de satisfaction ; l'erreur commise étant quasiment nulle.

Les figures 3, 4, 5 et 6 ci-après illustrent l'applicabilité de la formule expérimentale aux forages exploitant respectivement les formations aquifères du Maastrichtien, de l'Oligo-Miocène et du Continental Terminal sénégalais et du Continental Intercalaire nigérien.

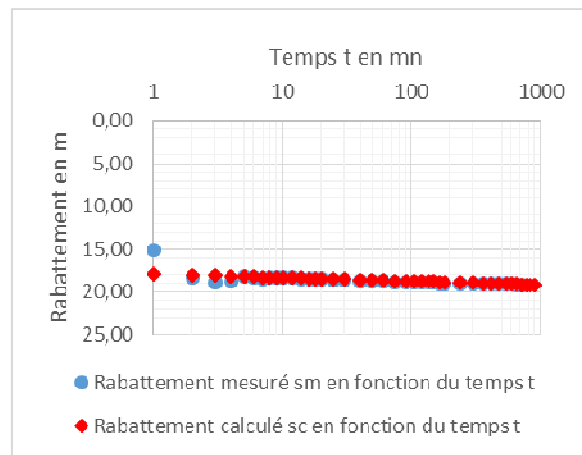
Tableau 3. - Récapitulatif des résultats de la validation de la formule

N°	FORAGE	RABATTEMENT (M)		ERREUR RELATIVE (%)	AQUIFERE	OBSERVATIONS
		MESURE	CALCULE			
01	Kignabour	8.04	8.04	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
02	Gandigal	18.85	18.85	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
03	Rickou	21.96	21.96	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
04	Naydé Guèye	8.03	8.03	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
05	Missirah Thioyène	4.11	4.11	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
06	Diaga Keur Sérigne Niang	13.46	13.46	0.00	Maastrichtien	VALIDEE
07	Boulel Demba Ba	15.12	15.12	0.00	Oligo-Miocène	VALIDEE
08	Darou Salam Chérif	13.05	13.05	0.00	Oligo-Miocène	VALIDEE
09	Dombondir	19.11	19.11	0.00	Oligo-Miocène	VALIDEE
10	Kataba I	21.06	21.06	0.00	Oligo-Miocène	VALIDEE
11	Séléty	13.18	13.18	0.00	Continental Terminal	VALIDEE
12	Albadar	4.79	4.79	0.00	Continental Terminal	VALIDEE
13	Baranlir	9.81	9.81	0.00	Continental Terminal	VALIDEE
14	Kabiline	6.50	6.50	0.00	Continental	VALIDEE

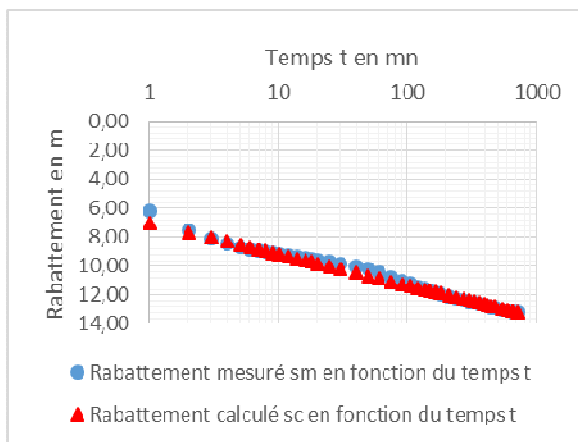
N°	FORAGE	RABATTEMENT (M)		ERREUR RELATIVE (%)	AQUIFERE	OBSERVATIONS
		MESURE	CALCULE			
15	Djinaky	11.04	11.04	0.00	Terminal Continental	VALIDEE
16	Allakaye	6.52	6.52	0.00	Intercalaire Continental	VALIDEE
17	Bagadichiri	3.85	3.85	0.00	Intercalaire Continental	VALIDEE
18	Baga	6.06	6.06	0.00	Intercalaire Continental	VALIDEE
19	Barmou	5.12	5.12	0.00	Intercalaire Continental	VALIDEE
20	Dan Gona	11.60	11.60	0.00	Intercalaire Continental	VALIDEE



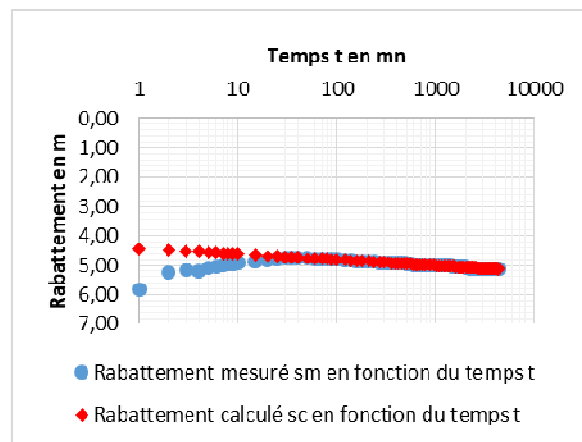
**Figure 3:** Illustration de la validation de la formule expérimentale par les données des essais de pompage de longue durée à débit constant du forage de Kignabour (Maastrichtien).



**Figure 4:** Illustration de la validation de la formule expérimentale par les données des essais de pompage de longue durée à débit constant du forage de Dombondir (Oligo-Miocène)



**Figure 5:** Illustration de la validation de la formule expérimentale par les données des essais de pompage de longue durée à débit constant du forage de Séléty (Continental Terminal)



**Figure 6:** Illustration de la validation de la formule expérimentale par les données du pompage de longue durée à débit constant du forage de Barmou (Continental Intercalaire)

**3.2. Extension du temps de pompage, diminution et/ou augmentation du débit.**

Compte tenu de la validité de la formule expérimentale dans les quatre aquifères, nous nous intéresserons uniquement aux forages de Kignabour (Sénégal) et Barmou (Niger) dont les essais de pompage par paliers sont respectivement non-enchaînés et enchaînés.

**3.2.1. Simulation des données du pompage de longue durée à débit constant à partir des données du pompage par paliers du forage de Kignabour.**

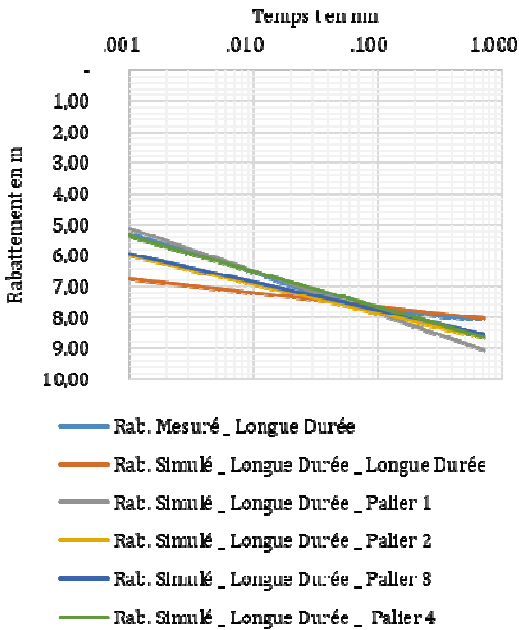
Le tableau 4 ci-après résume les résultats de la simulation du rabattement de l'eau dans le forage de Kignabour pendant le pompage de longue durée à partir des données des essais de pompage par paliers non-enchaînés (extension du temps de pompage de 1h à 12h et augmentation du débit d'exploitation).

**Tableau 4. - Récapitulatif des résultats de la simulation du rabattement final du pompage de longue durée du forage de Kignabour (Maastrichtien)**

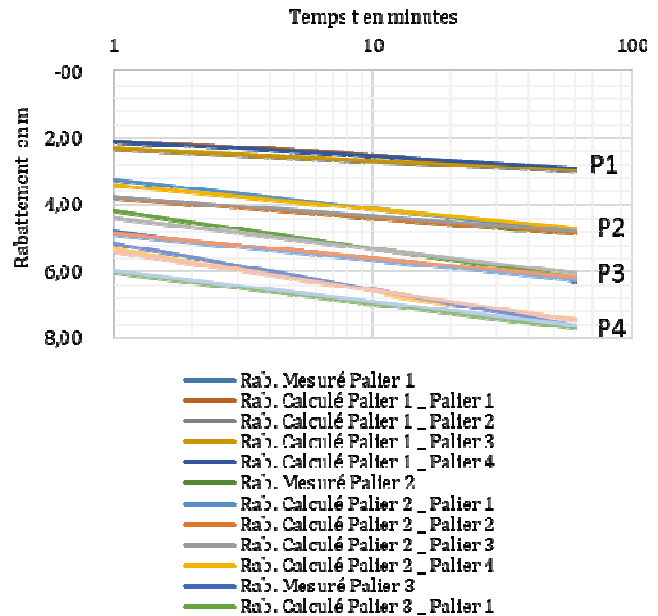
N°	Paliers	Sm5 (m)	Sc (m)	Sc - Sm5 (m)	ER (%)
01	P5 (Q5 = 51.58 m³/h)	8.04	8.04	-	-
02	P4 (Q4 = 51.90 m³/h)	/	8.65	0.61	7.06
03	P3 (Q3 = 42.11 m³/h)		8.54	0.50	5.91
04	P2 (Q2 = 32.68 m³/h)		8.66	0.62	7.16
05	P1 (Q1 = 20.15 m³/h)		9.06	1.02	11.28

A l'exception des résultats du palier 1 (débit relativement faible), les résultats des autres paliers sont satisfaisants avec une erreur relative inférieure à 10%. Ils montrent que les données de pompage d'un palier peuvent nous permettre de déterminer celles du pompage de longue durée à débit constant avec une erreur relative inférieure à 10%. Ainsi, le temps des essais de pompage de longue durée à débit constant pourra être réduit pour renforcer celui de développement à la pompe immergée et sécuriser les pompes d'exploitation des ouvrages avec les coûts supplémentaires afférents. La figure 7 ci-après, illustre les résultats de la simulation du pompage de longue

durée du forage de Kignabour à partir des données du pompage d'essais par paliers non-enchaînés



**Figure 7 :** Illustration de la simulation du rabattement du pompage de longue durée à partir des données des paliers non-enchaînés du forage de Kignabour (Maastrichtien)



**Figure 8 :** Illustration de la simulation des données des autres paliers à partir d'un palier donné du forage de Kignabour (Maastrichtien)

### 3.2.2. Simulation des données des autres paliers non – enchainés à partir d’un palier donné du forage de Kignabour (Maastrichtien)

Le tableau 5 ci-après résume les résultats de la simulation des rabattements de l’eau dans le forage de Kignabour à partir des données du palier P3 (variation du débit d’exploitation de l’ouvrage).

Les résultats obtenus en utilisant les données du palier P3 pour simuler celles des autres paliers sont très satisfaisants avec une erreur relative inférieure à

5.00%. Ils montrent que le temps des pompes d’essais par paliers non-enchainés peut être réduit à un seul palier. D’où, les données du palier unique peuvent être utilisées pour générer avec satisfaction celles des autres paliers et déterminer les caractéristiques du complexe ouvrage/aquifère. Ainsi, le temps économisé peut être utilisé pour améliorer le développement à la pompe immergée de l’ouvrage. La figure 8 ci-dessus illustre la simulation des données des autres paliers à partir d’un palier donné.

**Tableau 5. - : Récapitulatif des résultats de la simulation des rabattements des autres paliers non-enchainés du forage de Kignabour à partir des données du palier P3**




N°	Paliers	S <sub>m</sub> (m)	S <sub>c</sub> (m)	S <sub>c</sub> - S <sub>m</sub> (m)	ER (%)
01	P4 (Q <sub>4</sub> = 51.90 m <sup>3</sup> /h)	7.42	7.78	0.36	4.58
02	P3 (Q <sub>3</sub> = 42.11 m <sup>3</sup> /h)	6.31	6.31	0.00	0.00
03	P2 (Q <sub>2</sub> = 32.68 m <sup>3</sup> /h)	4.85	4.90	0.05	0.06
04	P1 (Q <sub>1</sub> = 20.15 m <sup>3</sup> /h)	2.96	3.02	0.06	1.97

### 3.2.3. Simulation du rabattement final du pompage de longue durée à débit constant à partir des données du pompage par paliers enchainés du forage de Barmou

Le tableau 6 ci-après résume les résultats de la simulation du rabattement final du pompage de longue

durée à débit constant (Palier P5) du forage de Barmou à partir des données des paliers enchainés P4, P3 et P2 (extension du temps de pompage de 2h à 72h et augmentation du débit d’exploitation).

**Tableau 6. - Récapitulatif des résultats de la simulation du pompage de longue durée du forage de Barmou à partir des données des paliers enchainés**

N°	Paliers	S <sub>m</sub> (m)	S <sub>c</sub> (m)	S <sub>c</sub> - S <sub>m</sub> (m)	ER (%)
01	P5 (Q = 52.91 m <sup>3</sup> /h)	5.12	5.12	-	-
02	P4 (Q <sub>4</sub> = 52.29 m <sup>3</sup> /h)		5.69	0.57	10.02
03	P3 (Q <sub>3</sub> = 44.11 m <sup>3</sup> /h)		5.28	0.16	3.03
04	P2 (Q <sub>2</sub> = 31.52 m <sup>3</sup> /h)		4.60	- 0.52	- 11.30

Les résultats ci-dessus montrent qu’avec un pompage d’essais par paliers enchainés, l’utilisation de la formule expérimentale pour simuler une extension du temps de pompage et/ou une augmentation du débit d’exploitation semble peu satisfaisante. Ceci est très probablement lié à l’influence des débits des paliers antérieurs. Cependant, une marge de sécurité de 3 m à 5 m pour tenir compte des variations saisonnières et

interannuelles des nappes (particulièrement celles à surface libre), de la surexploitation de la et de l’interférence avec les autres ouvrages exploitation (lors du pompage de longue durée du forage d’Allakaye, nous avons noté une baisse du niveau d’eau dans le forage de Barmou lors situé à 5 km) permettra de se mettre à l’abri. La figure 9 ci-après illustre la dispersion des résultats.



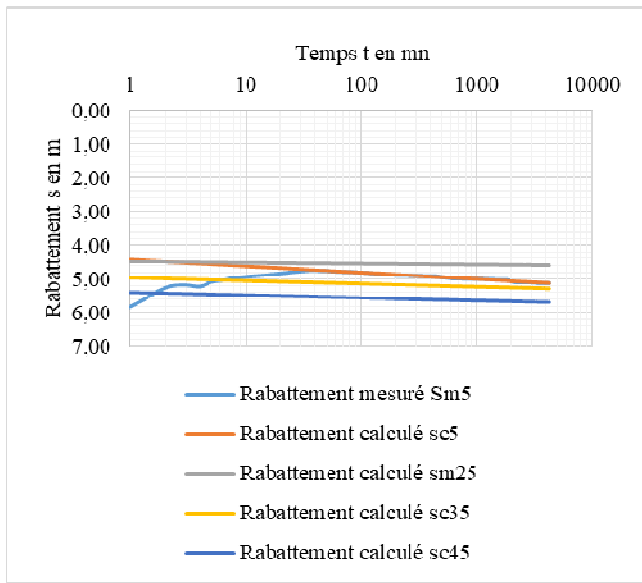


Figure 9: Illustration des résultats de la simulation du pompage de longue durée à débit constant (P5) du forage de Barmou à partir des données des paliers enchainés

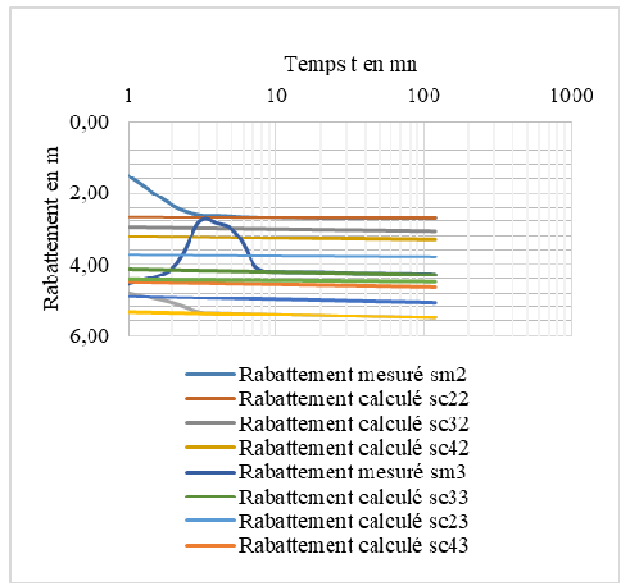


Figure 10: Illustration de la simulation des données des autres paliers à partir d'un palier donné du forage de Barmou (Continental Intercalaire)

**Légende** :  $sc_{ij}$  est le rabattement calculé du palier  $j$  à partir des données du palier  $i$

### 3.2.4. Simulation des données des autres paliers enchainés à partir d'un palier donné du forage de Barmou (Continental Intercalaire)

Le tableau 6 ci-après résume les résultats de la simulation des rabattements de l'eau dans le forage de Barmou à partir des données du palier P3 (variation du débit d'exploitation de l'ouvrage).

Les résultats obtenus sont très dispersés, particulièrement quand le débit simulé est très petit par rapport à celui de référence. Les rabattements des

paliers de débit inférieur sont surestimés, tandis que ceux de débit supérieur sont sous-estimés. Néanmoins la validité de la formule sur le palier de simulation est confirmée. Cette distorsion est très probablement due à l'influence des paliers antérieurs. Par conséquent, la formule expérimentale ne peut pas être utilisée pour la simulation des données des autres paliers enchainés à partir de celles d'un palier donné. La figure 10 ci-dessus illustre la dispersion des résultats de la simulation.

Tableau 6. - : Récapitulatif des résultats de la simulation des rabattements des autres paliers à partir des données du palier P3 du forage de Barmou

N°	Paliers	$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$s_c - s_m$ (m)	ER (%)
01	P4 ( $Q_4 = 52.29 \text{ m}^3/\text{h}$ )	5.50	5.09	-0.41	8.15
02	P3 ( $Q_3 = 44.1 \text{ m}^3/\text{h}$ )	4.29	4.29	0.00	0.00
03	P2 ( $Q_2 = 31.52 \text{ m}^3/\text{h}$ )	2.71	2.32	+0.60	18.26
04	P1 ( $Q_1 = 15.04 \text{ m}^3/\text{h}$ )	1.12	1.46	+0.34	23.43

### 3.3. Généralisation des formules de Theis et Cooper-Jacob.

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la formule expérimentale est applicable aux forages d'eau exploitant les formations aquifères continues. Cependant, même si certains auteurs remplacent dans les formes de Theis et Cooper – Jacob  $r$  par le rayon de l'ouvrage de pompage ([17]), cette démarche pose une ambiguïté pour les forages télescopiques qui ont au minimum deux rayons différents.

Afin de résoudre ce problème, nous proposons de généraliser les équations de Theis et Cooper – Jacob en remplaçant  $r$  par  $r-r_j$

Ainsi, les formules Eq.3, Eq.4 et Eq.9 peuvent être écrites :

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{+\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \frac{Q}{4\pi T} * W(u) \quad (\text{Eq.17})$$

$$u = \frac{(r-r_0)^2 S}{4Tt} \quad (\text{Eq.18})$$

$$s(t) = \frac{0.183Q}{T} * \log\left(\frac{2.25 * T * t}{(r-r_c)^2 * S}\right) \quad (\text{Eq.19})$$

$$r_0 = \left(\frac{2.25 * T}{K_a * S}\right)^{0.5} \quad (\text{Eq.20})$$

En présence d'un ouvrage d'observation,  $r_0$  est très petit et négligeable devant  $r$ . On retrouve les formules de Theis (Eq.3) et Cooper – Jacob (Eq.9). En outre, en cas d'absence d'un ouvrage d'observation,  $r$  est nulle et remplacée par  $r_0$  et les formules de Theis et Cooper – Jacob deviennent mathématiquement applicables aux ouvrages de pompage.

#### 4. Conclusion et perspectives

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la formule expérimentale (Eq.10) peut être appliquée aux ouvrages de pompage exploitant les formations aquifères continues avec satisfaction. Son utilisation pour simuler les rabattements des autres paliers non-enchaînés à partir d'un palier donné ou l'extension à débit constant du temps de pompage d'un ouvrage donne une erreur relative inférieure à 5.00 %. En sus, son utilisation pour simuler l'augmentation du débit et du temps de pompage donne une erreur relative inférieure à 10 %. D'où la formule expérimentale (Eq.10) peut être appliquées avec satisfaction aux forages exploitant les formations aquifères continues. Elle peut être aussi utilisée pour un calage optimum des profondeurs d'installation des pompes d'exploitation desdits ouvrages.

En perspectives, la formule expérimentale peut être utilisée pour simuler avec satisfaction les caractéristiques du complexe ouvrage/aquifère (débit critique, débit d'exploitation, débit spécifique, courbes caractéristiques) à partir d'un palier unique. En sus, elle peut permettre de réduire la durée des pompages d'essais de réception provisoire pour renforcer les temps de développement à la pompe immergée, réduire les risques d'ensablement précoce et les frais d'exploitation des ouvrages, mais aussi de sécuriser les pompes d'exploitation et le service de distribution d'eau.

#### REFERENCES

- [1] MABILLOT A., 1971. Le forage d'eau : Guide pratique, Editions Eyrolles, Janvier 1995, p271
- [2] CASTANY G., Principes et méthodes de l'hydrogéologie – DUNOD, 1982
- [3] DRISCOLL, F. G., 1987. Groundwater and wells, 2nd edition, Publisher Johnson Screens, January 1987
- [4] LAUGA R., 1990. Pratique du forage d'eau – Utilisation des crépines en Génie Civil et en forages profonds – Editions Seesam, 1990
- [5] NGUYEN J. P., 1993. Le forage – Techniques d'exploitation pétrolière – EDITIONS TECHNIP, 1993
- [6] BANTON O. et BANGOY L. M., 1997. Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines – Presse de l'Université du Québec / AUPELF, 1997
- [7] DUPUIS R. P., 2007 - Guide des essais de pompage et leurs interprétation - Bibliothèque et archives nationales du Québec, 2007
- [8] FETTER C. W., 2007. Applied Hydrogeology, Second Edition – CBS Publishers & Distributors Pvt, 2007
- [9] WEIGHT W. D, 2008. Hydrogeoly field manual – Mc Graw Hill, 2008
- [10] FITTS C. R., 2012. Groundwater Science, Second Edition – ELSEVIER, 2012
- [11] BRAN J. and HUDSON H. E. JR, 1961. Selected Methods for pumping tests analysis, Report of investigation 25 – URBANA ILLINOIS, Third Printing, 1961, p51
- [12] SCHICHT R. J., 1965. Ground Water Development in East Saint Louis Area, Illinois - Report of investigation 51, URBANA ILLINOIS, 1965, p77
- [13] DE MARSILY G, 1986. Quantitative Hydrogeology Groundwater for Engineers – Academic Press, INC, Harcourt Brace Jovanovich, Publishers. pp162-201
- [14] BARKER J. A. and HERBERT R., 1992. A simple theory for estimating well losses with application to test wells in Bangladesh – Applied hydrogeology 0/92, pp20 – 31
- [15] VAN TONDER G. J., BOTHA F. F. and VAN BOSCH J., 2001. A generalized solution for step drawdown tests including flow dimension and elasticity – Water SA, Vol.27 No.3 – <http://www.wrc.org.za>
- [16] SUMMA G., 2010. A new approach to the step-drawdown test, <http://www.wrc.org.za>
- [17] SERIANZ L., RMAN N. and BRENCIC M., 2020. Step – drawdown tests in exploitation wells for the termal and mineral water – Case study from Slovenia – GEOLOGIJA 63/2, 281 – 294, Ljubljana 2020
- [18] AL CHLAIBAWI S. H. and AGRAR H., 2020. The flow and transport parameter estimation of groundwater in a laboratory – scale sand tank aquifer, 10P Conf. Ser.: Mater.sci. Eng.888 0120 67, 11p
- [19] ALI H., Md. BISWAS H. P., ISLAM A. and KARIM N. N., 2022. Estimating Hydraulic Conductivity Transmissivity and Specific Yield of Aquifer in Barind Area, Bangladesh using pumping test – European Journal of Environment and Earth Sciences, Vol.3, August 2022, pp90 – 96, [www.ej-geo.org](http://www.ej-geo.org).
- [20] THEIS C. V., 1952. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage - Ground Water Notes Hydraulics, No.5, 1952, pp1-9
- [21] COOPER H. H. Jr and JACOB C. E., 1953. A generalized graphical method of evaluating formation constants and summarizing well-field history, Groundwater Notes Hydraulics, No.7, pp90-102
- [22] GUERRIER R., SIMLER L. et SUZANNE P., 1967. Etude du rabattement d'une nappe par application de l'équation de Theis. In Bulletin de service de la carte géographique de l'Alsace Lorraine, Tome 20, N°1, 1967. Géologie régionale de l'Est de la France, pp19-35
- [23] KRUSEMAN G. P. and DE RIDDER A. N., 1994. Analysis and Evaluation of pumping test data, Second edition. Publication 47, Internal Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994
- [24] OLSEN T., 1995. Geohydrology: Analytical Methods, Technical note 393 - US Department of the interior Bureau of Land Management, September 1995

[25] CHAPUIS, R. P. (1999). Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Québec, Canada: Les publications du Québec.

[26] ROSBERG J. E., 2010. Well testing methods and applicability (Doctoral Thesis compilation), Engineering Geology – Department of Electrical Measurements, Lund University, p165

[27] WEBER S., 2014. Interprétation des essais de pompage dans les aquifères à nappe captive en cas d'interférences – Thèse de Doctorat Ecole Polytechnique de Montréal, PolyPublie: <https://publications-polymtl.ca/1351>

[28] MAWLOOD D. K. and MUSTAPHA J. S., 2016. Performing test data analysis applying Cooper – Jacob's method for estimating of the aquifer parameters – Mathematical Modeling in Civil Engineering Vol.12. No.1:9-20-2016

[29] LENCASTRE A., 2005. Hydraulique Générale – Editions Eyrolles -Safège, p646

## ANNEXES

## Annexe 01. - Illustration de la validation de la formule expérimentale avec les données du forage de Kignabour (Maastrichtien - Sénégal)

N°	Temps t (mn)	Niveau d'eau dans le forage (m/R)		$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$ s_c - s_m $	ER (%)
		Mesuré	Calculé				
1	-	30,19	30,19	-	-	-	-
2	1	35,50	37,34	5,31	7,15	-	-
3	2	35,85	37,43	5,66	7,24	1,84	25,38
4	3	36,05	37,49	5,86	7,30	1,58	21,69
5	4	36,20	37,53	6,01	7,34	1,44	19,61
6	5	36,31	37,56	6,12	7,37	1,33	18,03
7	6	36,41	37,58	6,22	7,39	1,25	16,89
8	7	36,50	37,60	6,31	7,41	1,17	15,83
9	8	36,58	37,62	6,39	7,43	1,10	14,87
10	9	36,67	37,64	6,48	7,45	1,04	14,00
11	10	36,72	37,65	6,53	7,46	0,97	12,99
12	12	36,84	37,68	6,65	7,49	0,93	12,47
13	14	36,95	37,70	6,76	7,51	0,84	11,17
14	16	37,04	37,72	6,85	7,53	0,75	9,96
15	18	37,10	37,73	6,91	7,54	0,68	8,99
16	20	37,17	37,75	6,98	7,56	0,63	8,39
17	25	37,31	37,78	7,12	7,59	0,58	7,63
18	30	37,40	37,80	7,21	7,61	0,47	6,17
19	35	37,49	37,83	7,30	7,64	0,40	5,30
20	40	37,58	37,84	7,39	7,65	0,34	4,38
21	45	37,59	37,86	7,40	7,67	0,26	3,44
22	50	37,67	37,87	7,48	7,68	0,27	3,51
23	55	37,68	37,89	7,49	7,70	0,20	2,66
24	60	37,70	37,90	7,51	7,71	0,21	2,69
25	75	37,79	37,93	7,60	7,74	0,20	2,58
26	90	37,86	37,95	7,67	7,76	0,14	1,80
27	105	37,90	37,98	7,71	7,79	0,09	1,22
28	120	37,94	37,99	7,75	7,80	0,08	0,98
29	150	38,02	38,03	7,83	7,84	0,05	0,69
30	180	38,05	38,05	7,86	7,86	0,01	0,06
31	210	38,08	38,07	7,89	7,88	0,00	0,00
32	240	38,10	38,09	7,91	7,90	0,01	0,11
33	270	38,14	38,11	7,95	7,92	0,01	0,13
34	300	38,16	38,12	7,97	7,93	0,03	0,43
35	330	38,19	38,13	8,00	7,94	0,04	0,50
36	360	38,20	38,14	8,01	7,95	0,06	0,72
37	390	38,20	38,16	8,01	7,97	0,06	0,69
38	420	38,21	38,17	8,02	7,98	0,04	0,55
39	450	38,22	38,18	8,03	7,99	0,04	0,55
40	480	38,24	38,18	8,05	7,99	0,04	0,56
41	510	38,25	38,19	8,06	8,00	0,06	0,69
42	540	38,24	38,20	8,05	8,01	0,06	0,71
43	570	38,24	38,21	8,05	8,02	0,04	0,49
44	600	38,24	38,22	8,05	8,03	0,03	0,40
45	660	38,24	38,23	8,05	8,04	0,02	0,31
46	720	38,24	38,24	8,05	8,05	0,01	0,15
<b>Moyenne</b>		<b>37,33</b>	<b>37,73</b>	<b>7,14</b>	<b>7,54</b>	<b>0,40</b>	<b>5,66</b>
<b>Variance</b>		<b>1,75</b>	<b>1,35</b>	<b>1,75</b>	<b>1,39</b>	<b>0,28</b>	<b>48,92</b>
<b>Ecart Type</b>		<b>1,32</b>	<b>1,16</b>	<b>1,32</b>	<b>1,18</b>	<b>0,53</b>	<b>6,99</b>
$\mu_3$		<b>- 0,1860</b>	<b>- 0,2158</b>	<b>- 0,1860</b>	<b>- 0,2158</b>	<b>0,0036</b>	<b>9,0603</b>

## Annexe 02. - Illustration de la validation de la formule expérimentale avec les données du forage de Dombondir (Oligo-Miocène - Sénégal)

N°	Temps t (mn)	Niveau d'eau dans le forage (m/R)		$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$ s_c - s_m $	ER (%)
		Mesuré	Calculé				
1	-	7,60	7,60	-	-	-	-
2	1	22,73	25,53	15,13	17,93	2,80	15,59
3	2	25,92	25,65	18,32	18,05	0,27	1,49
4	3	26,43	25,65	18,83	18,05	0,78	4,32
5	4	26,30	25,72	18,70	18,12	0,58	3,18
6	5	25,83	25,78	18,23	18,18	0,05	0,30
7	6	25,95	25,82	18,35	18,22	0,13	0,74
8	7	26,13	25,85	18,53	18,25	0,28	1,55
9	8	25,95	25,88	18,35	18,28	0,07	0,41
10	9	25,92	25,90	18,32	18,30	0,02	0,11
11	10	25,94	25,92	18,34	18,32	0,02	0,10
12	12	25,98	25,94	18,38	18,34	0,04	0,22
13	14	26,03	25,97	18,43	18,37	0,06	0,31
14	16	26,06	26,00	18,46	18,40	0,06	0,32
15	18	26,09	26,02	18,49	18,42	0,07	0,35
16	20	26,11	26,05	18,51	18,45	0,06	0,35
17	25	26,17	26,06	18,57	18,46	0,11	0,57
18	30	26,23	26,10	18,63	18,50	0,13	0,68
19	35	26,30	26,14	18,70	18,54	0,16	0,87
20	40	26,35	26,19	18,75	18,59	0,16	0,86
21	45	26,38	26,23	18,78	18,63	0,15	0,81
22	50	26,43	26,26	18,83	18,66	0,17	0,90
23	55	26,48	26,30	18,88	18,70	0,18	0,95
24	60	26,49	26,34	18,89	18,74	0,15	0,82
25	75	26,53	26,36	18,93	18,76	0,17	0,89
26	90	26,55	26,39	18,95	18,79	0,16	0,87
27	105	26,56	26,41	18,96	18,81	0,15	0,80
28	120	26,57	26,43	18,97	18,83	0,14	0,76
29	150	26,59	26,44	18,99	18,84	0,15	0,77
30	180	26,60	26,46	19,00	18,86	0,14	0,74
31	210	26,63	26,51	19,03	18,91	0,12	0,62
32	240	26,64	26,55	19,04	18,95	0,09	0,46
33	270	26,66	26,59	19,06	18,99	0,07	0,39
34	300	26,67	26,61	19,07	19,01	0,06	0,30
35	330	26,68	26,64	19,08	19,04	0,04	,23
36	360	26,69	26,66	19,09	19,06	0,03	0,17
37	390	26,71	26,68	19,11	19,08	0,03	0,17
38	420	26,71	26,69	19,11	19,09	0,02	,08
39	450	25,75	25,69	18,15	18,09	0,06	0,31
40	480	9,566	9,194	9,566	9,194	0,263	0,099
41	510	3,093	3,032	3,093	3,032	0,513	0,314
42	540	-4,500	-4,437	-4,500	-4,437	0,015	2,546
43	570	7,60	7,60	-	-	-	-
44	600	22,73	25,53	15,13	17,93	2,80	15,59
45	660	25,92	25,65	18,32	18,05	0,27	1,49
46	720	26,43	25,65	18,83	18,05	0,78	4,32
<b>Moyenne</b>		<b>26,30</b>	<b>25,72</b>	<b>18,70</b>	<b>18,12</b>	<b>0,58</b>	<b>3,18</b>
<b>Variance</b>		<b>25,83</b>	<b>25,78</b>	<b>18,23</b>	<b>18,18</b>	<b>0,05</b>	<b>0,30</b>
<b>Ecart Type</b>		<b>25,95</b>	<b>25,82</b>	<b>18,35</b>	<b>18,22</b>	<b>0,13</b>	<b>0,74</b>
<b><math>\mu_3</math></b>		<b>26,13</b>	<b>25,85</b>	<b>18,53</b>	<b>18,25</b>	<b>0,28</b>	<b>1,55</b>

## Annexe 03. - : Illustration de la validation de la formule expérimentale avec les données du forage de Séléty (Continental Terminal - Sénégal)

N°	Temps t (mn)	Niveau d'eau dans le forage (m/R)		$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$ s_c - s_m $	ER (%)
		Mesuré	Calculé				
1	0	11,70	11,7	-	-	-	
2	1	17,86	18,71	6,16	7,01	0,85	12,14
3	2	19,23	19,36	7,53	7,66	0,13	1,71
4	3	19,80	19,74	8,10	8,04	0,06	0,73
5	4	20,14	20,01	8,44	8,31	0,13	1,55
6	5	20,35	20,22	8,65	8,52	0,13	1,52
7	6	20,53	20,39	8,83	8,69	0,14	1,60
8	7	20,62	20,54	8,92	8,84	0,08	0,96
9	8	20,71	20,66	9,01	8,96	0,05	0,55
10	9	20,79	20,77	9,09	9,07	0,02	0,21
11	10	20,87	20,87	9,17	9,17	0,00	0,00
12	12	20,98	21,04	9,28	9,34	0,06	0,65
13	14	21,07	21,19	9,37	9,49	0,12	1,22
14	16	21,15	21,31	9,45	9,61	0,16	1,67
15	18	21,21	21,42	9,51	9,72	0,21	2,17
16	20	21,27	21,52	9,57	9,82	0,25	2,55
17	25	21,42	21,73	9,72	10,03	0,31	3,08
18	30	21,52	21,90	9,82	10,20	0,38	3,73
19	40	21,73	22,17	10,03	10,47	0,44	4,20
20	50	21,91	22,38	10,21	10,68	0,47	4,39
21	60	22,14	22,55	10,44	10,85	0,41	3,78
22	75	22,47	22,76	10,77	11,06	0,29	2,62
23	90	22,72	22,93	11,02	11,23	0,21	1,87
24	105	22,92	23,07	11,22	11,37	0,15	1,36
25	120	23,10	23,20	11,40	11,50	0,10	0,87
26	135	23,25	23,31	11,55	11,61	0,06	0,52
27	150	23,39	23,41	11,69	11,71	0,02	0,16
28	165	23,51	23,50	11,81	11,80	0,01	0,10
29	180	23,61	23,58	11,91	11,88	0,03	0,25
30	210	23,79	23,72	12,09	12,02	0,07	0,54
31	240	23,93	23,85	12,23	12,15	0,08	0,66
32	270	24,05	23,96	12,35	12,26	0,09	0,73
33	300	24,18	24,06	12,48	12,36	0,12	0,98
34	330	24,24	24,15	12,54	12,45	0,09	0,74
35	360	24,33	24,23	12,63	12,53	0,10	0,80
36	390	24,41	24,31	12,71	12,61	0,10	0,83
37	420	24,47	24,37	12,77	12,67	0,10	0,75
38	450	24,54	24,44	12,84	12,74	0,10	0,79
39	480	24,58	24,50	12,88	12,80	0,08	0,63
40	540	24,70	24,61	13,00	12,91	0,09	0,70
41	600	24,80	24,71	13,10	13,01	0,09	0,70
42	660	24,88	24,80	13,18	13,10	0,08	0,62
43	720	24,88	24,88	13,18	13,18	0,00	0,00
	<b>Moyenne</b>	<b>22,18</b>	<b>22,24</b>	<b>10,48</b>	<b>10,54</b>	<b>0,15</b>	<b>1,53</b>
	<b>Variance</b>	<b>5,90</b>	<b>5,62</b>	<b>5,90</b>	<b>5,62</b>	<b>0,03</b>	<b>4,05</b>
	<b>Ecart Type</b>	<b>2,43</b>	<b>2,37</b>	<b>2,43</b>	<b>2,37</b>	<b>0,16</b>	<b>2,01</b>
$\mu_3$		<b>-0,01566</b>	<b>-0,015936</b>	<b>-0,01566</b>	<b>-0,015936</b>	<b>5,7183E-06</b>	<b>0,017051</b>

## Annexe 04. - : Illustration de la validation de la formule expérimentale avec les données du forage de Barmou (Continental Intercalaire – Niger)

N°	Temps t (mn)	Niveau d'eau dans le forage (m/R)		$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$ s_c - s_m $	ER (%)
		Mesuré	Calculé				
1	0	116,47	116,47	-	-	-	
2	1	122,30	120,90	5,83	4,43	1,40	31,58
3	2	121,73	120,96	5,26	4,49	0,77	17,20
4	3	121,65	120,99	5,18	4,52	0,66	14,57
5	4	121,69	121,02	5,22	4,55	0,67	14,85
6	5	121,55	121,03	5,08	4,56	0,52	11,32
7	6	121,51	121,05	5,04	4,58	0,46	10,08
8	7	121,47	121,06	5,00	4,59	0,41	8,91
9	8	121,44	121,07	4,97	4,60	0,37	7,99
10	9	121,42	121,08	4,95	4,61	0,34	7,33
11	10	121,40	121,09	4,93	4,62	0,31	6,70
12	15	121,35	121,12	4,88	4,65	0,23	4,86
13	20	121,31	121,15	4,84	4,68	0,16	3,47
14	25	121,27	121,17	4,80	4,70	0,10	2,22
15	30	121,24	121,18	4,77	4,71	0,06	1,25
16	35	121,22	121,19	4,75	4,72	0,03	0,56
17	40	121,22	121,20	4,75	4,73	0,02	0,33
18	50	121,23	121,22	4,76	4,75	0,01	0,15
19	60	121,25	121,24	4,78	4,77	0,01	0,25
20	70	121,26	121,25	4,79	4,78	0,01	0,20
21	80	121,26	121,26	4,79	4,79	0,00	0,03
22	90	121,27	121,27	4,80	4,80	0,00	0,03
23	100	121,28	121,28	4,81	4,81	0,00	0,00
24	120	121,30	121,30	4,83	4,83	0,00	0,10
25	140	121,32	121,31	4,85	4,84	0,01	0,25
26	160	121,34	121,32	4,87	4,85	0,02	0,44
27	180	121,35	121,33	4,88	4,86	0,02	0,44
28	210	121,36	121,34	4,89	4,87	0,02	0,39
29	240	121,36	121,35	4,89	4,88	0,01	0,16
30	270	121,37	121,36	4,90	4,89	0,01	0,17
31	300	121,37	121,37	4,90	4,90	0,00	0,01
32	330	121,37	121,38	4,90	4,91	0,01	0,17
33	360	121,38	121,39	4,91	4,92	0,01	0,11
34	390	121,38	121,39	4,91	4,92	0,01	0,24
35	420	121,38	121,40	4,91	4,93	0,02	0,37
36	450	121,38	121,40	4,91	4,93	0,02	0,48
37	480	121,40	121,41	4,93	4,94	0,01	0,18
38	510	121,42	121,41	4,95	4,94	0,01	0,12
39	540	121,43	121,42	4,96	4,95	0,01	0,23
40	570	121,44	121,42	4,97	4,95	0,02	0,34
41	600	121,45	121,43	4,98	4,96	0,02	0,45
42	630	121,46	121,43	4,99	4,96	0,03	0,57
43	660	121,46	121,44	4,99	4,97	0,02	0,50
44	690	121,46	121,44	4,99	4,97	0,02	0,42
45	720	121,46	121,44	4,99	4,97	0,02	0,35
46	780	121,47	121,45	5,00	4,98	0,02	0,42
47	840	121,47	121,46	5,00	4,99	0,01	0,30
48	900	121,47	121,46	5,00	4,99	0,01	0,18
49	960	121,47	121,47	5,00	5,00	0,00	0,08
50	1020	121,47	121,47	5,00	5,00	0,00	0,02
51	1080	121,47	121,48	5,00	5,01	0,01	0,12
52	1140	121,47	121,48	5,00	5,01	0,01	0,21
53	1200	121,48	121,48	5,01	5,01	0,00	0,09
54	1260	121,48	121,49	5,01	5,02	0,01	0,17
55	1320	121,48	121,49	5,01	5,02	0,01	0,25
56	1380	121,48	121,50	5,01	5,03	0,02	0,32
57	1440	121,48	121,50	5,01	5,03	0,02	0,39

N°	Temps t (mn)	Niveau d'eau dans le forage (m/R)		$s_m$ (m)	$s_c$ (m)	$ s_c - s_m $	ER (%)
		Mesuré	Calculé				
58	1500	121,49	121,50	5,02	5,03	0,01	0,26
59	1560	121,49	121,51	5,02	5,04	0,02	0,32
60	1620	121,49	121,51	5,02	5,04	0,02	0,38
61	1680	121,49	121,51	5,02	5,04	0,02	0,44
62	1740	121,49	121,52	5,02	5,05	0,03	0,50
63	1800	121,49	121,52	5,02	5,05	0,03	0,55
64	1860	121,49	121,52	5,02	5,05	0,03	0,61
65	1920	121,50	121,52	5,03	5,05	0,02	0,46
66	1980	121,52	121,53	5,05	5,06	0,01	0,11
67	2040	121,54	121,53	5,07	5,06	0,01	0,23
68	2100	121,55	121,53	5,08	5,06	0,02	0,38
69	2160	121,56	121,53	5,09	5,06	0,03	0,53
70	2220	121,57	121,54	5,10	5,07	0,03	0,69
71	2280	121,57	121,54	5,10	5,07	0,03	0,64
72	2340	121,57	121,54	5,10	5,07	0,03	0,60
73	2400	121,57	121,54	5,10	5,07	0,03	0,56
74	2460	121,57	121,54	5,10	5,07	0,03	0,52
75	2520	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,48
76	2580	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,44
77	2640	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,40
78	2700	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,37
79	2760	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,33
80	2820	121,57	121,55	5,10	5,08	0,02	0,30
81	2880	121,57	121,56	5,10	5,09	0,01	0,26
82	2940	121,57	121,56	5,10	5,09	0,01	0,23
83	3000	121,58	121,56	5,11	5,09	0,02	0,39
84	3060	121,58	121,56	5,11	5,09	0,02	0,36
85	3120	121,58	121,56	5,11	5,09	0,02	0,33
86	3180	121,58	121,56	5,11	5,09	0,02	0,30
87	3240	121,58	121,57	5,11	5,10	0,01	0,27
88	3300	121,58	121,57	5,11	5,10	0,01	0,24
89	3360	121,59	121,57	5,12	5,10	0,02	0,41
90	3420	121,59	121,57	5,12	5,10	0,02	0,38
91	3480	121,59	121,57	5,12	5,10	0,02	0,35
92	3540	121,59	121,57	5,12	5,10	0,02	0,32
93	3600	121,59	121,57	5,12	5,10	0,02	0,29
94	3660	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,27
95	3720	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,24
96	3780	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,22
97	3840	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,19
98	3900	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,16
99	3960	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,14
100	4020	121,59	121,58	5,12	5,11	0,01	0,12
101	4080	121,59	121,59	5,12	5,12	0,00	0,09
102	4140	121,59	121,59	5,12	5,12	0,00	0,07
103	4200	121,59	121,59	5,12	5,12	0,00	0,05
104	4260	121,59	121,59	5,12	5,12	0,00	0,02
105	4320	121,59	121,59	5,12	5,12	0,00	0,00
<b>Moyenne</b>		<b>121,44</b>	<b>121,37</b>	<b>4,97</b>	<b>4,90</b>	<b>0,07</b>	<b>1,61</b>
<b>Variance</b>		<b>0,0025</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0025</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,1812</b>
<b>Etat Type</b>		<b>0,0497</b>	<b>0,0501</b>	<b>0,0497</b>	<b>0,0501</b>	<b>0,0191</b>	<b>0,4257</b>
$\mu_3$		- 0,000109	- 0,000105	- 0,000109	- 0,000105	0,000003	0,033348