

## INFLUENCE DES PERTES DE CHARGES QUADRATIQUES SUR LA TRANSMISSIVITÉ ET LE DÉBIT SPÉCIFIQUE DETERMINÉS SUR DES FORAGES ISOLÉS : CAS DE LA RÉGION DE KORHOGO AU NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE

Oscar Zaïbo ONETIE<sup>1</sup>, Théophile LASM<sup>1\*</sup>, Derving BAKA<sup>1</sup>, N'Guessan Marie Rosine FOSSOU<sup>1</sup>, Suzane Ourapa KOUAKOU<sup>1</sup>, Marc YOUAN TA<sup>1,2</sup>, Omer De LASME<sup>1</sup>, Marie-Solange OGA<sup>1</sup> et Nagnin SORO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement, U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

(Reçu le 29 Juin 2010, accepté le 05 Décembre 2010)

\* Correspondance et tirés à part, e-mail : [theophile\\_lasm@yahoo.fr](mailto:theophile_lasm@yahoo.fr)

### RÉSUMÉ

Située au Nord de la Côte d'Ivoire, en domaine de socle, la région de Korhogo est constituée de formations birimiennes et de granitoïdes avec une fracturation développée. Cette étude a pour objectif de corriger l'effet des pertes de charges quadratiques sur la transmissivité déterminée sur les forages isolée. La base de données est constituée de 124 pompages d'essai à débit constant et variable. Les rabattements ont été corrigés selon la méthode de Forkasiewicz avant la détermination de la transmissivité et du débit spécifique. Dans un premier temps les pompages à 3 paliers ont été utilisés pour déterminer les transmissivités corrigées et non corrigées. Une relation empirique a été déterminée entre ces deux types de transmissivités. Cette relation est utilisée pour corriger les transmissivités des pompages à 1 et 2 paliers où la méthode de correction de Forkasiewicz est difficile.

Les transmissivités corrigées et non corrigées respectivement oscillent entre 6,09E-06 et 9,91E-04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> et entre 5,9E-06 et 7,27E-04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> avec une moyenne de 1,39E-04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> et 1,10E-04 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>, L'analyse des deux types de transmissivité montre qu'il ya une sous estimation de ce paramètre lorsque les rabattements ne sont pas corrigés. Les incertitudes affectant les valeurs de transmissivités atteignent parfois 27 % et ne sont pas négligeables.

Les valeurs du débit spécifique sont faibles, elles oscillent entre 2,85E-02 et 1,98 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> avec une moyenne de 3,25E-01 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>. La relation entre T et Q/s

est de type bi logarithmique. La relation empirique entre ces deux paramètres peut être utilisée pour déterminer la transmissivité lorsqu'elle n'est pas connue et que seul le débit spécifique est connu ou lorsqu'elle ne peut pas être calculée.

L'obtention des données fiables de la transmissivité et du débit spécifique contribue à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrodynamique et permet d'envisager la modélisation des écoulements souterrains en vue d'une gestion durable et efficiente des ressources en eau souterraine de la région de Korhogo.

**Mots-clés :** *Réservoirs fracturés, Pompage d'essai, Transmissivité, Pertes de charge quadratique, Korhogo, Côte d'Ivoire.*

## ABSTRACT

### **Influence of turbulent head loss on transmissivity and specific capacity determined from isolated boreholes : case of Korhogo area to the northern Côte d'Ivoire**

Located at the North of Côte d'Ivoire in crystalline basement, Korhogo area is constituted of birimian and crystalline rocks characterised by a developed fracturing. This study aims to correct the turbulent head loss effect on transmissivity determined on the isolated drillings. The data base is constituted by 124 pumping test data with constant and variable flow rate. Drawdowns were corrected for turbulent head losses before evaluating transmissivities and specific capacities according Forkasiewicz method.

Firstly, pumping with three steps have been used to evaluate the corrected and raw transmissivities. An empirical statistical relationship has been determined between these two transmissivities. This relationship is used to correct the transmissivities of pumping to 1 and 2 steps where the Forkasiewicz method is difficult to apply.

Corrected and raw transmissivities oscillate between 6.09E-06 and 9.91E-04  $m^2.h^{-1}$  and between 5.9E-06 and 7.27E-04  $m^2.h^{-1}$  respectively with an average of 1.39 E-04  $m^2.h^{-1}$  and of 1.10E-04  $m^2.h^{-1}$ . Analysis of those two transmissivities puts in evidence an underestimate of this parameter when drawdowns are not corrected. Uncertainties affecting transmissivities values reach sometimes 27 % which is not negligible.

Specific capacity values are low and oscillate between 2.85E-02 and 1.98  $m^2.h^{-1}$  with an average of 3.25E-01  $m^2.h^{-1}$ . The relation between transmissivity and specific capacity is bilogarithmic. This empirical statistical relationship between these two parameters can be used to determinate

transmissivity when it is not known or when specific capacity only is known and transmissivity cannot be evaluated.

Obtaining of reliable transmissivity and specific capacity data contributes to a better knowledge of hydrodynamic functioning and permits to undertake the groundwater flow modelling in view of efficient management of groundwater resources in Korhogo area

**Keywords :** *Fractured reservoirs, Pumping test, Transmissivity, Turbulent head loss, Korhogo, Côte d'Ivoire.*

## I - INTRODUCTION

Fournir de l'eau en qualité et quantité est l'un des défis majeurs des spécialistes des sciences de l'eau. En Afrique de l'Ouest différents travaux [1-6] ont été entrepris en vue d'une meilleure connaissance des différents réservoirs des eaux souterraines et des propriétés hydrodynamiques. Dans les provinces de socle, comme c'est le cas de la région de Korhogo, les techniques de la télédétection (imagerie satellitaires et radars, photographies aériennes) et de géophysiques ont été utilisées pour identifier les réseaux de fractures susceptibles de contenir de l'eau. En Côte d'Ivoire, plusieurs travaux ont été conduits dans cette optique [6-9]. Dans la région de Korhogo, [8, 10, 11] ont cartographié par télédétection les réseaux de fractures et ont effectué une analyse critique de ces réseaux puis ont caractérisé leur potentiel hydrogéologique et les différentes possibilités d'exploitabilité qu'offrent les différentes ressources. D'autres travaux sont actuellement en cours en vue d'une meilleure connaissance des réservoirs fracturés et une compréhension des écoulements souterrains afin d'entreprendre l'élaboration de modèles numériques représentatifs qui conduiront à la simulation des réservoirs fracturés.

La région de Korhogo est dotée de plusieurs centaines de forages, réalisés dans le cadre des différents programmes d'approvisionnement en eau potable des populations (BID2, Don Japonais). Les forages sont malheureusement des forages isolés sans piézomètres d'observation, ce qui rend difficile le suivi piézométrique de cette région à l'instar des autres régions de socle de Côte d'Ivoire. Des pompages à débits constants et croissants (par palier) ont été réalisés. Les différents rabattements disponibles sont ceux de la descente et de la remontée. Les rabattements sont directement mesurés dans le puits de pompage. La transmissivité, paramètre intrinsèque des aquifères est déterminée au moyen des pompages d'essai de longue durée à débit constant.

Les pompages par palier peuvent être aussi utilisés pour la détermination de ce paramètre à condition d'atteindre un palier au cours de chaque cycle [12-17]. Les différents points de mesures (rabattement) sont plus nombreux au cours de la descente que de la remontée. Cette étude se propose d'utiliser les données de la descente pour évaluer ce paramètre hydrodynamique car la transmissivité qui en découlerait serait plus cohérente et fiable. Les rabattements mesurés sont corrigés avant la détermination des différents paramètres hydrodynamiques (transmissivité et débit spécifique). La présente étude a donc pour objectif de corriger l'effet des pertes de charge quadratique sur la transmissivité déterminée sur des forages isolés. Elle intéresse une région du nord de la Côte d'Ivoire où la fracturation est bien développée et analysée d'un point de vue statistique [8].

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

Située au Nord de la Côte d'Ivoire, la région de Korhogo appartient au domaine protérozoïque (*Figure 1*). Les domaines protérozoïque et archéen constituent le socle et occupent environ 97,5 % du territoire national. Ces deux domaines sont séparés par l'accident majeur du Sassandra et sont caractérisés par des ensembles pétrographiques différents. Les roches ont des âges variant entre 1500 et 2500 Ma et entre 2500 et 3500 Ma respectivement dans les domaines protérozoïque et archéen.

Dans la région de Korhogo, on y distingue d'un point de vue pétrographique deux grandes entités géologiques (*Figure 1*) :

i) les formations volcaniques, volcano-sédimentaires et sédimentaires métamorphisées déposées dans les sillons intracratoniques birimiens.

Les roches d'origine sédimentaire se composent essentiellement de schistes ; les plus courants sont sericiteux, grauwackeux ou arkosique, choriteux ou calco-choriteux (in [8]). Les roches d'origine volcaniques sont représentées par des roches vertes basiques intermédiaires auxquelles s'ajoutent quelques roches basiques transformées par le métamorphisme général.

ii) les granitoïdes éburnéens.

Les granitoïdes sont constitués par un ensemble assez varié de granitoïdes allant des granites clairs aux granodiorites.

Différents événements tectoniques se sont succédés dans cette partie du socle de Côte d'Ivoire dont l'événement tectono-métamorphique majeur est l'orogénèse éburnéenne. L'ensemble de ces déformations a conduit à la mise en place d'une fracturation importante dans ces roches. Le réseau de fractures a été extrait des images satellitaires et radars après leur interprétation [8, 10].

Ce réseau de fractures est très dense et comporte des fractures d'extension locale à régionale (dizaine de mètres à plusieurs kilomètres). La fracturation de la région de Korhogo est hétérogène en effet, la densité de fracturation est très variable d'un secteur à un autre [8]. L'analyse statistique de ces réseaux indique que ces réseaux ont atteint un stade de développement avancé à l'instar des réseaux de fractures du socle précambrien de Côte d'Ivoire [8, 9, 17, 18]. L'analyse plus fine des fractures d'extension régionale a mis en évidence quatre familles de fractures prépondérantes : N30-40, N120-130, N140-160 et N170-180. La famille de fractures N90-100 constitue la direction secondaire. Les autres familles de fractures représentent les directions mineures de fracturation puisque leur fréquence en nombre est inférieure à 7 %. Ces réseaux de fractures s'ils ne sont pas remplis de recristallisations secondaires constituent le siège des écoulements souterrains. Les petites fractures qui sont généralement les plus nombreuses jouent un rôle important dans la connectivité des réseaux de fractures

La tectonique de cette région est complexe et polyphasée comme l'attestent les différents travaux [8, 10]. L'étude de la déformation effectuée sur la base des observations macroscopiques des éléments structuraux a permis d'identifier les différents styles de déformation tectonique (cisaillement ductiles et cassants, aplatissement).

Au plan hydrogéologique, on y distingue deux types d'aquifères : les aquifères des altérites et de fissures. Ces deux types d'aquifères sont généralement superposés mais il peut arriver que l'un fasse défaut ou soit disposé latéralement partiellement saturé ou pas, drainé ou drainant [3].

## **II-2. Données et méthodes**

### ***II-2-1. Données***

Les données utilisées dans cette étude sont essentiellement des essais de puits et de pompages réalisés sur des forages isolés. Les forages ont été réalisés par les autorités ivoiriennes en collaboration avec les partenaires nationaux et internationaux à travers les différents projets et programmes : Don Japonais et BID 2 (Banque Islamique de Développement).

Au total, 124 forages ont été retenus dans le cadre de cette étude. Il s'agit des forages isolés sur lesquels des pompages ont été réalisés. Les rabattements sont mesurés directement dans le puits de pompage faute de piézomètre d'observation pour des raisons essentiellement économiques. Au niveau des essais de puits, le nombre de paliers est généralement de 3 et rarement 2. Le pompage dure entre 4 et 8 heures avec une remontée de 1 à 4 h. Les pompages à débit constant ont généralement la même durée que les essais par paliers.

La figure 1 illustre la répartition des différents forages sur le secteur d'étude. La répartition des forages n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. Les forages sont principalement localisés dans la partie centrale de la région étudiée. Cette répartition peut s'expliquer par l'inaccessibilité de certaines régions du fait du relief et de la densité de population qui est inégalement répartie. En effet, certaines localités du fait de leur développement sont plus peuplées que d'autres. En Côte d'Ivoire, l'implantation des forages en zone rurale est fonction du nombre d'habitants dans cette région. Les profondeurs des forages varient généralement entre 50 et 90 m et captent des eaux des réservoirs fissurés.

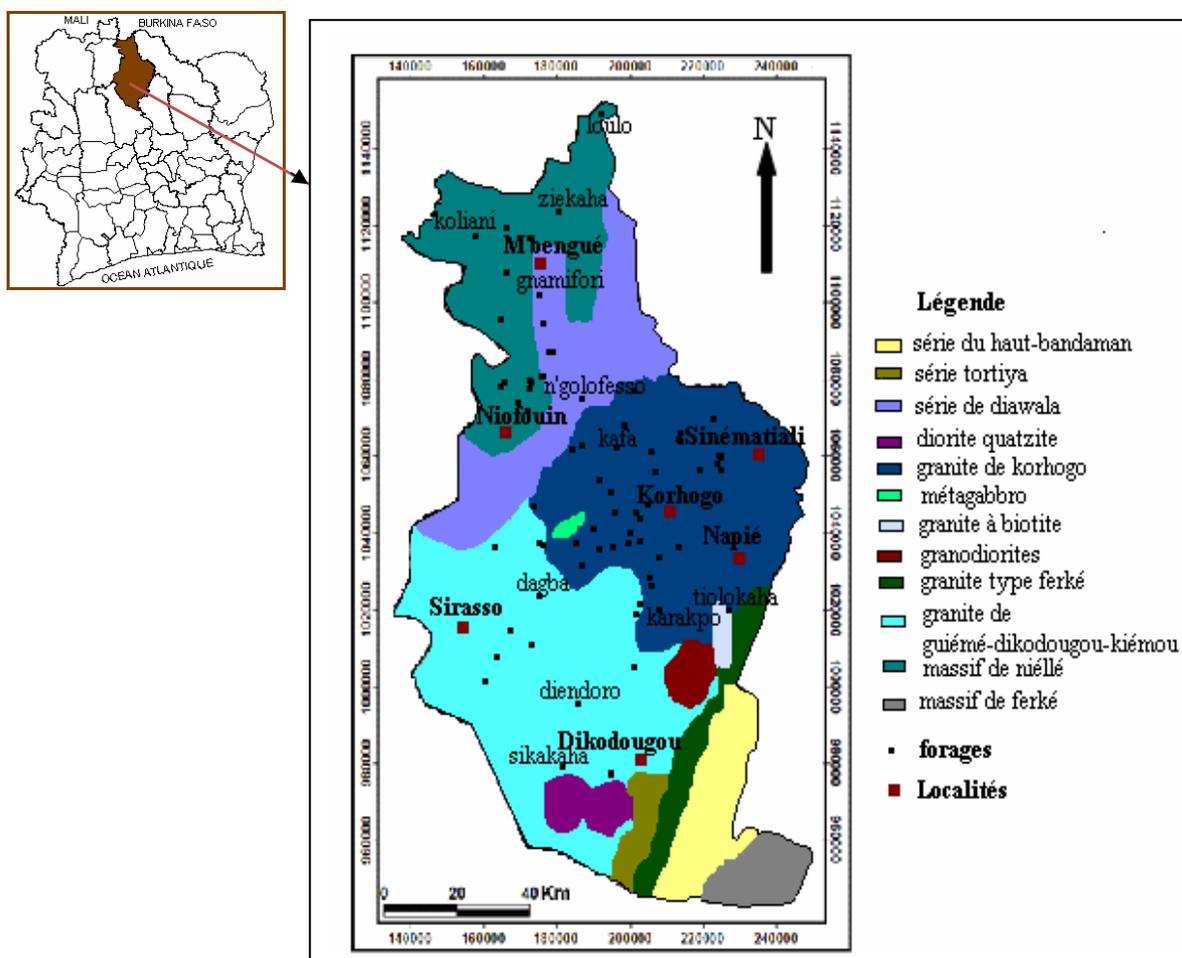


Figure 1 : Carte géologique de la région de Korhogo

## II-2-2. Méthodes

La transmissivité des aquifères fissurés de la région de Korhogo a été déterminée à partir de l'interprétation des essais de pompages à l'aide de la méthode de [19]. La transmissivité, paramètre hydrodynamique important peut être évaluée aussi bien avec les rabattements mesurés au cours du pompage (descente) et ceux mesurés après l'arrêt du pompage (remontée).

Dans le premier cas, les points de mesures sont assez nombreux du fait de la durée du pompage, mais la transmissivité calculée, serait entachée d'erreur due aux incertitudes liées aux mesures causées par les pertes de charges turbulentes dans le forage pouvant atteindre parfois 50 % dans certains cas [17]. Si le débit de pompages est faible voire très faible, les incertitudes sur les mesures peuvent être négligeables [20, 21] et la transmissivité calculée est plus fiable.

Dans le second cas, les points disponibles pour la détermination de la transmissivité sont peu nombreux et la valeur de la transmissivité obtenue est beaucoup plus fiable car le puits étant au repos, l'influence des pertes de charges dans le forage est négligeable.

Pour contourner le problème des incertitudes affectant les mesures de rabattements dû aux pertes de charges turbulentes dans les forages, différents auteurs [6, 9, 17, 18, 22-25] ont utilisé les données de la remontée des pompages. L'intérêt pratique d'utiliser les données de la descente au cours d'un pompage au lieu des données de la remontée réside dans le nombre de points de mesure. Plus le nombre de points de mesure est important, meilleure est la précision du paramètre déterminé, d'où la nécessité de corriger les rabattements mesurés (descente) au niveau des forages isolés. La modélisation des eaux souterraines nécessite l'usage de données fiables en vue d'une meilleure gestion et exploitation des ressources en eaux souterraines. Du fait que les données disponibles ne nous laissent aucune alternative, l'approche développée ici apparaît encourageante pour l'obtention de valeurs fiable de la transmissivité.

La détermination de la transmissivité se fait graphiquement à l'aide de la méthode de calage.

La méthode de calage consiste à superposer les courbes expérimentales (mesurées) et théoriques (calculées) du rabattement. Le rabattement théorique est calculé suivant l'équation de Cooper-Jacob (*équation 1*) qui est une approximation logarithmique de l'équation (2) de [26] (voir démonstration détaillée dans [17]) :

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \operatorname{Ln} \left( \frac{2,25Tt}{r^2 S} \right) \quad (1)$$

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

avec  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$  et  $W(u)$  est la fonction du puits donnée par des tables ;  
 $s$  est le rabattement mesuré exprimé en m ;  $Q$  est le débit de pompage en  $m^3.s^{-1}$  ;  $T$  est la transmissivité exprimée en  $m^2.s^{-1}$  ;  $t$  est le temps écoulé depuis le début du pompage, exprimé en s ;  $S$  est le coefficient d'emmagasinement, sans dimension et  $r$  le rayon du puits exprimé en mètre.

Les conditions d'application de cette méthode sont les mêmes que celles de Theis.

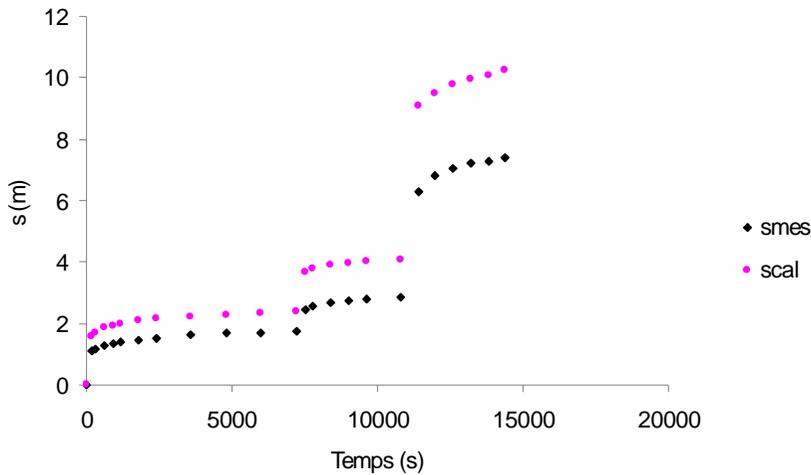
En l'absence de piézomètre d'observation, il est impossible de déterminer la valeur du coefficient d'emmagasinement. [3] préconise en l'absence de toute détermination rigoureuse sur forage isolé, de prendre pour le coefficient d'emmagasinement  $S$  des valeurs comprises dans l'intervalle  $1E-04 < S < 1E-03$  pour les réservoirs fissurés des régions à substratum éruptif ou métamorphique. Les valeurs de transmissivité obtenues dans les réservoirs fissurés du socle précambrien de Côte d'Ivoire s'intègrent dans l'intervalle  $1E-06 m^2.s^{-1} < T < 1E-03 m^2.s^{-1}$  [3, 6, 9, 17, 23, 18]. En intégrant donc ces valeurs de la transmissivité ( $T$ ) et du coefficient d'emmagasinement ( $S$ ) dans l'équation théorique (*Equation 1*), on calcule le rabattement théorique selon cette équation. Les courbes expérimentale (mesurée) et théorique (calculée) du rabattement auront tendance soit à se rapprocher soit à s'éloigner l'une de l'autre puisque les valeurs initiales de  $T$  et de  $S$  sont arbitraires mais s'inscrivant dans les intervalles définis plus haut. Le processus de superposition ou de calage peut se faire manuellement ou automatiquement en utilisant le module Solveur du logiciel Excel de MS-Office. La valeur de transmissivité qui sera retenue est celle pour laquelle les courbes expérimentales et théoriques se superposent. Lorsque que la superposition est obtenue, les deux courbes ont dans ces conditions les mêmes paramètres hydrodynamiques notamment la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. Les graphes des **Figures 2** et **3** montrent un exemple les différentes courbes de rabattement avant et après la procédure de calage.

Le socle étant abondamment fracturé [8, 10], le milieu peut être considéré comme un milieu poreux équivalent. Les méthodes d'interprétation développées pour le milieu poreux peuvent être utilisées car les données disponibles ne laissent aucune alternative. La théorie de cette méthode est très connue et ne sera donc pas présentée ici, le lecteur pourra consulter l'abondante littérature disponible à cet effet.

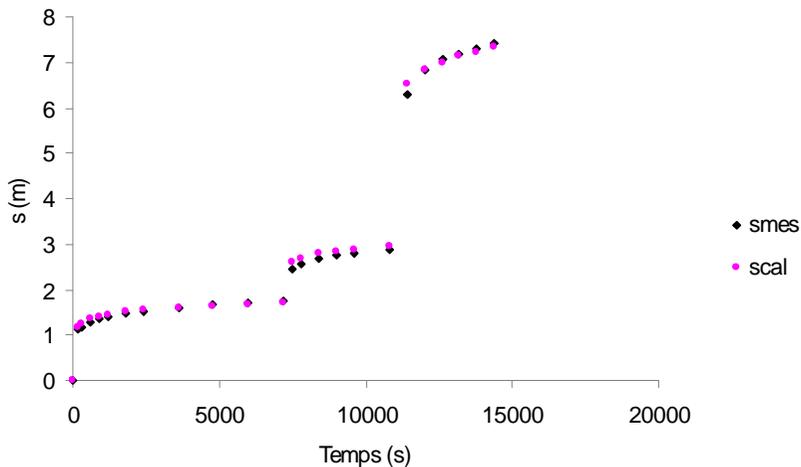
Pour un forage donné, on détermine deux transmissivités : i) TD issue de la descente (évaluée avec les données de rabattements non corrigés) et ii) TDC,

la transmissivité déterminée à partir des rabattements corrigés des effets des pertes de charges dans et autour du forage.

Les transmissivités TD et TDc sont comparées et la contribution des pertes de charges sur la transmissivité est déterminée pour chaque forage (évaluée en %). La transmissivité et le débit spécifique corrigés sont par la suite analysés d'un point de vue statistique.



**Figure 2 :** Courbes de rabattements mesurés et calculés (théoriques) avant la procédure de calage [27].



**Figure 3 :** Courbes de rabattements mesurés et calculés (théorique) après la procédure de calage).

### **II-2-3. Détermination des pertes de charge et correction du rabattement**

Le rabattement mesuré dans l'ouvrage à un instant  $t$  est la somme de deux composantes nommées pertes de charge, exprimées en mètres de hauteur d'eau, caractérisant le complexe aquifère/ouvrage de captage [28] :

- une perte de charge linéaire provoquée par l'écoulement laminaire dans l'aquifère et au voisinage du puits, notée :

$$s_1 = BQ ;$$

- et une perte de charge quadratique, non linéaire, provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, notée :

$$s_2 = CQ^2$$

Le rabattement total  $s$ , à un instant  $t$  est donné par l'expression (3) :

$$s = s_1 + s_2 = BQ + CQ^2 \quad (3)$$

$B$  et  $C$  sont des constantes.

En divisant l'expression (3) par le débit  $Q$  on obtient l'expression (4) :

$$\frac{s}{Q} = B + CQ \quad (4)$$

La droite débit /rabattements spécifiques permet de déterminer les coefficients  $B$  et  $C$  de l'équation selon l'approche de [29].

$C$  représente la pente de la droite et  $B$  est donnée par l'intersection de la droite avec l'axe des rabattements spécifiques.

Une fois  $B$  et  $C$  déterminés, on remplace leur valeur dans l'équation (4).

Pour chaque palier, on calcule les pertes de charges quadratiques et on déduit cette valeur du rabattement brute (non corrigés), si bien que le rabattement corrigé ( $s'$ ) est donné par l'expression suivante (5) :

$$s' = s - s_2 = s - CQ^2 \quad (5)$$

Pour chaque point de mesure, le rabattement mesuré est corrigé selon l'expression (5). Les rabattements corrigés sont utilisées par la suite pour la détermination de la transmissivité corrigée  $TDC$  par la procédure de calage et évalué le débit spécifique.

La détermination des pertes de charges par la méthode de [29] nécessite l'utilisation des données d'essais de pompage d'au moins trois paliers afin d'obtenir un courbe débit / rabattements spécifiques significative. Les essais de puits réalisés dans les programmes d'Hydraulique villageoise sont généralement de trois paliers. Dans la région de Korhogo, l'on a enregistré aussi des pompages à deux paliers au niveau du projet BID (Banque Islamique de Développement) et à un palier au niveau du projet Don Japonais. Dans ces deux derniers cas, il apparaît difficile d'appliquer cette

méthode et partant, il serait difficile de corriger les rabattements mesurés et la transmissivité. Une autre approche a été proposée pour la correction de la transmissivité du pompage à palier unique et à deux paliers. Cette approche consiste dans un premier temps à identifier la relation existant entre les transmissivités corrigées et non corrigées au niveau des pompages à trois paliers. Une fois la relation empirique déterminée, on utilise celle-ci pour la détermination de la transmissivité corrigée connaissant la transmissivité non corrigée au niveau des pompages à un et deux paliers.

### III – RÉSULTATS

#### III-1. Transmissivités déterminées à partir des pompages à trois paliers

Sur la *Figure 4*, l'on peut observer les deux graphes de rabattements (corrigés et non corrigés) d'un pompage par palier. Les deux courbes sont bien distinctes et la courbe de rabattements non corrigés est toujours au dessus de celle corrigée. Il y a donc une surestimation du rabattement dû à l'effet des pertes de charges quadratiques dans le forage de pompage. Les écarts entre ces deux types de courbe sont variables, ils augmentent graduellement avec le débit de pompage, c'est-à-dire ces écarts augmentent du premier palier au troisième palier. En effet, plus le débit de pompage est important plus l'effet des pertes de charges est important.

Sur les *Figures 5* et *6* sont illustrées les courbes de rabattements corrigés ( $s_{cor}$ ) et calculés ( $s_{cal}$ ) dans le puits de pompage à partir de l'équation (2) en fonction du temps, avant et après le calage. Les transmissivités non corrigées des pompages à trois paliers déterminés par calage oscillent entre  $1,92E-05$  et  $1,32E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit sur 3 ordres de grandeurs.

Après calage, les deux courbes, c'est-à-dire expérimentale et théorique se superposent plus ou moins parfaitement.

Les essais de puits à trois paliers concernent au total 21 forages. Les transmissivités corrigées déterminées après calage oscillent entre  $2,20E-05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $1,88E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une moyenne de  $8,01E-05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### III-2. Relation entre les transmissivités corrigées et non corrigées

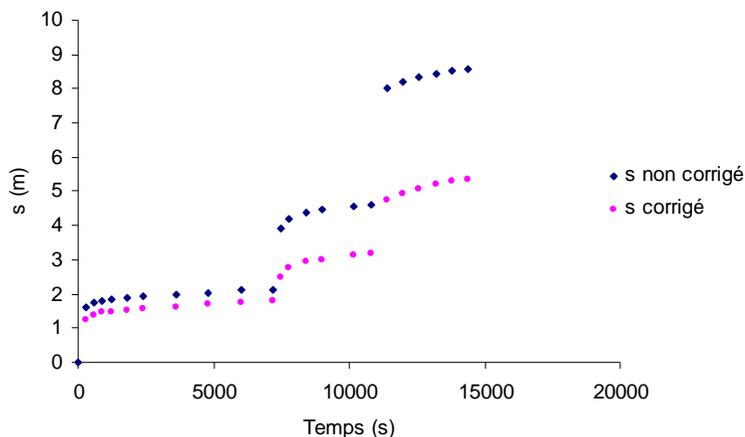
La relation entre la transmissivité non corrigée et corrigée déterminées à partir des pompages à 3 paliers a été analysée dans un diagramme bi-logarithmique (*Figure 7*). Les différents points dans le diagramme s'organisent suivant une ligne sur laquelle il est possible d'ajuster une loi de puissance. Cette loi de puissance a pour expression (6) :

$$TD_c = 2,087 TD^{1,058} \quad (6)$$

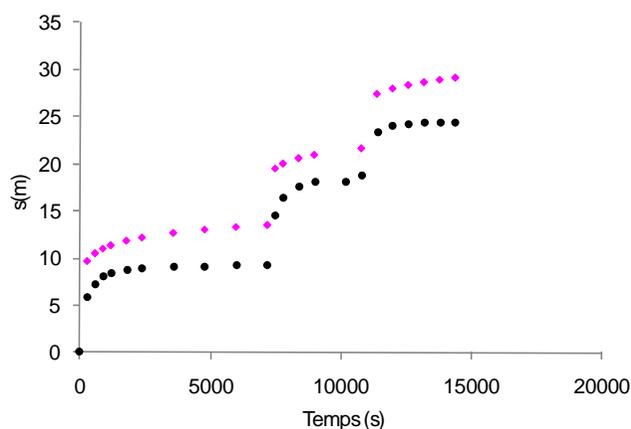
Avec  $R^2 = 0,906$ , la valeur du coefficient de détermination permet de dire que l'ajustement est très satisfaisant.  $TD_c$  et  $TD$  sont exprimées en  $m^2.s^{-1}$ . L'expression (6) peut être aussi écrite sous la forme suivante :

$$TD_c = 1,2896 TD^{1,058} \quad (7)$$

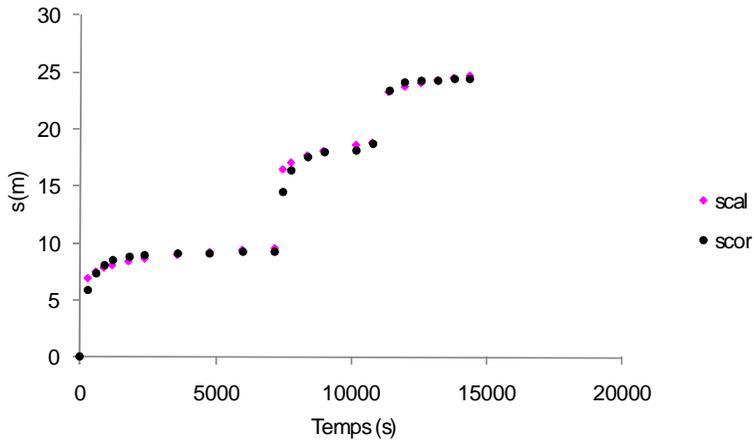
où  $TD_c$  et  $TD$  étant exprimées en  $m^2.h^{-1}$



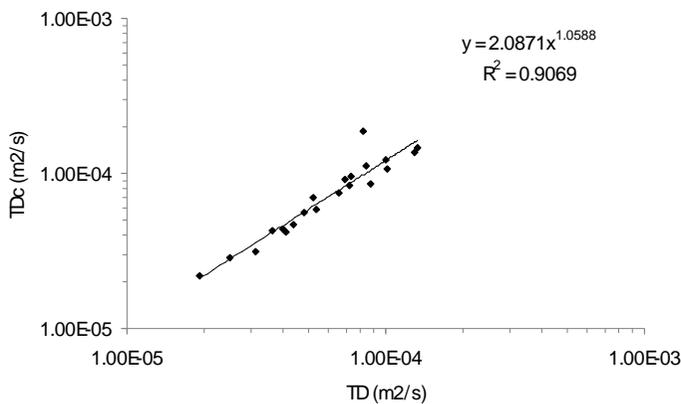
**Figure 4 :** Courbes de rabattements corrigés et non corrigés mettant en évidence l'influence des pertes de charge dues à l'écoulement turbulent. Cas d'un pompage à trois paliers



**Figure 5 :** Courbes de rabattements corrigés et calculés avant la procédure de calage. Cas d'un pompage à trois paliers.



**Figure 6 :** *Courbes de rabattements corrigés et calculé après la procédure de calage. Cas d'un pompage à trois paliers*



**Figure 7 :** *Relation entre la transmissivité non corrigée et corrigée au niveau des pompages à trois paliers dans un diagramme bilogarithmique*

### III-3. Transmissivités des aquifères déterminées à partir des pompages à une et deux paliers

L'équation (6) est utilisée pour corriger les 103 valeurs de transmissivités brutes (non corrigées) des pompages à un et deux paliers où la correction du rabattement était difficile voire impossible. Ces transmissivités brutes varient entre  $5,90E-06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $7,27E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une moyenne de  $1,19E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Les transmissivités corrigées TDC oscillent entre oscillent entre  $6,09E-06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $9,91E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une moyenne de  $1,52E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

D'une manière générale, les transmissivités corrigées au niveau de l'ensemble de la zone d'étude (124 forages) s'intègrent dans l'intervalle  $[6,09E-06 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}; 9,91E-04 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}]$ , elles s'échelonnent sur 3 ordres de grandeur mettant en évidence l'hétérogénéité du milieu. Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats des transmissivités corrigées et non corrigées.

**Tableau 1** : *synthétique des valeurs de transmissivités déterminées sur des forages isolés de la région de Korhogo*

		1 & 2 Paliers	3 Paliers	Zone d'étude
TD ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	Minimum	5,90E-06	1,92E-05	5,90E-06
	Maximum	7,27E-04	1,32E-04	7,27E-04
	Moyenne	1,19E-04	6,61E-05	1,10E-04
	Ecart type	1,46E-04	3,19E-05	1,35E-04
TDc ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	Minimum	6,09E-06	2,20E-05	6,09E-06
	Maximum	9,91E-04	1,88E-04	9,91E-04
	Moyenne	1,52E-04	8,01E-05	1,39E-04
	Ecart type	1,96E-04	4,35E-05	1,82E-04

#### III-4. Evaluation des effets des pertes de charges quadratiques sur la transmissivité

L'analyse des valeurs de transmissivités non corrigées ( $5,90E-06 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  à  $7,27E-04 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) et corrigées ( $6,09 \text{ E}-06$  à  $9,91E-04 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) montre que la valeur de la transmissivité déterminée sur forage isolé est influencée par l'effet des pertes de charges quadratiques occasionné par le pompage. En effet, les transmissivités non corrigées (TD) sont d'une manière générale plus faibles que les valeurs corrigées (TDc). En d'autres termes, l'influence induit une sous évaluation de la valeur de la transmissivité. L'essentiel des incertitudes sur ces valeurs oscillent entre 3 à 57 %. Seul un point a une incertitude de 57 %, c'est donc une valeur particulière parce qu'elle est isolée de l'ensemble des résultats et peut être supprimée pour conserver une certaine continuité des valeurs d'incertitudes affectant la transmissivité déterminée sur les forages isolés.

Les incertitudes oscillent donc 3 à 27 %. Bien que les incertitudes enregistrées ne soient pas trop importantes d'une manière générale, elles ne

doivent pas être cependant négligées. Les pertes de charges quadratiques ont donc un effet certain sur la valeur de la transmissivité calculé à partir des rabattements non corrigés d'un forage isolé. Les forages au niveau desquels les incertitudes sur la transmissivité sont importantes correspondent généralement aux forages à gros débits. Au niveau de l'ensemble des forages, la classe d'incertitude [10 ; 20] affecte 56 % des forages et les classes ]0 ; 10] et [20 ; 30] concernent respectivement 21 et 22 % des forages. D'une manière générale, plus de la moitié des forages à des incertitudes inférieures à 20 %.

### III-5. Le débit spécifique (Q/s)

Les valeurs du débit spécifique (Q/s) déterminées après correction du rabattement oscillent entre 2,85E-02 et 1,98 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> avec une moyenne de 3,25E-01 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>. Ces valeurs s'échelonnent sur trois ordres de grandeurs. Seuls 6 forages ont un débit spécifique supérieur à 1 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> soit environ 4,96 % des forages étudiés. Le débit spécifique calculé dans la région de Korhogo sur les différents forages est d'une manière générale faibles à l'instar des autres régions de Côte d'Ivoire.

### III-6. Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques : la transmissivité et le débit spécifique

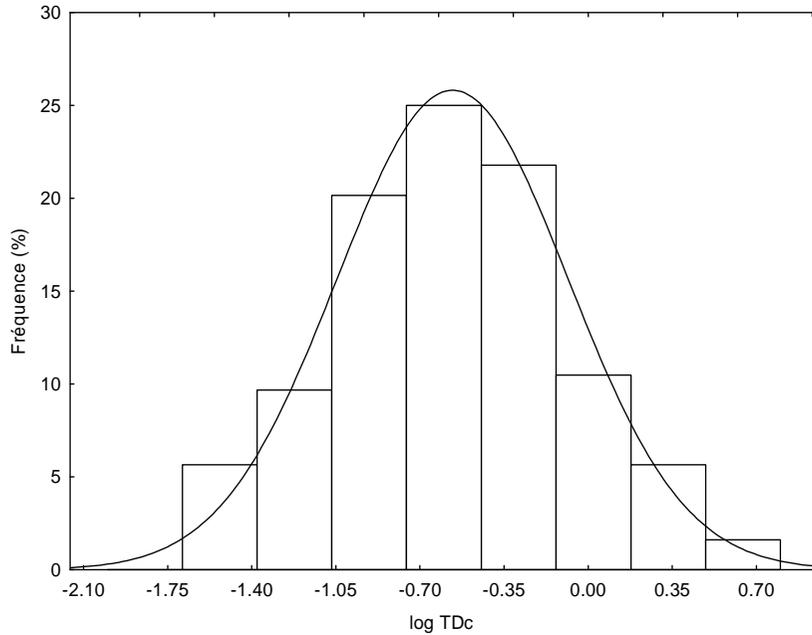
La transmissivité (TDc) et le débit spécifique (Q/s) ont été analysés d'un point de vue statistique. Les fréquences de distribution de ces deux paramètres sont illustrées dans un diagramme arithmétique (*Figures 8 et 9*). Ces deux paramètres sont distribués suivant la loi lognormale. En effet, le test de conformité du Khi-deux est satisfait au seuil de signification de 10 %. La relation existant entre ces deux paramètres a été étudiée (*Figure 10*). Les différents points s'alignent suivant une droite sur laquelle il est possible d'ajuster une droite de régression. Cette droite a pour équation (8) :

$$\text{TDc} = 1,591 \text{ Q/s}^{1,144} \quad (\text{R}^2 = 0,992) \quad (8)$$

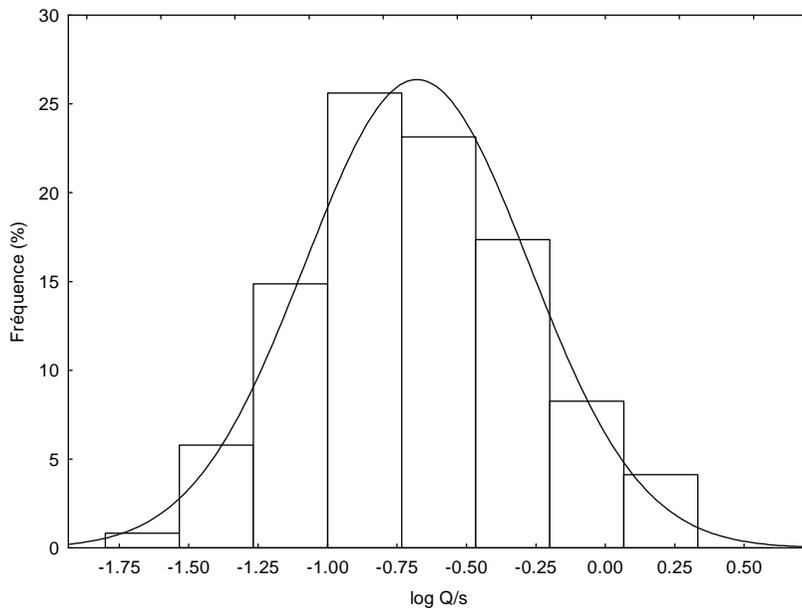
avec TDc et Q/s exprimée en m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>.

Lorsque TDc et Q/s sont exprimées en m<sup>2</sup>.j<sup>-1</sup>, l'équation 8 peut être écrite sous la forme :

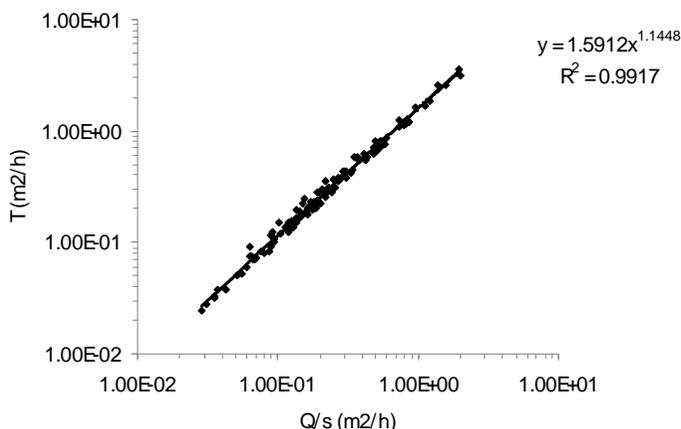
$$\text{TDc} = 1,004 \text{ Q/s}^{1,144} \quad (9)$$



**Figure 8 :** *Fréquence de distribution de la transmissivité (log TDc) dans la région de Korhogo dans un diagramme arithmétique*



**Figure 9 :** *Fréquence de distribution du débit spécifique (log Q/s) dans la région de Korhogo dans un diagramme arithmétique.*



**Figure 10** : Relation entre la transmissivité ( $T_{Dc}$ ) et le débit spécifique ( $Q/s$ ) dans un diagramme bilogarithmique

#### IV - DISCUSSION

Les valeurs de transmissivité déterminées à partir des pompages sur des forages isolés dans la région de Korhogo oscillent sur plus de 3 ordres de grandeur mettant en évidence l'hétérogénéité du milieu. Cette hétérogénéité est moins marquée comparativement aux régions de Man-Danané et Bondoukou [17, 18].

L'absence de piézomètres d'observation au niveau des forages de socle ne laisse aucune alternative que d'utiliser les données des essais de pompages réalisés sur les forages isolés pour la détermination de la transmissivité. Les rabattements issus de la descente dans le cas d'un pompage sur un forage isolé ne sont exploitables pour la détermination de la transmissivité que si ceux-ci sont corrigés de l'influence des pertes de charge quadratiques. En Côte d'Ivoire, certains auteurs [6, 30, 31] ont utilisé ces rabattements pour calculer la transmissivité, malheureusement les différentes valeurs de transmissivité sont entachées d'incertitudes et ne peuvent être utilisées pour la modélisation des écoulements souterrains qui nécessite des données fiables. Afin de s'affranchir de l'effet des pertes de charges, plusieurs auteurs [9, 18, 24, 25, 32,] ont utilisé les rabattements issus de la remontée pour la détermination de la transmissivité. L'approche développée dans le cadre de ce travail permet d'obtenir des valeurs de transmissivités plus fiables déterminées à partir de plusieurs points de mesures, après correction du rabattement. L'intérêt d'utiliser les données de la descente réside effectivement dans le nombre de points de mesure généralement plus important que celui de la

remontée, pris en compte dans la détermination de la transmissivité du fait de la durée de l'observation.

La gestion et l'exploitation des ressources en eaux souterraines nécessitent une meilleure connaissance des propriétés hydrodynamiques et hydrauliques des aquifères lesquelles contrôlent l'écoulement des eaux souterraines. En effet, obtenir des paramètres hydrogéologiques fiables est l'un des défis majeurs dans la modélisation des eaux souterraines. Il apparaît donc évident que la correction des valeurs du rabattement est importante pour l'obtention des valeurs de transmissivité plus fiables.

Les valeurs de transmissivité obtenues après correction des rabattements sont en accord avec celles obtenues par différents auteurs dans d'autres régions de socle de Côte d'Ivoire et d'Afrique de l'Ouest [1, 3, 6, 8, 9, 17, 18, 22, 23].

Les valeurs du débit spécifique sont majoritairement faibles, ceci est une caractéristique des programmes d'hydraulique villageoise [3, 17]. Les forages dans les programmes d'hydraulique villageoise sont implantés sous des considérations géomorphologiques sans des études plus poussées et fines [3, 17]. En effet, pour l'approvisionnement des populations rurales, les gros débits ne sont pas recherchés [6, 30]. La géophysique n'intervient que lorsque le taux d'échec est important [3, 17]. Les valeurs du débit spécifique peuvent être améliorées en entreprenant des études plus poussées et fines impliquant la télédétection (images satellitaires et radars, photographies aériennes) et la géophysique. L'analyse statistique de ces deux paramètres indiquent qu'ils sont distribués suivant la loi lognormale, ce qui est en accord avec les données de la littérature [18, 23, 33-36].

Plusieurs auteurs [23, 33, 34, 36, 37] se sont intéressés à la relation empirique existant entre ces deux paramètres importants. Une compilation des différentes relations empiriques obtenues dans différents milieux a été réalisée par [21, 23, 38].

La relation existant entre la transmissivité (TDc) et le débit spécifique (Q/s) obtenue dans le cadre de cette étude (*équation. 3*) pour la région de Korhogo reste significative dans la mesure où les valeurs de ces deux paramètres s'échelonnent sur plusieurs ordres de grandeurs [23]. Le coefficient de détermination  $R^2 = 0,991$  indique que le test est satisfaisant. [39] indiquent que les expressions empiriques pour des environnements géologiques similaires peuvent être différentes impliquant que ces relations sont spécifiques aux sites étudiés. Cette relation pourrait dépendre aussi de la méthode de détermination de la transmissivité et du débit spécifique Q/s [38]. La relation empirique varie en fonction des contextes hydrogéologiques, de la profondeur des ouvrages et la pénétration partielle du puits [21, 23, 38, 39]. L'utilisation des débits spécifiques non corrigés de pompage sur forage isolé

peut influencer la relation T et Q/s et par conséquent sous estimer les valeurs de transmissivités.

Pour réduire l'effet des pertes de charges turbulentes (quadratiques) dans le puits, [20, 21] suggèrent d'utiliser les faibles débits de pompage et les rabattements correspondants pour calculer le débit spécifique (Q/s). En effet, plus le débit est important plus l'influence des effets des pertes de charges quadratiques deviennent importants. Ces effets augmentent graduellement avec le débit. [39] soulignent que lorsque les rabattements sont corrigés, les différents points de mesures dans le diagramme bi-logarithmique sont moins dispersés et la corrélation est beaucoup plus importante que celle des rabattements non corrigés. En effet selon ces auteurs, les rabattements corrigés fournissent une estimation de la transmissivité (T) et la perméabilité (K) plus robuste avec une meilleure corrélation que les valeurs non corrigées. [40]. indiquent que l'estimation de la transmissivité (T) basée sur le débit spécifique apparaît comme une approche utile pour les cas où la transmissivité est impossible à déterminer ou n'est pas disponible, c'est-à-dire dans les cas où les données de rabattements en régime transitoire ne sont pas disponibles au cours du pompage dû à une stabilisation précoce du rabattement. A Korhogo, les rabattements ont été corrigés avant l'évaluation du débit spécifique et de la transmissivité. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont donc cohérentes et plus fiables et peuvent être utilisés pour entreprendre la modélisation des ressources en eau souterraine.

## V - CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus au terme de cette étude sont résumés ci-dessous :

- Les transmissivités corrigées et non corrigées oscillent respectivement entre  $6,09E-06$  et  $9,91E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et entre  $5,9E-06$  et  $7,27E-04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .
- L'analyse des deux types de transmissivité montre que l'effet des pertes de charges quadratiques sur les transmissivités a tendance à sous-estimer ce paramètre hydrodynamique ;
- Les transmissivités déterminées sont plus fiables, cohérentes et sont en accord avec les valeurs rencontrées dans les autres régions de zone de socle de Côte d'Ivoire et Afrique de l'Ouest ;
- La relation empirique entre la transmissivité (TDc) et le débit spécifique (Q/s) est de type  $\text{TDc} = 1,591 \text{ Q/s}^{1,144}$  ;
- Cette relation est caractéristique de la région de Korhogo et ne peut être étendue à d'autres régions de Côte d'Ivoire même de caractéristiques hydrogéologiques similaires.

- Les valeurs de transmissivités et de débits spécifiques obtenues après la correction du rabattement mesuré sur les forages isolés sont cohérentes et fiables.
- La compréhension des propriétés hydrodynamiques de ces aquifères complexes est à présent bien meilleure, ce qui permet d'envisager une gestion optimale de leurs ressources à l'aide de modèles numériques.

Cette approche si elle est vérifiée sur d'autres sites sera un élément important dans la recherche d'une meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques en zones de socle fissuré de Côte d'Ivoire. Cette étude a montré que les pertes de charges quadratiques ont un effet certain sur la transmissivité déterminée sur les forages isolés qui ne peut être négligé dans l'évaluation de ce paramètre.

En perspectives à ce travail, il sera possible de compléter la caractérisation hydrodynamique des réservoirs fissurés afin d'entreprendre la simulation numérique des écoulements souterrains dans les aquifères de socle de la région de Korhogo.

## RÉFÉRENCES

- [1]- FAILLAT J. P., LEBLOND P., Premiers résultats des essais menés sur une station de pompage expérimental en Côte d'Ivoire, Doc. B.R.G.M. 45 (1982) 301-314.
- [2]- SAVADOGO A. N., Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili, Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université, Grenoble 1, Inst. Dolomieu, France (1984) 350 p.
- [3]- FAILLAT J. P., Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest), *Hydrogéol.* 1 (1986) 65-76.
- [4] - FAILLAT J. P., Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'ouest), *Hydrogéol.* 2 (1987) 109-112.
- [5] - FAILLAT J. P., DROGUE C., Influence de l'effet d'échelle, de l'hétérogénéité et de la connexité des aquifères fissurés sur le comportement des forages en zone de socle (Afrique de l'Ouest), *J. Hydrol.* 90 (1987) 159-182.
- [6]- BIEMI J., Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de doctorat d'Etat *ès* Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire (1992) 493 p.

- [7] - K. F. KOUAME, Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse 3ème cycle, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), (1999) 194 p.
- [8] - JOURDA J.P., Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'Hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire (2005) 429 p.
- [9] - YOUAN TA M., Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire (2008) 236 p.
- [10]- JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUE E. V., KOUAME K. J., BIEMI J., RAZACK M., Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation, *Télédétection*, Vol. 5, 04 (2006) 339-357.
- [11]- J. P. JOURDA, E. V. DJAGOUE, K. KOUAME, M. B. SALEY, C. GRONAYES, J. J. ACHY, J. BIEMI ; M. RAZACK, Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat, *Télédétection*, Vol. 6, 02 (2006) 123-142.
- [12]- GUPTA C. P., On analysis of step drawdown test data, *Ground Water*, Vol. 27, 06 (1989) 874-880.
- [13]- KAWECKI M. W., Recovery analysis from pumping tests with stepped discharge, *Ground Water*, Vol. 31, 04 (1993) 585-592.
- [14]- KAWECKI M. W., Correction for temperature effect in the recovery of a pumped well, *Ground Water*, Vol. 33, 06 (1995) 917-926.
- [15]- BANGOY L. M., Hydrodynamique d'un site expérimental en aquifère de socle fissuré, nouvelle méthode des interprétations hydrauliques, Thèse Université, Montpellier II, France (1992) 138 p.
- [16]- BANGOY M. L., DROGUE C., Analysis of intermittent pumping test in fissured fractal aquifers: theory and applications, *J. Hydrol* 158 (1994) 47-59.
- [17]- LASM T., Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen), Thèse de doctorat, Université, Poitiers, France (2000) 274 p.

- [18]- LASM T., RAZACK M., YOUAN TA M., Geostistical analysis of the transmissivity in fissured reservoirs of Bondoukou Region (northeast, Côte d'Ivoire). *in the IAH-Selected Papers book series titled : Applied Groundwater Studies in Africa - Segun Adelana, Alan MacDonald, Tamiru Alemayehu & Callist Tindimugaya (editors); Publishers: Taylor & Francis, The Netherlands (2008) 473-485.*
- [19]- COOPER H., JACOB C., A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 27, 04 (1946) 526-534.*
- [20]- FRANSSON A., Characterisation of fracture geometry using specific capacities: numerical and experimental study of a fracture replica, *Bull. Eng. Geol. Env.* 60 (2001) 139-144.
- [21]- SRIVASTAVA S. K., LUBCZYNSKI M.W., BIYANI A. K., Upscaling of transmissivity, derived from specific capacity : a hydrogeomorphological approach applied to the Doon Valley aquifer system in India, *Hydrogeol. J.* 15 (2007) 1251-1264.
- [22]- LASM T., KOUAME F., OGA M. S., JOURDA J. R. P., SORO N., KOUADIO H. B., Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire), *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* 5 (2004) 97-115.
- [23]- RAZACK M., LASM T., Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast), *J. Hydrol.* 325 (2006) 164-178.
- [24]- AHOUSSE, K. E., Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville, Thèse de doctorat, Université de Cocody Abidjan (2008) 270 p.
- [25]- SORO G., Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou, Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire (2010) 257 p.
- [26]- THEIS C. V., The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of the well using ground-water storage, *Trans. Am. Geophys. Union* 16 (1935) 519-524.
- [27]- KOUAKOU O. S., T. LASM, D. BAKA, M. S. OGA, M. YOUAN TA, O. Z. DE LASME, N. SORO, Détermination de l'effet des pertes de charges sur la transmissivité issue des pompages d'essai dans les forages isolés. Application à la région d'Agnibilékrou (Est de la Côte d'Ivoire), *5<sup>ème</sup> Congrès de l'AAWG (2010.)*, Bassam, Abidjan-Côte d'Ivoire.
- [28]- CASTANY G., Hydrogéologie. Principes et méthodes, Dunod, Paris (1982) 236 p.

- [29]- FORKASIEWICZ J., Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données, Doc. B.R.G.M., Orléans (1978).
- [30]- SORO N., Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Bassin versant de la Mé, Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université, Grenoble 1, Institut Dolomieu, France (1987) 218 p.
- [31]- SAVANE I., Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université, Cocody, Côte d'Ivoire (1997) 322 p.
- [32]- SORO N., LASM T., KOUADIO B. H., SORO G., AHOUSSE K. E., Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan, *Sud Sci. Technol.* 12 (2006) 30- 40.
- [33]- AHMED S., De MARSILY G., Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity, *Water Resour. Res.*, Vol. 23, 09 (1987) 1717-1737.
- [34]- RAZACK M., HUNTLEY D., Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer, *Ground Water*, Vol. 29, 06 (1991) 856-861
- [35]- FABBRI P., Transmissivity in the geothermal Euganean Basin : A geostatistical analysis, *Ground Water*, Vol. 35, 05 (1997) 881-887.
- [36]- JALLUDIN M., RAZACK M., Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the republic of Djibouti (Horn of Africa), *Hydrogeol. J.*, Vol. 12, 02 (2004) 159-170.
- [37]- ABOUFIRASSI, M. MARINO M.A., Cokriging of aquifer transmissivity from field measurements of transmissivity and specific capacity, *Math. Geol.* Vol. 16, 01 (1984) 19-35.
- [38]- ROTZOLL K., EL-KADI A. I., Estimating hydraulic conductivity from specific capacity for Hawaii aquifer, USA, *Hydrogeol. J.* 16 (2008) 969-979.
- [39]- HAMM S.T., CHEONG J.Y., JANG S., JUNG C.Y., KIM B.S., Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea, *J. Hydrol.* 310 (2005) 111-121.