



## FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES DISCONTINUS DE LA REGION D'ABIDJAN-AGBOVILLE (SUD DE LA COTE D'IVOIRE)

**Kouassi Ernest AHOUSSE<sup>1†</sup> --- Yao Blaise KOFFI<sup>2</sup> --- Amani Michel KOUASSI<sup>3</sup> --- Gbombélé SORO<sup>4</sup> --- Nagnin SORO<sup>5</sup> --- Jean BIEMI<sup>6</sup>**

<sup>1,2,4,5,6</sup> Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM); 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup> Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 Yamoussoukrou, Côte d'Ivoire

### ABSTRACT

The region of Abidjan-Agboville, in spite of an abounding haste and the existence of a water-bearing system constituted by the two main hydrogeological units of the Côte d'Ivoire, knows numerous problems of supply with water. This study offers to know hydrodynamic functioning of water-bearing discontinuous of the region of Abidjan-Agboville. This study uses the method of Theis and Jacob for the counting of the hydraulic parameters of the water-bearing of plinth and statistical multivariate method. The flow rates of wells range from 0.20 to 18m<sup>3</sup>/h, with an average of 4.03m<sup>3</sup>/h. Average flows at high flow rates represent 47% of the drilling operation. Half of the recorded flows greater than 2.5m<sup>3</sup>/h and acceptable to the village water. The specific flow rates are low and vary from 0.02 to 3.26m<sup>3</sup>/h/m, among these, 91.85% are less than 1m<sup>3</sup>/h/m. The results of this study show that transmissivities of the water-bearing varies from 1.6.10<sup>-6</sup> to 1.11.10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>/s, with an average of 1.12.10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/s. The permeability of the water-bearing ranges from 2.25.10<sup>-8</sup>m/s to 9.29.10<sup>-5</sup>m/s. The slaty fields are the most productive than granite fields with stocks of permeability which wobble between 2.77.10<sup>-8</sup>m/s and 9.29.10<sup>-5</sup>m/s. The hydrodynamic parameters of the water-bearing are represented by the law of lognormale distribution. The most important debit sides of working are acquired from the thicknesses of impairment consisted of between 10 and 50m. In the area, the productiveness of aquifers is influenced by the transmissivity, permeability, the debit side of working and the specific debit side. The accessibility of groundwater is linked to bored complete depth and to thickness of the zone of impairment.

**Keywords:** Groundwater, Productivity, Rock and mineralization.

Received: 31 March 2013/ Revised: 18 June 2013/ Accepted: 22 June 2013/ Published: 26 June 2013

## 1. INTRODUCTION

La Côte d'Ivoire, à l'instar des autres états africains est confrontée dans ces dernières décennies à d'énormes problèmes d'eau. Pour cela, l'Etat de Côte d'Ivoire s'attelle à doter ces différentes populations d'infrastructures hydrauliques adéquates. Les infrastructures réalisées par l'Etat ivoirien depuis les années 1970 ont été insuffisantes et le manque d'étude complète lors de l'implantation de ces ouvrages a entraîné de nombreux problèmes lors du fonctionnement de ceux-ci. La région d'Abidjan-Agboville est confrontée à ces problèmes d'eau qui sont récurrents dans la zone de socle. Dans cette zone, les eaux de surface sont couramment utilisées pour l'alimentation en eau potable des populations (cas de la ville d'Agboville depuis l'indépendance). Cependant, depuis ces dix dernières années, la qualité de l'eau de la rivière Agbô soumise à l'eutrophisation s'est considérablement dégradée au point que les traitements ordinaires n'arrivent plus à purifier l'eau (N'GO *et al.*, 2005). La qualité de l'eau de robinet cause régulièrement des désagréments aux populations. Pour résoudre ce problème, les récentes études sont orientées vers l'utilisation des eaux des nappes de fractures pour une alimentation durable des populations. L'exploitation des eaux souterraines en zone de socle pose un problème de pérennisation de l'aquifère. En effet, les aquifères du socle qui sont constitués de roches cristalline et cristallophyllienne sont des réserves isolées généralement pas importantes. Les différentes études ont montré que ces aquifères peuvent constituer des réserves d'eau souterraine qui présentent souvent l'avantage d'être à l'abri des fluctuations saisonnières et des éventuelles pollutions accidentelles (Faillat, 1986; Biémi, 1992; Lasm, 2000; Jourda, 2005; Youan Ta, 2008). Il y a donc nécessité de mieux connaître ces réservoirs fracturés car leur importance hydrogéologique est considérable. L'exploitation de ces aquifères de socle à faible conductivité hydraulique n'est pas aisée (Lachassagne *et al.*, 2011). Pour répondre à cette question, de nombreuses études ont été réalisées sur ce milieu de socle par plusieurs auteurs tels que Dewandel *et al.* (2010), Marechal *et al.* (2010) et Lachassagne *et al.* (2011). Compte tenu de l'aspect complexe du milieu fracturé, plusieurs propositions de modèles conceptuels ont été mis en place parmi lesquels celui de Wyns *et al.* (2004) est couramment étudié. La réalisation des ouvrages hydrauliques dans les aquifères de socle coûte d'importantes sommes à l'Etat ivoirien et le taux d'échec est très élevé, d'où la nécessité d'optimiser les possibilités de captage de ces nappes de fractures. La présente étude a été initiée pour identifier les principaux paramètres hydrauliques déterminants dans la productivité des nappes de fractures de la région d'Abidjan-Agboville. Une telle démarche est rendue complexe par le caractère discontinu des milieux fissurés dans lesquels sont contenues les eaux souterraines aquifères. Ainsi, la complexité des écoulements des eaux dans les terrains géologiques a entraîné la mise au point de plusieurs méthodes d'interprétation des données de forages et des pompages d'essai dont celui de Cooper-Jacob qui sera utilisée pour la détermination des paramètres hydrodynamique de l'aquifère.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 Site d'étude

#### 2.1.1 Cadres climatique et géologique

La région d'Abidjan-Agboville est située au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°30 et 6°00 Nord et les longitudes 3°30 et 4°20 Ouest (figure 1). Le climat de la région est de type équatorial dans la zone littorale, tropical humide vers Agboville. Le régime pluviométrique est influencé par le déplacement du front intertropical. Cette région est une zone pluvieuse, avec des précipitations interannuelles moyennes supérieures à 1500 mm. Elle est caractérisée par quatre saisons dont deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La végétation varie de la forêt claire sur le littoral au Sud à la forêt dense sempervirente et ombrophile vers le Nord de la région. La région renferme également un réseau hydrographique très dense composé du fleuve Comoé et des rivières Mé et Agnéby ainsi que leurs affluents.

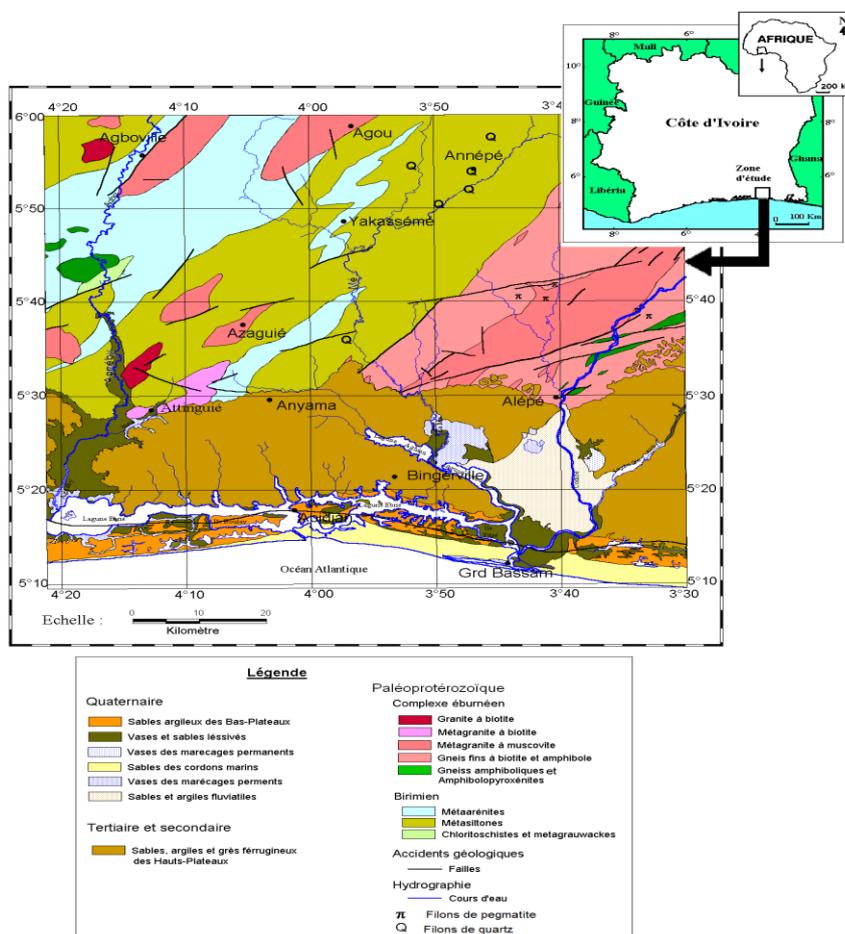
La géologie de la région est marquée par un ensemble formé de deux unités géologiques dont le bassin sédimentaire situé au Sud et le socle cristallin au Nord, constitué de roches volcano-sédimentaires. Les formations du socle qui affleurent dans la région sont attribuées au Paléoproterozoïque et définissent le cycle de dépôt birimien (Delor *et al.*, 1992). Le socle cristallin est constitué de formations birimiennes qui sont les schistes, les métaarénites et les métasiltstones. Dans ces formations, apparaissent en intrusions des granitoïdes éburnéens composés de gneiss, de granites, de granito-gneiss, auxquels sont associées des auréoles de métamorphisme. Le socle est de manière générale incliné du Nord au Sud en direction de l'Océan Atlantique, avec une pente qui varie entre 6 et 9%.

Les épaisseurs d'altérites varient de 2,2 m à 66 m, avec une moyenne de 24,47 m. Les épaisseurs d'altérites les plus fréquentes se situent dans l'intervalle de 10 m à 30 m, avec une probabilité de 67,58%. L'épaisseur d'altération sur terrain granitique varie entre 2,2 et 47 m, avec une moyenne de 21,51 m. En zone granitique, l'altération couramment rencontrée varie de 10 à 30 m. La plupart des forages exploités sur terrain granitique captent une épaisseur d'altérites d'environ 40 mètres. Sur les terrains schisteux, l'épaisseur moyenne d'altération est de 27,03 m, soit 5 m de plus que sur le granite.

#### 2.1.2 Contexte hydrogéologique

Les aquifères du socle occupent les terrains granito-gneissiques et schisteux et représentent environ 70% de la superficie de la zone d'étude. En fonction du comportement hydrogéologique et de la nature lithologique des roches, l'on différencie deux types d'aquifères : l'aquifère d'altérites et celui de fractures. Dans la région d'Anyama jusqu'Agboville, se développent des couches d'altérites au-dessus des terrains de socle cristallin et cristallophyllien (figure 2). Dans la région, les épaisseurs d'altérites peuvent atteindre par endroit 70 m d'épaisseur. Ces produits issus de l'altération du substratum peuvent recéler des nappes d'eau importantes. Ces nappes d'altérites sont les plus exploitées par les puits modernes et villageois avec des profondeurs qui dépassent rarement 20 mètres (figure 3).

Figure-1. Carte géologique de la région d'Abidjan-Agboville

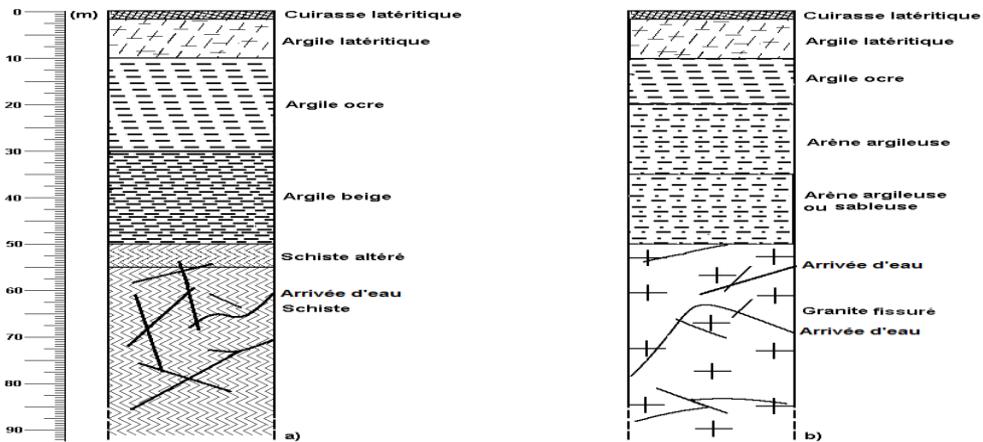


Les aquifères d'altérites sont généralement formés par des couches géologiques qui sont composées de haut en bas, de cuirasse latéritique, de sable argileux et d'arènes grenues. Les nappes d'altérites sont caractérisées par un niveau piézométrique proche de la surface du sol. Elles reçoivent directement les précipitations et sont caractérisées par un rabattement excessif du niveau piézométrique en saison sèche et une recharge immédiate en période de pluie ; ce qui pose le problème de pérennité de celles-ci (Biémi, 1992). La réserve d'eau dans les aquifères d'altérites est fonction de plusieurs paramètres tels que la perméabilité, l'épaisseur des altérites et l'extension de l'altération, mais aussi de l'évapotranspiration de la région. Compte tenu de leur niveau piézométrique proche de la surface du sol, les nappes d'altérites sont souvent menacées par les activités anthropiques, d'où leur vulnérabilité à la pollution. Elles constituent, cependant une importante réserve hydraulique exploitable par l'intermédiaire de réseau de fissures drainantes communiquant avec elles (Jourda, 1987).

L'aquifère de fractures ou de fissures est l'aquifère principal et le plus productif du fait de l'intense fracturation qui l'affecte. Dans la région, il est intercepté par les nombreux forages et son existence est liée à l'importance des fractures ouvertes. Ils sont formés de petites poches d'eau

isolées les unes à côté des autres. Lorsqu'aux droits de ces fractures, se développent des horizons d'altérites, elles jouent un rôle de drain pour les réserves stockées dans la zone altérée. Ces aquifères peuvent fournir des débits assez importants quand ils sont captés par les forages. Les débits obtenus dans ces aquifères varient entre 0,7 m<sup>3</sup>/h et 10 m<sup>3</sup>/h. Cependant, des débits relativement élevés peuvent être obtenus dans les zones de fractures broyées (plus de 10 m<sup>3</sup>/h). Les aquifères de fractures de la région présentent également une faible transmissivité qui varie entre 10<sup>-4</sup> et 6 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s (Soro, 1987).

**Figure-2.** Profil géologique des formations granitique (a) et schisteuse (b) de la région d'Abidjan-Agboville



**Figure-3.** Quelques ouvrages hydrauliques présents dans la région



a) Puits moderne captant la nappe des altérites



b) Forage à pompe manuel captant la nappe de fractures

La profondeur des arrivées d'eau évaluée à partir de la base des altérites (par rapport au toit de la roche) varie de 10 à 100 m de profondeur. Le nombre d'arrivées d'eau (fissures hydrauliquement actives) enregistré dans les forages est au moins de 2. Cependant, certains ouvrages peuvent avoir plusieurs arrivées d'eau, 3 à 4, voire 5 et même plus. Ces arrivées d'eau ont été observées dans le socle fissuré à différentes profondeurs par rapport au toit de la roche fracturée.

## 2.2 Méthodes

### 2.2.1 Approche hydrodynamique

Cette étude a été réalisée à l'aide des données de forages obtenues sur les fiches techniques de forages mises à notre disposition par la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH). A partir de ces données, les paramètres hydrauliques des aquifères ont été calculés. Pour la détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères discontinus, nous avons utilisé les méthodes mises au point par Theis (1935) et Jacob (1947). La transmissivité a été calculée par la méthode de Cooper-Jacob qui est une méthode couramment utilisée pour le calcul des paramètres hydrodynamiques des nappes en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire par plusieurs auteurs (Biémi, 1992; Savané, 1997; Lasm, 2000; Soro, 2002; Jourda, 2005; Youan Ta, 2008). Les mesures issues des pompages d'essai disponibles sur le terrain sont celles du puits de pompage, faute de piézomètres d'observation. A l'aide de ces données, la transmissivité de l'aquifère peut être évaluée aussi bien par les données de la descente que celles de la remontée.

Dans le premier cas, la valeur de celle-ci serait entachée d'erreurs dues aux incertitudes dans les mesures causées par les pertes de charges quadratiques pouvant atteindre les 50% (Lasm, 2000) dans certains cas (écoulement turbulent dans la pompe). Dans le second cas, la valeur de la transmissivité obtenue est beaucoup plus fiable (régime non influencé). Nous avons donc utilisé les données de la remontée pour la détermination de ce paramètre. Cette démarche est conseillée par Lasm (2000).

La méthode de Jacob est une méthode d'interprétation des données de pompage d'essai qui est basée sur une théorie de base. En effet, c'est une méthode de détermination graphique qui résulte de l'approximation logarithmique de l'équation de Theis (1935). La série infinie ou la fonction de puits  $W(u)$  a été tronquée d'après le deuxième terme.

$$W(u) = \gamma - \ln(u) = -\gamma - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) \quad (1)$$

L'expression du rabattement à l'instant  $t$  est définie par l'équation suivante :

$$S(t) = \frac{Q}{4\pi T} (\ln e^{-\gamma} - \ln(u)) = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{e^{-\gamma}}{u}\right) \quad (2)$$

En substituant  $u$  et  $\gamma$  par leur expression respective dans l'équation précédente. On obtient l'égalité connue sous le nom d'équation de Jacob :

$$S(t) = \frac{r^2 S}{4Tt} \ln\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad (3)$$

avec :

$s$  : le rabattement exprimé en un temps  $t$ , exprimé en m ;

$T$  : la transmissivité exprimée en  $m^2/s$  ;

$S$  : le coefficient d'emmagasinement, sans dimension ;

$T$  : le temps écoulé depuis le début du pompage, exprimé en s ;

$Q$  : le débit de pompage en  $m^3/s$

Cette méthode n'est applicable que si la valeur de  $u$  est inférieure à 0,01. Lorsque dans certains cas, les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions, cette situation n'empêche pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages. Ces méthodes donnent des résultats significatifs et représentatifs des aquifères quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques (Kruseman and De Ridder, 1991).

### 2.2.2 Détermination graphique de la transmissivité

#### Par la remontée

L'expression du rabattement est donnée par l'équation suivante :

$$S(t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{u'}{u}\right) = \frac{2,3Q}{4Tt} \log\left(\frac{t}{t'}\right) = 0,183 \frac{Q}{T} \log\left(\frac{t}{t'}\right) \quad \text{et} \quad u' = \frac{r^2 S}{4Tt'} = u \frac{t}{t'} \quad (4)$$

- $t'$  est le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage ;
- $t$  est le temps à la fin du pompage.

Les tests étant de courte durée, le temps final  $t$  sera remplacé par la moyenne logarithmique pondérée du temps corrigé ( $tm$ ). Il se définit comme étant le temps auquel se serait produit le rabattement dans un certain piézomètre si le débit de pompage était resté constant depuis le début et égal au débit réel au temps  $t$ . Pour le calcul de la moyenne logarithmique pondérée du temps ( $tm$ ), l'on pourra se référer à Kruseman and De Ridder (1991). L'équation de la remontée est la suivante :

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{u'}{u}\right) = \frac{2,3Q}{4Tt} \log\left(\frac{tm}{t'}\right) = 0,183 \frac{Q}{T} \log\left(\frac{tm}{t'}\right) \quad (5)$$

La représentation de la fonction résiduelle  $tm/t'$  sur un papier semi-logarithmique en fonction du rabattement permet de calculer la valeur de la transmissivité de la nappe.

La perméabilité  $K$  est calculée à partir de la relation suivante :

$$T = K * e \quad (6)$$

Dans cette relation,  $T$  est la transmissivité et  $e$  est l'épaisseur de la zone fracturée déduite à partir des logs des forages. Cette technique donne un aperçu général de l'évolution de la perméabilité des aquifères de la région.

### 2.2.2 Approche statistique

#### Méthode de l'Analyse en Composantes Principales

Dans le but de comprendre le fonctionnement global du système aquifère de la région, les données hydrodynamiques ont fait l'objet d'une étude statistique multivariée à partir de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). En effet, l'ACP est une méthode qui est souvent utilisée dans le domaine de l'hydrogéologie par les auteurs tels que Dibi *et al.* (2004), Kouassi *et al.* (2010) et Ahoussi *et al.* (2011) en Côte d'Ivoire avec de bons résultats. Cette analyse a été réalisée à l'aide du

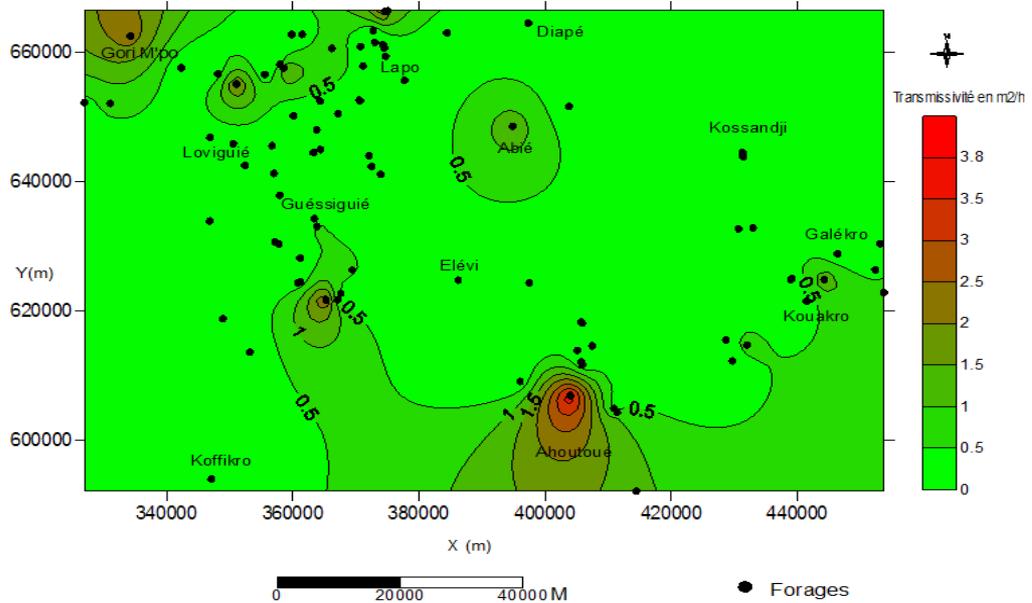
logiciel STATISTICA 6.0, sur 7 variables dont le débit d'exploitation (Q), la transmissivité (T), le débit spécifique (Qsp), le rabattement (S), l'épaisseur d'altération (Ep Alt), la profondeur totale des forages (Pf tot) et l'épaisseur de l'aquifère (Ep Aquif).

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Propriétés hydrodynamiques des aquifères

Les résultats du calcul de la transmissivité des 139 forages montrent que les valeurs de transmissivité observées dans la région varient de  $1,6 \cdot 10^{-6}$  à  $1,11 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, pour une moyenne de  $1,12 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/set un écart-type de  $1,90 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs se subdivisent en trois classes. Il s'agit de la classe des transmissivités faibles ( $< 1 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s), moyennes ( $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s) et la classe des transmissivités fortes ( $> 1 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s). Dans la région, les forages ayant une transmissivité supérieure à  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s représentent 75,54% de l'ensemble des ouvrages étudiés. La distribution spatiale des valeurs de transmissivités converties en m<sup>2</sup>/h montre que les transmissivités faibles occupent toute la partie centrale de la région (figure 4). Au niveau des valeurs les plus élevées, elles sont observées dans le Sud et dans l'extrême Nord-Ouest de la région.

Figure-4. Carte de la distribution spatiale des transmissivités de la zone d'étude



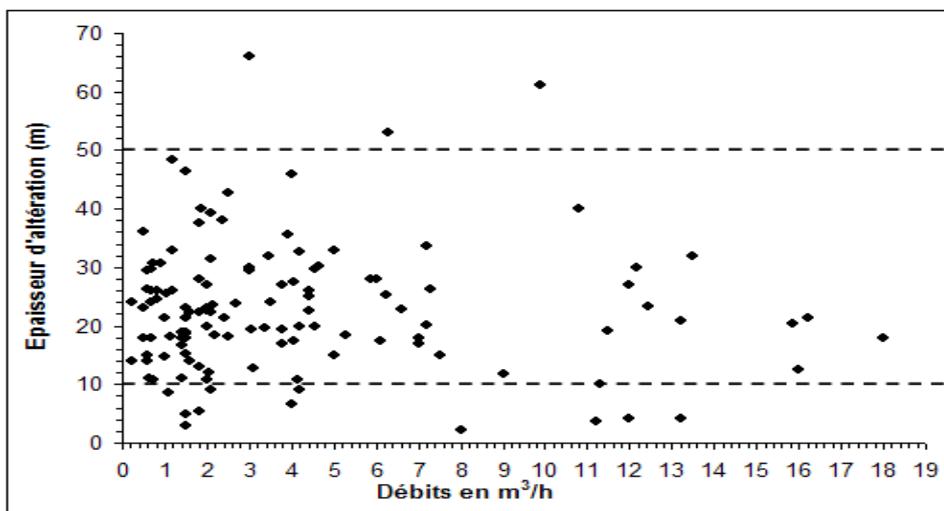
Les Perméabilités des aquifères calculées à partir des logs des forages varient de  $2,25 \cdot 10^{-8}$  à  $9,29 \cdot 10^{-5}$  m/s, pour une moyenne de  $4,76 \cdot 10^{-6}$  m/s, avec un écart-type de  $1,11 \cdot 10^{-5}$ . En fonction de la nature pétrographique des roches, les perméabilités se présentent comme suit :  $2,25 \cdot 10^{-8}$  à  $1,82 \cdot 10^{-5}$  m/s, avec une moyenne de  $3,08 \cdot 10^{-6}$  m/s dans les formations granitiques et  $2,77 \cdot 10^{-8}$  à  $9,29 \cdot 10^{-5}$  m/s, avec une moyenne de  $5,32 \cdot 10^{-6}$  m/s dans les formations schisteuses.

Le nombre d'arrivées d'eau (AE) enregistré dans les forages est au moins de 2, avec cependant, quelques ouvrages qui peuvent avoir plusieurs arrivées d'eau, 3 à 4, voire 5 et même plus.

Les débits rencontrés varient de 0,20 à 18 m<sup>3</sup>/h, avec une moyenne de 4,03 m<sup>3</sup>/h. La classe des débits moyens à forts représente 47% des débits des forages en exploitation dans la région. Cela indique que près de la moitié des débits enregistrés est supérieure à 2,5 m<sup>3</sup>/h et sont donc acceptables pour une alimentation en eau potable (A.E.P.) des populations rurales. Dans la région, près de 53% des forages présentent également un débit faible. Les débits couramment rencontrés se situent dans l'intervalle de 1 à 2,5 m<sup>3</sup>/h (35%). La relation roches et productivité des ouvrages hydrauliques à partir des débits forts ( $Q > 5$  m<sup>3</sup>/h) montre que les gros débits sont observés sur les schistes, avec un pourcentage de 30,65%. Les résultats montrent que les terrains schisteux sont plus productifs que les terrains granitiques.

La répartition de l'épaisseur des altérites en fonction des débits de forage montre que les débits d'exploitation moyens et forts (2,5 m<sup>3</sup>/h) se rencontrent généralement dans les zones où les épaisseurs d'altérites sont comprises entre 10 et 50 m (**figure 5**).

**Figure-5.** Distribution de l'épaisseur des altérites en fonction des débits des forages



Au-delà de 50 m d'épaisseur d'altérites, les débits rencontrés ne sont pas très importants. Dans la région, les débits les plus importants se rencontrent entre 30 et 80 m de profondeur. Au-delà de cette profondeur, les débits deviennent de plus en plus rares car très peu de forages de la région dépassent 100 m de profondeur.

Les débits spécifiques ( $Q_{sp}$ ) calculés sont en majorité faibles et varient de 0,02 à 3,26 m<sup>3</sup>/h/m, avec une moyenne de 0,36 m<sup>3</sup>/h/m et un écart-type de 0,56. Le regroupement des débits spécifiques par classe indique que 91,85% de ces valeurs restent inférieures à 1 m<sup>3</sup>/h/m, soit un effectif de 124. Seulement 4,44% des forages étudiés ont un débit spécifique supérieur à 1 m<sup>3</sup>/h/m, ce dernier demeure inférieur ou égal à 2 m<sup>3</sup>/h/m. Les tests statistiques ont été réalisés suivant

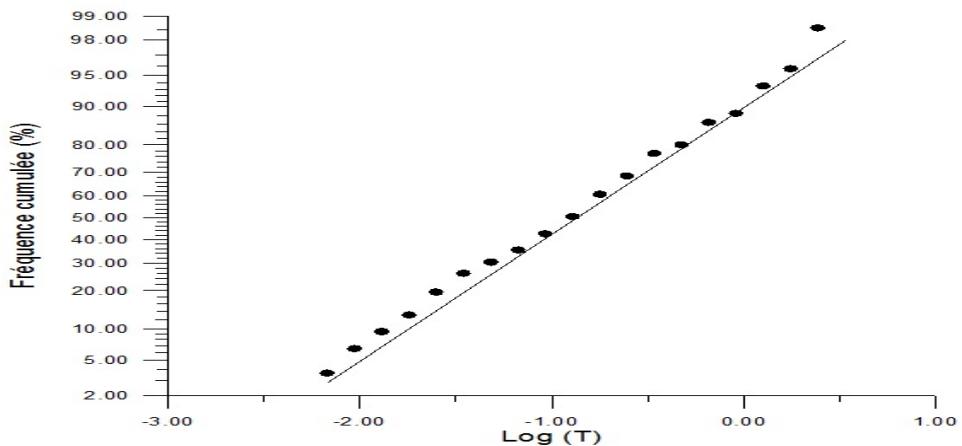
deux lois : la loi exponentielle et la loi lognormale à partir des transmissivités converties en m<sup>2</sup>/h. Le test de khi-2 est négatif pour la loi exponentielle et positif pour la loi lognormale au seuil d'acceptation de 10% (tableau 1). Ces résultats conduisent au rejet de la loi exponentielle pour ne retenir que la loi lognormale pour les transmissivités en zone de socle.

**Tableau-1.** Interprétation statistique des valeurs de la transmissivité, du débit spécifique et de la profondeur hydrauliquement active

Loi de distribution	Paramètres	$\chi^2$ calculé ( $\alpha = 10\%$ )	$\chi$ théorique	$\varrho$	Degré de liberté
Lognormale	T	0,51138	2,71		1
Lognormale	Qsp	3,79094	4,61		2
Lognormale	Ep aquifère	3,83920	6,25		3
Exponentielle	T	10,13176	2,71		1
Exponentielle	Qsp	16,14645	6,25		3
Normale	LogT	8,70384	14,70		9
Normale	Qsp	34,47629	4,61		2
Exponentielle	Ep aquifère	46,09066	7,78		4

L'étude de la distribution statistique des valeurs transformées de T en log(T) a été réalisée pour conforter nos propos. Ainsi, théoriquement un paramètre distribué suivant la loi lognormale voit ces valeurs obéir à la loi normale. La distribution de fréquences des valeurs logarithmiques (logT) présente une forme symétrique similaire à la courbe de Gauss. Le test d'ajustement du khi-2 à la loi normale est positif (tableau 1). Les résultats obtenus montrent que les fréquences observées ne diffèrent donc pas statistiquement des fréquences théoriques. Il existe une conformité entre les fréquences théoriques et empiriques. La distribution des fréquences cumulées en fonction de la transmissivité (figure 6) confirme également que les transmissivités suivent une loi lognormale.

**Figure-6.** Distribution de la fréquence cumulée des transmissivités en zone de socle

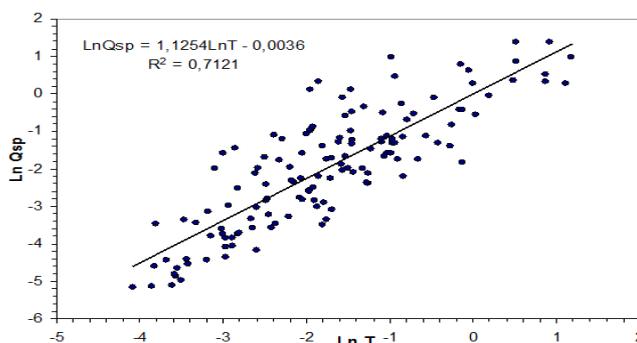


Les différents résultats des ajustements statistiques réalisés sur les débits spécifiques, à l'aide des lois lognormale et exponentielle sont présentés dans le tableau 1. Ceux-ci indiquent que les

débits spécifiques sont également décrits par la loi lognormale. Les résultats de l'ajustement des lois exponentielle et lognormale montrent que le test de khi-2 est positif pour la loi lognormale au seuil de 10% (tableau 1). Cela traduit que la profondeur hydrauliquement active est décrite par la loi lognormale. Ces résultats sont mis en évidence par la distribution similaire à la courbe de Gauss de la distribution des fréquences de profondeur des AE.

L'étude de la corrélation transmissivité et débit spécifique renseigne sur les propriétés hydrauliques des réservoirs. Elle a été réalisée par une transformation bi-logarithmique des variables qui donne un nuage de points dans le diagramme bi-logarithmique (figure 7).

**Figure-7.** Relation entre la transmissivité et le débit spécifique



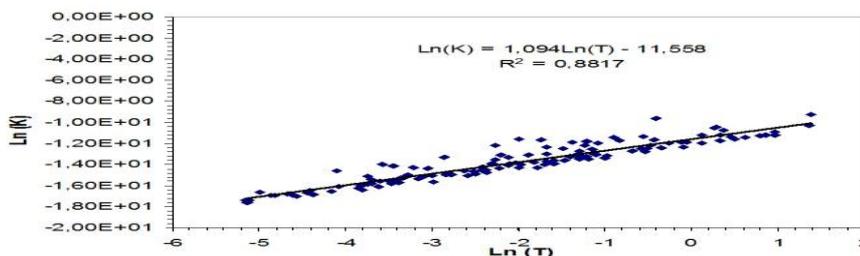
L'usage de la méthode de régression linéaire des moindres carrés a permis de déterminer l'équation de la droite et le coefficient de corrélation (0,72) entre ces deux variables. Ce coefficient de corrélation permet de dire que le test statistique est satisfaisant. La relation qui lie les valeurs transformées de la transmissivité et du débit spécifique est linéaire et peut s'écrire par l'expression suivante:

$$\text{Ln}(Q_{sp}) = 1,125\text{Ln}(T) - 0,0036 \quad \text{et} \quad R^2 = 0,71 \quad (7)$$

Cette relation traduit l'expression de la géométrie des fractures et de leur connexion avec le forage.

L'étude de la corrélation entre la transmissivité et la perméabilité a été également faite par la transformation bi-logarithmique de ces deux variables. Cette transformation donne un alignement des différents points dans le diagramme bi-logarithmique (figure 8).

**Figure-8.** Relation entre la transmissivité et la perméabilité

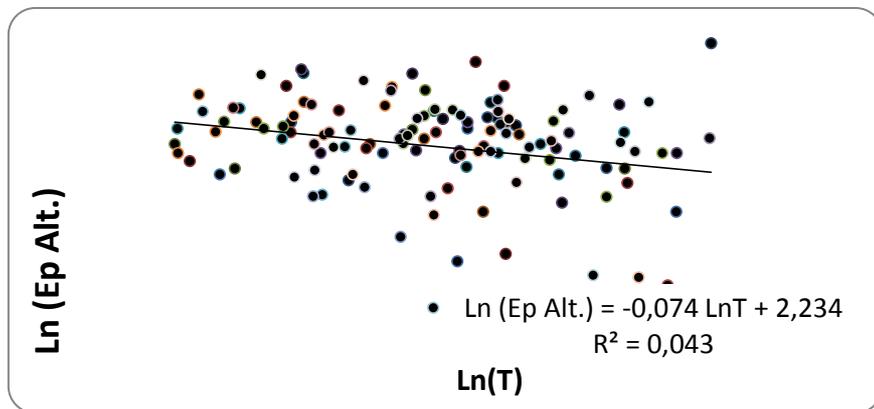


La méthode de régression linéaire des moindres carrés a permis de déterminer l'équation de la droite et le coefficient de corrélation (0,88) entre ces deux variables. Cette corrélation est légèrement supérieure à celle qui existe entre la transmissivité et le débit spécifique. L'importance de la corrélation entre la transmissivité et la perméabilité de l'aquifère permet de dire que le test statique est satisfaisant. La relation qui lie ces deux variables est exprimée par l'équation suivante :

$$\ln(K) = 1,094\ln(T) - 11,56 \quad \text{et } R^2 = 0,88 \quad (8)$$

Aussi, l'étude de la corrélation entre la transmissivité et l'épaisseur d'altération a-t-elle été faite à partir de la transformation bi-logarithmique de ces deux variables. Cette transformation donne un nuage de points dispersés dans le diagramme bi-logarithmique (figure 9). La corrélation entre ces deux variables reste faible (0,043) et traduit une indépendance entre les différentes variables.

Figure-9. Relation entre la transmissivité et l'épaisseur d'altération



### 3.2 Relations entre propriétés hydrodynamiques et paramètres hydrogéologiques

L'application de la méthode de l'Analyse en Composantes Principales aux paramètres hydrauliques et hydrodynamiques des aquifères a donné les résultats ci-dessous. Les facteurs 1 et 2 sont les plus importants. Ils regroupent plus de la moitié de la variance exprimée par le nuage de points et contiennent l'essentiel des informations nécessaires à l'interprétation des données.

#### 3.2.1 Matrice de corrélation

La matrice de corrélation présente les différentes corrélations qui existent entre les variables de l'étude statistique. L'analyse de la matrice de corrélation (tableau 2) met en évidence d'importantes corrélations entre les variables telles que Q-Qsp (0,78), et T-Qsp (0,76).

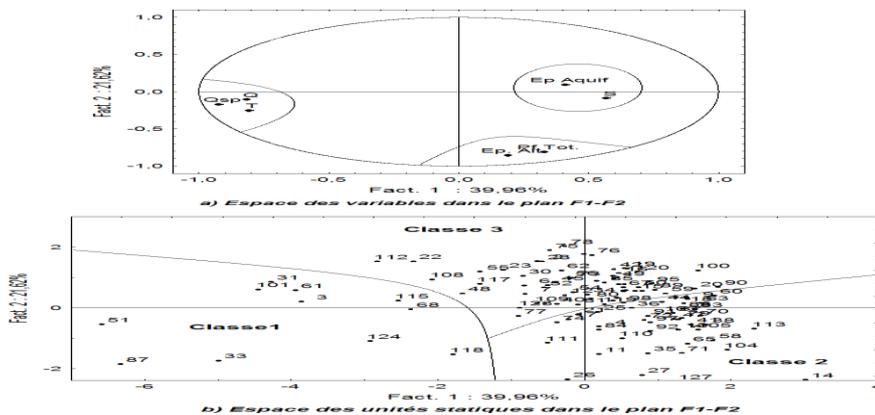
Tableau-2. Matrice de corrélation

	<i>NS</i>	<i>Q</i>	<i>S</i>	<i>Qsp</i>	<i>T</i>	<i>K</i>	<i>Ep Alt</i>	<i>Pf Tot</i>	<i>Ep Aquif</i>
<i>NS</i>	1,00								
<i>Q</i>	-0,22	1,00							
<i>S</i>	0,05	-0,16	1,00						
<i>Qsp</i>	-0,08	0,78	-0,46	1,00					
<i>T</i>	0,07	0,54	-0,44	0,76	1,00				
<i>K</i>	0,29	0,44	-0,30	0,57	0,73	1,00			
<i>Ep Alt</i>	0,64	-0,10	0,13	-0,09	-0,01	0,23	1,00		
<i>Pf Tot</i>	0,54	-0,20	0,21	-0,13	-0,03	0,21	0,55	1,00	
<i>Ep Aquif</i>	0,06	-0,36	0,10	-0,25	-0,17	-0,40	-0,08	0,22	1,00

Ces différentes valeurs de corrélation mettent en évidence l'existence d'une relation entre les paramètres et leur intervention dans la productivité des aquifères de la région.

### 3.2.2 Analyse des plans factoriels

L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 montre que ce plan factoriel est le plus important et représente 61,58% de la variance exprimée, soit plus de la moitié de la variance. Le facteur F1 est le plus important, avec 39,96% de la variance exprimée. Celui-ci est déterminé par *Q*, *Qsp*, *T* et *K* (figure 10a). Ces variables présentent entre elles une forte corrélation de l'ordre de 0,78 entre *Q*-*Qsp* et 0,76 entre *Qsp*-*T*. Cette forte corrélation traduit l'importance du phénomène qui lie ces paramètres dans l'aquifère. Le groupement de ces variables dans la moitié gauche du cercle de communauté témoigne de la forte implication de ces variables dans le fonctionnement de l'aquifère. Ce premier regroupement s'oppose à un second, formé par les variables telles que le rabattement (*S*) et l'épaisseur de l'aquifère (*Ep Aquif*). En effet, les variables qui définissent le facteur 1 interviennent dans le fonctionnement des aquifères de socle. Le facteur F1 exprime donc la productivité hydraulique de l'aquifère. Le facteur F2 (21,62%) est défini par les variables *Ep Alt* et *Pf Tot*. La corrélation visible entre ces variables qui est de 0,55 montre une variation de l'épaisseur d'Altération en fonction de la profondeur totale de l'aquifère. Ce phénomène est également mis en évidence par la proximité de ces variables dans le cercle de communauté (figure 10b). Ces paramètres mettent en évidence l'accessibilité de l'eau dans la nappe. Le facteur F2 qui est défini par ces paramètres explique donc l'accessibilité aux eaux souterraines. L'analyse dans l'espace des unités statiques (US) du plan factoriel F1-F2 permet d'identifier trois grands regroupements des points d'eau (figure 10). La classe 1 renferme tous les points d'eau dont la productivité des aquifères est liée aux paramètres intrinsèques de la nappe. Il s'agit des forages des localités telles que : Anyama, Alépé (Danguira et Allokoï), Agboville (M'bérié et Yapo Gare) et Azaguié (Odoguié et Aké Béfiat). La classe 2 contient les forages dont la productivité est influencée par l'épaisseur d'altération, et la profondeur forée. Ces forages sont situés dans la zone d'Alépé (N'Sankoi Kossandji et Allosso), d'Agboville (Loviguié) et d'Agou (Lobo Opé). La classe 3 regroupe tous les forages influencés par le rabattement et l'épaisseur de l'aquifère. Ce groupe renferme la majeure partie des forages de la région implantés en zone de socle.

**Figure-10.** Analyse factorielle des potentialités hydrogéologiques des aquifères de la région

### 3.3. Discussion

Les conditions d'application de la méthode de Cooper-Jacob sont difficilement atteintes dans le cas d'un aquifère de fractures. Cette méthode nécessite également dans son application des pompages d'essais de longues durées d'au moins 72 heures et d'un piézomètre d'observation. Dans le cadre de cette étude, nous ne disposons que des pompages de courte durée. Le temps de pompage varie de 4 à 24 heures et les mesures ont été réalisées directement dans le forage. L'absence d'un véritable dispositif d'observation de la descente et de la remontée lors du pompage constitue un handicap dans l'application de cette méthode. Les résultats obtenus dans la détermination des paramètres hydrodynamiques donnent un aperçu de leur évolution au niveau de la région d'Abidjan-Agboville. Les différentes valeurs de transmissivité obtenues varient de  $1,6 \cdot 10^{-6}$  à  $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , pour une moyenne de  $1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Elles s'inscrivent dans la même gamme que celles rencontrées sur le socle ivoirien par [Haubert \(1977\)](#), avec des valeurs qui varient de  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  dans la boucle du cacao. [Soro \(1987\)](#) a trouvé des valeurs qui oscillent entre  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  dans le bassin versant de la Mé. Les transmissivités obtenues dans la région d'Abidjan-Agboville évoluent dans le même ordre que ceux obtenus par [Lasm \(2000\)](#) dans l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire. Les transmissivités et les perméabilités les plus importantes se rencontrent sur les terrains schisteux. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par [Dibi \(2008\)](#) dans la région d'Aboisso, ce qui confirme la forte productivité des schistes sur les granites. Cette importance peut s'expliquer par le redressement à la verticale et subverticale des plans de schistosité ([Dibi et al., 2004](#)). En effet, les structures feuilletées et redressées des schistes birimiens qui constituent des zones de moindre résistance, leur confère l'avantage d'être plus transmissifs que les autres formations ([N'GO et al., 2005](#)). A cela, il faut ajouter la présence d'intercalation de carbonate dans les bancs schisteux, la présence de filons de pegmatite et de quartz ([Dibi, 2008](#)). L'hétérogénéité des valeurs des transmissivités a été également constatée par [Soro \(2002\)](#), de  $5,97 \cdot 10^{-6}$  à  $7,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  pour le socle granitique ;  $1,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $2,69 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  sur les métasédiments et métavolcanites de la région de Grand-Lahou. La dispersion des valeurs de transmissivité est conforme aux résultats déjà obtenus dans les formations analogues, aussi bien en Côte d'Ivoire par les auteurs tels que [N'Guessan \(1985\)](#), [Jourda \(1987\)](#), [Soro \(1987\)](#), [Biémi](#)

(1992), Tapsoba (1995), Savané (1997) et Lasm (2000) qu'en Afrique de l'Ouest par Savadogo (1984) et Traoré (1985). Dans la région d'Abidjan-Agboville, comme dans l'Ouest montagneuse de la Côte d'Ivoire, les transmissivités sont décrites par la loi de distribution lognormale. Ces conclusions sont similaires à celles des travaux de Razack et Huntley (1991) et de Fabbri (1997). En effet, selon Jalludin et Razack (2003), ces résultats rendent compte de l'hétérogénéité de l'aquifère et sont importants pour entreprendre une modélisation stochastique future dans l'étude de cet aquifère. Les perméabilités de la région restent faibles et sont caractéristiques des terrains cristallins. Les forages étudiés atteignent rarement la profondeur de 100 m. En effet, en Afrique de l'Ouest, les fractures hydrauliquement actives se referment avec la profondeur (Biémi, 1992). Ainsi, il a proposé des profondeurs de foration à ne pas atteindre dans le socle (80 m dans les granites et 100 m dans les schistes) pour des raisons purement économiques. Les arrivées d'eau les plus productives sont obtenues à partir des trente premiers mètres sous les altérites, ce qui est similaire aux résultats obtenus par Lasm (2000) dans la région de Man-Danané, Soro (1987) dans le bassin versant de la Mé et Biémi (1992) dans la région de la Marahoué. Au-delà de cette profondeur, on assiste à une diminution progressive du nombre d'arrivées d'eau. Les études analogues conduites par certains auteurs (Cairon, 1981; Biémi, 1992) ont montré que les granitoïdes et les schistes étaient reconnus être des roches très productives, quand elles sont fracturées. Ces résultats corroborent ceux de Marechal *et al.* (2010) et Lachassagne *et al.* (2011) qui ont montré que la zone productive en zone de socle est située dans la partie fracturée du profil d'altération. Le modèle conceptuel des aquifères de socle mis en place par Wyns *et al.* (2004) met clairement en évidence la zone de productivité de l'aquifère de socle.

Les débits spécifiques sont faibles (91,85%) et restent inférieurs à 1 m<sup>3</sup>/h/m. Ceux-ci s'apparentent aux résultats obtenus par Faillat (1986) qui montrent que les débits spécifiques en Côte d'Ivoire étaient variables d'une région à l'autre ou d'un programme d'hydraulique à un l'autre, en fonction de la stratégie d'implantation et de la foration. En zone rurale, les programmes d'implantation des forages sont généralement liés aux contraintes économiques, ce qui caractérise les faibles débits spécifiques. Par contre, dans les grandes agglomérations, les recherches sont axées sur les gros débits; ce qui implique des études hydrogéologiques plus poussées. Ces ouvrages se caractérisent par de gros débits spécifiques. L'analyse multivariée montre que les principaux facteurs qui régissent la productivité des forages en milieu de socle sont les paramètres intrinsèques de l'aquifère tels que la transmissivité (T), le débit d'exploitation (Q) et le débit spécifique (Q<sub>sp</sub>). En effet, ces paramètres sont directement liés à la nature de l'aquifère étudié. Ainsi, les aquifères ayant les plus fortes valeurs de transmissivités sont les plus productifs. Les débits d'exploitation les plus élevés y sont rencontrés. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Dibi *et al.* (2004) dans la région d'Aboisso et N'GO *et al.* (2005) dans la région d'Agboville.

#### 4. CONCLUSION

L'étude des paramètres hydrodynamiques et des potentialités hydrogéologiques des aquifères de la région d'Abidjan-Agboville montre que les transmissivités des aquifères varient de  $1,6 \cdot 10^{-6}$  à  $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , avec une moyenne de  $1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . La perméabilité des aquifères oscille entre

$2,25.10^{-8}$  et  $9,29.10^{-5}$  m/s. En zone de socle, les terrains schisteux sont les plus productifs, avec des valeurs de perméabilité qui oscillent entre  $2,77.10^{-8}$  et  $9,29.10^{-5}$  m/s, pour une moyenne de  $5,32.10^{-6}$  m/s. Les aquifères de la région sont hétérogènes, avec des paramètres hydrodynamiques décrits par la loi de distribution lognormale. Les débits d'exploitation les plus importants sont obtenus à partir des épaisseurs d'altération comprises entre 10 et 50 m. L'intervalle compris entre 30 et 80 m de profondeur totale forée influence favorablement la productivité de l'ouvrage hydraulique. Dans cette région, les études statistiques montrent que la productivité des nappes est influencée par la transmissivité (T), le débit d'exploitation (Q) et le débit spécifique (Qsp). L'accessibilité des eaux souterraines est liée à la profondeur totale forée et à l'épaisseur de la zone d'altération.

Funding: This study received no specific financial support.

Competing Interests: The authors declare that they have no competing interests.

Contributors/Acknowledgement: All authors contributed equally to the conception and design of the study.

## REFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahoussi, K., E. , O.Y.M. S., K.Y. B., K.A. M., S. N. and B. J., 2011. Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un centre d'enfouissement technique (cet) de Côte d'ivoire : Cas du cet de kossihouen dans le district d'abidjan (Côte d'ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 5: 2114-2132.
- Biémi, J., 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'ouest Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat Université Nationale de Côte d'Ivoire.
- Cairon, D., 1981. Étude sur les forages d'eau de la boucle de cacao. D.M.G. Abidjan-Côte d'Ivoire.
- Delor, C., D. I. and Y. B., 1992. Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000. 1ère Edn.: Feuille de Grand-Bassam.
- Dewandel, B., P. Lachassagne, R. Wyns, J.C. Marechal and N. S. Krishnamurthy, 2010. A generalized 3-d geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of hydrology, 330: 260-284.
- Dibi, B., 2008. Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'aboisso (sud-est de la côte d'ivoire) apport du SIG et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody.
- Dibi, B., I. D., G.B.T. A., S. I. and B. J., 2004. Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'aboisso (sud-est de la côte d'ivoire). Sud Sciences Technologies, 13: 22-39.
- Fabbri, P., 1997. Transmissivity in the geothermal euganean basin : Ageostatistical analysis. Ground Water, 35: 881-887.

- Faillat, J.P., 1986. Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (afrique de l'ouest). *Revue Hydrogéologie*, 1: 65-76.
- Haubert, M., 1977. Prospection et exploitation des eaux souterraines dans une région de socle. la Boucle du Cacao (Côte d'Ivoire) – Géohydraulique – S.A.H. Abidjan. Note interne.
- Jacob, C.E., 1947. Draw-down test to determine effective radius of artesian well. *Transactions. American Society of Civil Engineers*, 112: 1047-1070.
- Jalludin et Razack, 2003. Assesment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the republic of djibouti (horn of africa). *Hydrogeology Journal*, 12: 159-170.
- Jourda, J.P., 1987. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du grand abidjan (côte d'ivoire). Thèse de Doctorat, 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et médicale de Grenoble.
- Jourda, J.P., 2005. 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 d'Etat, Université de Cocody.
- Kouassi, A.M., Y.K. A., A.K. E., S.L. C., Y.N. A. and B. J., 2010. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région du n'zi-comoé (centre-est de la côte d'ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4: 1816-1838.
- Kruseman, G.P. and N.A. De Ridder, 1991. Analysis and evaluation of pumping test data. *International Institute for Land Reclamation and Improvement*. Wageningen, the Netherland.
- Lachassagne, P., W. R. and DEWANDEL, 2011. The fracture permeability of hard rock aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23: 145-161.
- Lasm, T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montages de côte d'ivoire (domaine archéen). Thèse de l'Université de Poitiers.
- Marechal, J.C., J.-M. VOUILLAMOZ, M.K.M. S. and D. B., 2010. Estimating aquifer thickness using pumping tests. *Hydrogeology Journal* 18(8): 1787-1796.
- N'GO, Y.A., D.L. GONE, S. I. and G.M. M., 2005. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'agboville (sud ouest de la côte d'ivoire). *Caractérisation hydroclimatique et physique*. *Afrique Science*, 1: 127-144.
- N'Guessan, A., 1985. Contribution à l'hydrogéologie de la région centrale de la côte d'ivoire et analyse statistique des résultats de forage. Thèse de 3ème cycle Université de Franche-Comté, Besançon, n° d'ordre
- Razack et Huntley, D., 1991. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water*, 6: 215-230.

- Savadogo, A.N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de haute volta : Etude régionale du bassin versant de la sissili. Thèse Doctorat ès sciences naturelles, Université de Grenoble.
- Savané, I., 1997. 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 un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat, Université de Cocody: 396.
- Soro, N., 1987. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du sud-est de la côte d'ivoire, bassin versant de la mé. Thèse 3ème cycle, Université scientifique, technique et médicale de Grenoble: 243.
- Soro, N., 2002. Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de grand-lahou et ses environs (sud-ouest de la côte d'ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody
- Tapsoba, A.S., 1995. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de dabou (sud de la côte d'ivoire) : Hydrochimie, isotopie et indice de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire: 200.
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezométric surface and the rate and duration of discharge of the well using ground-water storage. Trans. Am. Geophys. Union, 16: 519-524.
- Traoré, A.Z., 1985. Géologie et hydrogéologie des plateaux mandingues (mali). Région de koula-nossombougou. Thèse de 3ème cycle Université scientifique, technique et médicale de Grenoble.
- Wyns, R., J.M. Baltassat, P. Lachassagne, A. Legtchenko and J. Vairon, 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (brittany, france). Bulletin de la Société Géologique de France, 175(1): 21-34.
- Youan Ta, M., 2008. 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 de l'Université de Cocody: 236.

*Views and opinions expressed in this article are the views and opinions of the author(s), International Journal of Geography and Geology shall not be responsible or answerable for any loss, damage or liability etc. caused in relation to/arising out of the use of the content.*