



## **CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFÈRES FISSURÉS DE LA RÉGION DU BÉLIER (CENTRE DE LA COTE D'IVOIRE)**

### **HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE AQUIFERS FISSURED OF THE AREA OF THE “BÉLIER” (CENTER OF IVORY COST)**

***EHOUSSOU K.M.<sup>1</sup>, KOUASSI A.M.<sup>2</sup>, KAMAGATÉ B.<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>Université Nangui Abroguoua, Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE),  
02 BP 801 Abidjan ;

<sup>2</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 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

*michel.a\_kouassi@yahoo.fr.*

### **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette étude est d'analyser les potentialités en eau souterraine de la région du Bélier au Centre de la Côte d'Ivoire afin de favoriser une optimisation de l'alimentation en eau des populations. Pour ce faire, une collecte de données basée sur l'analyse de 353 fiches techniques de forages d'hydraulique villageoise a été effectuée. La démarche méthodologique est basée d'abord sur le calcul du débit spécifique et de la transmissivité des aquifères. Ensuite, une analyse des fréquences de distribution des paramètres étudiés a été faite. Enfin, une étude de l'influence du faciès lithologique sur la géométrie et l'hydraulicité des aquifères a été réalisée. Les principaux résultats obtenus ont montré que les aquifères étudiés ont de bonnes potentialités hydrauliques. Les eaux sont accessibles et fréquemment obtenues à des profondeurs comprises entre 44 et 84 m (78%) sous une épaisseur de l'altération meuble de 0 à 30 m (75,64%) et une épaisseur de l'horizon fissuré comprise entre 20 et 70 m (78,19%). Les formations schisteuses sont en général les plus productives et comprennent les épaisseurs d'altération les plus élevées. Les granites renferment les profondeurs

de forage et les épaisseurs des horizons fissurés traversés les plus importantes. Les forages les plus accessibles sont situés dans les granites et les roches vertes.

**Mots clés :** Hydrogéologie, Aquifères fissurés, Région du Béliér, Côte d'Ivoire

## **ABSTRACT**

The objective of this study is to analyze the potential of underground water in the region of Aries in central Côte d'Ivoire to promote an optimization of the water supply of populations. To do this, data collection involving 353 drilling technical data and pumping tests available was performed. The methodological approach is based initially on the calculation of specific capacity and the transmissivity. Then, an analysis of the frequency distribution of the parameters studied was made. Lastly, a study of the influence of the lithological facies on the geometry and the hydraulicity of the aquifers were carried out. The main results obtained showed that the studied aquifers have good hydraulic potential. The waters are accessible and frequently obtained at depths of between 44 and 84 m (78%) within a thickness of loose alteration of 0 to 30 m (75.64%) and a cracked horizon thickness of between 20 and 75 m (78%) and 70 m (78.19%). The schistous formations are in general most productive and understand the highest thicknesses of deterioration. The granites contain the depths of drilling and the greatest thicknesses of the crossed fissured horizons. The most accessible drillings are located in the granites and the green rocks. The results contribute to a better knowledge of geometric and hydrodynamic characteristics of fissured aquifers in the region of "Béliér".

**Keywords:** Hydrogeology, Fissured aquifers, Region of "Béliér", Ivory Coast.

## **INTRODUCTION**

L'eau est à la fois un élément essentiel et indispensable à la vie et aux écosystèmes naturels et un bien à caractère socio-économique incontestable. A l'instar des pays en voie de développement, la Côte d'Ivoire connaît des problèmes d'approvisionnement en eau potable. En effet, la majeure partie du territoire national est occupée essentiellement par les terrains du socle cristallin et cristallophyllien qui représentent 97,5% de sa superficie totale. L'exploitation des eaux souterraines dans ces formations de socle se fait au moyen de deux types réservoirs. Il s'agit des aquifères d'altérites plus superficiels et les aquifères du socle fracturés sous-jacents aux premiers. Les aquifères de fissures

sont les plus recherchés lors des prospections hydrogéologiques, car ils concentrent l'essentiel des réserves d'eaux souterraines et sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières éventuelles pouvant se dérouler en surface. Les eaux au niveau des aquifères de fissures sont de qualité meilleure que celles des niveaux altérés. Cependant, les faibles débits d'exploitation souvent observés et le taux d'échec élevé lors de l'implantation des ouvrages dans ces aquifères de socle posent un véritable problème faute d'une meilleure connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et potentialisé en eau de ces milieux.

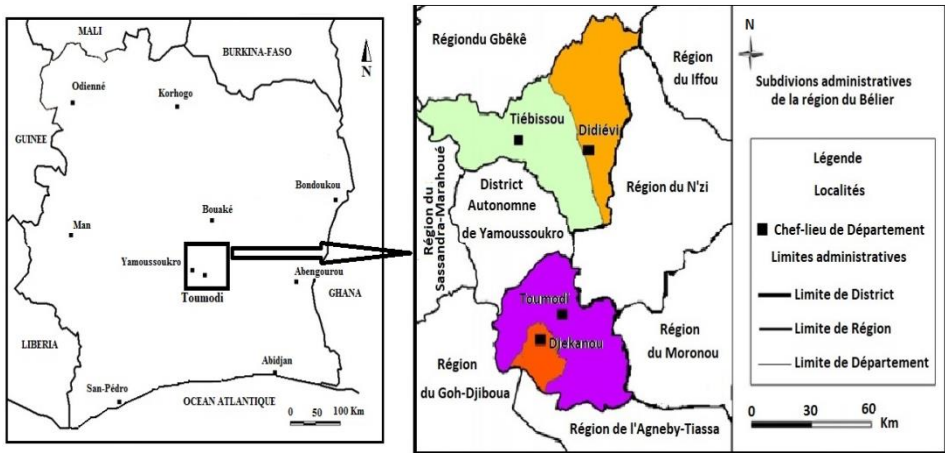
En Côte d'Ivoire l'alimentation en eau des populations rurales est réalisée en général à partir des eaux souterraines captées par des forages équipés de pompes à motricité humaine (système hydraulique villageoise). La problématique d'alimentation en eau des populations de la région du Bélier, située au Centre de la Côte d'Ivoire, s'inscrit dans cette politique. La présente étude a pour objectif d'analyser les potentialités en eau souterraine de la région du Bélier à travers la caractérisation géométrique et hydraulique des aquifères, afin de contribuer à une optimisation de l'alimentation en eau des populations.

Pour atteindre cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis:

- i) l'évaluation du débit spécifique et de la transmissivité ;
- ii) l'analyse des fréquences de distribution des paramètres étudiés ;
- iii) l'étude de l'influence du faciès lithologique sur la géométrie et l'hydraulicité des aquifères.

## **PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

La région du Bélier est située au Centre de la Côte d'Ivoire (Figure 1). Elle fait partie intégrante du « V Baoulé » et s'étend sur une superficie de 6 809 km<sup>2</sup>. Elle compte 346 768 habitants avec une population essentiellement rurale agricole (agriculture de rente et vivrière) et une densité moyenne de 51,5 habitants/km<sup>2</sup>.



**Figure 1 :** Localisation de la région du Bélier (Centre de la Côte d'Ivoire)

Le relief de la région du Bélier est peu vallonné et correspond aux plateaux de la zone de savane arborée (Anonyme, 2014). La zone d'étude est caractérisée par une monotonie des reliefs qui est favorable à la stagnation des eaux qui auront tendance à s'infiltrer et/ou s'évapotranspirer selon les conditions de perméabilité du substratum et l'intensité des activités évapotranspiratoires. Les sols de la région du Bélier, majoritairement de type ferralitique moyennement déssaturé sont le socle d'une végétation constituée de forêt mésophile, de forêts-galeries, de savanes arbustives ou de savanes à rôniers. Le climat de la région est de type tropical humide et caractérisé par quatre saisons réparties entre la grande saison des pluies (Mars-Juin), la petite saison sèche (Juillet-Aout), la petite saison des pluies (Septembre-Octobre) et la grande saison sèche (Novembre-Février). Ces saisons sont sous l'influence de la mousson atlantique du Sud-Ouest et de l'Harmattan en provenance du Sahara. La hauteur moyenne annuelle des précipitations est de 1092 mm/an tandis que la température moyenne est de 30°C. Le réseau hydrographique de la région est constitué des affluents du cours d'eau principal N'zi (affluent du Bandama blanc) que sont le Kan et le Kpra. La région du Bélier appartient au domaine paléoprotérozoïque. Elle est en outre située dans le domaine Birrimien de la Côte d'Ivoire. On y rencontre deux principales formations géologiques : les roches magmatiques constituées par les granitoïdes éburnéens (granites à biotite, granites à deux micas, migmatites, granodiorites concordants, pegmatites) et les roches métamorphiques (volcano-sédimentaires) du Birrimien représentées par les schistes, les quartzites et les roches vertes.

## **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

### **Données**

Trois cent cinquante-trois (353) fiches techniques renseignant sur les paramètres physiques et hydrodynamiques ont servi de base de collecte des données. Il s'agit d'une part, des données physiques des forages notamment la profondeur totale du forage (m), l'épaisseur de l'altération meuble (m), l'épaisseur de l'horizon fissuré foré (m) et la profondeur de la première arrivée d'eau significative (m) et d'autre part, de données hydrodynamiques dont le niveau statique (m), le débit de forage après développement air-lift (m<sup>3</sup>/h), le temps de pompage (s), le rabattement induit « s » (m) par le pompage dans le temps et le débit de pompage (m<sup>3</sup>/h) du premier palier (essais par paliers) et la transmissivité.

### **Démarche méthodologique de l'étude**

La démarche méthodologique adoptée est basée d'abord sur le calcul du débit spécifique et de la transmissivité (Cooper-Jacob en descente). Ensuite, une analyse des fréquences de distribution des paramètres étudiés a été faite à partir de la règle de Iman et Conover. Enfin, une étude de l'influence du faciès lithologique sur la géométrie et l'hydraulicité des aquifères a été réalisée.

### ***Calcul du débit spécifique***

Le débit spécifique représente le débit pompé (Q), rapporté au rabattement « s », induit pour un temps de pompage donné. Il est noté  $Q_{sp}$  (m<sup>2</sup>/h) et son expression est (équation 1) :

$$Q_{SP} = \frac{Q}{s} \quad (1)$$

Le débit considéré est celui du premier palier réalisé au cours des essais de courte durée. Le rabattement (m) est celui induit par le débit du premier palier de débit (m<sup>3</sup>/h). Le choix du premier palier est dû au fait qu'il a mis plus de temps (2 heures) alors que les autres (deuxième et troisième paliers) ont mis une heure.

### **Détermination de la transmissivité**

La détermination des paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère se fait au moyen des tests de pompage de longue durée à l'aide des diverses méthodes d'interprétation disponibles, qui pour la plupart découlent des méthodes de Théis et de Jacob (Soro et al., 2010). Quant aux essais par paliers (essais de performance), ils servent à déterminer la productivité et la performance de l'ouvrage. Cependant, en l'absence d'essai de longue durée, alors qu'on souhaite déterminer les caractéristiques de l'aquifère, on sollicite les essais par paliers s'ils existent surtout que les résultats ne sont fondamentalement distincts lorsque le palier est vraiment atteint. Ainsi, divers travaux ont montré qu'il était possible de calculer la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère à l'aide des pompages de courte durée ou pompages par paliers à condition d'atteindre un palier au cours de chaque cycle. Le nombre de paliers minimum nécessaire pour obtenir des résultats satisfaisants est de trois (3). Plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest ont utilisé les pompages de courtes durées pour l'évaluation des paramètres hydrodynamiques et ont montré que les valeurs des paramètres hydrodynamiques obtenues par les pompages par paliers ne diffèrent pas significativement de celles issues des pompages classiques (Lasm, 2000 ; Dakouré, 2003 ; Alassane, 2004 ; Ahoussi, 2008 ; Houmed-Gaba, 2009 ; Soro et al., 2010 ; Baka et al., 2011 ; Lasm et al., 2012 ; Kouassi et al., 2012).

Dans le cadre de notre étude, ce sont les essais par paliers qui ont été sollicités pour déterminer les valeurs de la transmissivité. Ainsi, la méthode utilisée est celle de Cooper-Jacob. En effet, le suivi des niveaux a été effectué uniquement dans les forages où a lieu les pompages donc en absence de piézomètres de mesure. De ce fait, seule la transmissivité peut être évaluée. La méthode de Cooper-Jacob permettant l'interprétation des données d'essais de puits est basée sur l'approximation logarithmique de l'équation de Théis. L'expression du rabattement ( $s$ ) à l'instant  $t$  est définie par l'équation 2 (équation de Cooper-Jacob en descente) :

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

avec :

$T$  : transmissivité ( $m^2/s$ ) ;

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

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

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

$r$  : distance du piézomètre à l'axe du puits, en m.

A partir d'hypothèses de simplification, l'expression de la transmissivité peut se présenter comme suit (équation 3) :

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad (3)$$

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

$Q$  : débit de pompage du premier palier en  $m^3/s$  ;

$\Delta s$  : variation du rabattement en m.

La variation du rabattement (m) s'exprime comme suit (équation 4) :

$$\Delta s = S_2 - S_1 \quad (4)$$

### ***Analyse des fréquences de distribution des paramètres étudiés***

Les caractéristiques statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation (CV=écart-type/moyenne) des paramètres physiques et hydrodynamiques ont été déterminées.

Les fréquences de variation des paramètres étudiés ont été également analysées. En effet, il existe des règles à respecter pour réaliser une discrétisation correcte :

- i) aucune classe ne doit être vide ;
- ii) les limites de classe doivent couvrir l'ensemble de la distribution ;
- iii) les limites de classe ne doivent pas se chevaucher.

La formule utilisée pour déterminer le nombre de classe est la règle de Iman et Conover (C) pour un échantillon de taille  $n$  (équation 5) :

$$C = \text{int}\left(\frac{\ln n}{\ln 2}\right) = \text{int}(1,443 \ln n) \quad (5)$$

**NB:** Int=partie entière.

L'intervalle de classe (I) est calculé par (équation 6) :

$$I = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{C} \quad (6)$$

Dans l'équation 6,  $X_{\max}$  et  $X_{\min}$  sont respectivement les valeurs maximale et minimale observées sur l'ensemble des échantillons pour un paramètre donné, C

le nombre de classes défini. On calcule ensuite à partir de « $X_{\min}$ », les classes successives par addition de l'intervalle de classe I, d'abord à la valeur minimale observée sur l'échantillon, puis à la borne supérieure de chacune des classes jusqu'à obtention de la dernière classe.

Les fréquences de distribution des différents paramètres étudiés ont été calculées à partir de l'effectif par classe ( $n_i$ ) et de l'effectif total ( $n$ ) au moyen de la relation suivante (équation 7) :

$$F_i = 100 \times \frac{n_i}{n} \quad (7)$$

L'établissement des classes de variables et la construction des courbes de fréquence ont été réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel. En fait, les courbes de distribution de fréquence sont construites à partir des intervalles réguliers choisis.

Les paramètres hydrodynamiques tels que le débit de forage, le débit spécifique et la transmissivité ont été analysés en tenant compte des classifications spécifiques à chaque paramètre. Ainsi, pour mieux apprécier la distribution des débits de forage, le Comité Inter-africain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H.) a proposé la classification suivante (Lasm, 2000) :

- de 0 à 1 m<sup>3</sup>/h : débits très faibles ;
- de 1 à 2,5 m<sup>3</sup>/h : débits faibles ;
- de 2,5 à 5 m<sup>3</sup>/h : débits moyens ;
- supérieur à 5 m<sup>3</sup>/h : débits forts.

L'analyse des débits spécifiques a été faite selon la classification suivante :

- $Q_{sp} < 0,1$  : débit spécifique faible ;
- $0,1 < Q_{sp} < 1$  : débit spécifique moyen ;
- $Q_{sp} > 1$  : débit spécifique fort.

L'analyse de la transmissivité est faite à partir de la classification suivante :

- classe faible :  $T < 10^{-5}$  ;
- classe moyenne :  $10^{-5} < T < 10^{-4}$  ;
- classe forte :  $T > 10^{-4}$ .



### **Analyse des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques en fonction du faciès lithologique**

Une analyse des paramètres physiques et hydrodynamiques étudiés en fonction du faciès lithologique a été réalisée afin de comprendre l'influence de la géologie sur le comportement géométrique et hydrodynamique des aquifères fissurés de la région du Bélier. A partir de cette analyse, nous avons établi des relations entre le faciès lithologique et quelques paramètres étudiés.

## **RÉSULTATS ET DISCUSSION**

### **Caractéristiques statistiques des paramètres étudiés**

Les caractéristiques statistiques des paramètres physiques des forages sont consignées dans le tableau 1. L'analyse de ces paramètres montre que les profondeurs de forage ( $P_f$ ) varient de 28 à 100 m avec une moyenne de 65,87 m et un écart-type de 15,47 m. La profondeur de la première arrivée d'eau ( $P_{ae\_1}$ ) varie de 12,5 à 87 m avec une moyenne de 42,82 m et un écart-type de 16,58 m. L'épaisseur de l'horizon altéré ( $EP_{Alt}$ ) varie de 0,5 à 77,8 m avec une moyenne de 19,64 m et un écart-type de 15,43 m. L'épaisseur de l'horizon fissuré foré ( $EP_{Fis}$ ) varie de 3,2 à 95 m avec une moyenne de 46,25 m et un écart-type de 19,46 m. La valeur du coefficient de variation (CV) des différents paramètres oscille entre 23,48% (profondeur de forage) et 78,56% (épaisseur de l'altération meuble). Toutes les valeurs sont supérieures à 25% hormis celle de la profondeur de forage. Ces résultats montrent que la profondeur des forages est homogène alors que tous les autres paramètres sont hétérogènes. Le paramètre le plus hétérogène est l'épaisseur de l'altération meuble.

**Tableau 1 :** Caractéristiques des paramètres physiques des forages

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV(%)
$P_{ae\_1}$ (m)	12,5	87	42,82	16,58	38,72
$EP_{Alt}$ (m)	0,5	77,8	19,64	15,43	78,56
$EP_{Fis}$ (m)	3,2	95	46,25	19,81	42,83

Les caractéristiques statistiques des paramètres hydrodynamiques sont consignées dans le tableau 2. L'analyse de ce tableau montre que le niveau statique (NS) varie de 0 à 43,8 m avec une moyenne de 11,86 m et un écart-type de 7,03 m. Le débit de forage (Q), quant à lui, varie de 0,115 à 24 m<sup>3</sup>/h avec une

moyenne de 4,39 m<sup>3</sup>/h et un écart-type de 4,17. Le débit spécifique (Q<sub>SP</sub>) calculé varie de 0,011 à 1,015 m<sup>2</sup>/h avec une moyenne de 0,225 m<sup>2</sup>/h et un écart-type de 0,223. La transmissivité T calculée à partir de la méthode de Cooper-Jacob en descente varie de 1,29.10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s à 2,65.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s avec une moyenne de 4,83.10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s et un écart-type de 5,66.10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s. La valeur du coefficient de variation (CV) des différents paramètres hydrodynamiques varie de 59,3% (niveau statique) à 117% (transmissivité), ce qui signifie que tous les paramètres hydrodynamiques étudiés sont hétérogènes.

**Tableau 2 :** Caractéristiques statistiques des paramètres hydrodynamiques des forages

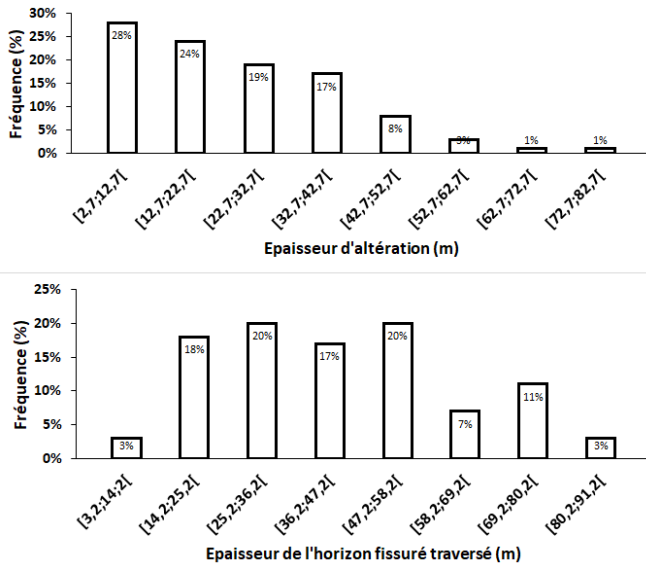
Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
NS (m)	0	43,8	11,86	7,03	59,3
Q (m <sup>3</sup> /h)	0,115	24	4,39	4,17	94,88
Q <sub>SP</sub> (m <sup>2</sup> /h)	0,011	1,015	0,225	0,223	99,365
T (m <sup>2</sup> /s)	1,29.10 <sup>-6</sup>	2,65.10 <sup>-4</sup>	4,83.10 <sup>-5</sup>	5,66.10 <sup>-5</sup>	117

### Fréquences de distribution des paramètres étudiés

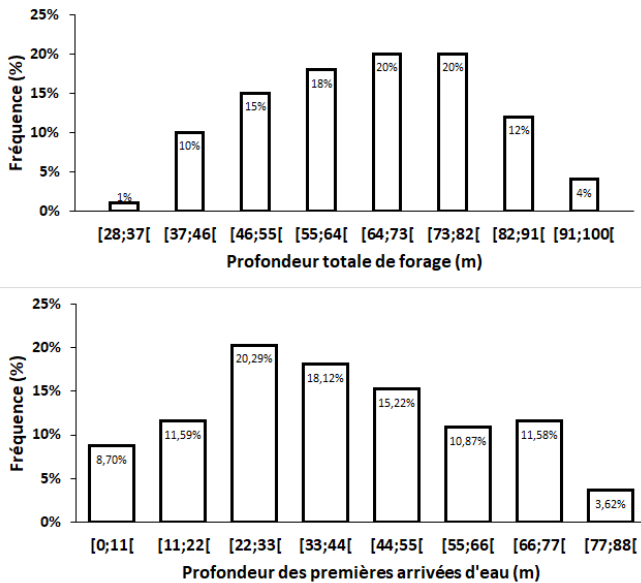
La figure 2 montre que l'épaisseur de l'altération meuble se situe fréquemment (75,64%) entre 0 et 30 m. Cependant la classe la plus dominante est comprise entre 0 et 10 m avec un taux de 37%. Les épaisseurs de l'altération meuble comprises entre 10 et 20 m représentent près de 24%, suivies de celles comprises entre 20 et 30 m avec une fréquence de 15%. Les valeurs les moins fréquemment obtenues sont comprises entre 30 et 50 m avec un taux de 19,55%. Les épaisseurs de l'altération meuble sont rarement obtenues et très rarement obtenues entre 60 et 80 m (1,7% des valeurs observées). Les fréquences des puissances de l'altération meuble diminuent au fur et à mesure que les valeurs de classes d'épaisseur augmentent. Cette tendance pourrait suivre une loi exponentielle négative.

Il est constaté que la majorité des épaisseurs de l'horizon fissuré traversé est comprise entre 20 et 70 m et représente environ 78,19% des forages (Figure 2).

Cependant, les horizons fissurés traversés les plus fréquents se situent entre 30 et 50 m avec plus de 35% de fréquence. Par ailleurs, les forages ayant traversé le socle fissuré sur une profondeur inférieure à 20 m et supérieure à 70 m sont moins fréquents et représentent 21,81% des valeurs observées sur ce paramètre.



**Figure 2 :** Distribution des fréquences des épaisseurs d'altération (m) et de l'horizon fissuré traversé (m)

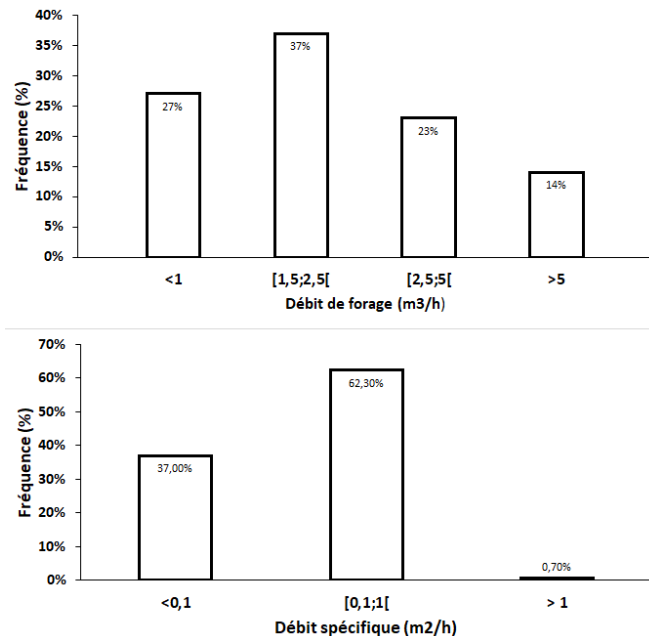


**Figure 3 :** Distribution des fréquences de profondeur totale de forage (m) et profondeur des premières arrivées d'eau (m)

Les profondeurs totales de forage les plus fréquentes sont comprises entre 44 et 84 m avec un taux de près de 78% (Figure 3). Les profondeurs totales de forage les moins fréquentes sont comprises d'une part, entre 28 et 44 m, et d'autre part, entre 84 et 100 m. Les valeurs observées pour les profondeurs comprises dans ces intervalles représentent moins de 08% de l'ensemble des profondeurs observées.

Les profondeurs des premières arrivées d'eau (AE-1) sont majoritairement (88%) comprises entre 22 et 72 m (Figure 4). Elles sont rarement obtenues à moins de 22 m et au-delà de 72 m et très rarement au-delà de 82 m.

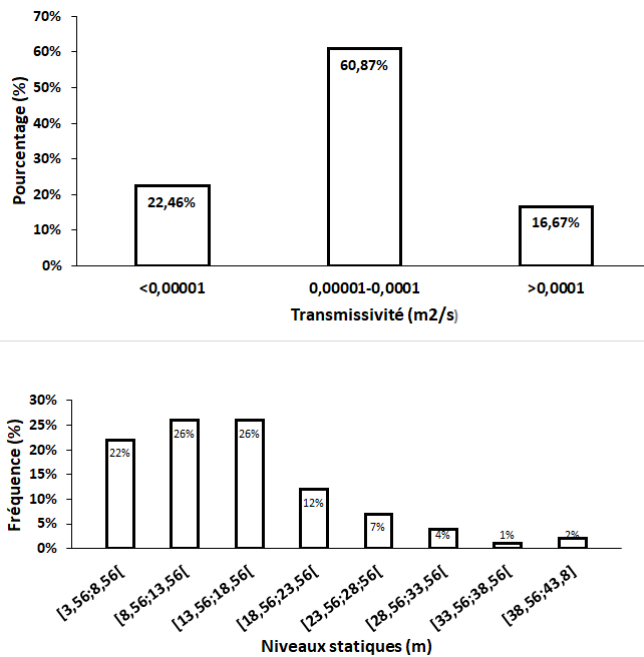
Selon la classification proposée par le Comité Inter-africain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H.), les débits forts représentent 30,59%, les débits moyens 24,36%, les débits faibles 35,41% et les débits très faibles représentent 9,63% (Figure 4). Ainsi, les débits faibles sont les plus fréquents avec un taux de 35,41%. Les débits moyens à forts représentent 54,95% alors que les débits d'au moins 1 m<sup>3</sup>/h représentent 90,36%. Ainsi, la chance d'avoir un débit de forage supérieur au seuil de décision (1 m<sup>3</sup>/h) dans la région du Béliér est donc très élevée (Figure 4).



**Figure 4 :** Distribution des fréquences de débits de forage (m<sup>3</sup>/h) et de débit spécifique (m<sup>2</sup>/h)

Les débits spécifiques les plus fréquents varient entre 0,1 et 1 m<sup>2</sup>/h, ce qui correspond à des valeurs débits spécifiques moyens avec un taux de 62,30% (Figure 4). La probabilité d'avoir un débit spécifique moyen dans la région du Bélier est donc élevée. Aussi, 37% ont un débit spécifique faible ( $Q_{sp} < 0,1$  m<sup>2</sup>/h). Seulement 0,70% des points d'eau ont un débit spécifique supérieur à 1 m<sup>2</sup>/h. Les débits spécifiques moyens à forts représentent donc 63% (Figure 4).

Les résultats obtenus suite à l'application de la méthode de l'approximation logarithmique de Cooper-Jacob en descente montrent que dans la région du Bélier, la classe de transmissivité la plus fréquente est celle des transmissivités moyennes avec un taux de 60,87% (Figure 5). Elle est suivie par la classe des transmissivités faibles avec une contribution de 22,46%. Ainsi, les transmissivités moyennes et fortes représentent 83,33%. La classe de transmissivité la moins fréquente est celle de la classe des fortes transmissivités qui représentent 16,67% de l'échantillon. Les transmissivités moyennes et fortes représentent 83,33% (Figure 5).



**Figure 5 :** Distribution des fréquences de la transmissivité (m<sup>2</sup>/s) et du niveau statique (m)

Il est constaté que 59,66% des forages ont leurs niveaux statiques situés entre 5 et 15 m (Figure 5). En plus, 15,35% des forages ont un niveau statique compris entre 15 et 20 m et 12,22% entre 0 et 5 m. Ainsi, les niveaux statiques les plus fréquents sont compris entre 5 et 20 m avec un taux de 75%. Les niveaux statiques ayant une profondeur de 20 à 30 m sont moins fréquents et représentent 11,36% des valeurs observées tandis que les niveaux statiques de plus de 30 m sont rarement observés et représentent 1,42% des effectifs.

### Analyse de l'influence du faciès lithologique sur la géométrie et la productivité des aquifères

A partir du tableau 3, on peut conclure que la grande majorité (74%) des forages a été réalisée dans les formations granitiques. Une fréquence relativement élevée (23%) des forages a été effectuée dans les schistes. Très peu de forages ont été réalisés dans les gneiss migmatitiques (2%) et les roches vertes (30%) (Tableau 3).

**Tableau 3 :** Fréquences des forages réalisés selon le contexte lithologique

Paramètre	Granites	Schistes	Roches vertes	Migmatites- gneiss
Fréquence (%)	74	23	1	2

Les caractéristiques statistiques de l'épaisseur de l'altération meuble selon le contexte lithologique sont consignées dans le tableau 4. L'épaisseur moyenne de l'altération meuble est très importante au niveau des schistes (32,19 m). Après les schistes, les puissances d'altération meuble sont assez élevées au sein des roches vertes (près de 18 m) et des granites (16,40 m). L'altération meuble est peu développée dans les roches gneisso-migmatitiques (près de 10 m). Les épaisseurs de l'altération meuble au sein des formations granitiques et schisteuses sont homogènes (5-6%) quand celles des roches vertes et des formations gneisso-migmatitiques sont hétérogènes (37-38%). L'épaisseur minimale de l'altération meuble a été obtenue dans les granites (0,5 m) alors que l'épaisseur maximale a été obtenue dans les formations schisteuses.

**Tableau 4 :** Caractéristiques de l'épaisseur d'altération meuble selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	0,5	65	16,4	0,84	5
Schistes	6	75	32,19	1,87	6
Roches vertes	6	31,91	17,98	6,91	38
Migmatites-gneiss	2	18,8	9,76	3,59	37

Les épaisseurs de l'horizon fissuré partiel diffèrent d'une roche à une autre (Tableau 5). Ainsi, elles sont en moyenne plus importantes dans les formations gneisso-migmatitiques (51,42 m) et granitiques (50,09 m). Ces différentes formations sont suivies par les roches vertes qui enregistrent un horizon fissuré foré moyen de l'ordre de 40 m. Les épaisseurs moyennes de l'horizon fissuré partiel les plus faibles se situent au niveau des formations schisteuses (33,24 m). L'horizon fissuré partiel le plus faible est de 8,69 m et se trouve au niveau des schistes. L'épaisseur de l'horizon fissuré traversé la plus forte (95 m) a été obtenue dans les granites. L'épaisseur de l'horizon fissuré traversé ou partiel est homogène dans les schistes (5%) et hétérogène (18-35%) dans les autres formations géologiques.

**Tableau 5 :** Caractéristiques de l'épaisseur de l'horizon fissuré selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	12	95	50,09	19,02	38
Schistes	8,69	85,5	33,24	1,75	5
Roches vertes	22	63	39,98	8,56	21
Migmatites-gneiss	17	66	51,42	9,34	18

Les forages les plus profonds sont obtenus respectivement dans les formations granitiques (66,46 m) et schisteuses (65,29 m) (Tableau 6). Ensuite viennent les formations gneisso-migmatitiques (61,18 m). Les forages les moins profonds sont obtenus dans les roches vertes (57,97 m). Le forage le moins profond (28 m) et le forage le plus profond (103 m) ont été obtenus dans les granites. Les profondeurs de forage sont très homogènes dans les granites (2%) et homogènes dans les autres formations géologiques (3 -14%)

**Tableau 6 :** Caractéristiques des profondeurs de forage selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	28	103	66,46	1,06	2
Schistes	38	98	65,29	1,74	3
Roches vertes	46	69	57,95	5,82	10
Migmatites-gneiss	35	82,9	61,18	8,39	14

Le tableau 7 présente les caractéristiques statistiques des profondeurs des premières arrivées d'eau selon le contexte géologique dans la région du Bélier. Les profondeurs des premières arrivées d'eau sont en moyenne plus importantes

dans les formations gneisso-migmatitiques. Ces formations sont suivies par les schistes ( $\approx 45$  m) et granites ( $\approx 43$  m). Les profondeurs des premières arrivées d'eau sont en moyenne plus faibles dans les roches vertes (39 m). La profondeur de la première arrivée d'eau la plus faible a été relevée dans les granites (12 m). Quant à la profondeur de la première arrivée d'eau la plus importante, elle a été également constatée dans les mêmes formations géologiques. Les profondeurs des premières arrivées d'eau sont homogènes au sein de chaque formation géologique. Cependant, elles sont plus homogènes au sein des granites (3%) et des schistes (4%).

**Tableau 7 :** Caractéristiques des profondeurs des premières arrivées d'eau selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	12	86	42,84	1,19	3
Schistes	16	83	45,18	1,86	4
Roches vertes	24	60	39	7,56	19
Migmatites-gneiss	26	69	49,6	8,47	17

Le débit de forage dépend en grande partie de la géométrie du système de fractures et de la nature pétrographique de la roche (encaissant). La répartition de ces débits en fonction de la nature pétrographique est présentée dans le tableau 8. D'une manière générale les débits rencontrés dans ces formations sont importants et dépassent la moyenne nationale (inférieur à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ). D'après ce tableau 6, le plus important débit est observé dans les granites ( $24 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et le débit le plus faible ( $0,30 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a été obtenu également dans les granites. Les meilleurs débits de forage ont été obtenus dans les roches vertes ( $7,03 \text{ m}^3/\text{h}$ ) suivies des formations gneisso-migmatitiques ( $5,22 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et des schistes ( $5,21 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Les plus faibles débits ont été obtenus au niveau des granites ( $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Le débit est homogène dans les granites et les schistes avec des coefficients de variation respectif de 6% et 9% et hétérogène dans les roches vertes (44%) et l'ensemble gneiss-migmatite (43%).

**Tableau 8 :** Caractéristiques statistiques du débit selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	0,3	24	4,25	0,25	6
Schistes	0,9	13,5	5,21	0,46	9
Roches vertes	2,4	15,4	7,03	3,08	44
Migmatites-gneiss	1	13	5,22	2,25	43



Le tableau 9 présente les caractéristiques statistiques du niveau statique traduisant l'accessibilité aux eaux souterraines en fonction du contexte lithologique. Les niveaux statiques extrêmes (minimum, maximum) ont été enregistrés dans les granites. Les forages les plus accessibles sont situés respectivement dans les roches vertes (9,63 m), les granites (11,14 m) et les schistes (13,11 m). Les forages de niveau statique les plus élevés se trouvent au sein des formations gneisso-migmatitiques (14,34 m). La majorité des forages ont un niveau statique localisé dans les formations d'altérations meubles. Ce fait est très important, car il montre la mise en charge de l'eau de l'aquifère de fissures et confirme l'interconnexion des aquifères de fissures et d'altérites. Les niveaux statiques sont homogènes au niveau des formations granitiques (4%) et schisteuses (6%). Les niveaux statiques sont plutôt hétérogènes au sein des formations gneisso-migmatitiques (23%) et des roches vertes (30%).

**Tableau 9 :** Caractéristiques de l'accessibilité selon le contexte lithologique

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Granites	0,7	33,6	11,14	0,42	4
Schistes	1,5	30,2	13,11	0,81	6
Roches vertes	2,7	16,9	9,63	2,91	30
Migmatites-gneiss	7,3	25,6	14,34	3,34	23

## DISCUSSION

Dans les aquifères fissurés, outre les densités et l'orientation des fractures, la productivité des forages peut être aussi liée à certains paramètres tels que la profondeur des forages et l'épaisseur de l'altération meuble (Lasm et al., 2014). En ce qui concerne la profondeur, il existe une profondeur au-delà de laquelle, les chances de trouver un horizon aquifère s'amenuisent, surtout au sein des roches de socle altérée (Kouadio et al., 2010). Ainsi, plusieurs travaux (Kouadio, 2005 ; Kouadio et al., 2010 ; Lasm et al., 2014 ; Kouassi et al., 2014 ; Kouassi et al., 2016) ont défini la profondeur optimale à atteindre lors de la foration pour obtenir des productivités satisfaisantes au niveau des roches cristallines à partir d'approches statistiques et graphiques. Ceci a pour but d'éviter les surcreusements inutiles très souvent constatés lors des campagnes de foration en Afrique de l'Ouest, sans aucune amélioration sur la productivité des forages (Gombert, 1997), mais avec plutôt des incidences financières sur les enveloppes budgétaires allouées aux projets.

Dans la région du Bélier, les profondeurs totales des forages réalisés se situent entre 28 et 103 m avec une moyenne de 65,87 m. La majorité de ces forages ont des profondeurs totales comprises entre 44 et 80 m. Les profondeurs les plus importantes obtenues dans la région seraient liées au fait que n'ayant pas obtenu le débit recherché, l'on ait poursuivi la foration (Soro, 2009). En effet, les forages négatifs ou peu productifs sont forés plus profonds dans l'espoir d'atteindre un débit minimal exploitable (Gassita et al., 1987 *in* Lasm et al., 2014). Des auteurs tels que N'go et al. (2005), soutiennent que la possibilité d'obtenir des forages productifs est réelle à de grandes profondeurs. Dans la région du Bélier, les profondeurs les plus productives se localisent entre 30 et 90 m. Ce résultat est conforme aux travaux effectués en Côte d'Ivoire fixant la limite inférieure d'existence de fissures ouvertes entre 50 m et 70 m de profondeur (Biémi, 1992 ; Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; N'go et al., 2005 ; Youan Ta, 2008 ; Kouassi et al., 2012). Dans l'ensemble, nous pouvons dire, que ce soit sur schistes ou granites, les profondeurs maximales dépassent rarement les profondeurs limites de foration proposer dans la littérature (80 m sur granites, et 100 m sur schistes) en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, ceci pour des raisons économiques (Lasm, 2000).

La moyenne de l'épaisseur de l'altération meuble obtenue dans cette étude est de 19,64 m. En effet, la zone d'étude est dominée dans sa majeure partie par les granites sur lesquels l'épaisseur de l'altération meuble est faible comparée aux schistes qui sont plus tendres. Ce résultat se situe dans l'intervalle de l'épaisseur maximum moyenne des altérites qui est de 40 à 50 m quel que soit le pays ou le climat considéré (Soro, 2009). Au regard de ces valeurs, et en tenant compte du fait que l'altération est sous la dépendance directe des fractures ouvertes et que l'ouverture de celles-ci est en général due à la décomposition superficielle des roches et à la tectonique cassante (Faillat, 1986), nous pouvons dire que la région du Bélier est une zone très altérée. Les aquifères qu'on y trouve sont très importants parce qu'ils jouent un rôle capacitif. En effet, dans notre cas, les débits les plus élevés sont rencontrés dans les formations où les épaisseurs d'altération sont les plus grandes. On serait donc tenté de croire qu'une forte épaisseur d'altérites serait la garantie d'avoir un bon débit lors d'une campagne de forage. Mais très souvent cette relation n'est pas vérifiée. En effet, selon Soro (2009), la présence d'une épaisseur trop importante d'altérites aura tendance à masquer les fractures sous-jacentes. Sauf dans le cadre de fractures émergentes, l'alimentation par les eaux d'infiltration pourraient y être ainsi retardée ou empêchée suivant la nature lithologique du recouvrement. C'est le cas des schistes où l'altération est de nature argileuse avec une épaisseur très importante mais très peu perméable. La présente étude réalisée dans la région

du Bélier révèle que l'épaisseur moyenne de l'altération meuble est très importante au niveau des schistes (32,19 m). Après les schistes, les puissances d'altération meuble sont assez élevées au sein des roches vertes (près de 18 m) et des granites (16,40 m). L'altération meuble est peu développée dans les roches gneisso-migmatitiques (près de 10 m). En outre, une altération qui n'est pas très épaisse favorise l'accroissement du débit avec la profondeur. Dans le cas contraire, si l'épaisseur de la roche altérée dépasse les 40 m, l'accroissement des débits est compromis (Soro, 2009). Plusieurs travaux ont montré l'importance des horizons d'altérites dans l'alimentation en eau des réseaux de fractures (Wyns et al., 2004 ; Dewandel et al., 2006 ; Lachassagne et al., 2001, 2005). En effet, Les couches d'altérites reçoivent directement l'eau des précipitations et sont capables d'accumuler des quantités énormes d'eau d'infiltration. De façon générale, lorsque la profondeur d'altération est importante la probabilité d'obtenir un débit important est très grande. Si nous restons dans cette logique, la moyenne des épaisseurs d'altérations étant de 19,64 m, une épaisseur d'altération au-dessus de 25 m peut être le signe d'un aquifère productif, surtout dans les formations métamorphiques. Cette conclusion n'est pas linéaire car cela dépend de la nature de la roche sous-jacente comme cela a été déjà signifié plus haut.

Si dans les aquifères fissurés la productivité des forages peut être en partie liée à la profondeur de forages et à l'épaisseur de l'altération meuble, c'est dire qu'elle peut dépendre aussi de l'épaisseur de l'horizon fissuré d'autant plus que la profondeur totale du forage est la somme de l'épaisseur de l'altération meuble et de l'épaisseur de l'horizon fissuré traversé. Pour ce qui est de la région du Bélier, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré varie de 3,2 à 95 m avec une moyenne de 46,25 m et un écart-type de 19,46 m. La majorité des épaisseurs de l'horizon fissuré traversé est comprise entre 20 et 70 m et représente environ 78,19% des forages. Cependant, les horizons fissurés traversés les plus fréquents se situent entre 30 et 50 m avec plus de 35% de fréquence. Les épaisseurs de l'horizon fissuré foré sont en moyenne plus importantes dans les formations gneisso-migmatitiques (51,42 m) et granitiques (50,09 m). Ces différentes formations sont suivies par les roches vertes qui enregistrent un horizon fissuré foré moyen de l'ordre de 40 m. Les épaisseurs moyennes de l'horizon fissuré partiel les plus faibles se situent au niveau des formations schisteuses (33,24 m).

Les premières arrivées d'eau sont fréquemment rencontrées entre 22 et 72 m. L'analyse des débits de ces arrivées d'eau montre qu'elles sont les plus productives. Ces résultats sont conformes aux travaux antérieurs sur le socle (Lasm, 2000). Le débit de ces arrivées d'eau est plus ou moins fonction des

propriétés géométriques des systèmes de fractures (longueur et interconnexion), de l'importance de la tectonique et dans une certaine mesure de l'épaisseur de la couche d'altération (Soro, 2009). Dans la région du Bélier, les formations gneisso-migmatitiques, les schistes ainsi que les granites sont les formations dans lesquelles les profondeurs des premières arrivées d'eau sont les plus importantes.

Dans la région du Bélier, le niveau statique varie de 0 à 43,8 m avec une moyenne de 11,86 m et un écart-type de 7,03 m. Les niveaux statiques les plus fréquents sont compris entre 5 et 20 m avec un taux de 75%. Les forages les plus accessibles sont situés respectivement dans les roches vertes (9,63 m), les granites (11,14 m) et les schistes (13,11 m). La majorité des forages ont un niveau statique localisé dans les formations d'altérations meubles. Ce fait est très important, car il montre la mise en charge de l'eau de l'aquifère de fissures et confirme l'interconnexion des aquifères de fissures et d'altérites. Les niveaux statiques sont homogènes au niveau des formations granitiques (4%) et schisteuses (6%). Les niveaux statiques sont plutôt hétérogènes au sein des formations gneisso-migmatitiques (23%) et des roches vertes (30%).

Le débit spécifique est une variable très importante dans la détermination de la productivité des ouvrages de captage (Neves et Morales, 2007 *in* Lasm et al., 2014). La gamme des débits spécifiques enregistrée (0,011 à 1,015 m<sup>2</sup>/h) dans la région du Bélier s'inscrit dans l'intervalle des valeurs observées en Côte d'Ivoire et en Afrique de l'Ouest (Lasm, 2000 ; Youan Ta, 2008 ; Soro, 2009). En effet, les valeurs du débit spécifique observées sont en général faibles dans nos régions et dépassent rarement 1 m<sup>2</sup>/h, surtout en zone rurale.

Les différentes valeurs de transmissivité obtenues dans la région du Bélier varient entre  $1,29 \cdot 10^{-6}$  et  $2,65 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s avec une moyenne de  $4,83 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s et un coefficient de variation de 1,17. Elles s'apparentent aux valeurs obtenues en Côte d'Ivoire par Kouassi et al. (2012) dans la région du N'zi-Comoé, par Soro et al. (2010) dans la région des Lacs. Ces transmissivités sont variables avec de faibles valeurs, mais les plus importantes valeurs de transmissivités se rencontrent sur les terrains granitiques. Le pourcentage élevé des faibles valeurs est attribué au caractère semi-captif des nappes (Soro, 2002). De même, les fortes valeurs pourraient être dues à une remarquable fracturation avec forte connexion entre fractures et à de bonnes propriétés géométriques développées par ces réservoirs. La nature pétrographique du réservoir peut jouer également une influence sur la transmissivité.

De manière générale, les débits de forage moyens à forts représentent 54,95% dans la région du Bélier. Un fort taux de débit de forage faible est donc observé

(45,15%). En effet, la récurrence de faibles débits n'est pas spécifique à la zone d'étude. Des résultats similaires ont été obtenus ailleurs. Ainsi, dans la région de Man-Danané, 73% des débits rencontrés sont faibles (Lasm, 2000) ; de même que dans la région de Grand-Lahou où ils représentent 75% (Soro, 2002). Pour Saley (2003), ces faibles débits sont le fait d'un faible ravitaillement de la nappe ou à l'absence d'une faille drainante dans la zone de captage posant ainsi le problème d'implantation des forages. Dans notre étude, les meilleurs débits sont enregistrés dans les roches métamorphiques. La bonne productivité de ces roches peut s'expliquer par les très bonnes propriétés géométriques de leurs fractures acquises de la tectonique. La majorité des forages (87,23%) ont leurs niveaux statiques situés dans les vingt (20) premiers mètres à partir de la surface. En plus, on remarque que le niveau statique de l'ensemble des formations (granites, schistes, roches vertes, roches gneisso-migmatitiques) est localisé dans les formations d'altérites. Ce fait est très important, car il montre la mise en charge de l'eau de l'aquifère de fissures et confirme l'interconnexion des aquifères de fissures et d'altérites. En effet, la productivité des forages est liée à la qualité (ouverture ou degré de colmatage) de la fissuration et à l'épaisseur de la tranche fissurée. Au-delà de ces profondeurs, les fissures se renferment ou deviennent rares et la productivité baisse (Soro, 2009). En définitive, une combinaison de différentes méthodes d'implantation à savoir, la géomorphologie, la géophysique, la photo-interprétation et la télédétection pourrait contribuer à améliorer qualitativement les débits de forage lors des différentes campagnes hydrauliques. Aussi, des modèles statistiques conçus par Kouassi et al. (2014 ; 2016), peuvent également contribuer à une optimisation de la profondeur limite d'arrêt des forages au cours des campagnes hydrauliques en général et particulièrement dans la région du Bélier.

## **CONCLUSION**

Les profondeurs de forage les plus fréquentes sont comprises entre 44 et 84 m avec un taux de près de 78%. L'épaisseur de l'altération meuble se situe fréquemment (75,64%) entre 0 et 30 m. Quant à l'épaisseur de l'horizon fissuré traversé, elle est couramment (78,19%) comprise entre 20 et 70 m. Les premières arrivées d'eau sont majoritairement (88%) comprises entre 22 et 72 m. Les débits de forage moyens à forts représentent 54,95% alors que les débits d'au moins 1 m<sup>3</sup>/h représentent 90,36%. Ainsi, la chance d'avoir un débit de forage supérieur au seuil de décision (1 m<sup>3</sup>/h) dans la région du Bélier est donc très élevée. Les débits spécifiques moyens à forts représentent 63%. Les transmissivités moyennes et fortes représentent 83,33%. Les niveaux statiques

les plus fréquents sont compris entre 5 et 20 m avec un taux de 75%. Les formations schisteuses sont en général les plus productives et comprennent les épaisseurs d'altération les plus élevées. Les granites renferment les profondeurs de forage et les épaisseurs des horizons fissurés traversés les plus importantes. Les forages les plus accessibles sont situés dans les granites et les roches vertes. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure connaissance des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région du Bélier, ce qui permet d'envisager une gestion optimale de leurs ressources à l'aide de modèles.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AHOUSSE K.E. (2008). 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 de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.
- ALASSANE A. (2004). Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat de 3ème cycle de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 145p.
- ANONYME (2014). Etudes monographiques et économiques des districts de Côte d'Ivoire (District des lacs). Rapport technique, 288p.
- BAKA D., LASME T., OGA M.S., YOUANTA M., DE LASME O., KOUAKOU O.S., ETTIEN B.F. (2011). Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Center of Côte d'Ivoire). American journal of scientific and industrial research, Vol.2, N°2, pp.310-322.
- BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopique des aquifères discontinus de sillons et des aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) », Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 480p.
- DAKOURE D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali) - essai de modélisation. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, France, 255p.

- DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., WYNS R., MARECHAL J.C. AND KRISHNA M. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.330, pp.260-284.
- 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). *Hydrogéologie*, Vol.1, 65-76.
- GOMBERT P. (1997). Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale. IAHS Publication, Vol.241, pp.113-122, 1997.
- HOUMED-GABA A. (2009). Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (Corne de l'Afrique). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 194p.
- JOURDA J.P.R. (2005). Méthodologie d'application des techniques de la télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrothecnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire 402p.
- KOUADIO K.E., SORO N. ET SAVANE I. (2010). Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : Application à la région du Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°1, pp.1-15.
- KOUASSI A.M., AHOUSI K.E., YAO K.A., OUREGA W., YAO K.B., BIEMI J. (2012). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss journal*, N°10, pp.57-74.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KADIO K.K.R., BIEMI J. (2014). Conception de modèles statistiques à variables hydrogéologiques pour la prévision de la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieux de socle en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol.11, N°1, pp.181-197.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KOUAMÉ K.A., KADIO K.K.R., BIEMI J. (2016). Prospection hydrogéologique par optimisation de la profondeur limite d'arrêt de forage en milieux de socle ivoirien : performance et robustesse des modèles. *Afrique SCIENCE*, Vol.12, N°1, pp.282-296.
- LACHASSAGNE P., WYNS R., BERARD P., BRUEL T., CHERY L., COUTAND T., DESPRATS J.F., LE STRAT P. (2001). Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *GroundWater*, Vol.39, N°4, pp.568-581.

- LACHASSAGNE P., WYNS R. (2005). Aquifères du socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. Géosciences, Vol.2, pp.1-6.
- 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 montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen), Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, 274p.
- LASM T., GNAMBA F.M., OGA Y.M.S., GNANGNE T., BIEMI J., KOUAKOU Y.K.N. (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal., Vol.10, N°5, pp.79-98.
- LASM T., FOSSOU R.M.N., SORO N., ONETIE O.Z., BAKA D., YOUANTA M., OGA M.S., SORO. N. (2012). Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (Nord de la Côte d'Ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable. Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, N°19, pp.114-135.
- N'GO Y.A., GONE D.L., SAVANE I., GOBLE 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, Vol.1, pp.127-144.
- SALEY M.B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semimontagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 209p.
- SORO G. (2009). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux 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 Tiebissou. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 257p.
- 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 de Doctorat ès Sciences Naturelles de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 272p.
- SORO G., SORO N., AHOUSSE K.E., LASM T., KOUAMÉ F.K., SORO T.D., BIÉMI J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphiques dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, Vol. 2, N°66, pp.1-16.



- YOUANTA M., LASM T., JOURDA J.P., KOUAMÉ K.F., RAZACK M. (2008). Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, Vol.8, N°2, pp.119-135.
- WYNS R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGTCHENKO A., VAIRON J. (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, Vol.175, N°1, pp.21-34.