

Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien: Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

[Assessment of the hydraulic properties of crystalline and crystallophyllian bedrock aquifers: case study of the N'zi-Comoé region (east-central Côte d'Ivoire)]

Kouassi Amani Michel¹, Okaingni Jean Claude¹, Kouakou Koffi Eugène¹, and Biemi Jean²

¹Institut 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

²Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study aims to evaluate the hydraulic properties of crystalline and crystallophyllian bedrock aquifers of N'zi-Comoé area (east-central Côte d'Ivoire). To this end, a data base comprising pumping tests data and the technical reports were gathered. The work was done by using a sample of 150 drillings. The parameters used are the pumping rate (Q) in m³/s, the residual folding (s) in m, the length of liner (L) in m, the radius of drilling (R) in m, the radius of casing (R₀) in m and the pumping time (t) in seconds. Three methods were used to estimate the hydraulic conductivity and transmissivity. It is the method of scooping, the method of Logans and the analytical method. The hydraulic conductivity values obtained range from 1,79.10⁻⁸ to 3,8.10⁻⁶ m/s. As the values of transmissivity, they oscillate between 2,54.10⁻⁷ m²/s and 2,67.10⁻³ m²/s. The values of the hydrodynamic parameters (hydraulic conductivity and transmissivity) are heterogeneous, reflecting the structural heterogeneity of the crystalline and crystallophyllian rock. The results contribute to a better understanding of the hydrodynamic characteristics of fractured aquifers in the region N'zi-Comoé.

KEYWORDS: Hydrodynamic parameters, fractured aquifers, hydrodynamic methods, N'zi-Comoé, Côte d'Ivoire.

RESUME: Cette étude a pour objectif d'évaluer des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien de la région du N'zi-Comoé (Côte d'Ivoire). Pour ce faire, une collecte de données regroupant les fiches techniques de forage de même que celles des essais de pompage disponibles dans ladite région a été effectuée. Le travail a été réalisé à partir d'un échantillon de 150 forages. Les paramètres retenus sont le débit de pompage (Q) en m³/s, le rabattement résiduel (s) en m, la longueur de crépine (L) en m, le rayon de forage (R) en m, le rayon de tubage (R₀) en m et le temps de pompage (t) en seconde. Trois méthodes ont été appliquées pour l'estimation de la conductivité hydraulique et de la transmissivité. Il s'agit de la méthode de l'Ecopage, de la méthode de Logans et de la méthode analytique. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues varient de 1,79.10⁻⁸ à 3,8.10⁻⁶ m/s. Quant aux valeurs de transmissivité, elles oscillent entre 2,54.10⁻⁷ m²/s et 2,67.10⁻³ m²/s. Les valeurs des différents paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique et transmissivité) sont hétérogènes, ce qui traduit l'hétérogénéité structurale du socle cristallin et cristallophyllien. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé.

MOTS-CLEFS: Paramètres hydrodynamiques, aquifères fissures, méthodes hydrodynamiques, N'zi-Comoé, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Les aquifères sont caractérisés par leur capacité à stocker de l'eau et à conduire le flux. En zone saturée et nappe captive, la transmissivité exprime la productivité de l'aquifère. Ces propriétés hydrodynamiques sont généralement estimées par l'interprétation de mesures in situ: les pompages d'essai. La connaissance de la transmissivité passe souvent par la connaissance de la conductivité hydraulique. En effet, la conductivité hydraulique (K) est l'un des paramètres commandant l'importance et la vitesse d'eaux souterraines, et par conséquent, est l'un des paramètres les plus importants affectant l'écoulement des eaux souterraines et le transport d'éléments dissous. La description des propriétés internes d'un système d'eaux souterraines exige une connaissance précise du champ de la conductivité hydraulique ou perméabilité. Aussi, la gestion de l'eau des eaux souterraines nécessite-t-elle de connaître avec précision les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère (la transmissivité et la conductivité hydraulique). En effet, la transmissivité et la perméabilité sont les paramètres les mieux indiqués pour la caractérisation des propriétés géométriques d'un aquifère. Les paramètres hydrauliques des aquifères fracturés sont souvent sous le contrôle de la géométrie des fractures.

Pour l'estimation de la transmissivité, plusieurs méthodes existent généralement proches de la méthode de Théis (méthode de Cooper-Jacob, méthode de Thiem, la méthode de Gringarten, la méthode de Gringarten-Ramey, la méthode de Thiery, etc.). Ces méthodes ont été généralement utilisées pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques en Côte d'Ivoire et ailleurs dans le monde. Cependant, ces méthodes ne donnent pas toujours les résultats escomptés du fait des nombreuses hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiées et restent de ce fait limitées. La question fondamentale que soulève cette étude est celle de savoir si d'autres méthodes dont les bases mathématiques diffèrent des méthodes citées précédemment ne peuvent pas permettre d'aboutir à des résultats similaires voire meilleurs que ceux produits par les premières ? Il s'agit donc d'utiliser des méthodes en dehors de celles communément utilisées et découlant de la méthode de Théis pour évaluer les propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien de la région du N'zi-Comoé (Côte d'Ivoire). Les différentes méthodes utilisées sont la méthode de l'Ecopage, la méthode de Logans et la méthode dite analytique.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La région du N'zi-Comoé, située au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, est comprise entre les longitudes 3°40' et 4°55' Ouest et les latitudes 6°20' et 8°10' Nord (Fig. 1) avec une superficie de 19 560 Km². Sa population est estimée à environ 900 000 habitants en 2010, soit une densité moyenne de 45 habitants au Km².

Le relief de la région du N'zi-Comoé est monotone et constitué d'un plateau légèrement incliné de direction Nord-Sud, avec une altitude moyenne supérieure à 150 m. Les collines de la chaîne Baoulé correspondent au faciès volcano-sédimentaire, principalement les roches vertes. La végétation est constituée de lambeaux de forêt mésophile, et de larges mailles de savanes séparées par des forêts-galeries. Il existe à côté de ces végétations naturelles, des végétations liées à l'action anthropique (mosaïques forêt-cultures, mosaïques savanes-cultures, cultures). Le climat est de type tropical humide avec une alternance de 4 saisons dont deux (2) saisons pluvieuses et deux (2) saisons sèches. Le régime climatique est caractérisé par des précipitations moyennes mensuelles variant entre 11 mm et 198 mm. La hauteur pluviométrique annuelle est de 1155 mm.

La région du N'zi-Comoé appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine baoulé-mossi. Du point de vue lithologique, la zone d'étude est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques constituées essentiellement de roches ignées, métamorphiques et volcano-sédimentaires [1] (Fig. 2). On distingue les roches éburnéennes et les roches birimiennes. Les roches éburnéennes sont constituées essentiellement de granitoïdes notamment les granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et les granodiorites. Les formations birimiennes sont essentiellement des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, métagabbro, amphibolite. Les différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs systèmes d'accidents majeurs [1, 2, 3, 4]. Ces fractures sont de direction préférentiellement Nord-Sud. Ces nombreuses fractures sont susceptibles de faciliter la circulation de l'eau dans les roches. Ces formations géologiques ont été également touchées par le phénomène d'altération. Ainsi, l'altération sur le substratum schisteux est particulièrement épaisse et argileuse. Elle est en moyenne d'une trentaine de mètre et peut atteindre 60 m. En effet, les roches plus ou moins riches en minéraux ferromagnésiens, en minéraux calciques, en plagioclases, en silice et en oxydes, ont une altération qui conduit à la formation d'argiles. L'altération des granites est essentiellement sableuse et peu épaisse (inférieure à 10 m).

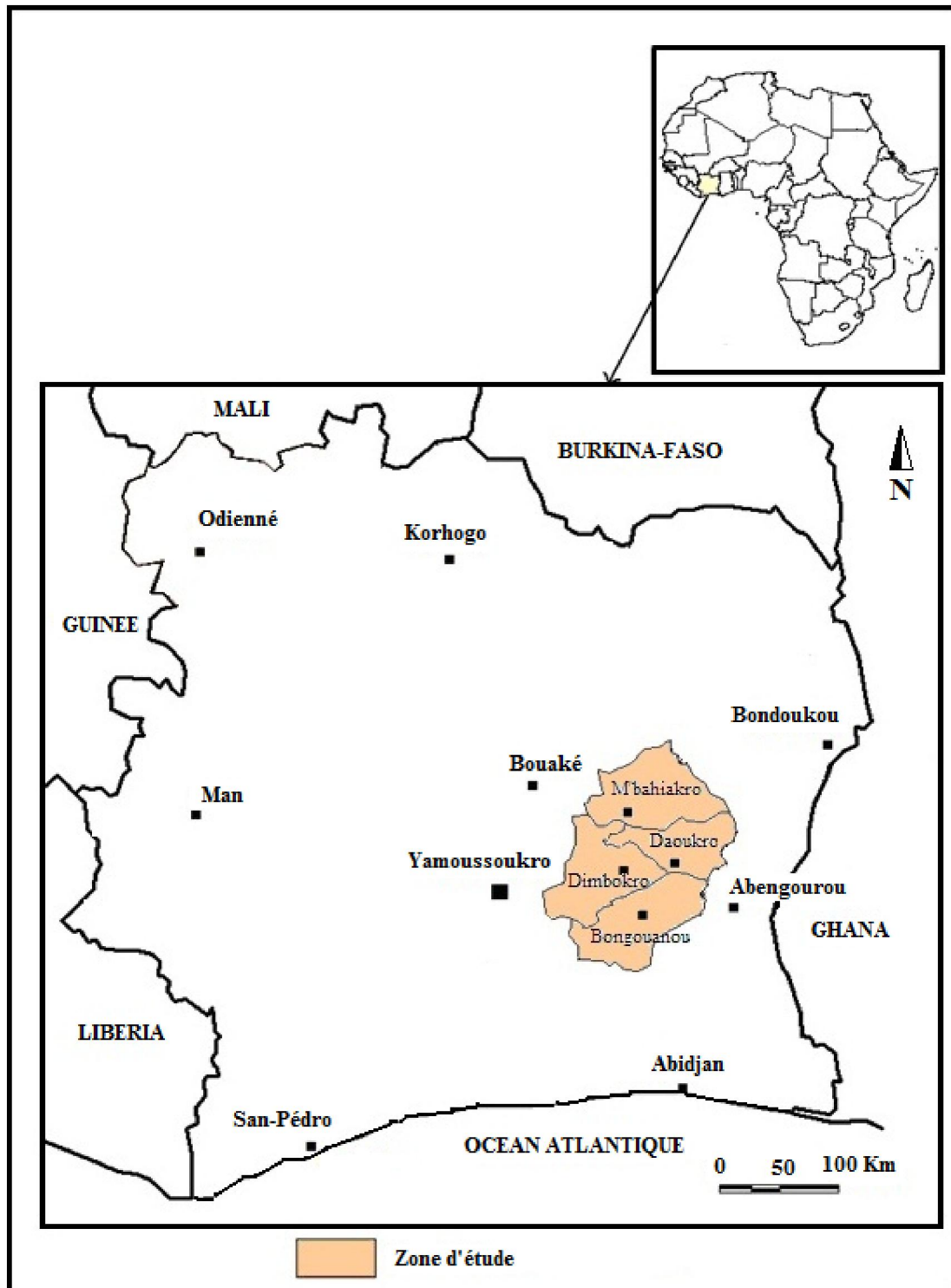


Fig. 1. Présentation de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

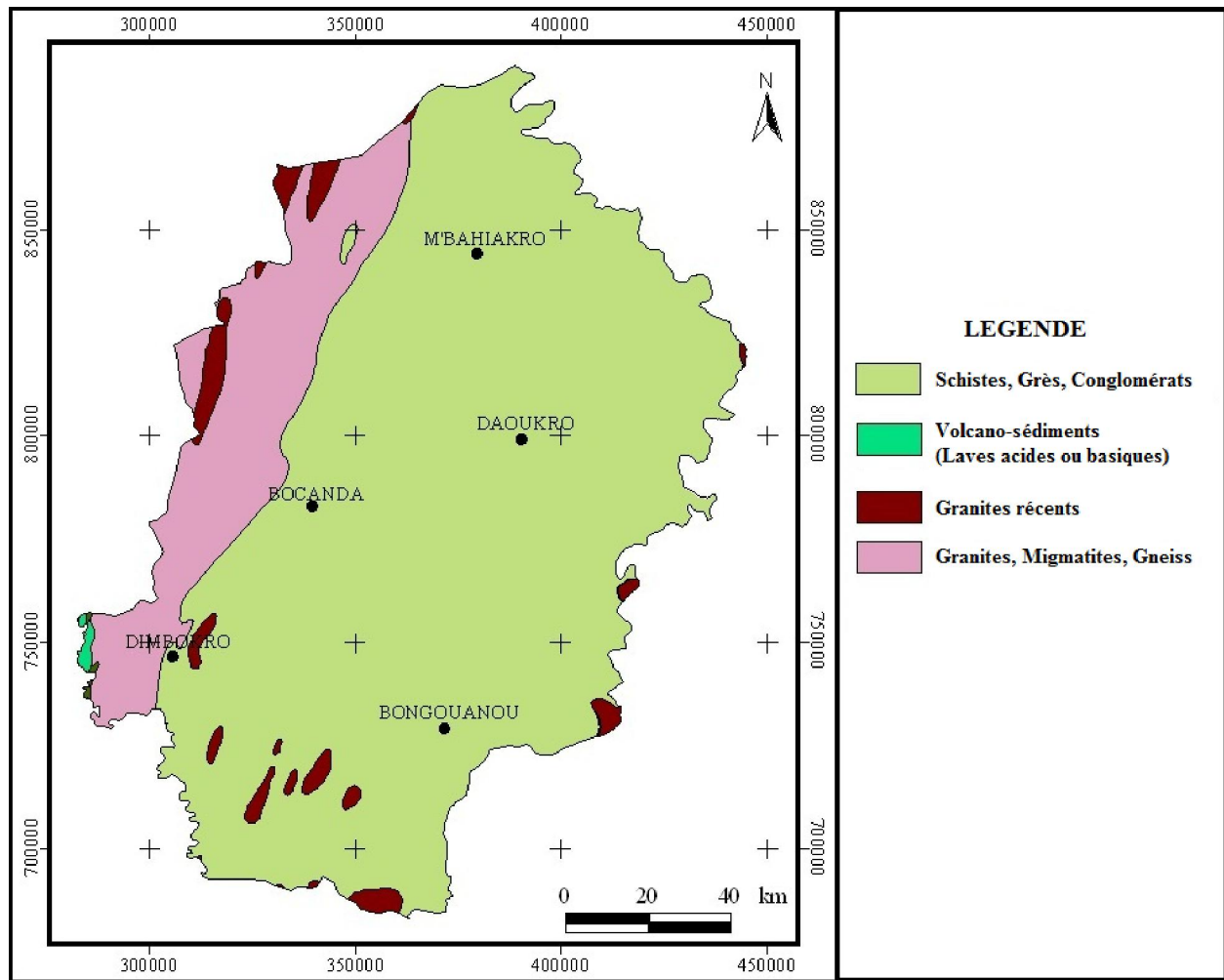


Fig. 2. Carte géologique de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES DE L'ÉTUDE

La collecte des données hydrodynamiques a été faite par le biais de dossiers de forage des programmes d'hydraulique villageoise réalisés dans la région du N'zi-Comoé de 1999 à 2000. Ces dossiers, comprenant des fiches techniques de forage et des données des essais de pompage, ont été fournis par la Direction de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) de Yamoussoukro. Au total, 150 fiches techniques représentant 150 forages ont été retenues. Dans le cadre de notre étude, plusieurs paramètres ont été retenus. Il s'agit du débit de pompage (Q) en m^3/s , du rabattement résiduel (s) en m, de la longueur de crépine (L) en m, du rayon de forage (R) en m, du rayon de tubage (R_0) en m, du temps de pompage (t) en seconde. Le choix de ces données est motivé par leur rôle joué dans les différentes méthodes pour la détermination de la conductivité hydraulique et de la transmissivité des aquifères.

3.2 MÉTHODES DE DÉTERMINATION DE LA TRANSMISSIVITÉ

La détermination des paramètres hydrodynamiques 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 [5]. Divers travaux ont montré qu'il était possible de calculer ces paramètres 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 [5]-[12]. Dans le cadre de notre étude, les méthodes utilisées pour l'estimation de la transmissivité sont la méthode de l'Écopage, la méthode de Logans et la méthode analytique.

3.2.1 MÉTHODE DE L'ÉCOPAGE

Le calcul de la transmissivité par la méthode de l'écopage (T_1) est basé sur la formule suivante (équation 1) [13]:

$$T_1 = \frac{V}{4\pi s' t} \quad (1)$$

avec :

T : transmissivité (m^2/s);

V : volume d'eau pompé (m^3) (produit du débit de pompage par le temps);

s' : rabattement résiduel dans le forage (m) ;

t : temps écoulé depuis l'extraction du volume d'eau pompé (s).

3.2.2 MÉTHODE ANALYTIQUE

La détermination de la transmissivité par la méthode analytique (T_2) s'appuie sur le produit de la conductivité hydraulique (K) par l'épaisseur de l'aquifère (e), selon l'équation 2 [10]:

$$T_2 = Ke \quad (2)$$

Etant en milieu fissuré, on a considéré « e » comme la longueur crépinée de forage.

La détermination de la conductivité hydraulique (K) est basée sur la méthode de Hvorslev (équation 3) [10]:

$$K = \frac{R_0 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2LT_0} \quad \text{lorsque } L/R > 8 \quad (3)$$

avec :

K : conductivité hydraulique (m/s) ;

L : longueur crépinée de forage (m) ;

R : rayon du forage (m) ;

R_0 : rayon du tubage (m) ;

T_0 : retard (s).

On définit le temps T_0 (retard) comme le délai nécessaire pour la dissipation de 37% du changement de pression initiale induit par l'injection. T_0 est déterminé graphiquement sur le diagramme semi-logarithmique du recouvrement relatif par rapport au temps de recouvrement [10]. Les données de terrain sont projetées sous forme logarithmique ($\log (h_t/h_0)$) sur l'axe Y par rapport au temps sur l'axe X. La valeur de T_0 est lue sur l'axe X lorsque $Y = (h_t/h_0) = 0,37$.

3.2.3 MÉTHODE DE LOGANS

L'estimation de la transmissivité à partir de la méthode de Logans (T_3) est basée sur l'expression suivante (équation 4) [8]:

$$T_3 = 1,25 \times q_s \quad (4)$$

Avec :

T : transmissivité (m^2/s) ;

q_s : débit spécifique (Q/s) (m^2/s) ;

Q : débit de pompage du palier (m^3) ;

s : rabattement résiduel du palier (m).

Pour mieux apprécier la distribution de la transmissivité, une classification de celle-ci a été établie et se présente comme suit [6]:

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

3.3 ANALYSE STATISTIQUE DES VALEURS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE ET DE TRANSMISSIVITÉ

Des études statistiques basées sur l'analyse des paramètres descriptifs de séries de valeurs ont été effectuées pour en tirer des informations utiles. Elles ont concerné les valeurs extrêmes (minimum, maximum), la moyenne (valeur centrale), l'écart-type (paramètre de dispersion) et le coefficient de variation (Cv) qui se définit comme le rapport de l'écart-type à la moyenne. Selon la valeur de Cv, trois structures de l'ensemble étudié sont mises en évidence :

- si Cv est inférieur à 0,20, la série est très homogène ;
- si Cv est compris entre 0,20 et 0,25, la série est homogène ;
- si Cv est supérieur à 0,25, la série est hétérogène.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE (K)

Les caractéristiques statistiques des 150 valeurs de conductivité hydraulique (K) calculée à partir de la méthode de Hvorslev sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1. *Caractéristiques statistiques de la conductivité hydraulique (K)*

Paramètres	Conductivité hydraulique (m/s)
Minimum	$1,79.10^{-8}$
Maximum	$3,80.10^{-6}$
Moyenne	$6,35.10^{-7}$
Ecart-type	$7,23.10^{-7}$
Coefficient de Variation	1,14

L'analyse du tableau 1 montre que les valeurs de conductivité hydraulique (K) varient entre $1,79.10^{-8}$ m/s et $3,80.10^{-6}$ m/s, pour une moyenne de $6,35.10^{-7}$ m/s. L'écart-type est de $7,23.10^{-7}$ et le coefficient de variation de 1,14. La forte valeur du coefficient de variation (supérieure à 1) traduit une hétérogénéité des valeurs de conductivité hydraulique dans l'espace.

4.2 RÉSULTATS DE LA TRANSMISSIVITÉ (T)

Les caractéristiques statistiques des 150 valeurs de transmissivité calculées à partir de la méthode de l'Ecopage (T_1), de la méthode analytique (T_2) et de la méthode de Logans (T_3) sont consignées dans le tableau 2. L'analyse du tableau 2 montre que les valeurs de transmissivité obtenues avec la méthode de l'Ecopage (T_1) varient entre $4,05.10^{-7}$ et $2,55.10^{-5}$ m^2/s avec une moyenne de $4,67.10^{-6}$ m^2/s . Celles obtenues avec la méthode analytique (T_2) oscillent entre $2,54.10^{-7}$ et $4,64.10^{-5}$ m^2/s avec une moyenne de $7,74.10^{-6}$ m^2/s . Au niveau de la méthode de Logans (T_3), les valeurs obtenues fluctuent entre $6,36.10^{-6}$ et $2,67.10^{-3}$ m^2/s avec une moyenne de $2,59.10^{-4}$ m^2/s . La transmissivité moyenne obtenue par la méthode de Logans vaut plus de 33 fois celle de la méthode analytique et plus de 55 fois la transmissivité moyenne obtenue avec la méthode de l'Ecopage.

Tableau 2. Caractéristiques statistiques des transmissivités calculées

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-Type	Coefficient de variation
Méthode de l'écopage (T₁)	4,67.10 ⁻⁶	4,05.10 ⁻⁷	2,55.10 ⁻⁵	3,70.10 ⁻⁶	0,79
Méthode analytique (T₂)	7,74.10 ⁻⁶	2,54.10 ⁻⁷	4,64.10 ⁻⁵	8,66.10 ⁻⁶	1,12
Méthode de Logans (T₃)	2,59.10 ⁻⁴	6,36.10 ⁻⁶	2,67.10 ⁻³	3,71.10 ⁻⁴	1,43

L'analyse des valeurs de transmissivité calculées à partir des différentes méthodes montrent que les écart-types des échantillons varient de façon croissante en passant de la méthode de l'écopage ($3,70.10^{-6}$) à la méthode de Logans ($3,71.10^{-4}$) (Tableau 2). Quant aux coefficients de variation, ils varient dans le même ordre. Les valeurs oscillent entre 0,79 (méthode de l'écopage) et 1,43 (méthode de Logans). Seul le coefficient de variation obtenu avec la méthode de l'Ecopage est inférieur à 1 mais reste supérieure à 0,25. Ces valeurs de coefficient de variation traduisent donc une forte dispersion des valeurs de transmissivité dans l'espace. Les transmissivités calculées sont dans l'ensemble hétérogènes. Cependant, une analyse en termes de relativité, montre que les transmissivités obtenues avec la méthode de l'écopage sont plus homogènes.

L'analyse du tableau 3 révèle les différentes classes de transmissivité faible, moyenne et forte des différentes méthodes:

- au niveau de la méthode de l'écopage, la quasi-totalité des transmissivités est de classe faible (91,33%). La classe moyenne représente 8,67 % tandis que la classe forte est de 0%;
- au niveau de la méthode analytique, la majorité des valeurs de transmissivité se trouve dans la classe faible (70%) suivie de la classe moyenne qui comprend 30%. Aucune valeur de transmissivité ne se trouve dans la classe forte ;
- concernant la méthode de Logans, les valeurs de transmissivité sont quasiment réparties dans les classes moyenne et forte avec des valeurs respectives de 44 % et 54,67%. La classe faible ne représente que 1,33%.

La distribution des transmissivités montre qu'elles sont toutes concentrées dans les classes faibles et moyennes pour les méthodes de l'Ecopage et analytique, tandis qu'elles sont plus concentrées dans les classes moyenne et forte pour la méthode de Logans.

Tableau 3. Répartition des résultats de transmissivité en fonction des classes définies

Méthodes	Classes de T	Faible	Moyen	Fort
		<10 ⁻⁵	[10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴]	>10 ⁻⁴
Méthode de l'écopage	Nombre de forages	137	13	0
	% des classes	91,33	8,67	0
Méthode analytique	Nombre de forages	105	45	0
	% des classes	70,00	30,00	0
Méthode de Logans	Nombre de forages	2	66	82
	% des classes	1,33	44,00	54,67

4.3 DISCUSSION

Les valeurs de conductivité hydraulique issues de l'interprétation de l'essai de pompage sur chaque forage des aquifères fissurés du N'zi-Comoé sont faibles et sont comprises entre $1,79.10^{-8}$ et $3,8.10^{-6}$ m/s. Dans les formations fracturées des départements de Dimbokro-Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), [3] a obtenu des valeurs allant de $2,5.10^{-8}$ à $3,2.10^{-6}$ m/s. Les résultats de cette étude sont presque identiques à ceux obtenus par [3] dans la même zone (10^{-8} à 10^{-6}). En effet, cette étude a été menée à partir de la méthode de Hvorslev [10] alors que [3] s'est appuyé sur la méthode de Théis pour

l'estimation de la conductivité hydraulique. En Côte d'Ivoire, des cas d'étude ont été déjà réalisés. Les principaux résultats montrent que les valeurs de conductivité hydraulique obtenues dans le N'zi-Comoé sont supérieures à celles obtenues par [14] dans la région d'Odienné (10^{-10} à $1,7 \cdot 10^{-11}$ m/s). Elles sont inférieures ou égales à celles déterminées par [15] dans la région de la Marahoué (10^{-6} à 10^{-4}) et [16] dans la région de Korhogo qui varient entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s. Elles s'inscrivent dans l'intervalle des valeurs calculées par [17] dans la région de Man qui sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-4} m/s et [9] avec des valeurs qui oscillent entre $2,25 \cdot 10^{-8}$ et $9,29 \cdot 10^{-5}$ m/s dans la région d'Agboville. Une comparaison avec d'autres travaux en Afrique a été faite. Ainsi, les valeurs obtenues dans le cadre de cette étude sont similaires à celles obtenues par [18] au Burkina-Faso, qui sont de l'ordre de 10^{-8} m/s. Les résultats des travaux de [19] dans les mares de Sammiwéogo et de Dissa au Burkina Faso donnent des valeurs de conductivité hydraulique qui s'échelonnent entre $5 \cdot 10^{-7}$ et $7 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dans les basaltes fracturés de Djibouti, [10] a trouvé des valeurs dans l'intervalle $[4,1 \cdot 10^{-8} - 5,2 \cdot 10^{-8}]$. D'après [3], les valeurs obtenues dans la région du N'zi-Comoé restent faibles par rapport aux conductivités hydrauliques caractéristiques des aquifères granitiques de Maheshwaram ($5 \cdot 10^{-6}$ à $9 \cdot 10^{-5}$ m.s-1) mais présentent sensiblement la même gamme de variation que les conductivités hydrauliques (10^{-9} à $3 \cdot 10^{-5}$ m.s-1) mesurées en Ouganda sur des roches cristallines également soumises à des cycles d'érosion et d'altération contrôlés tectoniquement. La conductivité hydraulique des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé s'inscrit dans la majorité des cas dans les intervalles de valeurs connues pour les formations cristallines en Afrique en général et en Afrique de l'Ouest en particulier dont la gamme de variation est généralement comprise entre 10^{-8} et 10^{-4} m.s-1. Ces résultats témoignent de la bonne performance de la méthode de Hvorslev utilisée pour l'estimation de la conductivité hydraulique. La différence de conductivité hydraulique entre les différentes formations géologiques, peut s'expliquer par le rôle aquifère joué par la couche altérite. En effet, dans la zone étudiée, la couche altérite est de faible épaisseur et est généralement dénoyée (niveau piézométrique plus bas). Par conséquent, le rôle capacitif de la couche altérite est dans ce cas quasi inexistant ; la couche d'altérite ne peut donc pas soutenir l'écoulement dans la zone fissurée et fracturée sous jacente, comme décrit par Taylor et Howard (2000) cités par [3]. Ces auteurs montrent l'existence de cette connexion hydraulique entre les couches altérite et fissurée à partir de données d'essais par pompages et de données isotopiques: durant l'essai par pompage, se met en place un phénomène de drainance, qui est attribué à la contribution en eau souterraine du manteau altéré. Ceci est confirmé par la composition isotopique de l'eau emmagasinée dans la couche altérite, ainsi que par la composition isotopique de l'eau pompée lorsque le phénomène de drainance devient stationnaire. Au contraire, dans les formations granitiques de Maheshwaram et dans certaines formations cristallines d'Afrique, il existe une bonne connexion hydraulique entre la couche altérite et la couche fissurée [3]. Les valeurs de conductivité hydraulique montrent une certaine disparité. Cette variation spatiale des valeurs de K proviendrait de l'hétérogénéité et surtout des variations latérales et verticales de faciès pétrographiques.

Les transmissivités calculées à partir des différentes méthodes sont comprises dans l'intervalle $[2,5 \cdot 10^{-7} - 2,7 \cdot 10^{-3}]$ m²/s avec des valeurs moyennes dans l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} . Les bonnes valeurs de transmissivité pourraient s'expliquer par la forte densité des réseaux de fractures et surtout l'importance de leur connexion pour permettre une circulation d'eau plus facile [3]. En effet, la zone est fortement fracturée [4]. Mais l'existence d'une densité de fracturation élevée ne suffit pas à elle seule pour garantir de bonnes propriétés hydrodynamiques s'il n'existe pas une bonne connexion des réseaux de fractures. L'existence de joints subverticaux dans l'aquifère, contribue selon Lachassagne et Wyns (2005), à la connexion de ce réseau de fractures [3]. Seule une activité tectonique intense caractérisée par une réactivation d'anciennes fractures ou la mise en place de nouvelles fractures pourrait être à l'origine de ces propriétés hydrodynamiques [20]. En effet, l'altération joue un rôle primordial dans l'origine des fractures et influence par conséquent les paramètres hydrodynamiques des aquifères [21]. Plusieurs travaux en Côte d'Ivoire ont permis d'avoir les résultats suivants. Des valeurs variant entre $1,72 \cdot 10^{-6}$ et $3,62 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $5,45 \cdot 10^{-5}$ m²/s ont été obtenues par [22] à partir de la méthode de Cooper-Jacob sur la même zone du N'zi-Comoé et avec les mêmes données. Les valeurs de transmissivité obtenues par [5] dans la région des lacs (Yamoussoukro) sont comprises entre $1,15 \cdot 10^{-6}$ et $4,48 \cdot 10^{-4}$ m²/s soit sur trois ordres de grandeur, avec une moyenne de $4,95 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Selon [6], Degallier (1977) a obtenu des valeurs qui s'échelonnent entre 10^{-4} et $8,33 \cdot 10^{-5}$ m²/s dans le bassin versant de Korhogo et Engalenc (1978-1979-1981) a obtenu des valeurs qui fluctuent entre $1 \cdot 10^{-6}$ et $1 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Des valeurs allant de 10^{-4} à 10^{-6} m²/s ont été trouvées par [23] dans le bassin de la Mé. [15] a obtenu des valeurs de transmissivités oscillant entre 10^{-4} et 10^{-7} m²/s dans la région de la Haute Marahoué. Des valeurs variant entre $1,09 \cdot 10^{-6}$ et $2,32 \cdot 10^{-3}$ m²/s ont été obtenues par [24] dans l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire. Les travaux de [25] dans le domaine cristallin ivoirien (Biankouma-Man) montrent que dans le secteur Biankouma-Man, la transmissivité moyenne est de $5,62 \cdot 10^{-6}$ m²/s avec la méthode de Théis et $1,60 \cdot 10^{-5}$ m²/s avec la méthode de Jacob. [26] ont obtenu des valeurs moyennes de $2,3 \cdot 10^{-4}$ m²/s dans les schistes et $2,6 \cdot 10^{-4}$ m²/s dans les granites à Agboville. Les résultats des travaux de [9] donnent des valeurs qui oscillent entre $1,6 \cdot 10^{-6}$ et $1,11 \cdot 10^{-3}$ m²/s sur le socle dans la région d'Agboville. Les valeurs de transmissivité obtenues dans l'ancienne boucle du cacao varient entre $6 \cdot 10^{-6}$ et $6 \cdot 10^{-3}$ m²/s [9]. Les valeurs obtenues par [27], dans la région de Toumodi évoluent entre $1,34 \cdot 10^{-6}$ et $6,93 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Des valeurs de transmissivité oscillant entre $7,76 \cdot 10^{-6}$ et $1,80 \cdot 10^{-4}$ m²/s ont été trouvées par [16]. Des travaux effectués hors de la Côte d'Ivoire mais dans les mêmes contextes de milieux cristallins et fissurés ont donné

plusieurs résultats. Au Burkina Faso, des valeurs qui oscillent respectivement entre 10^{-6} et 10^{-3} m²/s ont été trouvées par [28]. Des valeurs allant de $5,78.10^{-4}$ à $5,7.10^{-1}$ m²/s dans les basaltes fissurés de Djibouti ont été obtenues [10]. Des valeurs comprises entre 3.10^{-5} et 1.10^{-2} m²/s ont été obtenues par [29]. Les ordres de grandeur de la transmissivité obtenue à partir de la méthode de l'Écopage et de la méthode analytique s'inscrivent donc dans les valeurs obtenues par plusieurs auteurs dans la même zone, en Côte d'Ivoire et ailleurs, dans les milieux cristallins et cristallophylliens. Cependant, les valeurs de transmissivité obtenues par la méthode de Logans qui sont dans les classes moyenne et forte, montrent que cette méthode a pour inconvénient de surestimer la transmissivité. Il ressort de cette étude que les valeurs de transmissivité acceptables oscillent entre 10^{-6} et 10^{-4} m²/s. Ces valeurs de transmissivité corroborent les résultats obtenus antérieurement sur les aquifères fissurés, en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, dans les roches fracturées.

Les transmissivités obtenues dans la région du N'zi-Comoé sont hétérogènes (coefficient de variation supérieur ou égal à 0,79). Cette hétérogénéité des valeurs des transmissivités a été également constatée par [30] avec une variation de $5,97.10^{-6}$ à $7,45.10^{-4}$ m²/s pour le socle granitique et $1,83.10^{-5}$ m²/s à $2,69.10^{-4}$ m²/s sur les métasédiments et métavolcanites. La dispersion des valeurs de transmissivité est conforme aux résultats déjà obtenus dans les formations analogues, aussi bien en Côte d'Ivoire qu'en Afrique de l'Ouest par beaucoup d'autres auteurs tels que Savadogo (1984), Traoré (1985), Biémi (1992), Tapsoba (1995), Savané (1997), Lasm (2000) [9]. La grande dispersion des valeurs des différents paramètres hydrodynamiques provient de l'importante hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés au niveau de chaque niveau aquifère et surtout des variations quantitatives et qualitatives de la fracturation [31]. En effet, de nombreux travaux ont montré le rôle important joué par la géométrie des réseaux de fractures sur les propriétés d'écoulement et de transport dans les milieux souterrains discontinus [3, 4, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]. Cela pourrait aussi s'expliquer par le fait que les différents forages utilisés ne captent pas l'aquifère à la même profondeur, ni sur une même épaisseur.

5 CONCLUSION

Le travail a été réalisé à partir d'une combinaison de méthodes hydrodynamiques (méthode analytique, méthode de l'écopage et méthode de Logans). Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues varient de $1,79.10^{-8}$ à $3,8.10^{-6}$ m/s. Les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-5} m²/s avec la méthode de l'écopage et la méthode analytique et de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} m²/s avec la méthode de Logans. La méthode de l'écopage et la méthode analytique donnent des résultats qui s'inscrivent dans les ordres de grandeurs généralement obtenus en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire (10^{-6} à 10^{-4}). Les valeurs des différents paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique et transmissivité) sont hétérogènes et varient en fonction de la nature géologique des terrains aquifères et de la densité de fracturation de ces terrains. Les résultats obtenus ont aussi permis de contribuer à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé. Les conclusions de cette étude soulèvent la problématique de l'efficacité des méthodes appliquées comparativement à celles généralement utilisées et dérivées de la méthode de Théis.

REFERENCES

- [1] Y.B. Daouda, "Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtêkro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest africain," Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, 190 p., 1998.
- [2] N.H. Kadio, M.B. Saley, B.E. N'dri, A. Ouattara et J. Biémi, "Contribution à l'interprétation des linéaments par l'exploitation des Pseudo Images, de l'hydrographie en région tropicale humide: Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire)," *European Journal of Scientific Research*, Vol. 24, N°1, pp. 74-93, 2008.
- [3] M. Koita, "Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)," Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 235p, 2010.
- [4] Y.A. N'go, T. Lasm, M. Koita et I. Savané, "Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)," *Télédétection*, Vol. 9, N°1, pp. 33-42, 2010.
- [5] G. Soro, N. Soro, K.E. Ahoussi, T. Lasm, K.F. Kouamé, T.D. Soro et J. Biémi, "Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphiques dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire)," *Estudios Geológicos*, Vol. 66, N°2, pp. 227-242, 2010.
- [6] T. Lasm, "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, 274 p, 2000.
- [7] D. Dakouré, "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, 255 p, 2003.

- [8] A. Alassane, "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, 145 p, 2004.
- [9] K.E. Ahoussi, "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, 270 p, 2008.
- [10] A. Houmed-Gaba, "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 de l'Université de Poitiers, France, 194 p, 2009.
- [11] G. Soro, "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, 2010.
- [12] D. Baka, T. Lasm, M.S. Oga, M. Youan-Ta, O. De Lasm, O.S. Kouakou, B.F. Ettien, "Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Centre of Côte d'Ivoire)", American journal of scientific and industrial research, Vol. 2, N°2, pp. 310-322, 2011.
- [13] F. Lalbat, "Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France)," Thèse de Doctorat de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, 234 p, 2006.
- [14] I. Savané, "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 de Doctorat ès Sciences Naturelle de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 396 p, 1997.
- [15] J. Biémi, "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, 480 p, 1992.
- [16] J.P.R. Jourda, "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 435p, 2005.
- [17] K.F. Kouamé, "Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semimontagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitaires," Thèse de 3ème cycle, Univ. Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 194 p, 1999.
- [18] A.N. Savadogo, "Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute -Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili," PhD Thesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France, 351 p, 1984.
- [19] Y. Koussoubé, "Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga)," Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop De Dakar, Sénégal, 263 p, 1996.
- [20] J.P. Faillat, "Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest)," Hydrogéologie, N°1, pp. 65-76, 1986.
- [21] J.C. Maréchal, B. Dewandel et K. Subrahmanyak, "Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer", Water resources Research., N°40, W11508, doi: 10.1029/2004WR003137, 2004.
- [22] A.M. Kouassi, K.E. Ahoussi, K.A. Yao, W.E.J.A. Ourega, K.S.B. Yao, J. Biémi, "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, 2012.
- [23] N. Soro, "Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire," Thèse de 3è cycle Univ. Scient. Technol. et Médicale de Grenoble, France, 243 p, 1987.
- [24] T. Lasm, K.F. Kouamé, M.S. Oga, J.R.P. Jourda, N. Soro et H.B. Kouadio, "Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)," Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, Vol.5, N°97, pp.1-15, 2004a.
- [25] Y.B. Koffi, "Contribution à l'analyse des méthodes d'interprétation des essais de pompage : cas des méthodes dérivées de la solution de Théis (méthodes grapho-analytique et méthodes numériques) : Application aux secteurs Biankouma-Man et Dabou," DEA de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 53p, 2003.
- [26] Y.A. N'go, D.L. Goné, I. Savané et M.M. Goblé, "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, N°1, pp.127-144, 2005.

- [27] K.A. Yao, A.M. Kouassi, Y.B. Koffi et J. Biémi, "Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (centre de la côte d'Ivoire)," *Journal of Environmental Hydrology*, N°18, pp.1-15, 2010.
- [28] J.M. Vouillamoz, "La caractérisation des aquifères de socle du Burkina Faso par sondages RMP. Institut de Recherche pour le Développement, UR 027 GEOVAST, Burkina Faso," N°1-4, 2002.
- [29] B.H. Aissata, "Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger), Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey," 220 p, 2010.
- [30] N. Soro, "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," 272 p, 2002.
- [31] M. Bahir, P. Carreira, M. Oliveira Da Silva et P. Fernandes, "Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc)," *Estudios Geológicos*, Vol.64, N°1, pp. 61-73, 2008.
- [32] I. Savané et J. Biémi, "Téledétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)," *Téledétection*, N°1, pp.47-64, 1999.
- [33] T. Lasm et M. Razack, "Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique associé," *Comptes Rendus Académie des Sciences, Géoscience*, N°333, pp.225-232, 2001.
- [34] T. Lasm, K.F.Kouamé, N. Soro, J.P.R. Jourda, et J. Biémi, "Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)," *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°5, pp.135-154, 2004b.
- [35] J.P.R. Jourda, M.B. Saley, E.V. Djagoua, K.J. Kouamé, J. Biémi et M. Razack, "Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation," *Téledétection*, Vol.5, N°4, pp.339-357, 2005.
- [36] J.P.R. Jourda, E.V. Djagoua, K.F. Kouamé, M.B. Saley, C. Gronayes, J.J. Achy, J. Biémi et M. Razack, "Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat," *Téledétection*, Vol.6, N°2, pp.123-142, 2006a.
- [37] J.P.R. Jourda, M.B. Saley, E.V. Djagoua, K.J. Kouamé, J. Biémi et M. Razack, "Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation," *Téledétection*, Vol.5, N°4, pp. 339-357, 2006b.
- [38] K.F. Kouamé, M. Bernier, D.L. Goné, M.B. Saley, R. Lefèbre, N. Soro et A. Koudou, "Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)," *Téledétection*, Vol.7, N°1-4, pp.217-235, 2007.
- [39] T. Lasm, M. Youan-Ta, J.P.R. Jourda, K.F. Kouamé, "Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire)," *European Journal of Scientific Research*, Vol.21, N°1, pp. 196-208, 2008.
- [40] M. YouanTa, T. Lasm, J.P. Jourda, K.F. Kouamé, M. Razack, "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, 2008.
- [41] V.M. Sorokoby, M.B. Saley., K.F. Kouamé, M.E.V. Djagoua, M. Bernier, K. Affian et J. Biémi, "Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): contribution à la gestion des ressources en eau souterraine," *Téledétection*, Vol. 9, N°3-4, pp.209-223, 2010.
- [42] M. Koita, H. Jourde, D. Ruelland, K. Koffi, S. Pistre et I. Savané, "Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire). *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.55, N°5, pp. 805-820, 2010.