



ANALYSE GÉOSTATISTIQUE DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DES AQUIFÈRES FISSURÉS DU CENTRE-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

STATISTICAL ANALYSIS OF EMMAGASINEMENT FACTOR OF CRACKED AQUIFER OF THE CENTRAL EAST OF IVORY COAST

KOUASSI A. M.^{1}, OKAINGNI J. C.¹, BAKA D.², LASM T.², BIEMI J.²*

¹ 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), Tél. (+225) 30 64 67 15 (Côte d'Ivoire) ;

² Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM) ; 22 BP 582 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire).

**Auteur Correspondant : E-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr.*

RÉSUMÉ

L'étude a été réalisée dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire plus précisément dans les départements de M'bahiakro, Dimbokro et Daoukro. Elle a pour objectif d'analyser les propriétés hydrodynamiques plus particulièrement le coefficient d'emmagasinement des aquifères fissurés d'un point de vue géostatistique, en vue d'une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau souterraine de cette région. Pour ce faire, une compilation de données regroupant un ensemble de 150 fiches techniques de forage de même que les essais de pompage disponibles dans la zone a été faite. La méthodologie a consisté d'une part à la détermination du coefficient d'emmagasinement à partir de la méthode de l'écopage. D'autre part, une analyse géostatistique de ce paramètre a été effectuée. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement calculées fluctuent entre $1,88.10^{-5}$ et $7,96.10^{-1}$ et s'échelonnent sur cinq ordres de grandeurs montrant l'hétérogénéité du milieu. Cependant, ces résultats

obtenus s'inscrivent dans les ordres de grandeur généralement obtenus en milieux fissurés (10^{-7} - 10^{-1}). Les résultats de l'analyse géostatistique montrent que le modèle qui ajuste au mieux les valeurs du coefficient d'emmagasinement est le modèle sphérique. L'estimation du coefficient d'emmagasinement par krigeage est satisfaisante et a permis de mettre en évidence le comportement spatial de ce paramètre essentiel dans la caractérisation des capacités de stockage des réservoirs. Les résultats acquis dans cette étude concourent à une meilleure compréhension des propriétés hydrogéologiques du Centre-Est de la Côte d'Ivoire.

Mots clés: Coefficient d'emmagasinement ; Analyse géostatistique ; Aquifères fissurés ; Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The study was carried out in the Center-Eastern of Ivory Coast specifically in the departments of M'bahiakro, Dimbokro and Daoukro. This work is aimed at analyzing the hydrodynamic properties specifically the aquifer storage coefficient using a geostatistical approach, for a better understanding and management of groundwater resources in this region. To do this, a compilation of data comprising a set of 150 drilling data sheets as well as pumping tests available in the area was made. The methodology consisted of one part, in the determination of the storage coefficient from the method of scooping. On the other hand, a geostatistical analysis for this parameter was performed. The values of storage coefficient calculated fluctuate between $1.88.10^{-5}$ and $7.96.10^{-1}$ and range over five orders of magnitude showing the heterogeneity of the environment. However, these results are part of the orders of magnitude generally obtained in fissured aquifers (10^{-7} - 10^{-1}). The results of the geostatistical analysis show that the model that best adjusts to the values of the storage coefficient is the spherical model. The estimated storage coefficient by kriging is satisfactory and helped to highlight the spatial behavior of this essential parameter in the characterization of the storage capacity of reservoirs. The results obtained in this study contribute to a better understanding of hydrogeological properties of Center-Eastern of Ivory Coast.

Keywords: Storage coefficient; Geostatistical analysis; Fissured aquifers; Ivory Coast.

INTRODUCTION

L'optimisation des résultats et des coûts des travaux de prospection hydrogéologique demeure conditionnée par le degré de connaissance des paramètres hydrodynamiques des aquifères (Sinan et Razack, 2006). En effet, les aquifères sont généralement caractérisés par leur capacité à stocker de l'eau et à conduire le flux. Ces propriétés hydrodynamiques sont généralement estimées par l'interprétation de mesures *in situ* à partir des essais de pompage. Les coûts importants engendrés par leur mise en œuvre ne permettent pas toujours de multiplier les essais de façon satisfaisante dans l'espace et dans le temps, et la densité d'observation est parfois faible voire inexistante pour caractériser les hétérogénéités des réservoirs, d'où l'intérêt de recourir à des estimations spatiales avec des moyens plus économiques tels que la géostatistique. L'utilisation de la géostatistique pour la caractérisation des paramètres hydrauliques des réservoirs fracturés en Côte d'Ivoire a été abordée par plusieurs auteurs (Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; Razack et Lasm, 2006 ; Youanta, 2008). La plupart des variables quantitatives utilisées en Sciences de la Terre telle que le coefficient d'emmagasinement peuvent être considérées comme des variables régionalisées (Massoud, 1988 *in* Lasm, 2000). En effet, l'application de la géostatistique à une variable donnée suppose la répétitivité de façon aléatoire de celle-ci. Le coefficient d'emmagasinement, phénomène spatial peut être soumis à l'analyse géostatistique. Son outil mathématique est le variogramme. Il permet de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance augmente. L'usage du variogramme permet de préciser certaines caractéristiques qualitatives du milieu à savoir la continuité, l'anisotropie, la taille de la régionalisation, la présence de structures imbriquées, etc. En pratique, son usage revient à ajuster une fonction analytique (modèle) au variogramme expérimental. C'est dans cette optique que nous avons entrepris ce travail dans la région du Centre-Est de la Côte d'Ivoire.

L'objectif de ce travail est d'analyser les propriétés hydrodynamiques plus particulièrement la capacité de stockage traduite par le coefficient d'emmagasinement des aquifères fissurés d'un point de vue géostatistique, en vue d'une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau souterraine de cette région. L'étude a été réalisée dans l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) plus précisément dans les départements de M'bahiakro, Dimbokro et Daoukro. La méthodologie a consisté d'une part à la détermination du coefficient d'emmagasinement à partir de la méthode de l'écopage. D'autre part, une analyse géostatistique de ce paramètre a été effectuée.

CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La zone d'étude regroupe les départements de M'bahiakro, Dimbokro et Daoukro. Elle est située au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, et est comprise entre les longitudes 3°40' et 4°55' Ouest et les latitudes 6°20' et 8°10' Nord (Figure 1). Le relief de la région est monotone et constitué d'un plateau de direction Nord-Sud, avec une altitude moyenne supérieure à 150 m. Des collines de direction Sud-Ouest-Nord-Est correspondant au sillon volcano-sédimentaire, traversent la région. 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 quatre (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. Les températures moyennes dans la région varient entre 25 °C et 29 °C avec des pics de 28,41 °C à 28,49 °C au cours des mois de février à mars.

La zone d'étude appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine baoulé-mossi. Elle est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques constituées essentiellement de roches magmatiques et métamorphiques (Yao, 1998). Les roches magmatiques sont constituées essentiellement de granitoïdes notamment les granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et les granodiorites. Les formations métamorphiques sont essentiellement des formations volcano-sédimentaires représentées par 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 et amphibolite. Les formations volcano-sédimentaires représentent plus de 85% de la superficie de la région contre près de 15% pour les formations magmatiques.

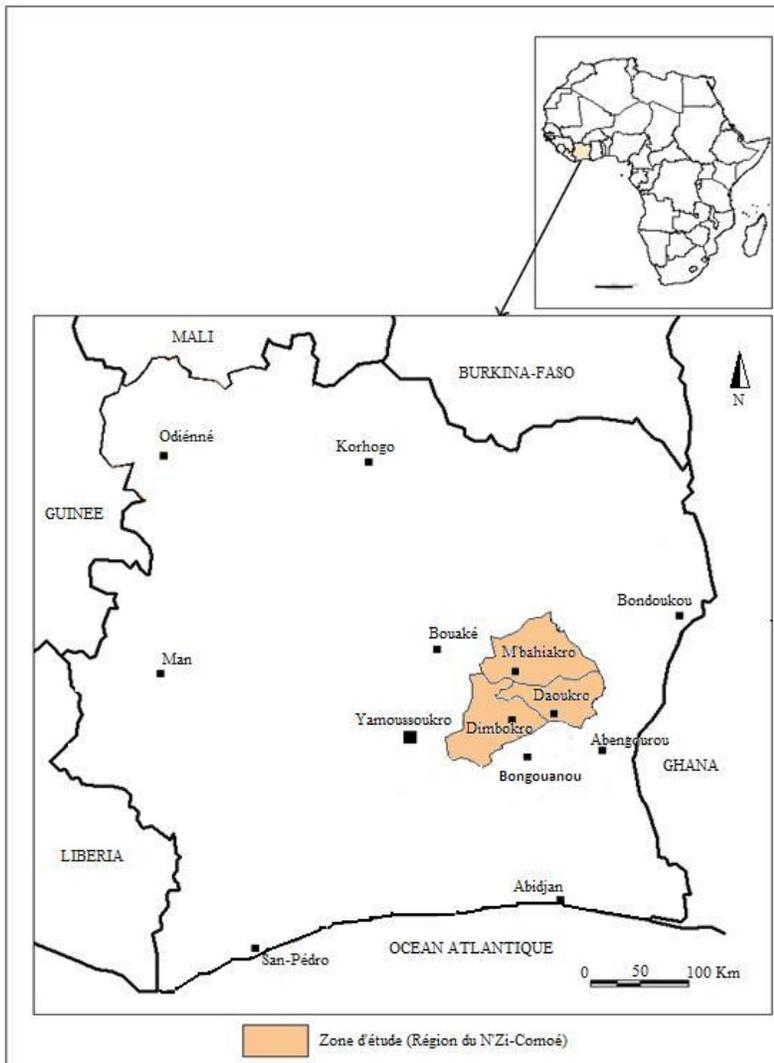


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

Les différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs familles d'accidents majeurs (Kadio et al., 2008 ; Koita et al., 2010 ; N'go et al., 2010). Ces fractures sont de direction préférentiellement Nord-Sud. Ces nombreuses fractures jouent un rôle essentiel dans l'importance qualitative et quantitative du

réservoir et partant son coefficient d'emmagasinement. Ces fractures sont susceptibles de faciliter la circulation de l'eau dans les roches. 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 (Jourda et al., 2005 ; Jourda et al., 2006a ; Jourda et al., 2006b ; Lasm et al., 2008 ; Youanta et al., 2008 ; Kouamé et al., 2010 ; N'go et al., 2010 ; Koita et al., 2010 ; Sorokoby et al., 2010). 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 60m.

DONNÉES ET MÉTHODES

Données de l'étude

La collecte des données hydrodynamiques a été faite par le biais des dossiers techniques de forage des programmes d'Hydraulique Villageoise réalisés dans la région du N'zi-Comoé de 1999 à 2000 lors des programmes financés par le PROJET DON JAPONAIS AEP-II-3. Ces dossiers, comprenant des fiches techniques de forage et des données des essais de pompage, ont été fournis par la Direction Territoriale de l'Hydraulique de Yamoussoukro. Un total de 150 fiches techniques représentant 150 forages ont été retenues. Dans le cadre de cette étude, plusieurs paramètres ont été pris en compte. Il s'agit du débit de pompage (Q_p) en m^3/s , du temps de pompage (t) en seconde (s), du rabattement (s') en mètre (m), du rayon du forage (R) en mètre (m) et des valeurs de transmissivité (T) en m^2/s . Les données de transmissivité utilisées ont été calculées à partir de la méthode de Cooper-Jacob (Kouassi et al., 2012).

Méthode de détermination du coefficient d'emmagasinement

Le calcul du coefficient d'emmagasinement (S) a été effectué à partir de la méthode de l'écopage (Lalbat, 2006; Houmed-Gaba, 2009). L'expression du coefficient d'emmagasinement (S) est déduite des équations suivantes (Ferris et al., 1962 in Lalbat, 2006) (équations 1-8):

$$s' = \frac{V}{4\pi T t e^{R(\frac{2S}{4TT})}} \quad (1)$$

De l'équation 1, on déduit le coefficient d'emmagasinement (S) dont l'équation est :

$$S = 2Tt \frac{\ln(\ln \frac{V}{4\pi T t s'})}{\ln R} \quad (2)$$

avec :

S : coefficient d'emmagasinement ;

V : volume d'eau pompé (m³) ;

T : transmissivité (m²/ s) ;

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

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

R : rayon effectif du forage (m).

Conditions :

$$\begin{cases} i) X = \frac{V}{4\pi T t s'} > e \\ ii) Y = \ln X > 1 \\ iii) R > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Analyse géostatistique du coefficient d'emmagasinement

La géostatistique est une méthode d'interpolation spatiale qui permet d'étudier les phénomènes régionalisés. Un phénomène régionalisé est un phénomène naturel qui se déploie dans l'espace et/ou dans le temps avec une certaine structuration. Développée initialement pour l'estimation des caractéristiques des gisements miniers, la géostatistique est aujourd'hui appliquée à d'autres domaines de recherche dont les sciences de l'eau. En Côte d'Ivoire, dans le

domaine de l'Hydrogéologie, plusieurs auteurs tels que Lasm (2000), Jourda (2005), Razack et Lasm (2006), Baka (2006), Youan-Ta (2008), Baka et al. (2011), ont appliqué la géostatistique à l'étude des paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité et le débit spécifique. L'interprétation des résultats est basée sur le variogramme qui est l'outil mathématique de géostatistique. Il permet de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance augmente et de préciser certaines caractéristiques qualitatives du milieu (continuité, anisotropie, régionalisation, etc.). Il est défini par la fonction $\gamma(h)$ (équation 4):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} VAR[Z(x+h) - Z(x)] = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad (4)$$

où x est le vecteur de coordonnées, h le vecteur distance et $Z(x)$ et $Z(x+h)$, les valeurs de conductivité électrique aux coordonnées x et $x+h$.

On étudie généralement le comportement du variogramme au voisinage de l'origine (effet de pépite), et à l'infini (portée, palier). Le comportement du variogramme à l'origine traduit le degré de continuité et de régularité spatiale de la variable régionalisée. Le voisinage de l'origine est caractérisé par la plus petite des distances entre les points d'observation. Concernant le comportement du variogramme à l'infini, quand la distance h prend des valeurs de plus en plus grandes, le variogramme peut atteindre un palier et se stabiliser. Le variogramme peut être borné ou au contraire croître à l'infini. Il existe plusieurs modèles théoriques dont les plus couramment utilisés sont les modèles : linéaire, sphérique, exponentiel et gaussien. Ce sont les modèles sphérique et exponentiel qui ont été retenus dans le cadre de notre étude car plus indiqués pour les phénomènes touchant aux Sciences de la Terre (Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; Razack et Lasm, 2006 ; Youan-Ta, 2008 ; Baka et al., 2011).

Le choix du meilleur modèle sera guidé par la valeur des erreurs quadratiques qui représente la somme des carrés de la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du variogramme. Ainsi, le modèle ajustant au mieux le variogramme expérimental sera défini par celui qui aura la plus faible valeur des écarts moyens quadratiques (Lasm, 2000). Dans le cadre de l'analyse géostatistique du coefficient d'emmagasinement, nous avons utilisé les valeurs logarithmiques car les valeurs brutes présentent des valeurs d'écart-type et de coefficient de variation élevées. L'usage de la transformée logarithmique permet de minimiser les fluctuations des variogrammes expérimentaux et d'obtenir un variogramme beaucoup plus structuré que la valeur brute. Par hypothèse, si la transformée logarithmique est structurée alors

la valeur brute est également structurée. L'analyse variographique a été réalisée avec le logiciel VariowinTM.

Après l'analyse variographique, l'interpolation spatiale des valeurs brutes du coefficient d'emménagement a été réalisée à l'aide de la méthode de krigeage. La carte résultante a été établie à partir du logiciel Surfer 8.0.

RÉSULTATS

Résultats d'estimation du coefficient d'emménagement

Les caractéristiques statistiques des valeurs de coefficient d'emménagement (S) calculées à partir des transmissivités issues de la méthode de Copper-Jacob sont synthétisées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques statistiques des coefficients d'emménagement

Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-Type	Coefficient de variation
$1,88.10^{-5}$	$8,71.10^{-1}$	$7,96.10^{-1}$	$1,46.10^{-1}$	1,68

L'analyse du tableau 1 montre que les valeurs de coefficient d'emménagement sont dans l'intervalle $[1,88.10^{-5} ; 7,96.10^{-1}]$ avec une moyenne de $8,71.10^{-1}$ et un écart-type de $1,46.10^{-1}$. Le coefficient de variation (CV) est de 1,68. Ces valeurs mettent en exergue la forte dispersion des valeurs du coefficient d'emménagement dans l'espace.

Résultats de l'analyse géostatistique du coefficient d'emménagement

L'analyse des variogrammes a consisté à décrire les comportements à l'origine et les comportements aux grandes distances. Cette analyse a abouti à la détermination des paramètres intrinsèques du variogramme que sont :

- l'effet de pépité (Co) ;
- le plateau ou balance (C1) ;
- le palier ($\sigma^2 = C=C1+Co$) ;
- la portée (a).

Les résultats de la modélisation des valeurs logarithmiques du coefficient d’emménagement sont illustrés par les figures 2 et 3.

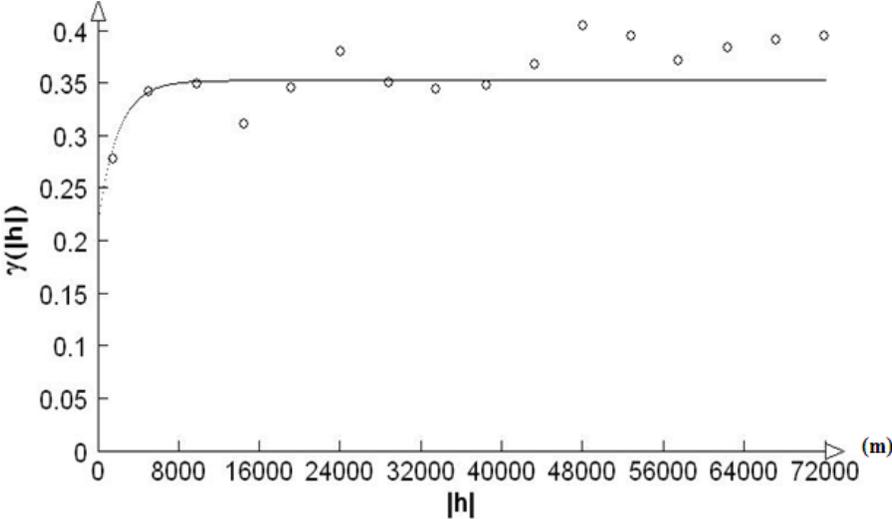


Figure 2 : Variogramme des valeurs logarithmiques du coefficient d’emménagement (S) : modèle exponentiel

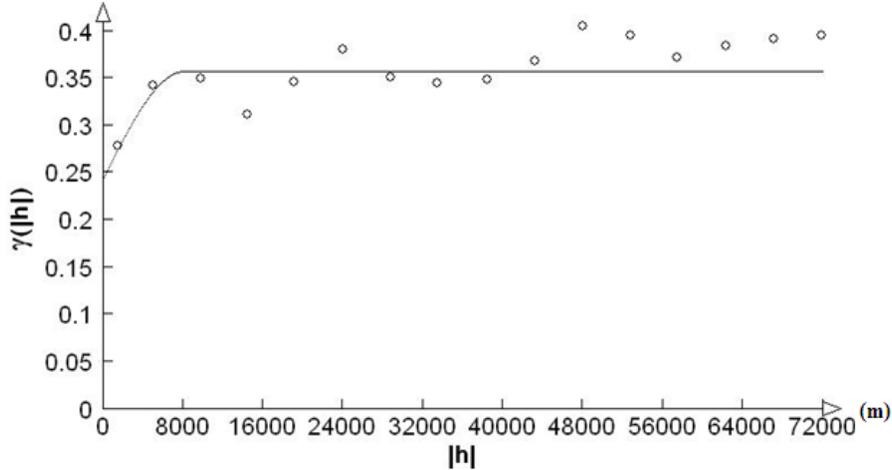


Figure 3 : Variogramme des valeurs logarithmiques du coefficient d’emménagement (S) : modèle sphérique

Les résultats des paramètres intrinsèques des variogrammes des valeurs logarithmiques de (LogS) sont synthétisés dans le tableau 2. Soit « a » la portée (m), « C₀ » l'effet de pépité ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$), « C₁ » le plateau ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$), « C (C₀+C₁) » le palier ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$) et « α » l'erreur quadratique.

Tableau 2 : Paramètres de régionalisation

Modèles	a	C ₁	Co	C	α
Sphérique	8 095	0,12	0,23	0,35	$6,83.10^{-6}$
Exponentiel	5 935	0,12	0,23	0,35	$7,62.10^{-6}$

Les deux variogrammes présentent une même valeur d'effet de pépité (0,23) témoignant de l'irrégularité locale du coefficient d'emmagasinement. En ce qui concerne les portées, elles sont de 8,09 km pour le modèle sphérique et de 5,93 km pour le modèle exponentiel. Quant aux valeurs des erreurs quadratiques moyennes, elles sont de $6,83.10^{-06}$ et $7,62.10^{-06}$ respectivement pour les modèles sphérique et exponentiel. Le modèle qui ajuste au mieux les valeurs du coefficient d'emmagasinement est le modèle sphérique au regard de la faiblesse de l'erreur quadratique. Les différents résultats obtenus montrent que le coefficient d'emmagasinement, est structuré, ce qui permet d'envisager sa régionalisation sur l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi, la cartographie de cette variable a été réalisée à partir des caractéristiques du modèle sphérique (Figure 4). La distribution des valeurs de coefficient d'emmagasinement est hétérogène sur l'ensemble de la zone d'étude et met ainsi en évidence des zones de fortes et faibles valeurs de coefficient d'emmagasinement :

- au niveau du département de M'bahiakro, les fortes valeurs de coefficient d'emmagasinement sont localisées dans la partie centrale et au Nord-Est ;
- en ce qui concerne le département de Daoukro, les valeurs de coefficient d'emmagasinement sont relativement élevées sur l'ensemble du département ;
- dans le cas du département de Dimbokro, les fortes valeurs de coefficient d'emmagasinement se localisent dans la partie Sud-Est principalement ;
- les autres parties des départements sont caractérisées par des valeurs plus faibles.

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement sont relativement élevées d'Ouest en Est. Cela pourrait être dû au fait que la partie ouest constituée en grande partie de formations granitiques est moins poreuse que la partie Est constituée de formations schisteuses. Ainsi, les fortes valeurs au niveau des schistes peut s'expliquer par l'existence au sein de ces roches de structures feuilletées leurs permettant d'avoir des capacités plus grandes de retenir de l'eau.

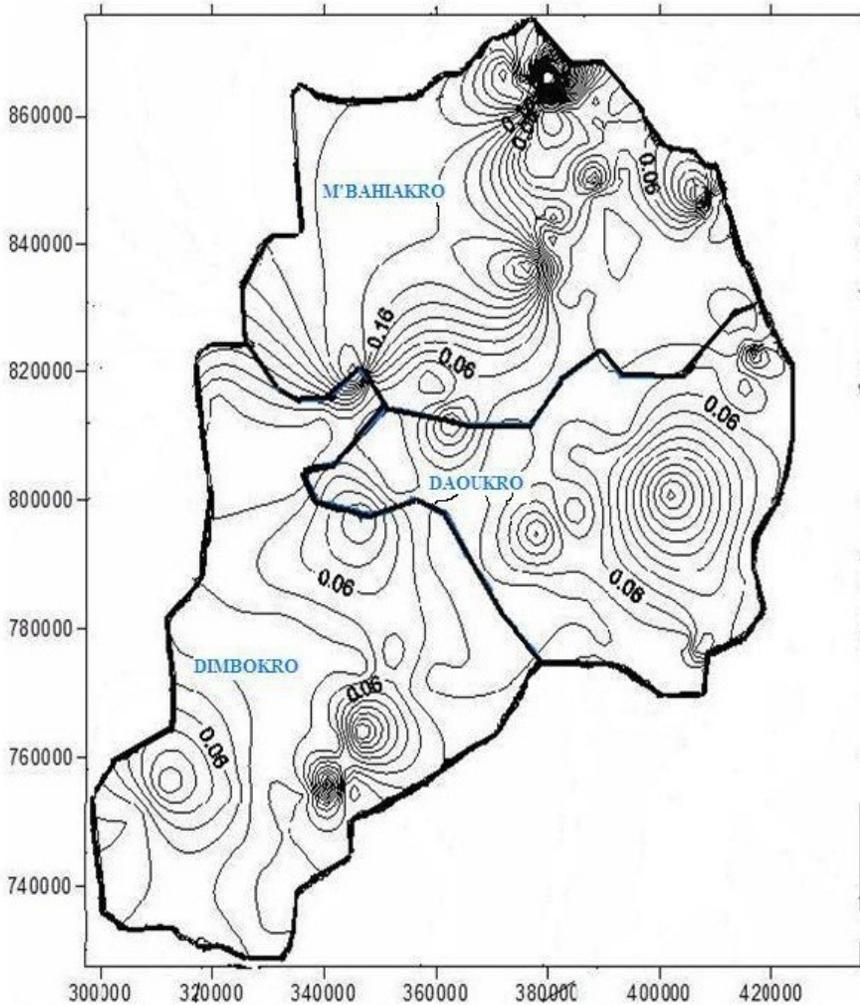


Figure 4 : Carte des valeurs du coefficient d'emmagasinement

DISCUSSION

Les résultats obtenus au cours de ce travail montrent que les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont dans l'ordre de 10^{-3} à 10^{-1} . Une comparaison des résultats obtenus avec ceux des travaux antérieurs a été effectuée. Selon les résultats de plusieurs études, il semble que les roches fracturées ont en général des valeurs de coefficient d'emmagasinement qui fluctuent entre 10^{-7} et 10^{-2} (Mortiers et al., 1965 ; Lapcevic et al., 1993 *in* Lasm, 2000). Au Centre de la Côte d'Ivoire, Faillat (1986a) a obtenu des valeurs de S allant de 9.10^{-5} à $1,1.10^{-3}$ (Jourda, 2005). Engalenc (1981) *in* Jourda (2005) a obtenu des valeurs de S de l'ordre de 10^{-2} pour les réservoirs de fissures. Faillat (1986b) a aussi obtenu pour les aquifères à substratums éruptifs et métamorphiques, des valeurs de S de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} (Jourda, 2005). Loba et Koutouan (2013) ont obtenu au cours de leurs travaux des valeurs de coefficients d'emmagasinement qui varient de $3,014.10^{-5}$ à $9,6.10^{-3}$ avec une moyenne de $1,8.10^{-3}$ à partir de la méthode de Cooper-Jacob en descente dans la région ouest de la Côte d'Ivoire (Guiglo-Duekoué) qui se situe dans un contexte cristallin fissuré (domaine archéen). En effet, les essais de pompage ont été réalisés sans piézomètre. De ce fait, les travaux ont été effectués avec l'hypothèse de l'existence de piézomètres fictifs situés à 1 m des forages soumis aux pompages. Vouillamoz (2002), a obtenu des valeurs de S, oscillant entre 1.10^{-4} et 1.10^{-1} au Burkina Faso ; Guissimbana et al. (1997) ont trouvé des valeurs allant de 1.10^{-3} à 3.10^{-2} au Burkina Faso. D'après Jourda (2005), Boukari et Guiraud (1985) ont obtenu dans les migmatites fracturées du Bénin des valeurs allant de 5.10^{-6} à 6.10^{-5} et au Burkina Faso des valeurs de $2,64.10^{-5}$ à $5,4.10^{-5}$ ont été trouvées dans les granito-gneiss de Zigla et de Mogtedo. Dans le Nord-Est du Maroc, Mortier et al. (1965) ont obtenu sur les roches volcaniques fracturées des valeurs variant de 2.10^{-2} à 7.10^{-2} (Lasm, 2000). De même Jalludin (1993) a évalué dans les réservoirs fracturés volcaniques de Djibouti des valeurs du coefficient d'emmagasinement oscillant entre 5.10^{-6} et 4.10^{-2} . Au regard des valeurs généralement obtenues dans des milieux similaires et des caractéristiques statistiques des valeurs générées dans le cadre de cette étude (moyenne, écart-type, coefficient de variation), il ressort que les valeurs acceptables du coefficient d'emmagasinement s'échelonnent entre 10^{-7} et 10^{-1} . Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude s'inscrivent en général dans les ordres de grandeur obtenus en milieux fissurés.

Le coefficient d'emmagasinement est un paramètre très variable dans l'espace et les données disponibles obtenues des tests de pompage sont souvent rares et en faibles quantités. Cette difficulté peut être palliée par une estimation de ce

paramètre à l'aide de la géostatistique. Le calcul des différents variogrammes a permis de montrer que les valeurs transformées des coefficients d'emmagasinement (Log(S)) sont structurées. Ce résultat est en accord avec les résultats des travaux de certains auteurs (Youanta, 2008) qui montrent que la structuration est meilleure avec les valeurs logarithmiques.

L'analyse variographique a mis en évidence la présence d'effet de pépite. En effet, l'effet de pépite est en général dû à l'effet combiné de deux (2) raisons principales (Lasm, 2000) :

- l'existence d'une micro-régionalisation ;
- l'existence d'incertitudes de mesures.

La discontinuité à l'origine signalée, est un phénomène couramment rencontré (Lasm, 2000; Jourda, 2005). La distance de structuration de l'ordre de 14,91 km indique que la structuration dans cette région de la Côte d'Ivoire est importante sans doute du fait de la bonne inter-connectivité des fractures. Des études analogues menées dans différentes régions de la Côte d'Ivoire, par Lasm (2000), Jourda (2005), Lasm et al. (2008) et YouanTa (2008) ont donné respectivement des valeurs de 6,6 km (à l'Ouest), 4,5 km (au Nord) et 10,08 km (à l'Est). L'obtention de variogrammes très mal structuré serait due à un faible nombre de données disponibles (38 points de mesures au total). Le nombre de points de mesure expliquerait la valeur de la portée et jouerait un rôle important dans la forme du variogramme et partant influencera sur la qualité de l'estimateur. En effet, plus les données disponibles sont de taille importante, meilleur sera le variogramme. Les fortes valeurs de coefficient d'emmagasinement observées en certains endroits sur la carte pourraient être dues à une densité de fracturation de la région et aussi à la nature de ces roches. En effet, les études de terrain réalisées par Bard (1974) et Yao et al. (1995) cités par Koïta (2010) ont permis de mettre en évidence deux accidents majeurs dans les formations de la région. Il s'agit entre autres de l'accident de Dimbokro et l'accident du N'zi (Koïta, 2010). D'autres accidents ont été répertoriés par Daouda (1998), Delany (1965), Yao et al. (1995) cités par Koïta (2010), Kadio et al. (2008).

CONCLUSION

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement calculées fluctuent entre 10^{-3} et 10^{-1} . Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude s'inscrivent en général dans les ordres de grandeur obtenus en milieux fissurés. En effet, au regard des

valeurs généralement obtenues dans des milieux similaires et des caractéristiques statistiques des valeurs générées dans le cadre de cette étude, il ressort que les valeurs acceptables du coefficient d'emmagasinement s'échelonnent entre 10^{-7} et 10^{-1} . Le modèle qui ajuste au mieux les valeurs du coefficient d'emmagasinement est le modèle sphérique au regard de la faiblesse de l'erreur quadratique ($6,83.10^{-6}$). Les différents résultats obtenus montrent que le coefficient d'emmagasinement, est structuré et s'apparente à une variable régionalisée, ce qui a permis sa cartographie à partir des caractéristiques du modèle sphérique. Les analyses géostatistiques menées ont montré que le coefficient d'emmagasinement est une variable en relation avec la densité de fracturation. Cette carte a permis de mettre en évidence le comportement spatial du coefficient d'emmagasinement qui croît généralement d'Ouest en Est.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAKA D. (2006). Caractérisation des propriétés hydrauliques des réservoirs fissurés du département d'Oumé Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire DEA Université de Cocody UFR STRM, Abidjan, Côte d'Ivoire, 84p.
- BAKA D., LASM 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, 2, 310-322.
- DAOUDA Y.B. (1998). Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, 190p.
- DE LASME Z.O., LASM T., OGA M.S., YOUANTA M., BAKA D., ETTIEN B.F., KOUAKOU S., ONETIE O.Z., KOFFI Y.T. (2012). Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud de la Côte d'Ivoire). Estudios Geologicos, Vol.68, n°2, 217-232.
- 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, 194 p.
- 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.

- JOURDA J.P.R., DJAGOUA E.V., KOUAME K., SALEY M.B., GRONAYES C., ACHY J.J., BIEMI J., RAZACK M. (2006a). Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat. *Télédétection*, Vol.6, n°2, 123-142.
- JOURDA J.P.R., SALEY M.B., DJAGOUA E.V., KOUAME K.J., BIEMI J., RAZACK M. (2006b). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, Vol.5, n°4, 339-357.
- KADIO N.H., SALEY M.B., N'DRI B.E., OUATTARA A., BIEMI J. (2008). 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, 74-93.
- KOFFI Y.B., LASM T., AYRAL P.A., JOHANNET A., KOUASSI A.M., ASSIDJO E., BIEMI J. (2007). Optimisation des modèles Perceptrons Multicouches avec les algorithmes de premier et de deuxième ordre. Application à la modélisation de la relation pluie-débit du Bandama Blanc, Nord de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol.17,n°3, 313-328.
- KOITA, M. (2010). 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.
- KOITA M., JOURDE H., RUELLAND D., KOFFI K., PISTRE S., SAVANE I. (2010). 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). *Hydrological Sciences Journal*, Vol.55, n°5, 805-820.
- KOUAME K.F., LASM T., DE DREUZY J.R., AKAFFOU A.G., BOUR O., DAVY P. (2010). Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.22, n°5, 617-632.
- KOUASSI A.M., AHOUSSE 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, 57-74.

- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., KOFFI Y.B., DJE K.B., PATUREL J.E., OULARE S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergeo)*, <http://cybergeo.revues.org/index23388.html>
- LALBAT F. (2006). Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, 234p.
- LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montages de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de l'Université de Poitiers, France, 274 p.
- LASM T., KOUAME F., OGA M.S., JOURDA J.P.R., SORO N., KOUADIO H.B. (2004). 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, 1-15.
- LASM T., YOUAN-TA M., JOURDA J.P.R., KOUAME K.F. (2008). Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol.21, n°1, 196-208.
- LOBA M.C., KOUTOUAN B.R. (2013). Analyse des potentialités hydrauliques des aquifères fissurés de la région de Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de projet de fin d'étude, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 60pp.
- N'GO Y.A., LASM T., KOITA M., SAVANE I. (2010). 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, 33-42.
- RAZACK M., LASM T. (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, Vol.325, 164-178.
- SINAN M., RAZACK M. (2006). Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène à partir de la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol.19, n°3, 221-232.
- SORO G., SORO N., AHOUSI K.E., LASM T., KOUAME K.F., SORO T.D., BIEMI 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). *Estudios Geológicos*, Vol.66, n°2, 227-242.

SOROKOBY V.M., SALEY M.B., KOUAMÉ K.F., DJAGOUA M.E.V., BERNIER M., AFFIAN K., BIEMI J. (2010). 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, 209-223.

VOUILLAMOZ J.M. (2003). La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris IX, 216p.

YOUANTA M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 270p.

YOUANTA M., LASM T., JOURDA J.P.R., KOUAME 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. 2, 119-13