

Étude des propriétés hydriques (porosité et conductivité hydraulique saturée) de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

[Study of Hydraulic properties (porosity and saturated hydraulic conductivity) of the quaternary aquifer of Abidjan (Côte d'Ivoire)]

Kouadio KOFFI¹, Innocent Kouassi KOUAMÉ¹, Emmanuel Konan KOUADIO², and Aristide Gountô DOUAGUI¹

¹Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Gestion de l'Environnement,
Université Nangui Abrogoua,
Abidjan, Côte d'Ivoire

²Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la terre et des ressources minières,
Université Félix Houphouët Boigny,
Abidjan, 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: The hydraulic properties of the soil are important parameters in hydrogeology. They allow knowing the characteristics and functioning of aquifers. But their determination is costly and difficult on large sites such as the quaternary aquifer of Abidjan. The objective is to know the hydraulic properties of the aquifer of Abidjan through the study of the porosity and the prediction of saturated hydraulic conductivity by the modified Kozeny Carman's model. The predicted conductivities are compared to those measured in situ by the double rings infiltrability method. The work showed that the porosities ranging from 0.25 to 0.42 while the hydraulic conductivities from 2.10^{-5} to 5.10^{-5} m/s. The quaternary aquifer of Abidjan is composed of coarse sand of the marine cordon and medium sand of the lagoon depressions. The coarse sands are found in the southern part of the aquifer while the medium sands in the north part. The application of the modified Kozeny Carman model showed that the predicted conductivities are close to those measured in situ. This model can be used to predict the hydraulic conductivity of the sands of the quaternary aquifer. The model has the merit of using the basic physical properties of the soil easily accessible. It could therefore be applied to other sandy aquifers along of whole eburneo basin of the West Africa.

KEYWORDS: Abidjan aquifer, saturated hydraulic conductivity, modified Kozeny Carman model, Quaternary groundwater, physical property of soil.

RESUME: Les propriétés hydriques des sols sont des paramètres importants en hydrogéologie pour la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement des aquifères. Mais leur détermination notamment la mesure de la conductivité hydraulique est coûteuse et difficile sur des sites étendus comme l'aquifère du quaternaire d'Abidjan. L'objectif est de connaître les propriétés hydriques de l'aquifère d'Abidjan à travers l'étude de la porosité et la prédiction de la conductivité hydraulique saturée par le modèle de Kozeny Caman modifié. Les conductivités prédites sont comparées à celles mesurées in situ par la méthode d'infiltrabilité à double anneaux. Les travaux ont montré que les porosités varient de 0.25 à 0.42 tandis que la conductivité de 2.10^{-5} à 5.10^{-5} m/s. L'aquifère du quaternaire d'Abidjan est constitué de sables grossiers des cordons marins et les sables moyens des dépressions fluivio-lagunaires. Les sables grossiers se trouvent au sud de l'aquifère et les sables moyens au nord. L'application du modèle de Kozeny Carman modifié a montré que les conductivités prédites sont proches de celles mesurées in situ. Ce modèle peut être utilisé pour prédire la conductivité hydraulique de ces sables. Il a le

mérite d'utiliser les propriétés physiques de base du sol facilement accessibles. Il pourrait donc s'appliquer sur les aquifères sableux de tout le bassin eburnéo-nigérien qui borde toute l'Afrique de l'ouest.

MOTS-CLEFS: Aquifère d'Abidjan, conductivité hydraulique saturée, Modèle de Kozeny Carman modifié, nappe du quaternaire, propriété physique des sols.

1 INTRODUCTION

Les zones côtières d'Afrique sont très sollicitées par l'homme. Elles permettent une ouverture sur le monde à travers de grands ports et regroupent les plus grandes villes notamment Ouest africaines. Ce sont des zones humides propices à l'habitation et aux activités agricoles [6], [7]. Elles regroupent les grands aquifères du continent. Ces aquifères sont sujets à la pollution anthropogéniques [5], [13], [32], [38]. Leur fonctionnement n'est toujours pas connu. Ce qui rend difficile la mise en place de programmes de gestion pour la préservation de la ressource eau qui se raréfie de plus en plus sur le continent.

L'aquifère du quaternaire situé au sud de la grande métropole d'Abidjan fait partie de ces aquifères. C'est un aquifère dont la nappe affleure par endroit. Il est équipé de puisards et de puits et l'eau est utilisée comme eau de boisson pour une frange de la population. Les études réalisées ont montré une forte pollution anthropique [12], [2]. Ce qui provoque des épidémies récurrentes liées aux maladies hydriques. L'étude de la dynamique de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan pour définir un plan de protection nécessite la connaissance des propriétés hydriques notamment la conductivité hydraulique.

La conductivité hydraulique (k_s) est une propriété importante de l'aquifère [15]. Sa connaissance est essentielle à la modélisation de l'écoulement de l'eau et au transfert de solutés [15], [15]. Lorsque l'aquifère est très étendu comme l'aquifère du quaternaire d'Abidjan, la connaissance de la conductivité hydraulique sur l'ensemble du système est nécessaire pour comprendre son fonctionnement à partir d'un modèle. Plusieurs méthodes d'estimation de la conductivité hydraulique existent. Les méthodes expérimentales de laboratoire sont appliquées au laboratoire sur des échantillons de sol prélevés et transportés. Des écarts de mesure sont observés sur les résultats de mesure en fonction du protocole de mesure appliqué [20]. En plus, le déplacement du matériau de son point de prélèvement peut modifier les résultats de mesure au laboratoire.

Les méthodes expérimentales in situ ont le mérite de prendre en compte l'environnement du matériau pendant la mesure de la conductivité hydraulique [23], [21]. Mais ces méthodes sont onéreuses et demandent beaucoup de temps quand les sites sont étendus [27].

Plusieurs méthodes de prédictions de la conductivité hydraulique ont été développées. Ainsi, des méthodes de prédiction basées sur la connaissance de la taille des grains de sol ont été testées [33], [3], [16], [19], [28], [20]. D'autres méthodes de prédiction basées sur la connaissance des paramètres physiques de base des matériaux ont été développées [26], [40], [37], [4], [30]. Ces méthodes utilisent des paramètres physiques des sols facilement accessibles et ont été discutées par [9], [39].

L'objectif de cette étude est de déterminer les propriétés hydriques (porosité et conductivité hydraulique) de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan. Il s'agit de tester le modèle de Kozeny Carman modifié pour prédire la conductivité hydraulique (k_s). Le modèle de Kozeny Carman utilise des paramètres physiques de base (indice de vide e , coefficient d'uniformité C_u , D_{10} , D_{60}) des matériaux pour la détermination de la conductivité hydraulique.

2 MATERIELS ET METHODE

2.1 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

L'aquifère du quaternaire d'Abidjan est situé entre les latitudes 5°12'5''Nord et 5°20'15''Nord et les longitudes 4°4'57''Ouest et 3°43'19''Ouest. C'est un étendu de sable [11]. Cet étendu de sable forme l'aquifère du quaternaire d'Abidjan et fait partie du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire et du grand bassin éburnéo-nigérien. Il s'étend sur une superficie d'environ 253 km² et est limité au sud par l'Océan Atlantique et la lagune Ouladine, au Nord par la lagune Ebrié, à l'Est par la lagune Potou et la lagune Ouladine et à l'Ouest par la lagune Ebrié et le Canal de Vridi [12] (figure 1).

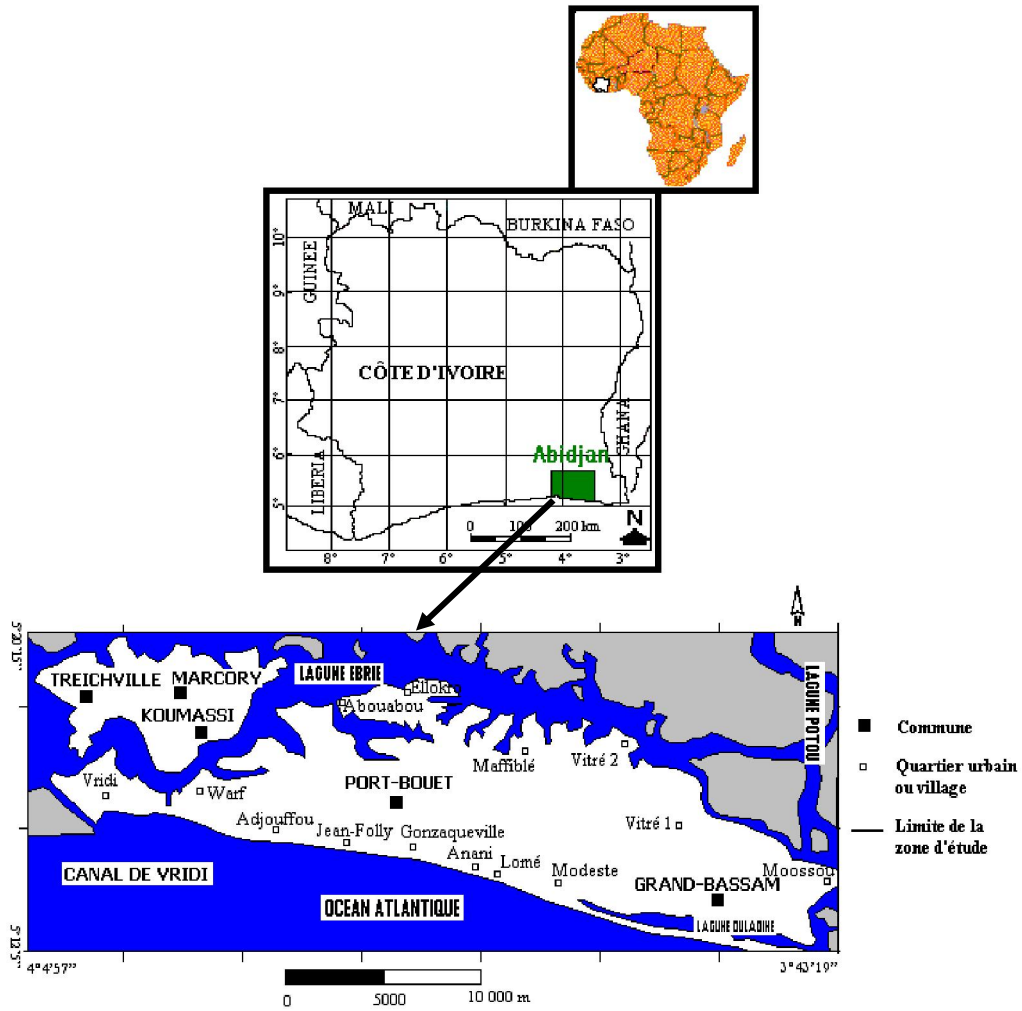


Fig. 1. Situation géographique du site d'étude

2.2 PRELEVEMENT

51 échantillons de sable ont été prélevés sur l'ensemble du site. Les points de prélèvement sont présentés dans la figure 2.

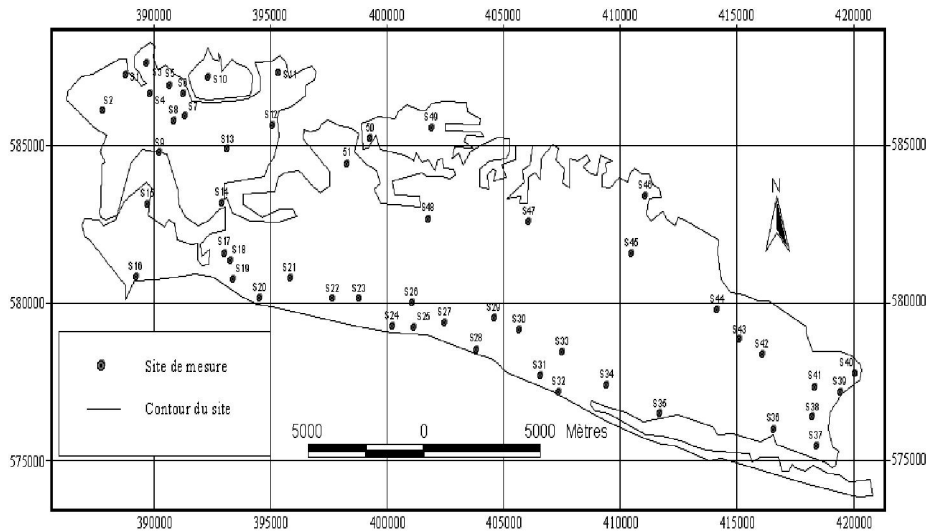


Fig. 2. Points d'échantillonnage de sol et de mesure de conductivité hydraulique (ks)

2.3 MESURE DE LA POROSITE ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Au niveau de ces 51 points d'échantillonnage des mesures de conductivités hydrauliques ont été faites à partir de l'infiltromètre à double anneaux. Les porosités ont été mesurées et des analyses granulométriques ont été faites. Pour préparer l'échantillon de sable, les échantillons sont pesés, lavés à l'eau douce et séchés à l'étuve à 105°C. La matière organique contenue dans cet échantillon est éliminée avec l'eau oxygénée à 30 %.

Pour la mesure de la porosité n , un volume V de l'échantillon séché est prélevé. L'échantillon séché a été immergé dans un volume d'eau (V_e) pendant une journée. Le volume des pores est égal au volume d'eau V_e moins le volume (V_r) de l'eau restante après la saturation totale de l'échantillon [14], [20]. La porosité a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$n = \frac{V_e - V_r}{V}$$

Les analyses granulométriques sont faites à partir des fractions de 100 g d'échantillon séché puis tamisée. L'échantillon est placé au sommet d'une série de 16 tamis AFNOR superposés dans l'ordre des mailles de tailles décroissantes. Les dimensions des mailles sont comprises entre 63 μm et 5 mm. Le refus de chaque tamis est pesé après agitation. On en déduit le pourcentage en poids de chaque classe dimensionnelle par rapport à l'échantillon de départ. Les courbes granulométriques sont faites à partir des pourcentages cumulés en masse d'échantillon de sable passant les différentes mailles du tamis. Les diamètres D_{10} et D_{60} sont déterminés sur les courbes granulométriques obtenues.

2.4 MESURE IN SITU DE K_s

La conductivité hydraulique saturée est déterminée par la méthode d'infiltrabilité à double anneaux. Cette méthode a déjà été utilisée par [24] et [25] pour la détermination de la conductivité hydraulique des sols non saturés. La méthode d'infiltrabilité à double anneau est basée sur la détermination de la vitesse verticale d'un flux d'eau à travers un sol à partir de la loi de Darcy. Pour la mesure in situ, on enfonce de 50 cm dans le sol le cylindre métallique central de l'infiltromètre, sur lequel on pose le vase de Mariotte. Celui-ci maintient le niveau de l'eau constant à une certaine hauteur au dessus de la surface du sol. Après la stabilisation de la vitesse, le volume d'eau V infiltré pendant un temps t est mesuré. Connaissant le débit q d'infiltration, on applique la loi de Darcy, l'infiltration se faisant suivant la surface S égale à la section du cylindre et le gradient hydraulique égale à 1. La conductivité hydraulique est déterminée à partir de la fonction.

$$K_s = \frac{V}{st}$$

k_s la conductivité hydraulique (m.s^{-1}) ; V volume d'eau infiltrée (m^3) ; S la section du cylindre (m^2) et t le temps (s).

2.5 MODELE DE KOZENY CARMAN MODIFIE

Sur la base de la méthode de Kozeny-Carman, [29], [30] ont développé un modèle d'estimation de la conductivité hydraulique saturée. Ce modèle est tiré de la relation proposée par [4]. Ces derniers ont introduit un paramètre qui est la tortuosité qui est une fonction de l'indice des vides. L'équation générale s'écrit :

$$K_s = C_{KCM} \frac{\gamma_w e^{3+x}}{\mu_w} \frac{1}{1 + e \phi_s^2 S_m^2}$$

avec C_{KCM} constante, γ_w le poids volumique de l'eau [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}$], μ_w la viscosité de l'eau [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$], e l'indice des vides [-] calculé à partir de la porosité n mesurée comme suit :

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$x=2$ est un facteur qui tient compte de la tortuosité, ϕ_s masse volumique de l'eau [ML^{-3}] et S_m la surface spécifique massique [L^2M^{-1}].

Selon Kovac's (1981) la surface spécifique S_m peut s'écrire :

$$S_m = \frac{\alpha}{\phi_s D_h}$$

avec α est un facteur de forme, $1/\alpha^2 = 1$ et D_h le diamètre équivalent [L].

Selon [40], on peut écrire

$$D_h = C_u^{1/6} D_{10}$$

La forme finale de l'équation peut s'écrire pour des sols peu plastiques en tenant compte des paramètres géotechniques comme suit [30] :

$$K_s = C_g \frac{\gamma_w e^{3+x}}{\mu_w (1+e)} C_u^{1/3} D_{10}^2$$

$C_g = 0.1$, $\gamma_w = 10 \text{ KN / m}^3$, $\mu_w = 10^{-3} \text{ Pa . s}$, D_{10} en m, C_u : coefficient d'uniformité et K_s en m/s.

3 RESULTATS

Les courbes granulométriques des 51 échantillons de sable ont permis de déterminer les diamètres D_{10} et D_{60} . Les indices de vide e calculés à partir des porosités n mesurées, les diamètres D_{10} et D_{60} obtenus et les coefficients d'uniformité C_u et les K_s calculés sont mentionnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriété physique de sol et conductivité hydraulique saturée

Points	n	e	$D_{10} \cdot 10^{-2}$ (m)	$D_{60} \cdot 10^{-2}$ (m)	Cu	K_s (m/s) prédites
S1	0,29	0,40	0,020	0,060	3,00	4,22E-05
S2	0,30	0,43	0,040	0,070	1,75	1,98E-04
S3	0,32	0,48	0,020	0,060	3,00	9,86E-05
S4	0,29	0,40	0,018	0,043	2,43	3,01E-05
S5	0,30	0,43	0,020	0,060	3,00	5,84E-05
S6	0,31	0,43	0,024	0,050	2,08	7,56E-05
S7	0,31	0,45	0,023	0,060	2,61	8,87E-05
S8	0,27	0,36	0,025	0,058	2,32	3,86E-05
S9	0,20	0,35	0,020	0,048	2,38	2,08E-05
S10	0,26	0,35	0,029	0,050	1,72	3,80E-05
S11	0,23	0,30	0,020	0,051	2,55	1,02E-05
S12	0,28	0,39	0,021	0,050	2,38	3,77E-05
S13	0,29	0,41	0,021	0,052	2,48	4,72E-05
S14	0,30	0,43	0,023	0,055	2,39	7,16E-05
S15	0,30	0,43	0,021	0,050	2,38	5,96E-05
S16	0,26	0,40	0,021	0,050	2,40	4,24E-05
S17	0,27	0,50	0,029	0,050	1,72	2,10E-04
S18	0,34	0,52	0,029	0,054	1,86	2,58E-04
S19	0,36	0,57	0,030	0,060	2,03	4,22E-04
S20	0,31	0,44	0,028	0,060	2,14	1,14E-04
S21	0,31	0,44	0,039	0,070	1,79	2,17E-04
S22	0,25	0,30	0,030	0,065	2,17	2,18E-05
S23	0,26	0,60	0,030	0,060	2,00	5,51E-04
S24	0,38	0,70	0,060	0,100	1,67	4,22E-03
S25	0,39	0,54	0,058	0,090	1,55	1,16E-03
S26	0,30	0,35	0,050	0,100	2,00	1,23E-04
S27	0,37	0,58	0,057	0,090	1,58	1,60E-03
S28	0,35	0,50	0,050	0,080	1,60	6,09E-04
S29	0,42	0,70	0,050	0,100	2,00	3,11E-03
S30	0,36	0,56	0,030	0,067	2,23	4,15E-04
S31	0,42	0,73	0,021	0,060	2,86	7,34E-04

S32	0,42	0,70	0,050	0,080	1,60	2,89E-03
S33	0,36	0,56	0,040	0,077	1,93	7,17E-04
S34	0,39	0,64	0,050	0,093	1,86	2,00E-03
S35	0,40	0,67	0,050	0,100	2,00	2,49E-03
S36	0,26	0,34	0,025	0,040	1,60	2,56E-05
S37	0,31	0,46	0,022	0,059	2,68	9,13E-05
S38	0,31	0,45	0,020	0,041	2,05	6,19E-05
S39	0,33	0,49	0,021	0,055	2,62	1,10E-04
S40	0,35	0,54	0,022	0,061	2,77	2,10E-04
S41	0,32	0,47	0,025	0,060	2,45	1,33E-04
S42	0,31	0,44	0,023	0,055	2,39	8,10E-05
S43	0,27	0,37	0,035	0,075	2,14	7,98E-05
S44	0,30	0,40	0,020	0,050	2,50	3,97E-05
S45	0,35	0,50	0,019	0,050	2,63	1,04E-04
S46	0,32	0,48	0,035	0,085	2,43	2,82E-04
S47	0,30	0,43	0,029	0,039	1,33	9,35E-05
S48	0,29	0,41	0,029	0,041	1,41	7,79E-05
S49	0,29	0,41	0,023	0,055	2,39	5,84E-05
S50	0,29	0,42	0,024	0,056	2,33	6,75E-05
S51	0,26	0,35	0,060	0,100	1,67	1,62E-04

Les porosités sont comprises entre 20 et 45%. Les coefficients d'uniformité calculés à partir des diamètres D_{10} et D_{60} sont compris entre 1 et 3. Les conductivités hydrauliques prédites sont comparées à celles mesurées in situ par la méthode d'infiltrabilité à double anneaux dans la figure 3.

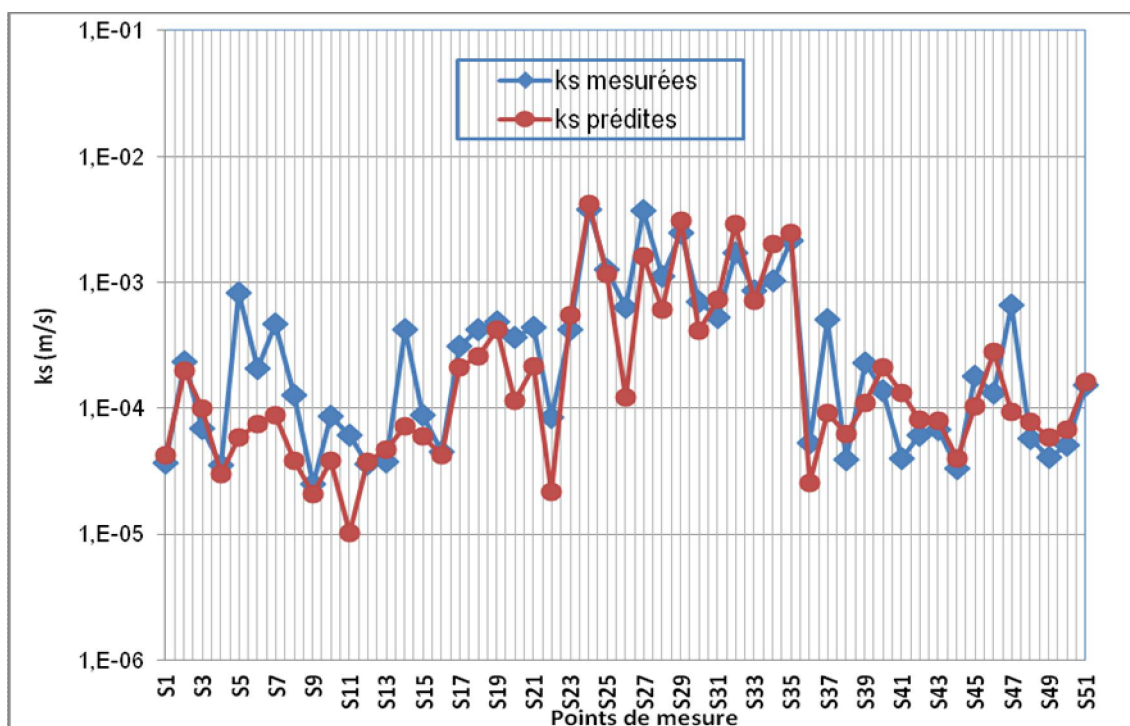


Fig. 3. Comparaison entre les valeurs de ks prédites et celles mesurées

Les conductivités hydrauliques sont comprises entre 10^{-2} et 10^{-5} m/s. Les valeurs de ks prédites sont inférieures à celles mesurées. Mais les écarts ne sont pas importants. De façon générale, les valeurs de ks mesurées sont proches de celles prédites.

Les conductivités hydrauliques mesurées ont permis d'établir une carte de répartition des conductivités sur le site dans la figure 4.

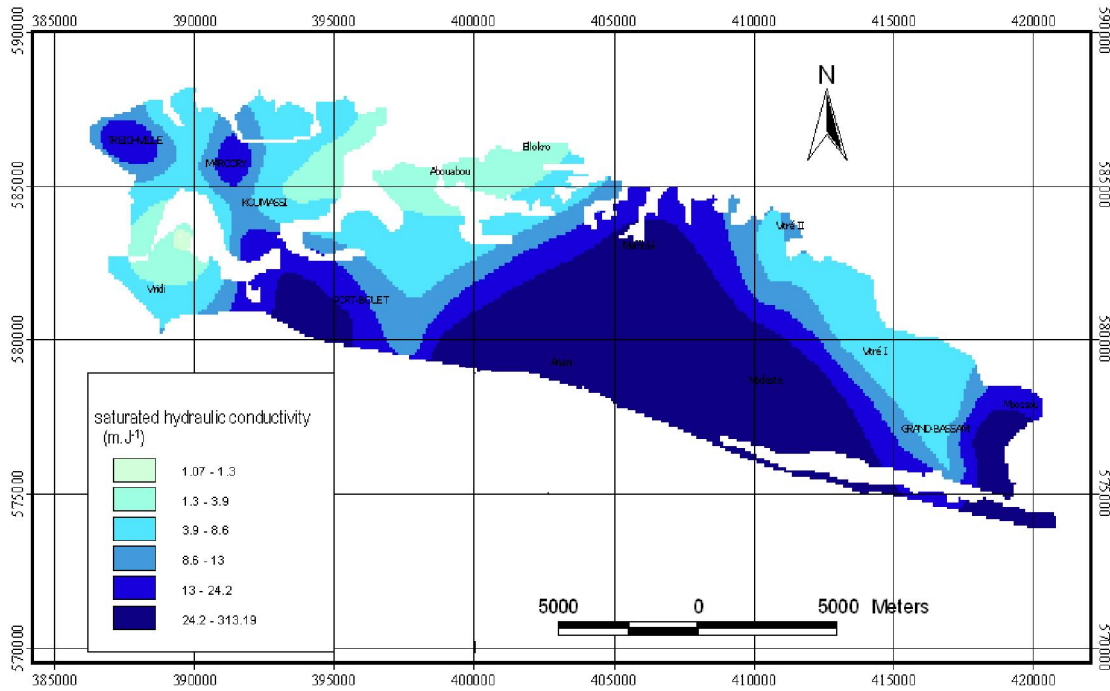


Fig. 4. Carte de distribution de la conductivité hydraulique saturée

La carte de distribution des conductivités hydrauliques montre que les conductivités hydrauliques sont élevées dans la partie sud en bordure de la mer. Elle évolue de façon décroissante vers le nord.

4 DISCUSSION

Les porosités des sables de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan mesurées ont des valeurs comprises entre 0.20 et 0.45. Sur l'échelle des valeurs définies, ce sont des moyens et grossiers [17], [8]. Ces sables grossiers des cordons marins et moyens des dépressions fluviolagunaires ont été décrits par Delor et al. (1992). Ils ont été déposés tout le long du littoral Ouest africain pendant les derniers épisodes de transgression et de régression qui datent du quaternaire [1]. Ces dépôts forment le bassin éburnéo-nigerian [36] et ont donné naissance à des aquifères qui bordent toute l'Afrique de l'ouest.

Les conductivités hydrauliques mesurées varient de 10^{-2} - 10^{-3} m/s pour les sables grossiers et de 10^{-4} - 10^{-5} m/s pour les sables moyens. Ces résultats sont proches de ceux mesurés par [1] et [35].

La carte de distribution des conductivités hydrauliques établie montre que les sables marins plus grossiers se trouvent tout le long de l'océan atlantique tandis que les sables moyens des dépressions fluviolagunaires se trouvent au nord tout au long des lagunes. Plusieurs facteurs expliquent cette classification. Les sables marins déposés subissent une influence des vents marins qui entraînent les particules les plus légères vers le nord. Il y a aussi les cours d'eaux qui apportent de fines particules de sable et d'argile le long des lagunes où ils se jettent notamment en période de crue [31].

De façon générale, les valeurs de conductivités hydrauliques mesurées in situ sont proches de celles prédites par le modèle de Kozeny Carman modifiée. Ces résultats confirment celles de [30]. Dans les conditions d'application du modèle ($0,35 \leq e \leq 1,26$), $1 \leq Cu \leq 227$), le modèle de Kozeny Carman, modifié peut être utilisé pour prédire des conductivités hydrauliques saturées des sols granulaires tels que des sables de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan.

La tendance générale qui tend à une sous estimation des conductivités hydrauliques prédites par le modèle par rapport à celles mesurées s'explique par le fait que la zone d'étude est habitée. Les sables subissent une influence de l'activité humaine. Ils subissent une compaction par endroit due aux travaux d'aménagement. Les travaux ont montré que la compaction des matériaux modifie leurs conductivités hydrauliques [34], [18]. Mais les effets de la compaction sont, contrairement aux argiles, moins perceptibles dans nos travaux parce que les sables sont des matériaux moins compressibles. Le modèle de Kozeny Carman modifié basé sur l'utilisation des propriétés géotechniques de base pour la prédiction de la conductivité hydraulique ne prend pas en compte l'effet de la compaction.

5 CONCLUSION

L'étude des propriétés hydriques de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan a montré que l'aquifère est constitué de sables grossiers des cordons marins au sud et les sables moyens des dépressions fluivio-lagunaires au nord. Ces deux types de sables ont des porosités comprises entre 0.20 et 0.45 et des conductivités hydrauliques qui varient entre 10^{-2} et 10^{-5} m/s. L'application du modèle de Kozeny Carman modifié montre que ce modèle peut être utilisé pour prédire les conductivités hydrauliques. Ce modèle a le mérite d'utiliser des propriétés physiques de base (porosité et diamètres D_{10} et D_{60}) qui sont des paramètres facilement accessibles. La concordance entre les conductivités hydrauliques mesurées et celles prédites montre que l'application de ce modèle peut s'étendre à une évaluation de la conductivité hydraulique de tous les aquifères du bassin eburnéo-nigérian qui bordent toute l'Afrique de l'Ouest. C'est une méthode complémentaire aux méthodes in situ qui permettra d'avoir des données sur les caractéristiques et les propriétés hydriques de ces aquifères pour comprendre leur fonctionnement et mieux les protéger contre la pollution anthropogénique.

REFERENCES

- [1] N. Aghui et J. Biémi, "Bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire: Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risque de contamination", *Annales Univ. Côte d'Ivoire*, Série c : 331-347, 1984.
- [2] K.E. Ahoussi, N. Soro, G. Soro, T. Lasm, M. Oga et S.P. Zadé, "Groundwater pollution in Africa biggest towns: case of the town of Abidjan (Côte d'Ivoire)", *Eur. J. Sci. Res.*, 20: 302-316, 2008.
- [3] L.R. Ahuja, J.W. Naney, R.E. Green, and D.R. Nielsen, "Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects on land management", *Soil Science Society of America Journal* 48, 699-702, 1984.
- [4] M. Aubertin, B. Bussière, R.P. Chapuis, "Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines", *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 470-482, 1996.
- [5] Baba-Moussa A., 1994. "Etude de la pollution bactériologique de la nappe phréatique à partir d'une latrine en Afrique subtropicale. Th. Doct, Ecole Polytech. Fédérale Lausanne, 247 p.
- [6] Benoit G., "Environnement et développement en Méditerranée – Les perspectives du Plan Bleu", *Futuribles*, 321, 11-46, 2006.
- [7] H. Bithin, V. Hrikrishna, D. Anibrban, "Modelling and control of saltwater intrusion in a costal aquifer of Andhra Pradesh, India", *Journal of hydro-environment Research*, Vol. 3 (3):148-159, 2009.
- [8] G. Castany, "Hydrogéologie, principes et méthodes 2e cycle", Ed. *Dumond* Paris, 236 p.
- [9] R.P. Chapuis, and I. Montour, "Evaluation de l'équation de Kozeny-Carman pour prédire la conductivité hydraulique", *Proceedings*, 45^{ie} me Conférence Canadienne de Géotechnique. Toronto, Ontario, 78-1-78-10, 1992.
- [10] R.P. Chapuis, M. Aubertin, on the use of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 40, n^o. 3: 6, 1998, 2003.
- [11] C. Delor, I. Diaby, Y. Siméon, B. Yao, J.P. Tastet, M. Vidal, J.P. Chiron, A. Dommanget, Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Grand-Bassam", *Mémoire de la Direction de la Géologie de Côte d'Ivoire*, n^o4, Abidjan, Côte d'Ivoire, 30 p, 1992.
- [12] G.A. Douagui, "Évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Quaternaire du secteur Canal de Vridi-Grand-bassam par la méthode Drastic", *Mém. DEA, Univ. Abobo-Adjamé*, 69 p, 2005.
- [13] B.C.E. Egboka et F.C. Ezeonu, "Nitrate et nitrite pollution and contamination in parts of SE Nigeria", *Water Resources*, 2: 101-110, 1990.
- [14] C.W. Fetter, "Applied Hydrogeology". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 2001.
- [15] N. Fodor, R. Sandor, T. Orfanus, L. Lichner, K. Rajkai. "Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity", *Geoderma*, Vol. 165 (1) : 60-68, 2011.
- [16] Franzmeier D.P, "Estimating of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol: 1801-1803, 1991.

- [17] L. W. Gelhar, C. Welty, K. T. Rehfeldt, "A critical review of data on field scale dispersion in aquifers", *Water Resources*, 28: 1955-1974, 1992.
- [18] L. Hsueh-Yu, "A method to estimate hydraulic conductivity from bulk geochemical compositions", *Environ. Geol*, Vol 51: 1029–1041, 2007.
- [19] J.D. Jabro, "Estimating of saturated hydraulic conductivity of soils from particule size distribution and bulk density data", *Journal of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol, 35 2:557-560, 1992.
- [20] C. Jae-Yeol, H. Se-Yeong, K. Hyoung-Soo, K.Eun-Joung, Y. Kyounghee, L. Jeong-Hwan, "Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea", *Hydrogeology Journal*, vol. 16 : 1129–1143, 2008.
- [21] J. Ross, M. Ozbek, F. G. Pinder, "Hydraulic Conductivity Estimation via Fuzzy Analysis of Grain Size Data", *Mathematical Geology*, vol. 39: 765–780, 2007.
- [22] J.R.P Jourda, K.J Kouamé, M.B Saley, B.H Kouadio, Y.S Oga, S. Deh, "Contamination of Abidjan aquifer by sewage: an assessment of extent and strategies for protection. In: Xu Y. and USHER B. (Eds): Groundwater pollution in Africa, *Taylor et Francis/Balkema, Leiden*, 291-300, 2006.
- [23] A. Klute and C. Dirksen, "Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods, *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*", in: A. Klute, Editor, (2nd ed.), Madison, pp. 687–732, 1986.
- [24] K. Koffi, "Contribution à l'étude des processus couplés hydrogéochimiques dans les stocks de déchets miniers: le cas du site de Carnoules (Gard, France)", Th. Doct. unique, Univ. Montpellier II, 161 p, 2004.
- [25] K.I. Kouamé, "Pollution physico -chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants", Th. Doct. Unique, Univ. Abobo-Adjamé, 206 p, 2007.
- [26] Kovac's, G. 1981. "Seepage Hydraulics", *Elsevier Science Publishers*, Amsterdam.
- [27] M. M. Mahmoud, "A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt", *Agricultural water Management*, Vol. 42 (3) : 291-312, 2000..
- [28] F.D. Masch and K.J. Denny, "Grain size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands", *Water Resources Research*, 2(4), 665–677, 1966.
- [29] M. Mbonimpa, M. Aubertin, R.P. Chapuis, B. Bussière, "Développement de fonctions hydriques utilisant les propriétés géotechniques de base", 1st Joint IAH-CNC-CGS *Groundwater Specialty Conf.*, p. 343-350, 2000.
- [30] M. Mbonimpa, M. Aubertin, R.P. Chapuis, B. Bussière, "Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity", *Geotechnical and Geological Engineering*, 20: 235–259, 2002.
- [31] Y.M.S. Oga, "Ressources en eaux souterraines de la région du Grand-Abidjan (Cote d'Ivoire): approches hydrochimique et isotopique", Th. Doct., Univ. Paris XI ORSAY; 211 p, 1998.
- [32] B. Ousmane, A. Daddy, T. Margueron, A. Boubacar et Z. Garba, "Groundwater contamination in the Niamey urban area, Niger", In: Y.Xu and B.USHER (Eds): Groundwater pollution in Africa, *Taylor & Francis/Balkema, Leiden*, 169-179, 2006.
- [33] R.G Shepherd, "Correlations of permeability and grain size", *Ground Water*, 27(5), 633–638, 1989.
- [34] E.Takeo, J.A Rwaichi, N. Takako, O.Yoshio, C. Abhijit "Correlation of hydraulic conductivity of clay–sand compacted specimens with clay properties", *Applied Clay Science*, vol. 26 : 3-12, 2004.
- [35] S.A. Tapsoba, "Etude géologique et hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire: recharge et qualité des eaux dans l'aquifère côtier (région de Jacqueville) ", *Mém. DEA, Univ. Cheik Anta Diop*, 65p, 1990.
- [36] J.P Tastet, "Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée, Côte d'Ivoire, Togo, Bénin", *Th. Doct. d'Etat, Univ. Bordeaux I*, 181 p, 1979.
- [37] O. Tiejé, and V. Hennings, "Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes", *Geoderma*, 69:71-84, 1996.
- [38] G.Tredoux et A.S. Talma, "Nitrate pollution of groundwater in southern Africa. In: Xu Y. and USHER B. (Eds): Groundwater pollution in Africa", *Taylor et Francis/Balkema,Leiden*, 15-36, 2006.
- [39] K.O. Uma, B.C.E Bgboka, K. M. "Onuoha, New statistical grain size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers", *Journal of Hydrology* 108:343–366, 1989
- [40] M. Vuković, A. Soro, "Hydraulics and water wells: theory and application", *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, CO, USA, 1992.