



Évaluation de la courbe de rétention d'eau de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan-Côte d'Ivoire

Kouadio KOFFI^{1*}, Konan Emmanuel KOUADIO², Kouassi Innocent KOUAMÉ¹, Pokou Marius KOLIA¹

¹ Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 02 BP 802 Abidjan 02

² Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

Corresponding author email: kouadiok1@yahoo.fr

Original submitted in on 13th March 2013 Published online at www.m.elewa.org on 29th May 2013.

RESUME

Objectifs : Cette étude examine l'apparition de la moisissure dans les maisons et la dégradation des routes liées à une humidité permanente du sol dans une partie de la ville d'Abidjan. Les causes de l'humidité permanente sont recherchées à travers l'étude de la courbe de rétention d'eau des matériaux de l'aquifère d'Abidjan.

Méthodologie et résultats: La courbe de rétention est difficile à mesurer *in situ* sur des sites étendus comme cet aquifère. Pour ce faire, le modèle de Kovacs modifié (KM) pour la prédiction de la courbe de rétention d'eau (CRE) est testé. Les courbes prédites sont comparées à des mesures effectuées *in situ*. Les résultats montrent que, dans l'ensemble, le modèle de Kovacs modifié prédit bien les courbes de rétention d'eau. L'étude de la CRE a montré une zone mouillée importante au dessus de la nappe dans le cas des sables fins et des mélanges argiles et sables. Dans ces zones, il y a une remontée capillaire d'eau dans les sous-bassements des maisons et autres infrastructures.

Conclusions et application des résultats : Ce travail a permis, non seulement, de déterminer les zones à risques pour la construction des maisons et de routes dans la partie sud du pays mais aussi de mettre en évidence une méthode de prédiction de la CRE des matériaux du sol de l'aquifère d'Abidjan. Ce modèle a le mérite d'utiliser des paramètres physiques du sol facile à déterminer. Les résultats de cette étude sont précieux pour définir un plan d'aménagement général de la ville d'Abidjan. Ils mettent en exergue des zones potentiellement humides sur lesquelles des dispositions particulières doivent être prises avant la construction des infrastructures.

Mots clés: Courbe de rétention d'eau, aquifère du quaternaire, remontée capillaire de l'eau

Evaluation of the water retention curve of Abidjan Quaternary aquifer

ABSTRACT

Objectives: This study examines the occurrence of mold in homes and road damage related to soil permanent humidity in the south part of the Abidjan city. The causes of permanent humidity are sought through the study of the water retention curve (WRC) of the aquifer materials.

Methods and Results: The water retention curve is difficult to measure *in situ* on large sites like this aquifer. Kovacs's modified model to predict the water retention curve is tested. Predicted curves are compared with *in situ* measurements points. The results show that, overall, the model predicts well the water retention curves. The study of the WRC showed an important wet area above the water table in the case of fine sand and clay

and sand mixtures. In these areas, there is a capillary rise of water in houses under-basements and other infrastructure.

Conclusions and application of results: This work allowed identifying risk areas for the houses and roads construction in the south part of Abidjan city. It also highlights a method for predicting water retention curve of aquifer soil materials of Abidjan. This model has the advantage of using soil physical parameters easy to determine. The results of this study are useful to define a general development plan of the Abidjan city. They highlight potentially wet areas on which precautions must be taken before building infrastructure.

Key words: water retention curve, quaternary aquifer, capillary rise of water

INTRODUCTION

L'aquifère d'Abidjan abrite une partie de la ville d'Abidjan où beaucoup d'infrastructures sont construites. Il est peu étudié. En effet les travaux existants sont très fragmentaires. Parmi ces travaux on peut citer ceux de Aghui et Biémi (1984), Oga (1998). Il contient une nappe d'eau superficielle dont le niveau affleure dans certaines zones. Cette nappe est sollicitée par la population pour divers usages et est sujette à une forte pollution (Savané et al., 2006 ; Ahoussi et al., 2008). La dynamique de la nappe et les propriétés notamment hydriques de cet aquifère sont mal connues pour définir un plan de gestion. Dans les zones où le niveau d'eau est proche du sol, il y a une présence permanente de moisissures dans les constructions. Ceci cause un problème de santé au niveau des populations locales. De plus, les infrastructures telles que les routes qui sont construites dans cette zone se dégradent rapidement à cause d'une humidité permanente observée. Une étude des propriétés hydriques de l'aquifère d'Abidjan est faite pour évaluer la courbe de rétention d'eau (CRE) et mieux comprendre l'apparition de moisissures et la dégradation précoce observée au niveau des routes.

La courbe de rétention d'eau est une propriété essentielle pour l'étude et l'usage des sols. Elle traduit la teneur en eau du sol en fonction de la force de succion. En agriculture, elle sert pour le choix des plantes pour différents types de sol (Marshall et al., 1996). En hydrogéologie, la connaissance de la courbe de rétention d'eau des sols non saturés permet de modéliser les transferts de polluants dans les aquifères et d'accéder à d'autres propriétés telle que la conductivité hydraulique non saturée (Maraqa et al., 1993 ; Alimi-Ichola et Gaidi, 2005 ; Mantovi et al., 2006). En géotechnique, l'étude du CRE permet de concevoir des plans de réhabilitation des sites

pollués par la mise en place des couches de sol à barrière capillaire (Aubertin et al., 1998, 2002 ; Bussière et al., 2000 ; Abdolazadeh et al., 2011). Plusieurs méthodes de détermination de la CRE existent. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes. Les méthodes descriptives déterminent la courbe de rétention d'eau par lissage à partir des points expérimentaux obtenus au laboratoire ou *in situ* (Bussière et al., 2000). Selon la formulation mathématique, cinq modèles de lissage sont couramment utilisés (Bussière, 1999). Ce sont des modèles exponentiels, de puissance, de cosinus hyperboliques, polynomiaux et des modèles avec fonction d'erreurs (Gardner, 1958 ; Books et Corey, 1964 ; Van Genuchten, 1980 ; Fredlund et Xing, 1994 ; Leong et Rahardjo, 1997). L'accès aux points expérimentaux est onéreux et les méthodes sont difficiles à mettre en œuvre quand les sites sont étendus.

Les méthodes de prédiction estiment la CRE à partir des propriétés physiques et chimiques des sols et à partir de données climatiques. Dans certains cas, ce sont des modèles mathématiques qui relient la teneur en eau aux propriétés physiques et chimiques du sol tels que la granulométrie, la teneur en matière organique et en argile, l'état et la capacité cationique du sol (Kovac's, 1981 ; Arya et Paris, 1981 ; Aubertin et al., 1998 ; Mbonimpa et al., 2002). Dans d'autre cas, ce sont des modèles empiriques qui lient le degré de saturation de l'eau aux données climatiques et aux hauteurs de précipitations (Valentino et al., 2012). Un modèle de prédiction de la CRE est utilisé dans cette étude pour prédire la courbe de rétention d'eau des matériaux de sol de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan.

L'objectif de ces travaux est d'étudier la CRE des matériaux de sol de l'aquifère du quaternaire

d'Abidjan à travers un essai de prédiction à partir du modèle de Kovac's modifié (MK). L'étude de la CRE permet de comprendre l'apparition de moisissures et

la dégradation précoce des routes observée sur une partie de l'aquifère.

MATERIEL ET METHODES

Sites d'étude : L'aquifère du quaternaire d'Abidjan est situé au sud de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest entre les latitudes 5°12'5" et 5°20'15" Nord et les longitudes 4°4'57" et 3°43'19" Ouest. C'est une étendue de sables et mélange d'argile et de sable dans des dépressions lagunaires (Delor et al. 1992). Cette étendue de sables forme l'aquifère du quaternaire d'Abidjan et fait

partie du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire et du grand bassin éburnéo-nigérian. Il couvre 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. Il abrite des quartiers de la ville d'Abidjan (figure 1).

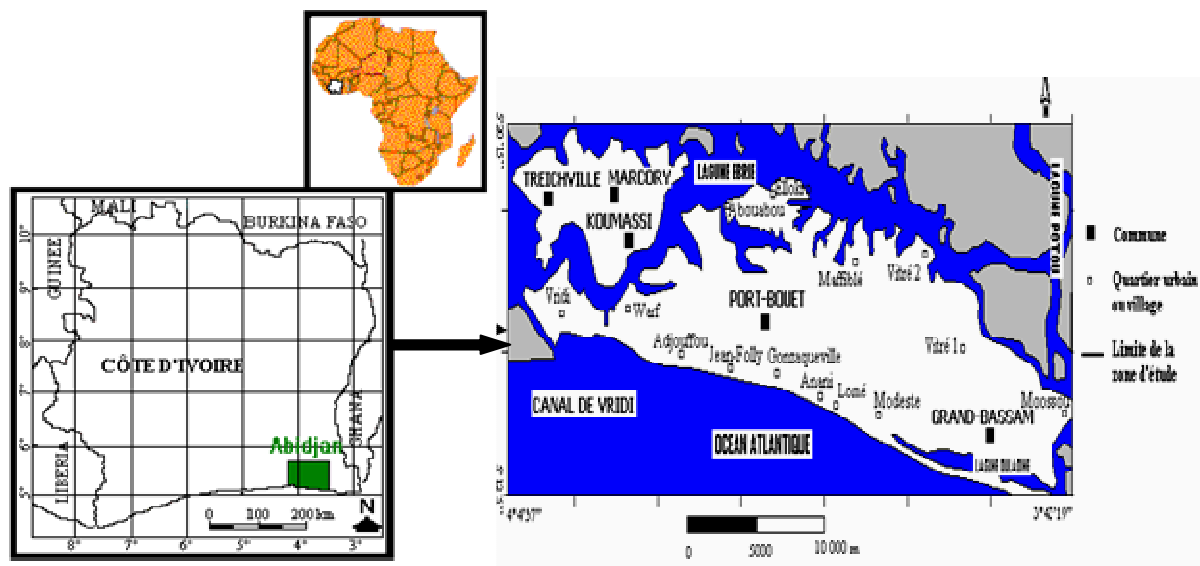


Figure 1 : Situation géographique du site d'étude

Les sables ont été déposés tout le long du littoral Ouest africain pendant les derniers épisodes de transgressions et de régression qui datent du quaternaire (Anghui et Biemi, 1984). Les argiles proviennent du nord et sont entraînées par les cours d'eau qui se jettent dans les lagunes. Ces argiles se mélangent aux sables marins pour donner un mélange d'argile et de sable qui borde les lagunes. L'ensemble de ces dépôts forme le bassin éburnéo-nigérian (Tastet, 1974) et ont donné naissance à des aquifères qui couvrent tout le littoral ouest-africain.

Les conductivités hydrauliques mesurées varient de 10⁻² à 10⁻⁵ m/s (Tapsoba, 1999).

Mesure des paramètres physiques de base du sol :

Des échantillons de sables fins, de sables grossiers, de mélanges de sables fins et grossiers et de mélanges d'argiles et de sables ont été prélevés sur l'ensemble du site. Trois échantillons de chaque type de matériau de sol ont été choisis dans des endroits différents. Les points d'échantillonnage sont présentés dans la figure 2.

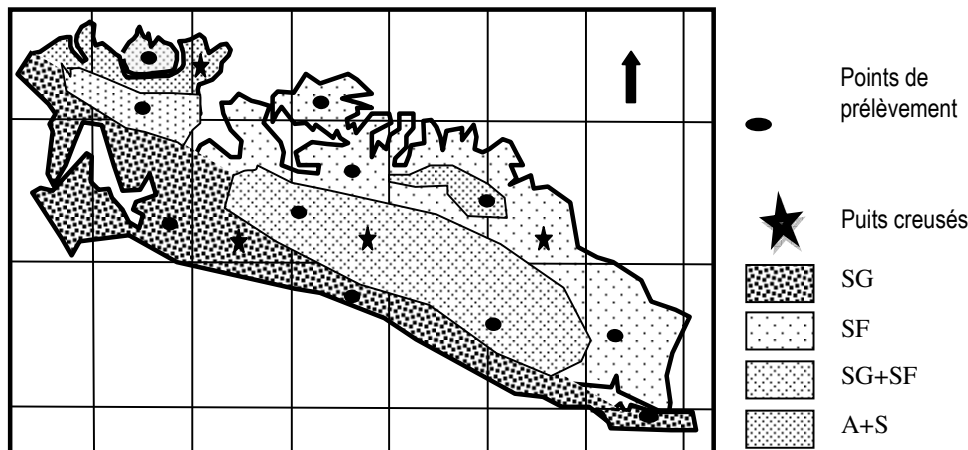


Figure 2 : Points d'échantillonnage de matériaux de sol (SG : Sables grossiers, SF : Sables fins, SG+SF : Mélange de sables grossiers et de sables fins, A+S : Mélange d'argiles et de sables)

Des analyses granulométriques et des mesures de porosité sont effectuées sur chaque échantillon au laboratoire. 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_{re}) de l'eau restante après la saturation totale de l'échantillon. (Fetter, 2001 ; Jae-Yeol, 2008). La porosité a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$n = \frac{V_e - V_{re}}{V}$$

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. Les dimensions des mailles sont comprises entre 63 μ m 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 réalisées à partir des pourcentages cumulés en masse d'échantillon de sables passant les différentes mailles du tamis. Les diamètres D_{10} et D_{60} sont déterminés sur les courbes granulométriques obtenues.

Mesure de la teneur en eau du sol : Quatre puits ont été réalisés sur le site dans les sables fins, sables grossiers, mélanges de sables fins et grossiers et mélanges d'argiles et de sables (figure 2). Pendant la réalisation des puits, des échantillons de sol sont prélevés à différentes profondeurs. Ces échantillons protégés des rayons solaires sont transportés au laboratoire. Ils sont portés au four pendant 24 heures pour mesurer la teneur en eau.

Modèle de Kovac's modifié (KM) : Le modèle de Kovac's permet de prédire la CRE des matériaux de sol en connaissant leur indice de vide (e) et les paramètres granulométriques (D_{10} et D_{60}).

Le modèle de Kovac's modifié (MK) considère que l'eau est retenue dans les matériaux de sol par les forces capillaires et des forces d'adhésion. Les forces capillaires sont responsables de la saturation capillaire, S_c , et les forces d'adhésion responsables de la saturation par l'adhésion, S_a (Kovac's, 1981). Dans la formulation du modèle MK, la CRE est une fonction de S_c et S_a . Ce modèle est basé sur l'estimation de la CRE de matériaux incompressibles, dans des conditions de drainage (Aubertin et al. 1998, 1999, 2003, Mbonimpa et al. 2002, 2006). La CRE est exprimée par une série d'équations présentées comme suit:

$$S_r = \theta/n = 1 - \langle 1 - S_a \rangle (1 - S_c) \quad [1]$$

$$S_a = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right] m e^{-m \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2} \quad [2]$$

$$S_a = ac \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + \psi_0 / \psi_r)} \right] \frac{(h_{co} / \psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} (\psi / \psi_n)^{1/6}} \quad [3]$$

S_r exprime le degré de saturation totale avec θ la teneur en eau volumique et n la porosité des matériaux. Les crochets Macauley $\langle \rangle$ sont définis comme $\langle x \rangle = 0.5(x + |x|)$. S_a et S_c sont respectivement les composantes d'adhésion et capillaire de l'eau. Dans les deux dernières équations, h_{co} est le diamètre équivalent et est défini comme paramètre de

référence. Il dépend de la surface spécifique des grains. Pour les matériaux granulaires h_{co} est exprimé comme suit:

$$h_{co} = \frac{0.75}{[1.17 \log(C_u) + 1]eD_{10}} \quad [4]$$

D_{10} et D_{60} sont des diamètres correspondant respectivement à 10% et 60% des matériaux passant les grilles du tamis sur la courbe granulométrique. C_u est le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$). h_{co} , D_{10} , D_{60} et ψ (la succion) sont exprimés en cm. m est le coefficient de la

taille des pores, e l'indice de vide des matériaux. Ψ_n est un paramètre de normalisation. $\Psi_n = 1 \text{ cm}$ lorsque la succion est donnée en cm.

A l'équilibre thermodynamique, $\theta = 0$ à $\Psi = \Psi_0 = 102 \text{ cm}$ d'eau (Fredlund et Xing, 1994). a_c est le coefficient d'adhésion et contrôle la saturation par adhésion. Selon des travaux de Mbonimpa et al. (2006) sur l'application du modèle sur une variété de sols granulaires m peut approximativement être $m = 1/C_u$ et a_c est fixé constant ($a_c = 0.01$ lorsque que la succion est exprimée en cm).

ψ_r est la succion résiduelle et peut être exprimée en fonction de h_{co} comme suit : $\Psi_r = 0.8h_{co}^{1.2}$.

RESULTATS ET DISCUSSION

Prédiction de la courbe de rétention d'eau : Les propriétés physiques des matériaux du sol de l'aquifère ont été déterminées pour la prédiction de la CRE à partir

du modèle de Kovac's modifié. Ce sont les paramètres granulométriques (D_{10} , D_{60}) et la porosité (n) ainsi que l'indice de vide (e) présentés dans le tableau 1.

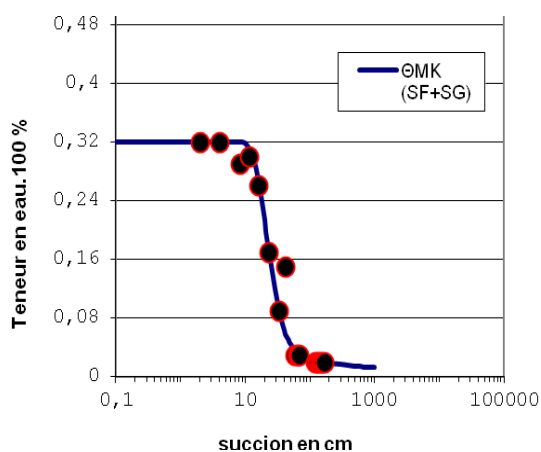
Tableau 1 : Paramètres physiques du sol utilisés dans le modèle de Kovac's modifié (MK)

	Porosité (n)	Indice de vide (e=n/1-n)	D ₁₀ (cm)	D ₆₀ (cm)
Sables fins (SF)	0,28	0,39	0,02	0,05
Sables grossiers (SG)	0,48	0,92	0,05	0,09
Mélange sables fins et grossiers (SF+SG)	0,32	0,47	0,03	0,07
Mélange d'argiles et de sables (A+S)	0,38	0,61	0,02	0,08

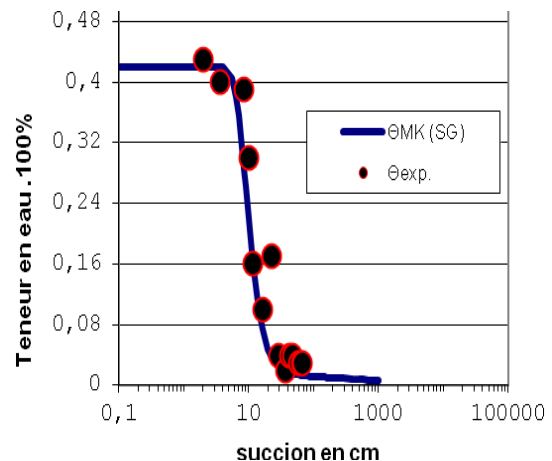
Pour chaque type de matériau, la moyenne des trois mesures réalisées est considérée.

Les courbes de rétention d'eau prédites pour les quatre types de matériaux de l'aquifère du quaternaire sont

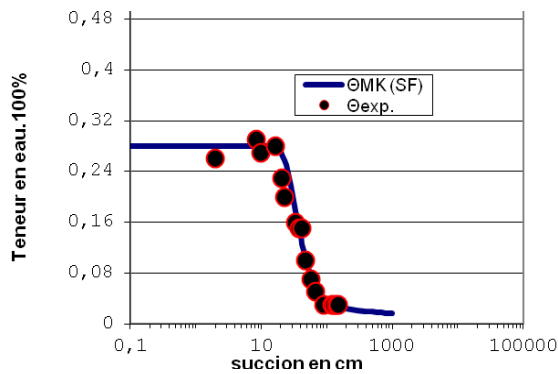
comparées aux points expérimentaux mesurés in situ dans les figures 3.



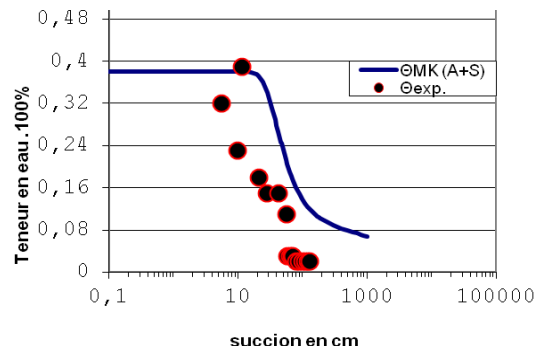
A



B



C



D

Figure 3 : Comparaison des CRE prédites aux points expérimentaux des quatre différents types de sol (A : CRE sables grossiers, B : CRE mélange de sables grossiers et sables fins, C : CRE sables fins, D : CRE mélange d'argiles et de sables)

Dans l'ensemble, les courbes de rétention d'eau des matériaux du quaternaire prédites par le modèle de Kovac's modifié sont proches des points expérimentaux en dehors de celle du mélange sables argiles. Ces résultats confirment ceux d'Aubertin et al. (1998) et de Mbonimpa et al. (2002). Dans les conditions d'application du modèle de Kovac's modifié décrites par Mbonimpa et al. (2002), ce modèle permet de prédire la courbe de rétention d'eau des matériaux granulaires. L'influence de l'argile dans le mélange de d'argiles et de sables donne un caractère plastique à ce matériau. La teneur en argiles du mélange modifie les propriétés hydriques dont

la CRE. La moyenne des trois mesures utilisées pour les points expérimentaux dans ces travaux ne représente certainement pas la teneur exacte obtenue pour la prédiction dans le cas du mélange d'argiles et de sables. Ceci pourrait expliquer les écarts observés entre les points expérimentaux et la prédiction dans le cas du mélange d'argiles et de sables. D'autres modèles sont à explorer pour la prédiction de la CRE de ce type de matériaux (Arya, 1981).

Étude des caractéristiques des courbes de rétention d'eau : Les courbes de la CRE prédites sont comparées entre elles sur la figure 4.

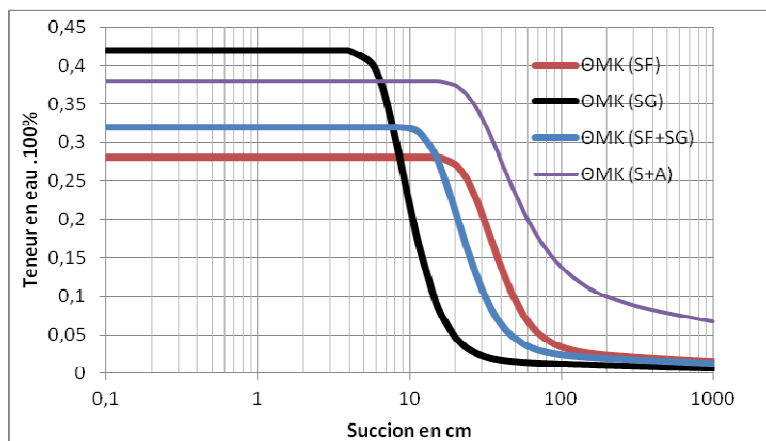


Figure 4 : Comparaison des courbes de rétention d'eau des sables fins (SF), des sables grossiers (SG), du mélange de sables fins et grossiers (SF+SG) et du mélange d'argiles et de sables (A+S).

Sur ces courbes, la pression d'entrée d'air (AEV) et la succion (ψ_G) sont déterminées de façon graphique. Ce

sont des paramètres caractéristiques des CRE décrits dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres caractéristiques des courbes de rétention d'eau

	AEV (cm)	ψ_c (cm)
Sable grossier SG	6,5	12
Sable fin SF	35	90
Mélange sable fin et grossier SG+SF	16	70
Mélange sable argile S+A	36	>100

La pression d'entrée d'air (AEV) des sables fins est supérieure à celle du mélange de sables grossiers et fins, elle est supérieure à l'AEV des sables grossiers. Elle est plus importante dans le cas du mélange d'argiles et de sables. L'AEV est la succion à laquelle, le sol soumis à la gravité, commence à se désaturer. C'est la succion correspondant à environ 90% de la saturation. Ce paramètre de la courbe de rétention du sol est directement relié au rayon moyen des pores par la loi de Jurin et à leur interconnexion pour les sols granulaires (Salager, 2007). Le diamètre moyen des pores et leur interconnexion dans la matrice sol traduisent la porosité et la perméabilité. Parmi les quatre types de sables étudiés, les sables grossiers ont une porosité et une perméabilité plus élevée. Soumis à la même succion (pression gravitaire), ces dernières vont, par conséquent, laisser passer plus facilement l'eau que le mélange de sables fins et grossiers et les sables fins. Dans les sols granulaires et peu plastiques tels que les sables et les mélanges de sables et d'argiles du quaternaire d'Abidjan, l'évolution de la pression d'entrée d'air suit celle de la perméabilité. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Aubertin et al., (1998) et Abdohzadeh et al., (2011). La succion (ψ_c) à laquelle les matériaux de sol commencent à se désaturer complètement sont

respectivement de 12 cm pour les sables grossiers, 70 cm pour le mélanges sables fins et sables grossiers, de 90 cm pour les sables fins et de plus de 100 cm pour le mélange d'argiles et de sables. Dans les parties de l'aquifère où il y a les sables fins et le mélange d'argiles et de sables, la zone saturée au dessus du niveau d'eau est très importante. Elle peut atteindre plus de 100 cm dans le cas des mélanges argiles et sables. Dans ces zones, une humidité permanente est créée. Cette humidité est due à la remontée de l'eau par capillarité au dessus du niveau dynamique. Lorsque le niveau dynamique de la nappe est à moins d'un 1 m du sol, l'humidité peut remonter jusqu'à la surface du sol. Ces zones deviennent des zones à risques pour les habitations et la construction d'infrastructures telles que les routes et les habitations. Si des précautions ne sont pas prises, l'eau pourra remonter dans les fondations de ces édifices. C'est le cas des remontées capillaires observées au niveau des constructions dans les zones où on trouve les sables fins et le mélange de sables et d'argiles. Ce phénomène est bien connu et a fait l'objet de plusieurs études (Wawra et Holfelder, 2003 ; Berger et al. 2005 ; Abdolahzadeh et al. 2008) dont d'autres sont encore en cours.

CONCLUSION

L'étude de la courbe de rétention d'eau de l'aquifère du quaternaire d'Abidjan montre que le modèle de kovac's modifié peut être utilisé pour la prédiction de la CRE des sables de cet aquifères. Ce modèle a le mérite d'utiliser des paramètres physiques de base du sol qui sont facilement accessibles et mesurables. La prédiction de la CRE des sols granulaires est une approche préliminaire intéressante pour la connaissance des propriétés hydriques des sites étendus comme l'aquifère d'Abidjan. Ce modèle peut être appliqué sur d'autres aquifères de sables. L'étude de la CRE des matériaux de l'aquifère révèle que les sables grossiers se désaturent rapidement tandis que les sables fins et les mélanges de sables et

les mélanges d'argiles et de sables se désaturent qu'à des valeurs de succions élevées. La zone mouillée au-dessus du niveau de la nappe est élevée pour les sables fins. Cette hauteur mouillée peut atteindre plus de 1 m dans le cas des mélanges d'argiles et de sables. Lorsque le niveau dynamique de la nappe se trouve à moins d'un mètre du sol, ces zones sont considérées comme des zones à risques pour l'habitation et la réalisation des infrastructures. L'humidité remonte dans ces infrastructures et causent l'apparition de moisissures. Des dispositions particulières doivent être prises pour la construction de maisons et de routes dans ces zones.

REFERENCES

- Abdolahzadeh AM, Vachon BL., Cabral AR, 2011. Evaluation of the effectiveness of a cover with capillary barrier effect to control percolation into a waste disposal facility, *Canadian Geotechnical Journal* 48: 996–1009.
- Abdolahzadeh AM, Vachon BL., Cabral AR, 2008. Hydraulic barrier and its impact on the performance of cover with double capillary barrier effect. In *Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, Alta. 21–24 September 2008. [CD-ROM]. BiTech Publishers, Richmond, B.C. Paper 154.
- Ahoussi KE, 2008. Évaluation qualitative et quantitative 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 doctorat unique. 283p.
- Aghui N, Biémi J, 1984. 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.
- Arya LM, Paris JF, 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture-characteristic from particle size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal* 45: 1023–1030.
- Aubertin M, Fala O, Bussière B, Martin V, Campos D, Gamacherochette A, Chouteau M, Chapuis, RP, 2002. Analyse des écoulements de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles. *Symposium 2002 sur l'environnement et les mines*. 3 – 5 novembre 2002, Rouyn-Noranda, Canada.
- Aubertin M, Mbonimpa M, Bussière B, Chapuis, RP. 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal* 40: 1104 – 1122.
- Aubertin M, Ricard JF, Chapuis, RP, 1998. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal* 35. 55 - 69.
- Berger J, Fornés LV, Ott C, Jager J, Wawra B, Zanke U, 2005. Methane oxidation in a landfill covers with capillary barrier. *Waste Management* 25(4): 369–373.
- Brooks, RH, Corey JC, 1964. Hydraulic properties of porous medium. Colorado State University. Fort Collins. Hydrology Paper 3.
- Bussière B, 1999. Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées avec l'aide de modélisations physiques et numériques. Thèse de doctorat en génie minéral, École Polytechnique de Montréal. 393p.
- Bussière B, Idrissi M, Elkadri NE, Aubertin M, 2000. Simulation des écoulements dans les milieux poreux de saturation variable à l'aide de la formulation mixte de l'équation de Richards. 1^{re} Conférence conjointe AIH-CNC et SCG sur l'eau souterraine. Montréal : Société Canadienne de Géotechnique 335 - 342.
- Delor C, Diaby I, Siméon Y, Yao B, Tastet JP, Vidal M, Chiron JP, Dommangeat A, 1992. 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°4, Abidjan, Côte d'Ivoire, 30 p.
- Fetter CW, 2001. *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA. 231pp.
- Fredlund DG, Xing A, Huang S, 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31:533–545.
- Fredlund DG, Xing A, 1994. Equations for the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532.
- Gardner WR, 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85: 228 –232.
- Jae-Yeol C, Se-Yeong H, Hyoung-Soo K, Eun-Joung K, Kyounghee Y, Jeong-Hwan L, 2008. Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea. *Hydrogeology Journal* 16: 1129–1143.
- Kovac's G, 1981. *Seepage hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands.
- Leong, EC, Rahardjo H, 1997. Review of soil-water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical et Geoenvironmental Engineering* 123: 1106-1117.
- Mantovi P, Fumagalli L, Beretta GP, Guermandi M, 2006. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications. *Journal of Hydrology* 316(1–4): 195– 212.

- Maraqqa MA, Wallace RB, Voice TC, 1999. Effect of water saturation on retardation of ground-water contaminants. *Journal of Environmental Engineering* 125(8): 697–704.
- Marshall TJ, Holmes JW, Rose CW, 1996. *Soil physics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mbonimpa M, Aubertin M, Bussière B, 2006. Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal* 43: 773–787.
- Mbonimpa M, Aubertin M, Chapuis RP, Bussière B, 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering* 20. 235 – 259.
- Salager S, 2007. Étude de la rétention d'eau et de la consolidation de sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 215p.
- Savané I, Goula BTA, Douagui GA, Kouassi KI, 2006. Vulnerability assessment of Abidjan quaternary aquifer using drastic method. In: Xu Y and Usher B (Eds *Groundwater pollution in Africa*. Taylor and Francis/Balkman, Leiden. 115-125.
- Tastet JP, 1997. Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée, Côte d'Ivoire, Togo, Bénin. Thèse ès Sciences Naturelles, Université Bordeaux I. 181 p.
- Wawra, B., and Holfelder, T. 2003. Development of a landfill cover with capillary barrier for methane oxidation – the capillary barrier as gas distribution layer. In *Proceedings of the 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6–10 October 2003*. Edited by Christensen TH, Cossu R, Stegmann R, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy. p348.
- Van Genuchten M T, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal* 44. 892-898.