

Délimitation géophysique de l'interface eau douce - eau salée dans les sables bruns de la plaine côtière de la commune de Sèmè-kpodji

E. Nicaise YALO^{1*}, R. Hercule CHODATON¹, Elie KOUNIKA², Marie BOUCHER³
et Christian ALLE⁴

¹ Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA)/INE, Bénin

² Faculté des Sciences et Techniques (FAST)/UAC, Bénin

³ Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE)/UGA, France

⁴ Institut de Recherche et Développement (IRD), Bénin

* Correspondance, courriel : yalonicaise@yahoo.fr

Résumé

L'aquifère côtier du Quaternaire situé au sud de la commune de Sèmè-Kpodji fait face à l'intrusion saline en provenance de l'Océan Atlantique. Cette intrusion est exposée aux risques anthropiques et climatiques. Pour caractériser cette intrusion saline, un ensemble de techniques géophysiques a été mise en œuvre afin de délimiter l'interface eau douce-eau salée dans cet aquifère. Les sondages électriques verticaux (VES) ont permis de vérifier l'hétérogénéité de la zone non-saturée et les sondages en Time Domain Electromagnétisme (TDEM) d'estimer la profondeur du toit de biseau salé. L'extension latérale de l'intrusion saline a été cartographiée par la méthode électromagnétique fréquentielle (EM-CD) et corrélée par la conductivité de la nappe. Les résultats de cette étude ont montré que la zone non saturée renferme des lentilles d'argiles. La profondeur du toit de l'interface augmente avec la distance au rivage pour atteindre en moyenne 38m à 2km de la ligne de côte avec un pendage variant de 15 à 1,3 %. La cartographie de l'extension latérale de l'interface eau douce - eau salée a montré que les conductivités électriques passaient de 100 mS/m sur la plage à 5-10 mS/m lorsqu'on s'éloigne de 300 m du rivage puis à moins de 2 mS/m à 1.5 km du rivage. De cette étude il ressort donc que les côtes béninoises à l'Est du chenal de Cotonou dans la localité de Sèmè-Kpodji sont moins vulnérables à l'intrusion saline qu'à l'Ouest du chenal dans la localité de Togbin.

Mots-clés : *aquifère du quaternaire, biseau salé, Electromagnétisme Fréquentielle (EM-CD), Time Domain Electromagnétisme (TDEM), Sondages Electriques Verticaux (VES).*

Abstract

Geophysical delimitation of the freshwater-saltwater interface in the brown sands of the coastal plain in the Sèmè-kpodji municipality

The Quaternary coastal aquifer located south of the Sèmè-Kpodji commune faces saline intrusion from the Atlantic Ocean. This intrusion is exposed to anthropogenic and climatic risks. In order to characterize this saline intrusion, a set of geophysical techniques was implemented to delimit the freshwater-salt water

interface in this aquifer. Vertical electric soundings (VES) were used to verify the heterogeneity of the unsaturated zone and Time Domain Electromagnetism (TDEM) soundings were used to estimate the depth of the saline wedge roof. The lateral extension of the salt intrusion was mapped by the electromagnetic frequency method (EM-CD) and correlated by conductivities of the water table. The results of this study showed that the unsaturated zone contains clay lenses. The depth of the roof of the interface increases with the distance from the shoreline to reach an average of 38m at 2km from the coastline with a dip ranging from 15 to 1.3 %. Mapping of the lateral extension of the freshwater-salt water interface showed that electrical conductivities increased from 100 mS/m on the beach to 5-10 mS/m when 300 m from the shoreline and then to less than 2 mS/m at 1.5 km from the shoreline. This study thus shows that the Beninese coasts east of the Cotonou channel in the locality of Sèmè-Kpodji are less vulnerable to saline intrusion than west of the channel in the locality of Togbin.

Keywords : *quaternary aquifer, salt wedge, Frequency Electromagnetism (EM-CD), Time Domain Electromagnetism (TDEM), Vertical Electrical Soundings (VES).*

1. Introduction

L'eau contenue dans le sol et dans le sous-sol constitue la majeure partie de l'eau qu'utilise l'homme. Une eau souterraine est en bon état lorsque son état quantitatif et son état chimique sont qualifiés, au minimum, de bons [1]. Au cours des dernières décennies, une croissance rapide de la population a accru la pénurie d'eau et la valeur de l'eau disponible [2, 3]. L'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou est assuré principalement à partir des ressources du système aquifère du Continental Terminal du plateau d'Allada, et accessoirement à partir de la nappe phréatique de l'aquifère du Quaternaire dans les cordons de sable littoraux [4]. La cartographie de l'intrusion saline contribue à la préservation du fragile équilibre de la ressource en eau souterraine sur le plan environnemental [5]. La cartographie de l'interface eau douce - eau salée par la méthode géophysique de résistivité électrique est possible dans les sédiments sableux. Néanmoins, l'estimation de la salinité de l'eau au moyen de la résistivité globale est compliquée dans les sédiments argileux [6]. L'aquifère côtier du Quaternaire situé au sud de la commune de Sèmè-Kpodji fait face à l'intrusion saline en provenance de l'Océan Atlantique. Cette intrusion est exposée aux risques anthropiques et climatiques. Pour caractériser cette intrusion saline, un ensemble de techniques géophysiques a été mise en œuvre afin de délimiter l'interface eau douce - eau salée dans cet aquifère. Les sondages électriques verticaux (VES) ont permis de vérifier l'hétérogénéité de la zone non-saturée et les sondages en Time Domain Electromagnétisme (TDEM) d'estimer la profondeur du toit de biseau salé. L'extension latérale de l'intrusion saline a été cartographiée par la méthode électromagnétique fréquentielle (EM-CD). La connaissance de l'extension de l'intrusion du biseau salé et de la profondeur de l'interface eau douce/eau salée contribue à la prise de décision pour la sauvegarde de l'environnement et la gestion durable des eaux souterraines [5, 7]. En particulier, les méthodes électromagnétiques et électrique de prospection permettent de déterminer les distributions des conductivités (ou inversement de résistivité) dans les sols et le sous-sol en fonction de la profondeur. Ainsi elles peuvent être utilisées pour délimiter l'interface entre l'eau douce (résistante) et l'eau salée (conductrice) [8, 9].

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

2-1-1. Géologie de la plaine littorale à l'Est du chenal de Cotonou

La plaine côtière montre trois générations de cordons sableux actuels ou hérités des oscillations marines du Quaternaire récent, [10]. Il s'agit des cordons internes de sables jaunes, des cordons médians de sables gris, et des cordons actuels et subactuels de sable gris brun. Au Sud de la lagune de Porto-Novo affleurent les formations quaternaires qui font partie du domaine margino-littoral du Bénin (**Figure 1**). Ce dernier a fait l'objet de nombreuses études géologiques dont celles de [11, 12] et d'autres auteurs qui ont travaillé spécifiquement sur les "sables jaunes". Ces études révèlent que la plaine littorale du Bénin est constituée de cordons sableux disposés en bandes massives parallèles au rivage et séparées entre elles par des dépressions marécageuses ou lagunes. On distingue dans cette partie orientale du domaine margino-littoral du Bénin, du Nord au Sud : les cordons de "sables jaunes" ou cordons internes à la latitude de Tori-Agonsaf Djèrègbé/Dja, les cordons médians de sables gris dans l'alignement Ekpè/Kpodji/Kraké et ceux actuels et subactuels de sables bruns et blancs qui bordent l'Océan Atlantique. Entre ces différents cordons sableux s'observent des dépôts de sables et de vases dans les dépressions marécageuses. En résumé, la stratigraphie de la plaine littorale, révélée par l'étude des sondages, montre au-dessus du Continental Terminal, des dépôts fluviaux-lagunaires de nature argileuse et sableuse, des sables marins holocènes et une sédimentation actuelle et subactuelle dans des dépressions et lagunes qui est aussi à l'origine des cordons de sables bruns [12].

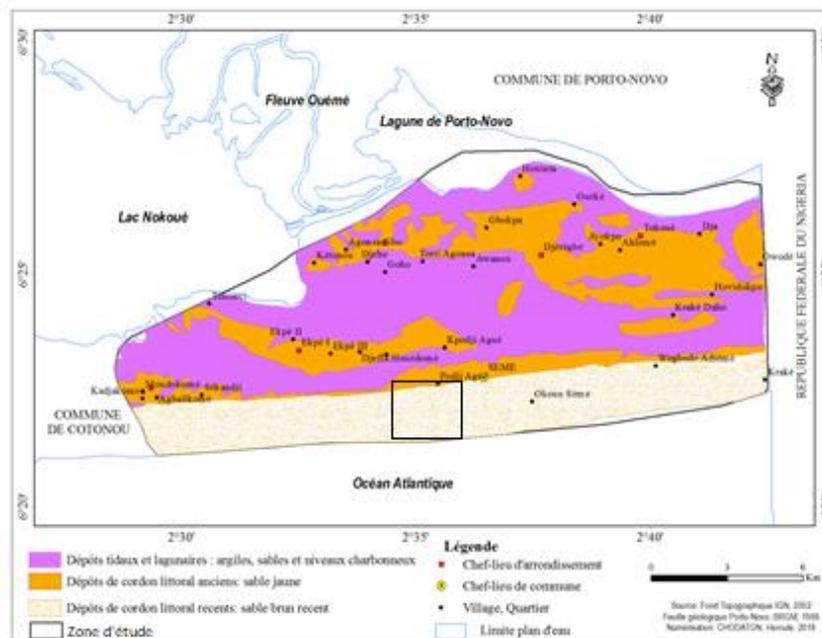


Figure 1 : Carte géologique de la commune de Sèmè-Kpodji

2-1-2. Hydrogéologie de la plaine côtière de Sèmè-Kpodji

Le milieu littoral béninois comporte superficiellement un système aquifère à nappe libre à semi-libre pour l'essentiel, mais par endroit captive. C'est l'aquifère superficiel du Quaternaire dont la nappe libre communique avec la lagune côtière et la lagune d'Outobo par des sources d'émergence (**Figure 2**). Cet

aquifère repose sur un aquitard le séparant de l'aquifère du Continental Terminal plus profond (**Figure 2**). Ce système constitue une même unité hydrogéologique « homogène en grand ». Dans la plaine littorale, la présence de plusieurs dômes piézométriques bien circonscrits [4], montre que ce sont les écoulements radiaux qui sont prédominants avec des gradients hydrauliques encore plus faibles que sur le plateau. On est souvent dans ce cas, en présence d'une nappe radiale divergente ou convergente, mais à profils piézométriques paraboliques, ce qui confirme qu'il s'agit d'une nappe alimentée par infiltration directe des précipitations et drainée dans la même zone par les lagunes, le lac Nokoué et l'Océan Atlantique. La zone non saturée a une épaisseur de 0 à 3 m environ. Selon [13], le cordon littoral est caractérisé par une bonne perméabilité des sables (10^{-2} à 10^{-4} m/s). Ces sédiments renferment localement des aquifères d'eau douce ou saumâtre.

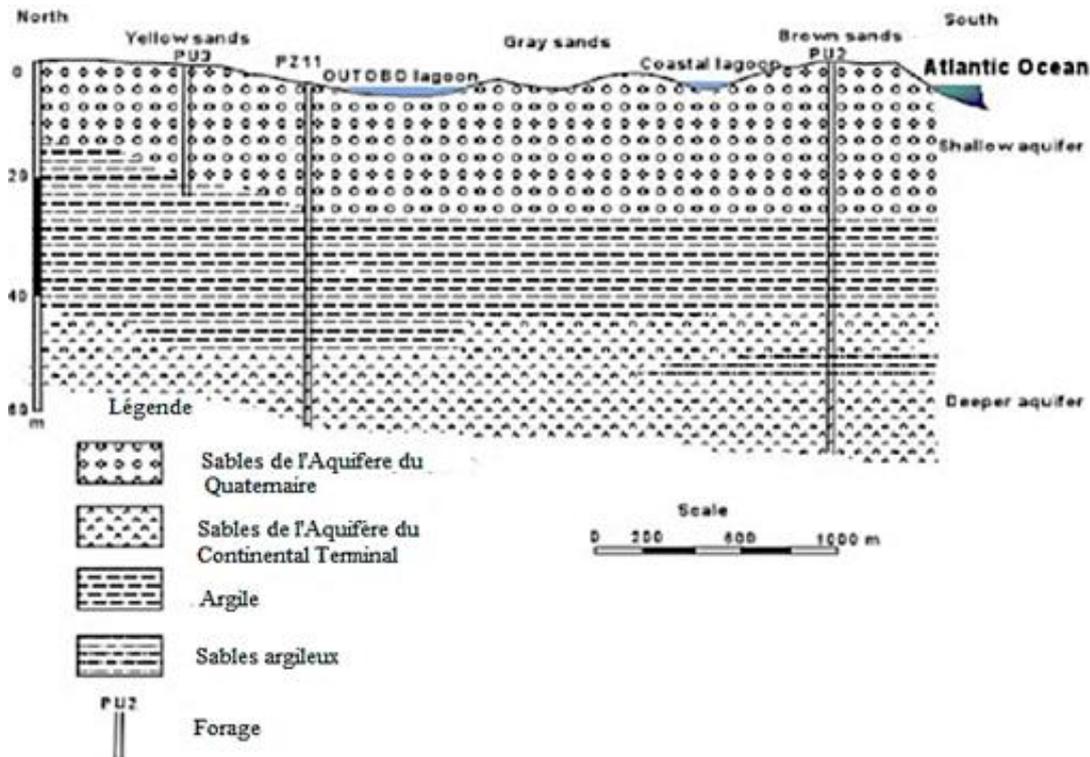


Figure 2 : Coupe hydrogéologique de l'aquifère du Quaternaire (Source : [5])

2-2. Méthodologie

Trois principaux types de prospections géophysiques ont été effectués dans le but de caractériser l'interface eau douce - eau salée dans le cordon de sables bruns de la plaine côtière de la commune de Sèmè-Kpodji. Il s'agit de la prospection en méthode de résistivité électrique avec un Syscal-Kid, la prospection en Time Domain Electromagnétisme avec un TEM-FAST et la prospection en électromagnétisme fréquentiel avec un EM-CMD. Le sondage électrique a été réalisé avec le dispositif Wenner. La résistivité apparente a été calculée suivant la formule de **l'Équation 1** [14] avec V - le potentiel, I - l'intensité du courant et a - la distance entre les électrodes.

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Les sondages en électromagnétisme temporel ont été réalisés avec un dispositif coïncident d'une boucle de 25 m de côté. Dans la localité de Sèmè-Kpodji, 40 sondages en Time Domain Electromagnétisme (TDEM) ont

été réalisés sur la plaine côtière dont certains répartis en deux profils avec les mêmes configurations. (**Figure 3**). La résistivité apparente (inverse de la conductivité) est automatiquement calculée suivant la **Formule de l'Équation 2** [15].

$$\rho = \frac{\mu}{\pi} \left(\frac{m}{20}\right)^{2/3} \frac{1}{\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)^{2/3}} \frac{1}{t^{5/2}} \quad (2)$$

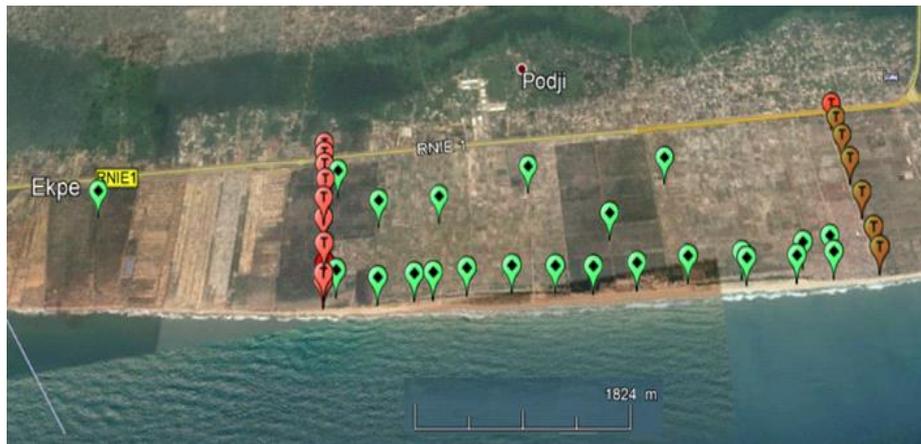


Figure 3 : Localisation des sondages TDEM à SÈME KPODJI

La méthode EM-CMD a été déployée sur une superficie d'environ 10 km² dans la localité de Sèmè-Kpodji avec des profils perpendiculaires à la ligne de rivage et identiques à ceux du TDEM. La conductivité électrique se calcule d'après la **Formule de l'Équation 3** [16] avec H_s/H_p - le rapport des champs (primaire et secondaire).

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu S^2} \left(\frac{H_s}{H_p}\right) \quad (3)$$

3. Résultats et discussion

3-1. Estimation de l'hétérogénéité de la ZNS

L'épaisseur de la Zone Non Saturée a été estimée par des sondages manuels à la tarière. Les sondages à la tarière ont atteint le toit de la nappe. Ce niveau est matérialisé par une courbe sur la **Figure 4**. On peut constater que les niveaux statiques varient entre 1 et 3,8 m. il s'en suit donc que la zone non saturée (ZNS) se situe au minimum dans le premier mètre du sous-sol pour P3 à l'aplomb duquel s'est fait le Sondage électrique S3, dans les deux premiers mètres pour P2 à l'aplomb duquel s'est effectué le sondage électrique S2 et les quatre premiers mètres pour P1 à l'aplomb duquel s'est déployé S1. On remarque sur la **Figure 4** que la zone au-dessus du niveau statique à savoir la ZNS, est en général constituée de sable fin intercalé par endroits de sable argileux comme en P1 et P2. Cela montre de la nature hétérogène de la ZNS particulièrement vers le nord, lorsqu'on s'éloigne du rivage.

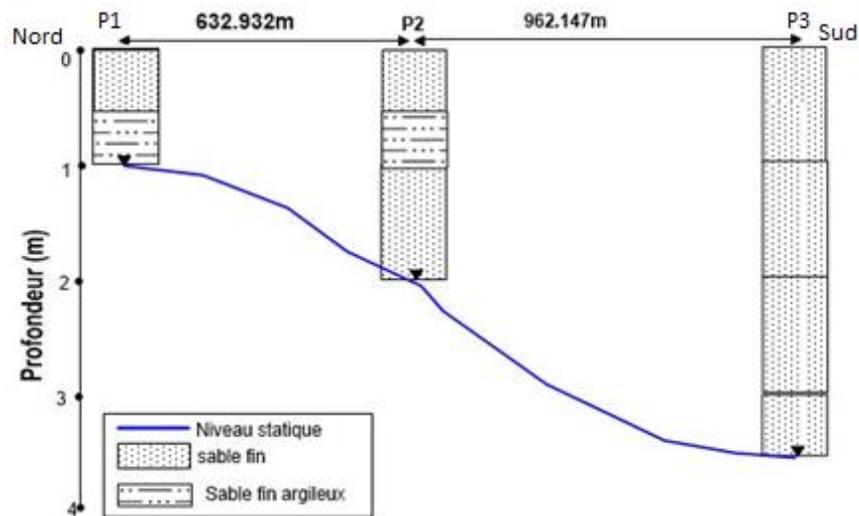


Figure 4 : Description macroscopique de la coupe lithologique issue des tarières

Les mesures de résistivité réalisées par sondage électrique vertical (VES) sur le profil Nord-Sud de la zone d'étude, montrent une hétérogénéité de la zone non saturée avec la présence des lentilles d'argile (Figure 5). En effet, sur les logs de sondages VES qui ont traversés la zone non saturée, les couches relativement conductrices représentent des niveaux argileux (5 ohms.m en S2) ou argileux sableux (250 ohms.m en S1) dans un environnement sableux sec (>3000 ohms.m). La zone non saturée est donc hétérogène dans la partie au nord de la lagune côtière contrairement à la partie sud où elle est très homogène (Figure 5). Cette hétérogénéité mise en évidence aussi bien par les sondages à la tarière que par les logs de sondages électriques verticaux, avait déjà été remarquée par [5] sur la zone littorale de Cotonou.

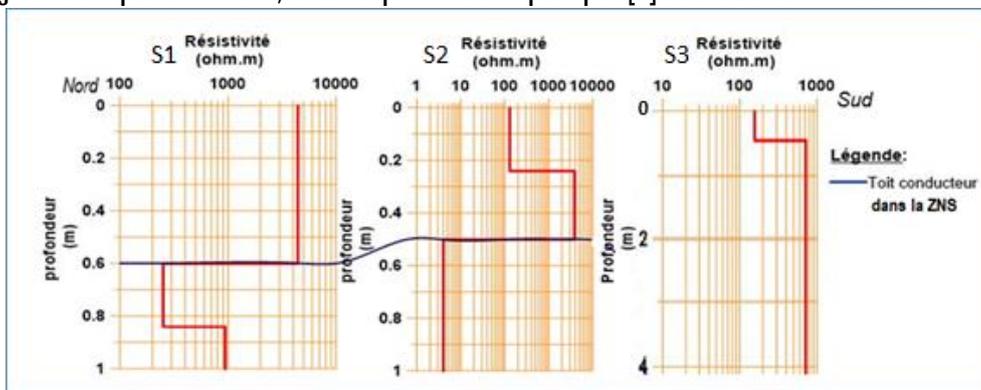


Figure 5 : Logs de résistivité électrique (VES) montrant les conducteurs dans la ZNS

3-2. Variation de la profondeur du toit du biseau salé

Les sondages TDEM ont permis de déterminer la morphologie de l'interface eau douce - eau salée. L'interprétation des logs de sondages TDEM suivant le profil Nord - Sud montre un approfondissement de la couche conductrice (résistivité < 5 ohms.m) en partant du rivage au Sud vers l'intérieur des terres au Nord (Figure 6). La profondeur de l'interface eau douce - eau salée passe donc de 23 m au sud de la zone d'étude près de l'Océan à plus de 45 m au nord de la lagune côtière.

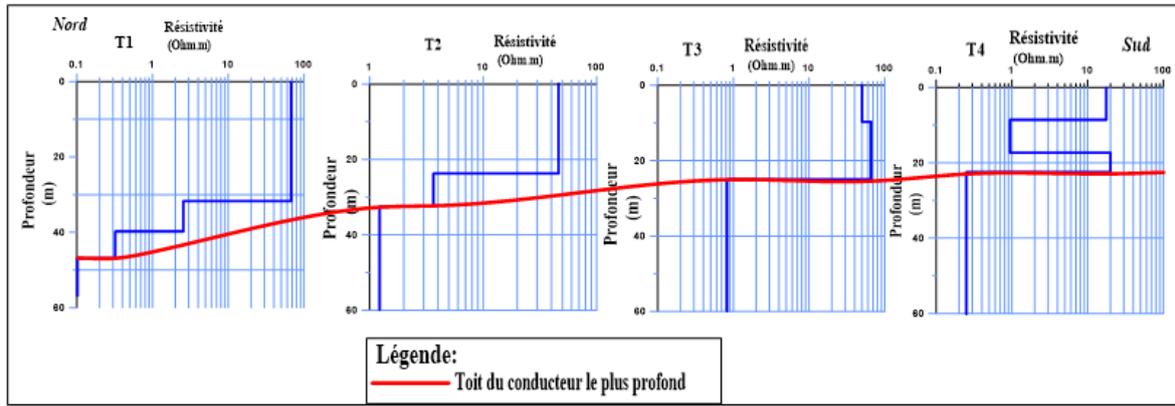


Figure 6 : Logs de sondages TDEM montrant le toit du conducteur dans la zone saturée (Profil de Sèmè-kpodji)

La coupe géoélectrique perpendiculaire au trait de côte en direction Nord-Sud de la zone d'étude (**Figure 7**) montre la mise en évidence d'au moins 35 m du sable quaternaire avec quelques lentilles d'argile (hétérogénéité de la zone non saturée). Néanmoins, la conductivité (inverse de la résistivité) de l'aquifère augmente avec la profondeur. Ce qui pourrait-être le passage de l'eau saumâtre à l'eau salée. En effet la conductivité d'un aquifère saturé en eau saumâtre est inférieure à la conductivité d'un aquifère saturé en eau salée. Il est à remarquer que la résistivité de l'aquifère saturé en eau salée avoisine celle de l'argile. Cela pose un problème d'équivalence qui ne serait être relevé que par la réalisation d'un forage profond.

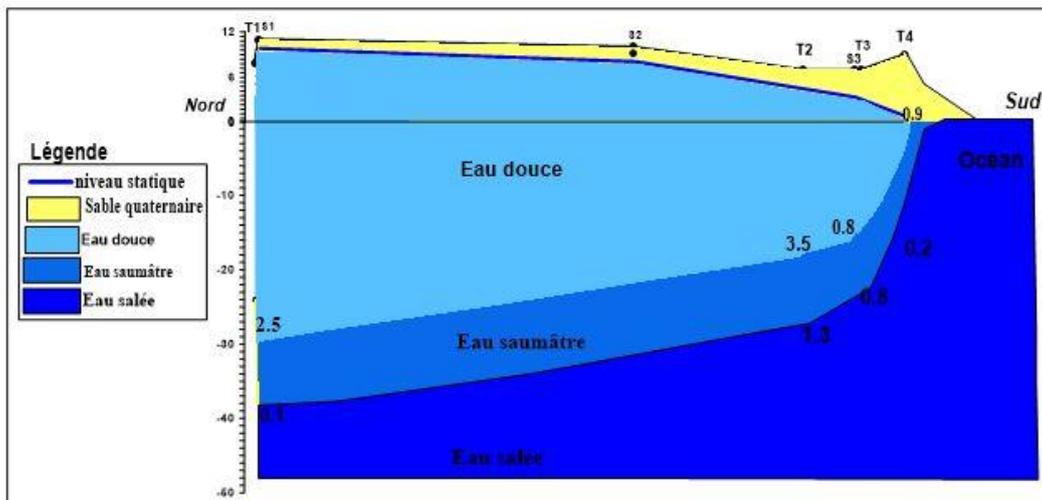


Figure 7 : Coupe géoélectrique interprétative de l'aquifère côtier suivant le profil Nord - Sud (les valeurs de résistivité électrique, indiquées pour chaque sondage, sont en Ohm.m)

Dans la zone d'étude le long de la côte (profil Ouest-Est), la profondeur de l'interface eau douce - eau salée varie de façon aléatoire. Néanmoins au nord de la zone d'étude à 1,5 km du rivage, cette profondeur est systématiquement inférieure à 40 m (**Figure 8**).

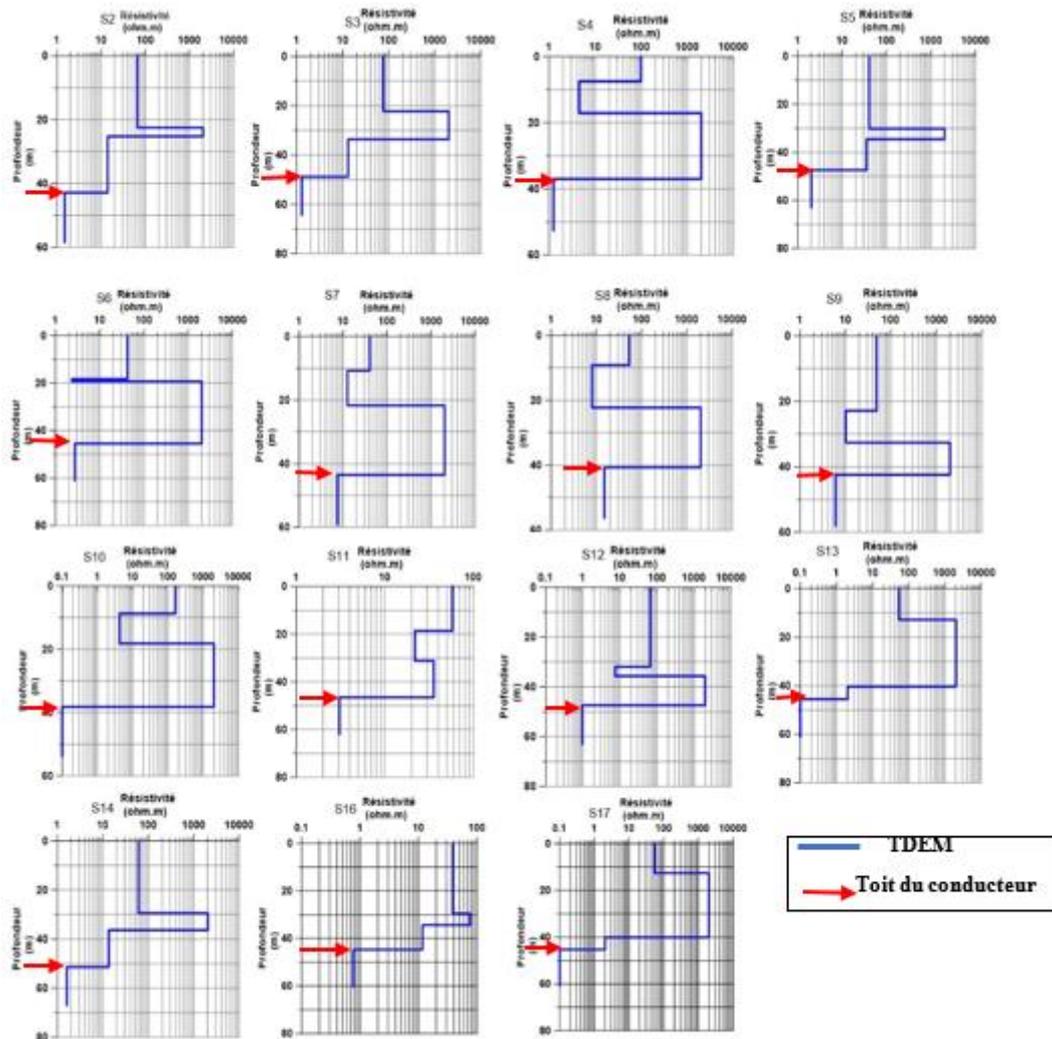


Figure 8 : Logs de sondages TDEM montrant le toit du conducteur dans la zone saturée (Profil W-E de Sèmè-Kpodij)

La coupe géoélectrique suivant le trait de côte de direction Ouest-Est, (Figure 9) montre la présence du biseau salée à 45 m de profondeur. Néanmoins on remarque la présence d'une épaisse couche de zone perméable avec une formation aquifère sous-jacente. On remarque sur cette coupe deux aquifères intercalés par un aquitard. L'épaisseur de l'aquifère superficiel n'excède pas 10m tandis que celui de l'aquifère sous-jacent est au minimum de 20 m soit le double de l'aquifère superficiel.

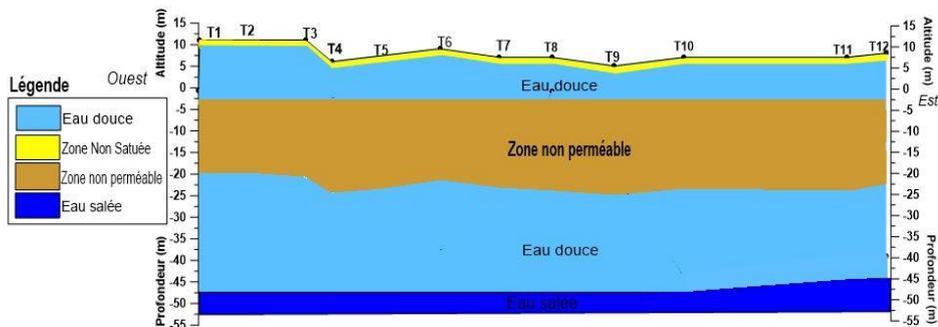


Figure 9 : Coupe géoélectrique montrant la profondeur du biseau salé sur la plaine en direction Ouest-Est à 1,5 km du rivage

3-3. Cartographie latérale du biseau salé

Les mesures de conductivités réalisées par EM-CMD dans la localité de Sèmè-Kpodji, montrent aussi une diminution en fonction de la latitude (**Figure 10a**). Les valeurs de conductivités passent de ~ 100 mS/m sur la plage à 5-10 mS/m lorsqu'on s'éloigne de 300 m du rivage puis à moins de 2 mS/m à 1.5 km. Cela suggère un approfondissement rapide du biseau salé qui semble être confiné en bordure d'Océan.

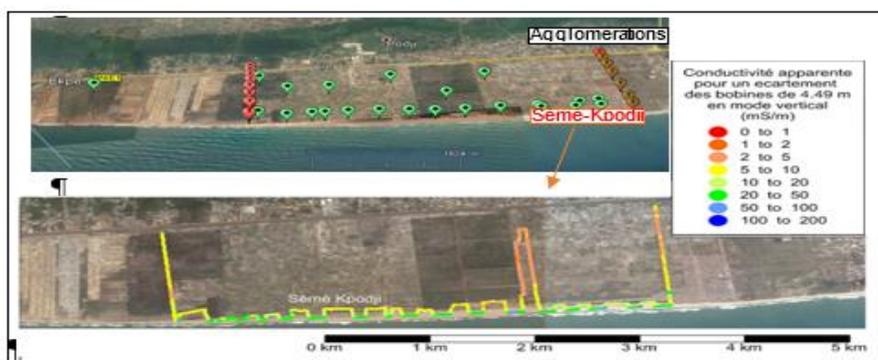


Figure 10a : Variation latérale des conductivités apparentes à Sèmè-Kpodji

Les mesures de conductivités de la nappe réalisées in situ dans les puits de la localité de Sèmè-Kpodji, affichent des conductivités plus faibles au Nord-Est de la zone d'étude (**Figure 10b**) conformément aux conductivités EM-CMD. Les valeurs de conductivités de la nappe passent de 1400 μ S/cm près de l'Océan et de la zone lagunaire à 500 μ S/cm au Nord-Est. Tout comme les valeurs de conductivités EM-CMD, celles de la nappe diminuent lorsqu'on s'éloigne du rivage à l'Ouest de la zone d'étude et restent moyennement constantes à l'Est. On peut en conclure que les conductivités de la nappe phréatique contrôlent les conductivités d'électromagnétiques EM-CMD.

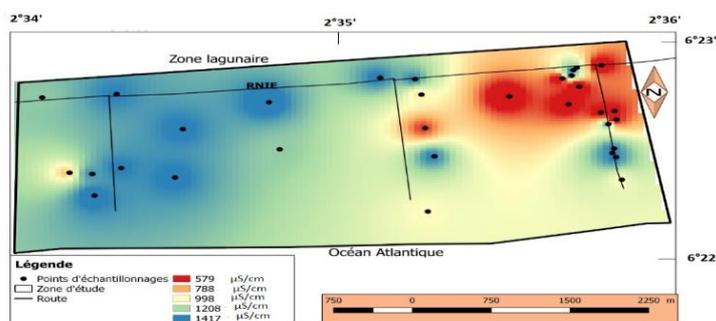


Figure 10b : Variation latérale des conductivités de la nappe à Sèmè-Kpodji

3-4. Comparaison de l'interface eau douce - eau salée de Sèmè-Kpodji et à celle de Togbin

Les résultats des sondages électriques et de TDEM sur le profil Nord-Sud montrent un approfondissement rapide du biseau salé. Ce qui s'explique par une pente brutale de 15 % d'inclinaison à côté du rivage et une pente progressive de 1,26 % environ à 1km de l'Océan. Cette zone est caractérisée par la présence de niveaux superficiels non conducteurs au-dessus d'un aquifère de sables à eau douce surmontant une nappe salée. Dans la direction Nord-Sud, l'interface eau douce - eau salée se situe à 7 m à côté du rivage et environ 40 mètres de profondeur en s'éloignant du rivage. Les résultats du sondage TDEM à Sèmè-Kpodji montrent que le toit du biseau

salé se situe à une profondeur moyenne de 38,5 m et d'après [17] le résultat de l'inversion du log de sondage TDEM à Togbin montre que la profondeur moyenne du biseau salé se situe à 5,8 m (**Figure 11**). D'après [17] le sondage réalisé à Ekpèl présente une résistivité de 1 ohm.m à partir de 50 m de profondeur. Les coupes géoélectriques révèlent à 32 m de profondeur environ, la présence d'une couche d'argile de 8m d'épaisseur avec une formation aquifère sous-jacente à partir de 40 m. Les valeurs de résistivités en EM-CMD décroissent avec la profondeur de 300 à 100 Ω m sur le site de Sèmè Kpodji et d'après [18] de 50 à 10 Ω m sur le site de Togbin. Les mesures de conductivités réalisées dans la localité de Sèmè-Kpodji, montrent leurs diminutions en fonction de la latitude : elles passent de ~ 100 mS/m sur la plage à 5-10 mS/m lorsqu'on s'éloigne de 300 m du rivage puis à moins de 2 mS/m à 1.5 km. D'après [18] les mesures de conductivités réalisées avec l'EM-CMD dans les secteurs de la localité de Togbin, montrent en général une diminution des conductivités en fonction de la latitude : elles varient de ~ 200 mS/m près de l'Océan à ~ 20 mS/m lorsque qu'on s'éloigne de 300 m de la plage (**Figure 11**).

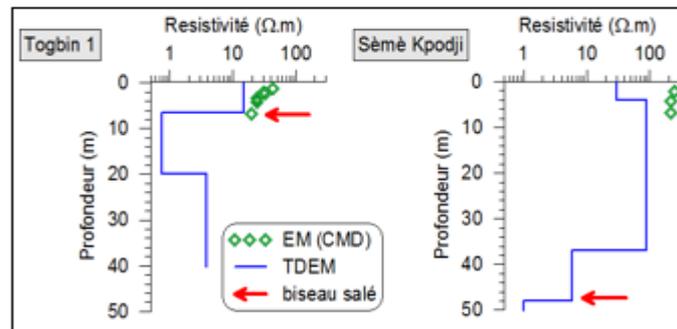


Figure 11 : Comparaison de la profondeur de l'interface eau salée à Togbin et à Sèmè-Kpodji

La cartographie de l'interface eau douce - eau salée a montré que cette dernière est plus étendue sur la côte Ouest où les lagunes sont plus proches de l'Océan que sur la côte Est où les lagunes sont à plus de 2 km du rivage. De cette étude il ressort donc que d'Ouest en Est, les côtes béninoises n'ont pas la même vulnérabilité à l'intrusion saline.

4. Conclusion

Cette étude a montré que la ZNS qui renferme quelques lentilles argilo-sableuses de faibles résistivités électriques, est assez hétérogène au nord des lagunes côtières. L'interface eau douce - eau salée s'approfondit très rapidement pour atteindre des profondeurs de 32 m indiquant ainsi un fort pendage de 15 % au contact de l'Océan au sud avant de se répandre à la base de l'aquifère avec un pendage plus faible de 1,26 %. Dans la direction parallèle au trait de côte, la coupe géoélectrique montre que l'aquifère du Quaternaire est traversé par un aquitard discontinu séparant deux nappes d'eau douce qui reposent sur une nappe salée à environ 40 m de profondeur. L'intrusion saline est plus accentuée au sud-est près de l'Océan où elle affiche des conductivités supérieures à 100 mS/m jusqu'à 300 m du rivage. Les conductivités de la nappe phréatique contrôlent les conductivités de électromagnétiques EM-CMD La profondeur du biseau salé qui est plus superficiel sur la côte Ouest à Togbin (6,5 m) que sur la côte Est à Sèmè-Kpodji (45 m).

Remerciements

Les auteurs remercient les chercheurs de l'IRD pour la mise à disposition du matériel EM-CMD et TEM-FAST lors des travaux de rédaction de cet article.

Références

- [1] - M. GHISLAIN et M. BESBES, "Les eaux souterraines", *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 2 (86), (2017) 25 - 30. DOI : 10.3917/re1.086.0025
- [2] - M. H. ZAWAWI, SYAFALNI, I. ABUSTAN, "Detection of groundwater aquifer using resistivity imaging profiling at Beriah Landfill Site, Perak, Malaysia". *Adv. Mater. Res.* 250, (2011) 1852 - 1855
- [3] - M. I. MCLEAN, L. EVERS, A. W. BOWMAN, M. BONTE, W. R. JONES, "Statistical modeling of groundwater contamination monitoring data: a comparison of spatial and spatiotemporal methods". *Sci. Total Environ.* 652, (2018) 1339 - 1346
- [4] - M. BOUKARI, "Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources". THS. Doctorat ès-Science. Univ. C. A. Diop de Dakar, (1998) 278 p.
- [5] - N. YALO, M. DESCLOITRES, A. ALASSANE, D. MAMA, M. BOUKARI, "Environmental geophysical study of the groundwater mineralization in a plot of the Cotonou littoral zone (South Benin)". *International Journal of Geophysics*, Article ID 329827, (2012) 1 - 10
- [6] - J. MCNEILL, "Electrical Conductivity of Soils and Rocks". Technical Note TN-5 Geonics Limited, Canada. (1980) 22 p.
- [7] - B. ALABJAH, F. AMRAOUI, M. CHIBOUTB, M. SLIMANIC, "Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using the electric recognition". *Journal of Hydrology* 566, (2018) 363 - 376
- [8] - M. GOLDMAN, D. GILAD, A. RONEN, A. MELLOUL, "Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method". *Geoexploration*, 28, (1991) 153 - 174
- [9] - H. EL-KALIOUBYAB, O. ABDALLAA, "Application of time-domain electro-magnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman". *Journal of Applied Geophysics*, 115, (2016) 59 - 64
- [10] - R. A. LAIBI, "Dynamique actuelle d'une embouchure fluviale estuarienne à flèche sableuse, la Bouche du Roi, Bénin, Golfe de Guinée : caractérisation hydrosédimentaire et géomorphologique". Thèse de Doctorat unique de l'UAC et l'Université doctoral Côte d'opale. (2011) 291 p.
- [11] - JP. TASTET, "The Quaternary to actual sedimentary formations of Togo and Popular Republic of Benin littoral" *Supplement of the Bulletin AFEQ* No 50, (1977) 15 - 167
- [12] - L. M. OYEDE, "Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quaternaires et néogènes du domaine margino-littoral du Bénin (Afrique de l'Ouest)". Thèse de Doctorat es-Sciences. Université de Bourgogne et Université Nationale du Bénin (1991) 302 p.
- [13] - R. MALIKI, "Hydrogeologic study of the beninian littoral in the area of Cotonou (A.O.)" Thesis of Doctorate of the 3rd cycle. UCAD Dakar, Senegal, (1993) 162 p.
- [14] - D. CHAPPELLIER, "Prospection électrique de surface, technique et documentation (Lavoisier)", Université de Lausanne. (2000) 102 p.
- [15] - B. FROHLICH, and W. J. LANCASTER, "Electromagnetic surveying in current Middle Eastern archaeology: Application and evaluation". *Geophysics*, 51(7) (1986) 1414 - 1425
- [16] - J. D. McNeill, "Use of electromagnetic methods for groundwater studies. Ward, S.H., ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics*" *Society of Exploration Geophysicists*, IG5 1, (1990) 191 - 218
- [17] - T. N'TCHA, "Caractérisation de l'interface eau douce - eau salée dans le secteur Sud du plateau de Sakété et de sa plaine littorale pour une gestion durable des ressources en eau souterraine en milieu côtier ". Mémoire de Master INE/UAC (2017) 59 p.
- [18] - N. YALO, M. BOUCHER A. ALASSANE, E. KOUNIKA, H. CHODATON et T. N'TCHA, "Caractérisation du biseau salé au Bénin par mesures électromagnétiques" 11^{ème} Colloque GEOFCAN, Anthony, France (2018) 89 - 92