

Caractérisation de l'intrusion saline et estimation de la réserve en eau douce de l'aquifère du quaternaire en zone côtière au Sud du Bénin

Louis-Marc SOGNON^{1,2,3*}, Nicaise YALO¹ et Christian ALLE^{1,2,4}

¹ UAC/INE, Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, 01 BP 4521 Cotonou, Bénin

² CIPMA-CHAIRE UNESCO, Université d'Abomey-Calavi, Chaire Internationale de Physique Mathématique et Applications, 072 BP 50 Cotonou, Bénin

³ DDEEM, Direction Départementale de l'Energie, de l'Eau et des Mines du Borgou, BP 197 Parakou, Bénin

⁴ IRD/IGE, Institut de Recherche pour le Développement, Institut des Géosciences de l'Environnement, 08 BP 841 Cotonou, Bénin

* Correspondance, courriel : louis marc.sognon@gmail.com

Résumé

Cette étude porte sur l'estimation de l'épaisseur de la lentille d'eau douce au-dessus de l'eau salée et la profondeur de l'interface eau douce eau salée. La zone d'étude est située entre l'Océan Atlantique et la lagune côtière au sud du Bénin sur une superficie de 33,69 km². 345 sondages TDEM ont été menés pour obtenir des cartes de résistivité à différentes profondeurs. L'application de la loi d'Archie a permis d'estimer la profondeur moyenne du biseau salé à 8 m pour un volume d'eau douce de 5 040 000 m³ à partir de l'océan Atlantique. Au nord de la zone d'étude, cette épaisseur atteint 23 m pour un volume d'eau douce de 16 800 000 m³ à partir de la lagune côtière. L'épaisseur de la lentille d'eau douce définie par la méthode géophysique corrèle avec celle mesurée dans les puits forés.

Mots-clés : *intrusion saline, lentille d'eau douce, TDEM, aquifère du quaternaire.*

Abstract

Characterization of the saline intrusion and estimation of the freshwater reserve of the quaternary aquifer in the coastal zone of southern Benin

This study focuses on estimating the thickness of the freshwater lens over saltwater and the depth of the freshwater salt water interface. The study area is located between the Atlantic Ocean and the coastal lagoon in southern Benin on an area of 33.69 km². 345 TDEM surveys were conducted to obtain resistivity maps at different depths. The application of Archie's law has made it possible to estimate the average depth of the salt wedge at 8 m for a freshwater volume of 5,040,000 m³ from the Atlantic Ocean. North of the study area, this thickness reaches 23 m for a freshwater volume of 16 800 000 m³ from the coastal lagoon. The thickness of the freshwater lens defined by the geophysical method correlates with that measured in drilled wells.

Keywords : *saline Intrusion, freshwater Lentil, TDEM, quaternary aquifer.*

1. Introduction

Plus de la moitié de la population mondiale vit en région côtière à moins de 100 km du littoral [1]. Les pays en voie de développement sont particulièrement concernés avec une démographie actuellement marquée par un important exode rural vers les grandes villes côtières en forte expansion [2]. Les zones côtières sont les plus densément peuplées et les plus intensément utilisées de la planète [3]. L'inégale répartition de la ressource en eau dans le bassin sédimentaire côtier au Bénin et plus précisément dans la plaine littorale, sa rareté relative, ainsi que sa fragilité créent un risque majeur de pénurie qui augmente continuellement face à l'accroissement démographique et aux besoins sans cesse croissants du développement socio-économique et industriel [4]. La zone littorale béninoise est un milieu très sensible. Elle est soumise à diverses pressions anthropiques (croissance urbaine ; agriculture intensive ; développement industriel et tourisme) et à diverses phénomènes naturels (changement climatique) provoquant de fortes dégradations : érosion côtière et élévation du niveau marin [5]. Son exploitation se heurte à un problème de quantité et de qualité [6]. En effet, les changements climatiques accompagnés de sécheresses prolongées peuvent être à l'origine de la rupture de l'interface eau douce-eau salée entraînant l'avancée du biseau salé [7]. Ainsi, une forte exploitation entraîne une inversion du gradient hydraulique et par conséquent une augmentation de la salinité [8]. Un certain nombre de puits à grand diamètre et des forages sont déjà mis hors service en raison d'une forte élévation de la concentration d'eau salée [9]. Face à ce problème, il devient nécessaire de caractériser la lentille d'eau douce au dessus de l'eau salée par la méthode géophysique Electromagnétisme en Domaine Temporel (TDEM) et d'estimer la réserve de la lentille d'eau douce de l'aquifère côtier. Parmi les méthodes géophysiques utilisées pour la prospection et la gestion des eaux souterraines, les techniques géoélectriques et géoélectromagnétiques viennent en tête [10]. Ces techniques sont particulièrement efficientes dans la prospection de l'intrusion saline dans les aquifères à cause de l'étroite relation qui existe entre la salinité et la résistivité/conductivité électrique [11]. En comparaison aux autres techniques électriques et électromagnétiques, la méthode électromagnétique en domaine fréquentiel (TDEM) est particulièrement précise et efficiente à cause de sa grande sensibilité aux cibles conductrices avec une résolution aussi bien verticale qu'horizontale et une plus grande profondeur d'investigation [12]. Le sondage TDEM est un moyen rapide et précis de cartographie de la profondeur, de l'épaisseur et de l'extension latérale de l'intrusion saline dans les zones côtières [13]. Cette étude vise à caractériser le biseau salé et à estimer la réserve en eau douce de l'aquifère du Quaternaire en zone côtière au Sud du Bénin.

2. Méthodologie

2-1. Cadre de l'étude

La zone côtière du Bénin mesure 125 Km et couvre environ 375 Km². Elle occupe environ 0,5 % de la superficie du pays et abrite jusqu'à 50 % de la population du pays [10]. La densité de la population rurale de la plaine côtière du Golfe du Bénin est supérieure à 200 hab/km² [10]. La zone étudiée s'étend sur 33.69 km². Elle est comprise entre les communes de Cotonou, d'Abomey-Calavi et de Ouidah. Elle est située entre l'Océan Atlantique au Sud et la lagune côtière au Nord.

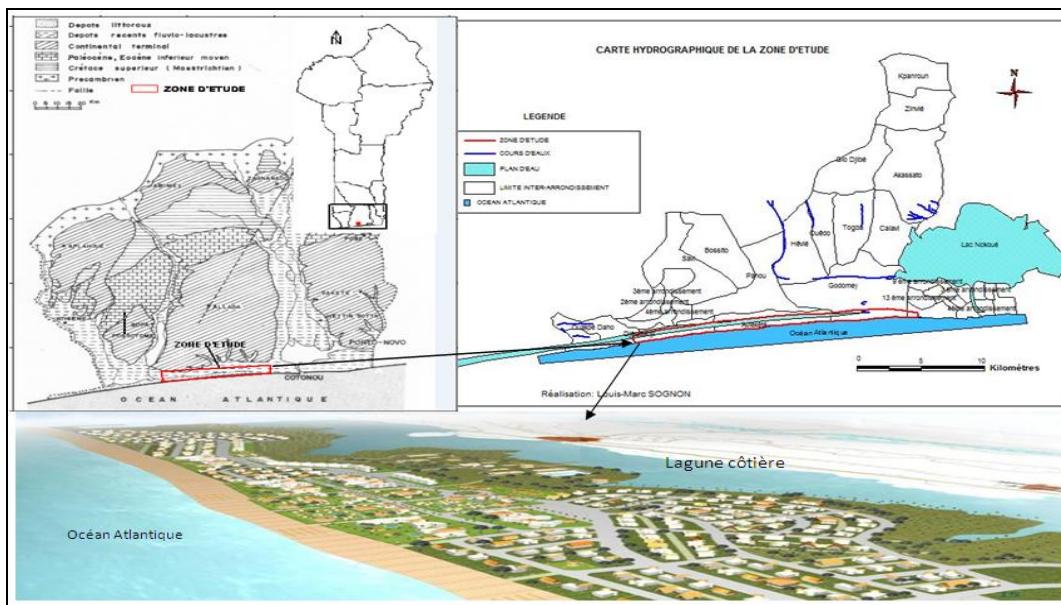


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-1-1. Géologie

Les cordons de sable sont constitués de sédiments granulaires marins, actuels ou hérités des dernières transgressions quaternaires. Du Nord au Sud nous avons trois générations de cordons sableux [11]; les cordons internes de sable jaune, les cordons médians de sable gris et les cordons actuels de sables bruns. Plusieurs travaux de recherche [11 - 15] portent sur ces différents cordons, et ont montré que le cordon interne est constitué de sables quartzeux de moyens à fins, très peu argileux. Le cordon médian est constitué de sables quartzeux de moyens à grossiers, bien classés, contenant des minéraux lourds présents dans les sables jaunes. Le cordon externe est constitué de sables bruns de la plage actuelle. Ces derniers sont du point de vue granulométrique, très voisins des sables du cordon médian. Considérant le cadre structural, les dépôts du milieu littoral béninois forment un empilement sédimentaire quaternaire transgressif sur les formations du domaine des plateaux.

2-1-2. Hydrogéologie

Le milieu littoral béninois comporte superficiellement un système aquifère à nappe libre à semi-libre pour l'essentiel, mais par endroit captive. Ce sont les aquifères du Quaternaire. Ce système constitue une même unité hydrogéologique «homogène en grand» [16]. Dans la plaine littorale, la présence de plusieurs dômes piézométriques bien circonscrits [17], 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. Selon [14], 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 dont l'exploitation est liée à la position du biseau salé et à la réalimentation des lentilles d'eau douce. Le niveau de l'eau (niveau statique) se situe entre 1 et 4 m de profondeur. Le débit des puits (1 à 15 m³/h) est limité par la faible profondeur des ouvrages. Les niveaux aquifères plus profonds renferment en général de l'eau saumâtre avec parfois quelques passages à eau douce difficile à capturer et à exploiter.

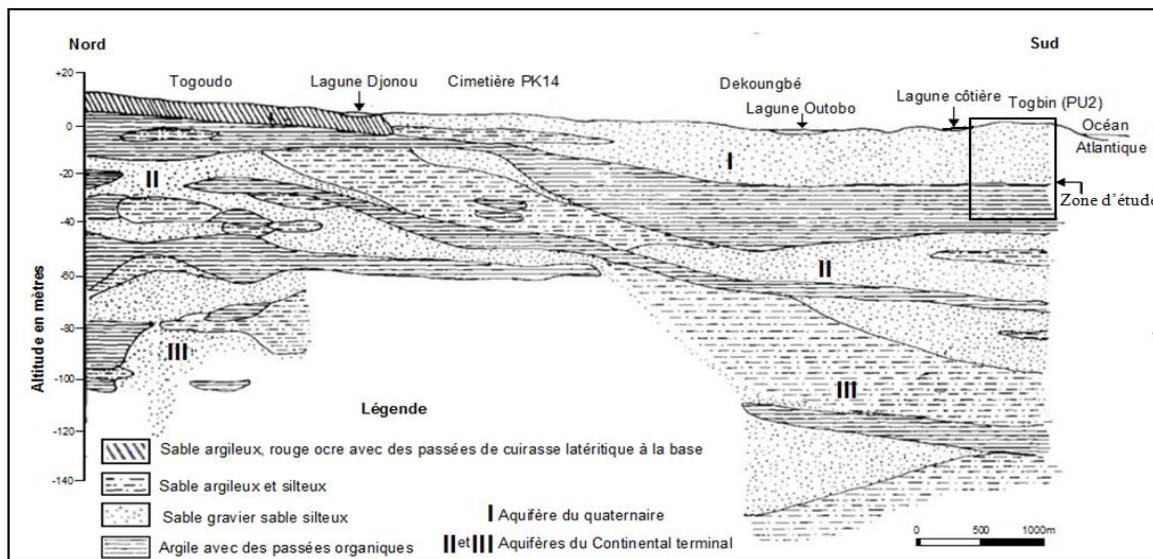


Figure 2 : Bordure Sud-est du plateau d'Allada et des cordons littoraux, Essai de corrélation lithologique des logs de forage (source : [14])

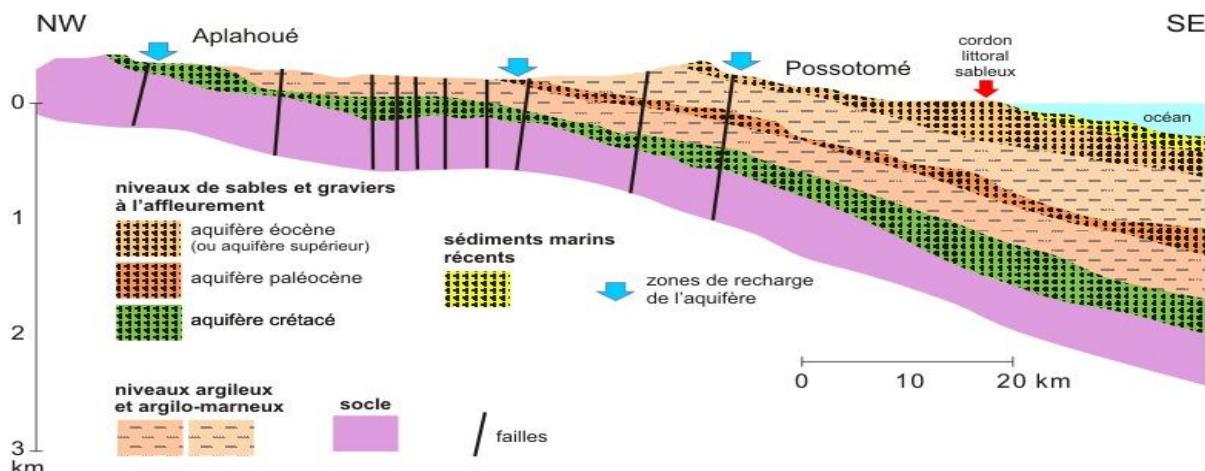


Figure 3 : Coupe hydrogéologique du Bassin Sédimentaire Côtier (source : [14])

2-2. Application du TDEM sur le terrain

La méthode TDEM est une méthode électromagnétique. Elle a permis de réaliser des sondages géophysiques pour caractériser les résistivités rho du sous-sol. 345 sondages TDEM ont été réalisés sur 36 profils. La zone d'étude de 33,69 km² est subdivisée en 12 sous-zones. Les modèles géoélectriques, obtenus sur la base d'une hypothèse de structuration tabulaire ou à une dimension (1D) du sous-sol, sont représentés sous forme de cartes de résistivité à différentes profondeurs réalisées avec le logiciel Surfer. La loi d'Archie a été ensuite utilisée pour estimer la porosité moyenne des sables, et pour différencier, sur la base d'une hypothèse d'homogénéité du sable, les terrains correspondant aux sables saturés en eau douce et en eau salée. En plus la conductivité et la salinité ont été mesurées dans 428 puits de la zone d'étude pour être représentées sous forme de carte de conductivité.

La résistivité d'un terrain étant influencée par la résistivité de la matrice (sable), de l'eau d'imbibition (eau douce ou de mer), de la porosité de la matrice et de la forme des grains [18], la loi d'Archie a été utilisée pour traduire la variation de résistivité observée sur des cartes de profondeur, car la condition principale d'usage de cette loi à savoir, l'utiliser uniquement pour les terrains sableux est satisfaite. Egalement elle a permis d'avoir une relation entre les différents paramètres qui sont présentés ci-dessous dans la formule d'Archie :

$$\rho_f = a \rho_w \emptyset^{-m} \quad (1)$$

ρ_f étant la résistivité (mesurée) de la formation sableuse en $\Omega.m$, ρ_w la résistivité de la solution de la nappe (eau douce, eau salée, etc...) en $\Omega.m$, \emptyset la porosité totale des sables, a : étant le facteur lithologique, m le facteur de cimentation.

On peut avec des hypothèses sur les valeurs de a et m obtenir une estimation de la porosité (\emptyset) connaissant ρ_w , ou une estimation de la solution (eau d'imbibition) ρ_w connaissant \emptyset . En limitant l'application de la formule d'Archie aux portions de l'aquifère saturées en eau salée, on peut éliminer l'inconnue de l'équation nommée ρ_w puisqu'on connaît exactement la salinité de l'eau de mer selon Repsold, 1989. Sachant que le site d'étude est sableux, les valeurs de 1,37 et 0,88 ont été retenues respectivement pour « m » et « a ». (Tableau 1).

Tableau 1 : Coefficients de la loi d'Archie et l'intervalle de porosité correspondant à chaque type de roches [19]

Types de grains ou de roches	Coefficient m	Coefficient a	Porosité en %
Roches détritiques faiblement cimentées (sable, grès, certains calcaires)	1,37	0,88	25 à 45
Roches sédimentaires modérément cimentées (grès et calcaire)	1,72	0,62	18 à 35
Roches sédimentaires fortement cimentées	1,95	0,62	5 à 25
Roches volcaniques très poreuses	1,44	3,50	20 à 80
Roches cristallines et métamorphiques très denses	1,58	1,40	< 4

Pour utiliser la forme la plus simplifiée de la formule d'Archie, nous avons utilisé $a = 1$ et $m = 2$. La variation de ρ_f étant liée à la variation de ρ_w ou de \emptyset , si l'on considère que les paramètres (a et m) ne changent pas dans la zone d'étude (ce qui est une hypothèse raisonnable pour notre étude si l'on considère les dépôts sableux comme ayant la même origine), la variation de résistivité des cartes obtenues peut être alors traduite soit par une variation spatiale de ρ_w soit de \emptyset en fixant l'un ou l'autre des deux paramètres. Si le milieu est complexe c'est-à-dire si ρ_w ou \emptyset sont susceptibles de varier l'un et l'autre de façon simultanée, il devient alors impossible de déduire ρ_w ou \emptyset des mesures de résistivité seules. La conductivité des eaux de puits a été mesurée à l'aide d'une sonde multiparamètre de type HACH. Cette estimation nous donne un intervalle de porosité totale des sables de 0,30 soit 30 %. La porosité calculée localement, ressemble beaucoup à celles obtenues par [5, 20] à savoir : porosité supérieure à 40 % pour les sables dunaires et 35 % pour les sables marins fins silteux de la plaine littorale. Ainsi avec cette de porosité connue, nous sommes arrivés à déterminer la résistivité de l'eau dans le sous-sol afin de savoir la

profondeur à laquelle nous avons de l'eau salée. Ce qui nous a permis d'avoir une idée sur la position du biseau salé ou de la limite eau douce / eau salée. Nous avons considéré, pour la délimitation du périmètre d'eau douce, une limite de potabilité de l'eau qui est de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, soit 10 ohm.m . En effet, la limite de potabilité fixée par [21] est de $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ soit 4 ohm.m . Mais, une petite enquête s'est faite sur le site et a montré que, l'eau à $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ n'est pas jugée de bon goût par la population et donc n'est pas consommable. La limite acceptée par la population s'est avérée être $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, valeur confirmée par [5]; par Jean-Michel VOUILAMOZ et [4]. L'objectif étant indirectement de définir l'eau consommable pour la population, nous avons donc choisi cette valeur comme limite de potabilité « pratique » ($1000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Connaissant la porosité de l'aquifère, la surface de l'aquifère étudié et l'épaisseur de la lentille d'eau douce sera déterminé. Le matériel TDEM utilisé est le TEM FAST avec une boucle de 12,5 m.

3. Résultats

345 résultats de logs de sondages TDEM ont été obtenus et interprétés. Les trois différentes formes de graphes principales présentées sur la Figure 4 représentent les familles typiques de courbe TDEM obtenues respectivement au Sud (modèle 1), au centre (modèle 2) et au nord (modèle 3) de la zone d'étude. Avec un RMS (Root Mean Square) inférieur à 1 % pendant l'inversion, les modèles peuvent supposer être bien fixés. Les modèles de sol résultant de l'interprétation des logs de sondage sont également affichés. Sur les modèles, les aquifères saturés en eau salée sont représentés par le sol le moins résistant ($< 1 \text{ ohm.m}$). L'épaisseur et la profondeur de l'aquifère saturé en eau salée peuvent être lues sur l'axe vertical des profondeurs.

3-1. Délimitation verticale de l'intrusion saline

Dans la zone d'étude, l'aquifère saturé en eau salée est représenté par le terrain le plus conducteur ($0,8 \text{ ohm.m}$) sur les logs de sondage TDEM. Dans le Sud de la zone étudiée, le toit de ce terrain est situé à une profondeur de 4 m et son fond (mur) à une profondeur de 25 m. L'épaisseur moyenne de ce terrain saturé en eau salée est donc de 21 m au Sud (**Figure 4 : modèle 1**). Etant donné qu'au sud de la zone d'étude le niveau statique est de 1 m, l'épaisseur de la lentille d'eau douce au-dessus de l'eau salée est d'environ 3 m. Au-delà de 25 m de profondeur l'aquifère repose sur un aquitard argileux de 15 ohm.m de résistivité. Au centre de la zone d'étude, le sommet de l'intrusion saline est situé à une profondeur de 10 m et son fond à une profondeur de 22 m. L'épaisseur moyenne du terrain saturé en eau salée est donc de 12 m dans la zone centrale de la zone d'étude (**Figure 4 : modèle 2**). Etant donné qu'au centre de la zone d'étude le niveau statique est de 4 m au maximum, l'épaisseur de la lentille d'eau douce au-dessus de l'eau salée est d'environ 6 m. Au-delà de 22 m de profondeur l'aquifère repose sur un aquitard argileux de 4 ohm.m de résistivité. Dans le Nord de la zone d'étude tout juste au sud de la lagune, le sommet de cette intrusion saline est situé à une profondeur de 8 m et son fond à une profondeur de 15 m (modèle 3). L'épaisseur moyenne du terrain saturé en eau salée est donc de 7 m au nord de la zone d'étude. Etant donné qu'au nord de la zone d'étude le niveau statique est de 2 m au maximum, l'épaisseur de la lentille d'eau douce au-dessus de l'eau salée est d'environ 4 m. Au-delà de 15 m de profondeur l'aquifère repose sur un aquitard argileux saturé d'eau saumâtre de 1 ohm.m de résistivité en liaison avec l'eau de la lagune. L'épaisseur du terrain saturé en eau salée est plus faible au Nord (7 m) que sur la bordure du Sud (21 m) et le centre (12 m).

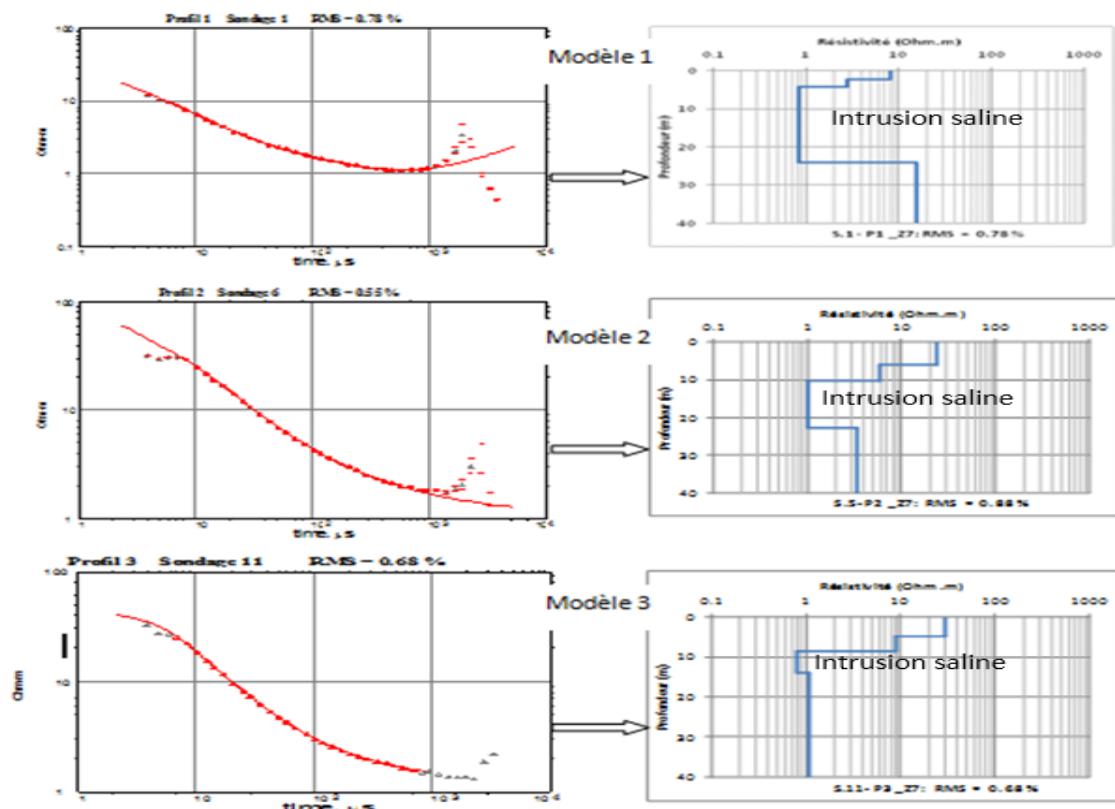


Figure 4 : Inversion des logs de sondage TDEM pour le sud (modèle 1) le centre (modèle 2) et le nord (modèle 3) de la zone d'étude

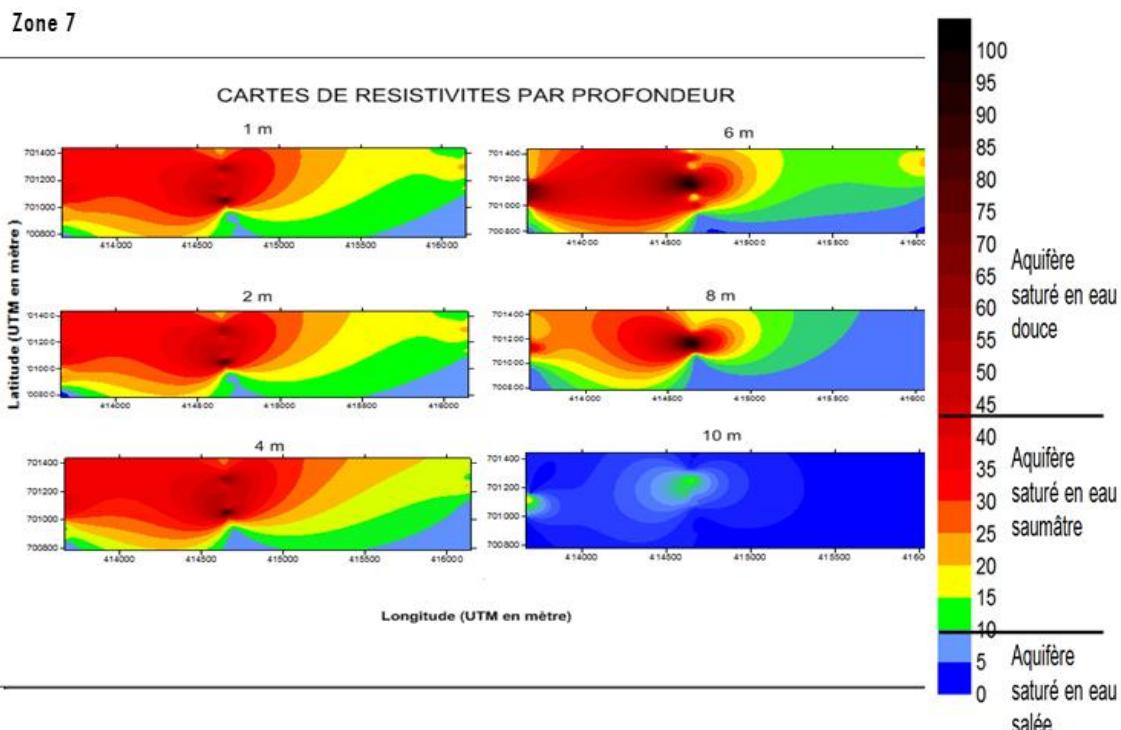


Figure 5a : Cartes de résistivités (en ohm.m) par profondeurs (a) pour la zone 7

Zone 12

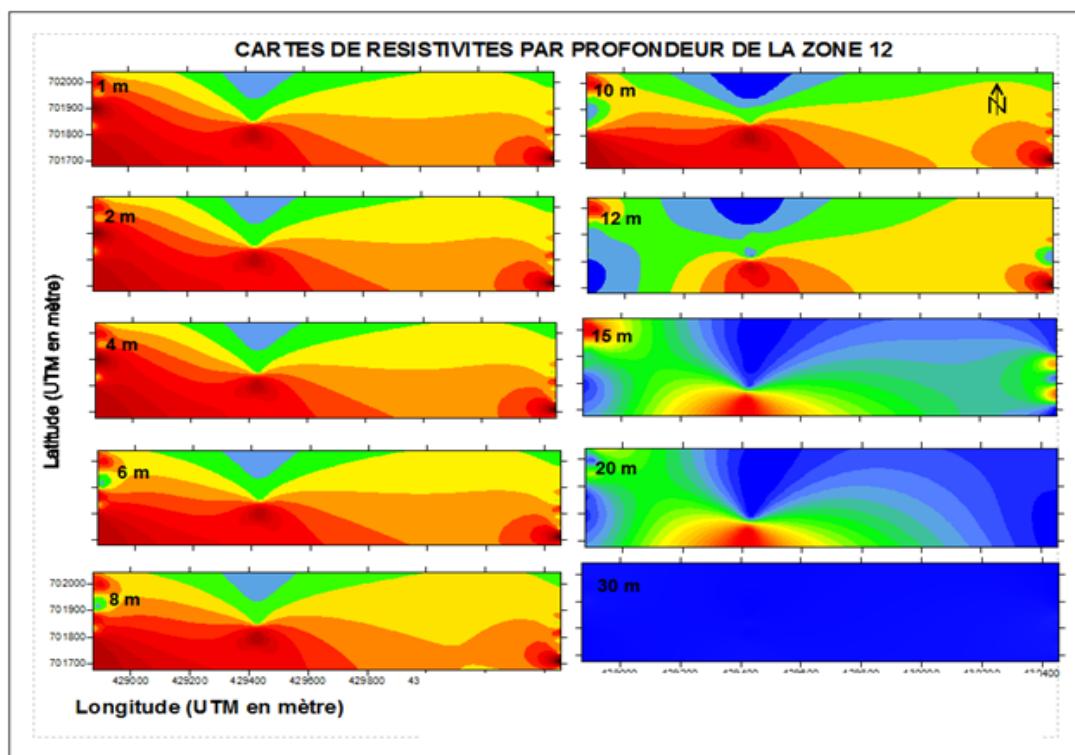


Figure 5b : Cartes de résistivités (en ohm.m) par profondeurs pour la zone 12

Les terrains saturés en eau salée sont plus répandues sur le côté Sud (océan Atlantique) et le côté Nord (lagune côtière). Ces terrains occupent toute la zone, à partir d'une profondeur de 10m pour la sous-zone 7 et 22 m pour la sous-zone 12. Des cartes de résistivité ont été réalisées à des profondeurs de 1 à 10 mètres pour la sous zone 7 et de 1 à 30 mètres pour la sous zone 12. Connaissant la limite supérieure de la conductivité de l'eau buvable ($1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, donc la limite inférieure de la résistivité) et la porosité estimée (30 %), nous avons déduit la limite de résistivité ρ_f entre les terrains contenant de l'eau douce et ceux contenant de l'eau saumâtre. Nous appelons eau saumâtre, l'eau de conductivité située entre $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $55\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (conductivité de l'eau de mer). La limite inférieure de résistivité ρ_f pour les terrains contenant de l'eau douce est de 45 ohm.m pour la porosité de 30 %. Les terrains contenant de l'eau douce et ceux contenant de l'eau saumâtre ou salée ont des résistivités respectivement supérieures et inférieures à 45 ohm.m. Par conséquent l'eau de conductivité supérieure à $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ est considérée comme eau saumâtre ou salée et l'eau de conductivité inférieure à $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ est considérée comme eau douce. La résistivité ρ_w de la nappe pour l'aquifère saturé en eau salée correspond à 0.1818 Ohm.m, ce qui équivaut à $55\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cette valeur est cinquante-cinq (55) fois plus grande que la valeur de la limite de l'eau potable ($1000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Donc cette eau n'est pas potable vis-à-vis de la salinité. L'intrusion saline est généralisée à partir de 10m de profondeur dans la zone 7 et 20 m de profondeur dans la zone 12.

3-2 Extension latérale de l'intrusion saline

Dans la zone d'étude et particulièrement pour la zone 7, l'intrusion saline occupe la partie sud en contact avec l'océan. Cette intrusion avance progressivement vers le nord en fonction de la profondeur (**Figure 5a**). Par contre pour la zone 12, l'intrusion saline occupe, la partie nord en contact avec la lagune

cotière pour avancer progressivement vers le centre en fonction de la profondeur (*Figure 5b*). L'extension latérale de l'intrusion saline n'est donc pas uniforme dans la zone d'étude. Dans certaines zones elle provient du sud (océan Atlantique) et dans d'autres zones du nord (lagune côtière). Dans tous les cas de figures, la zone centrale semble la plus épargnée par l'intrusion saline sur la première dizaine de mètres de profondeur. Cette extension latérale obtenue par les cartes de résistivités de l'aquifère est vérifiée par une autre carte des résistivités de l'eau de la nappe mesurée dans les puits présents dans la zone d'étude. Les conductivités des eaux mesurées directement dans les puits et convertis en résistivités électriques montrent que l'intrusion saline s'infiltre du sud vers le nord de la zone d'étude. Evidemment, aucun puits n'a directement capté la nappe saturée en eau salée car les utilisateurs de la ressource en eau souterraine évitent de les positionner trop près du rivage. Néanmoins, la carte de résistivité des eaux des puits montre que ceux qui sont à 200m du rivage captent de l'eau saumâtre (*Figure 6*). Il est à noter que l'intrusion saline dans cette zone est plus avancée à l'Est.

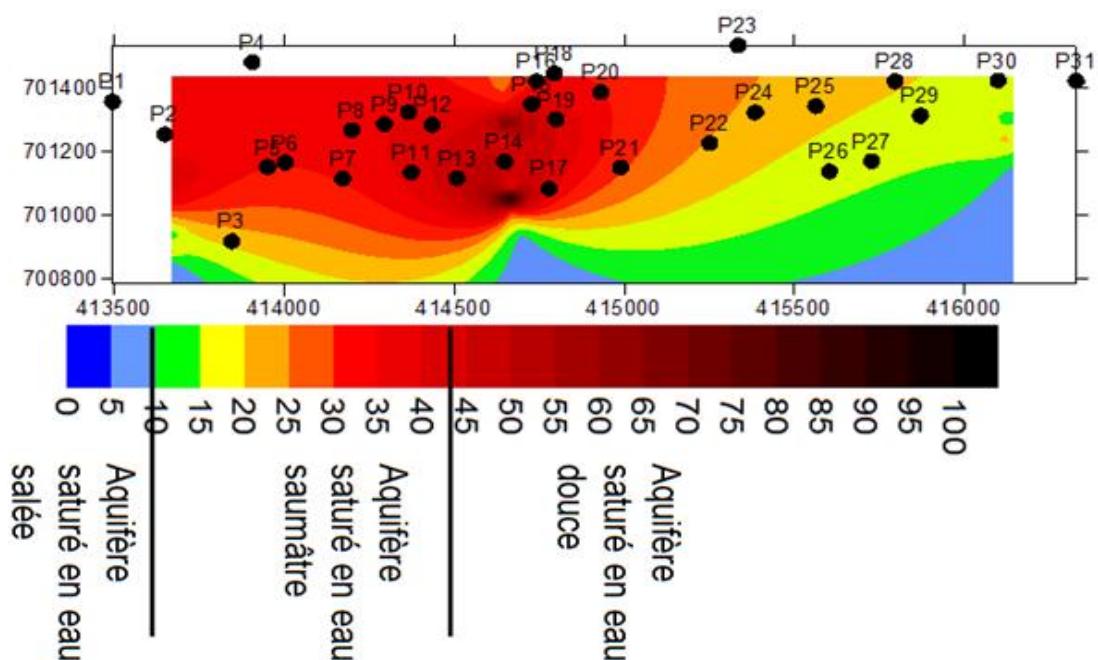


Figure 6 : Carte des résistivités (en ohm.m) des eaux de la nappe

3.3. Evaluation du volume de la lentille d'eau douce disponible

L'évaluation du volume de la lentille d'eau douce est très approximative et tient surtout compte de la porosité et l'épaisseur de la lame d'eau.

Zone d'étude	Porosité de la zone	Toit du terrain saturé en eau salée	Épaisseur de la lentille d'eau douce	Lame d'eau douce	Surface de la zone étudiée	Volume d'eau douce estimé
Zone 7	30 %	8 m	6 m	1800 mm	2 800 000 m ²	5 040 000 m ³
Zone 12	30 %	25 m	23 m	6000 mm	2 800 000 m ²	16800000 m ³

4. Discussion

Les modèles d'inversion des logs de sondage 1D sont conçus avec une hypothèse de tabularité des couches du sous-sol. Si les structures de la subsurface deviennent significativement de cette hypothèse, alors les incertitudes estimées par le modèle sont trop optimistes [22]. [10] ont montré que les structures en 3-D peuvent causer une baisse artificielle des résistivités en profondeur dans les résultats d'inversion 1-D. Etant donné que la coupe hydrogéologique de la zone d'étude montre un aquifère et un aquitard continu à structure lithologique 1-D, nous ne nous attendons pas à ce que la baisse des résistivités avec la profondeur soit due uniquement aux effets des structures 3-D. Bien que certains auteurs [23, 34] aient utilisés la méthode électromagnétique et la formule d'Archie pour estimer la porosité des aquifères contenant de l'eau salée la détermination des coefficients lithologique et de cimentation reste empirique. Le manque de rigueur dans la détermination de ces coefficients est due à l'absence de puits dans la zone saturée en eau salée. La profondeur moyenne des 428 puits de la zone d'étude dont les paramètres physico-chimiques ont été mesurés, est environ de 4 mètres. Ces puits ont été projetés sur la carte de la résistivité des eaux des puits de cette zone (**Figure 6**). Également la carte de la résistivité de la même zone est réalisée à partir des mesures TDEM à 4 mètres de profondeur conformément aux orientation des profils TDEM de la carte. La comparaison de ces deux cartes (physico-chimique et géophysique) de résistivité, révèle une grande similitude. On observe sur ces cartes des zones conductrices au Sud et des zones résistantes au Nord pour la sous-zone 7. Par contre pour la sous-zone 12 à la même profondeur, des terrains conducteurs sont observés au nord et des terrains résistants au Sud. Ce qui signifie que l'intrusion d'eau salée se fait de l'Océan Atlantique vers la lagune cotière pour la sous-zone 7. Pour la sous-zone 12, l'intrusion saline se fait de la lagune vers l'Océan Atlantique.

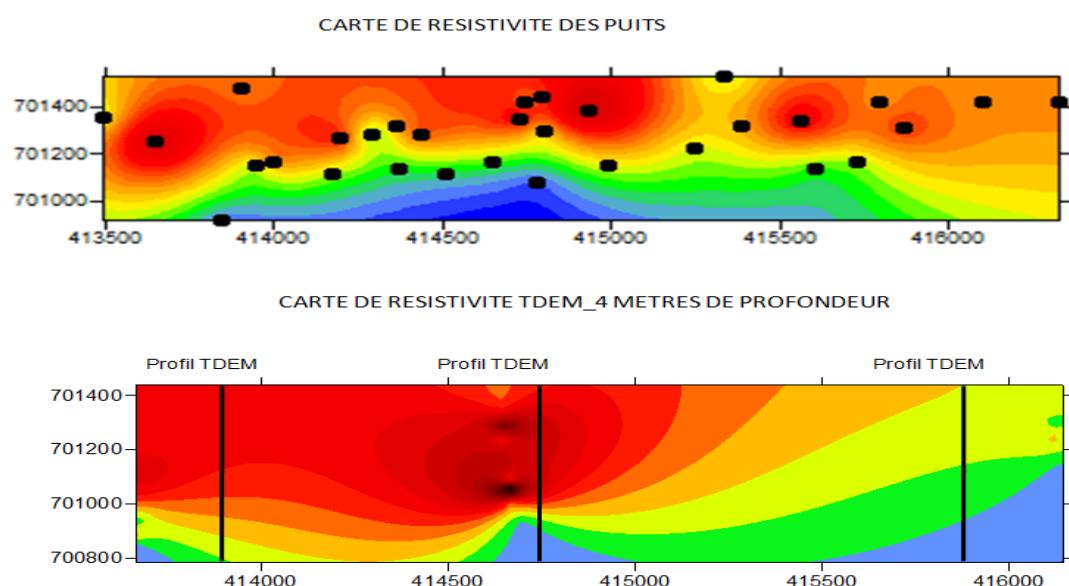


Figure 7 : Cartes comparatives des résistivités mesurées à partir des puits et des résistivités déterminées à partir du TDEM à 4 mètres de profondeur

La variation de la résistivité de l'eau saumâtre ou l'eau salée qui s'observe entre 6 à 10 mètres pour la sous-zone 7, entraîne la salinité des puits, qui au départ avaient captés l'aquifère saturé en eau douce à des profondeurs variantes de 1 à 8 mètres. À 10m de profondeur, l'eau douce disparaît totalement en laissant place à l'eau saumâtre et à l'eau de mer ce qui est à la base de la salinité des puits dont les profondeurs sont supérieures à 8 mètres.

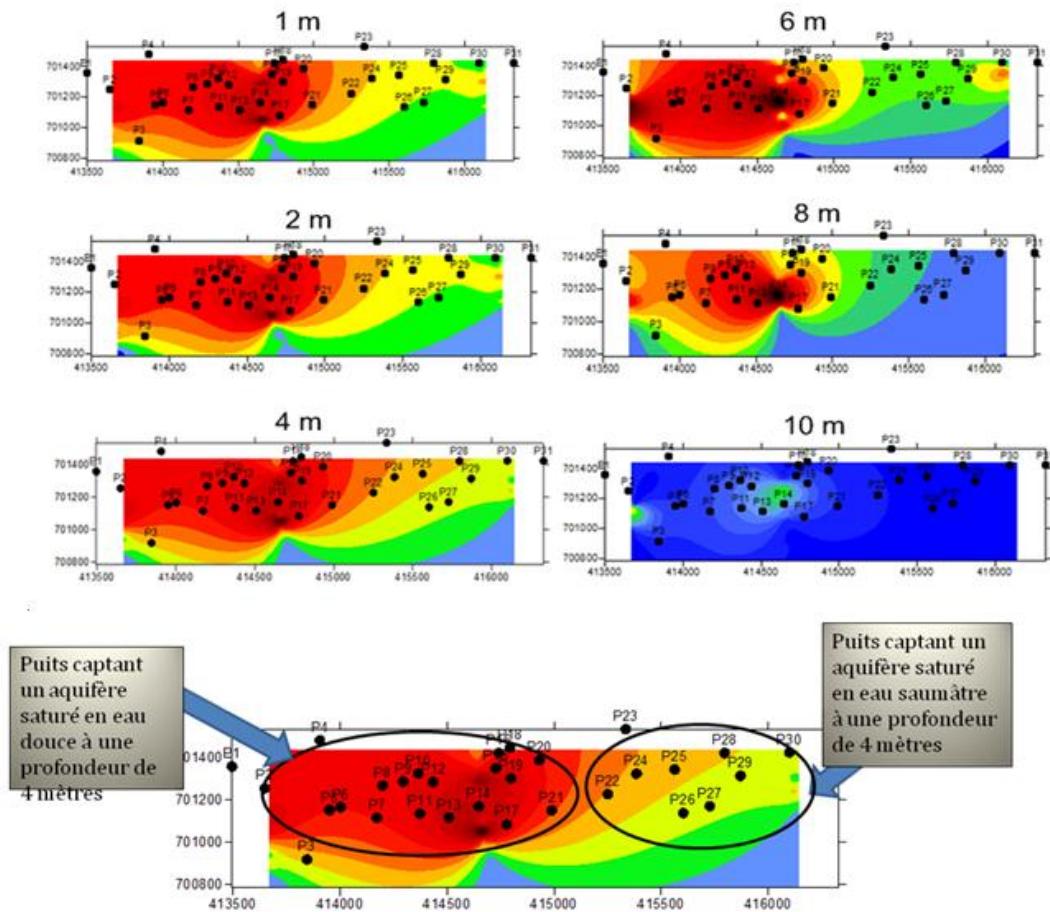


Figure 8 : Cartes de positionnement des puits

La méthode géophysique TDEM permet la détermination franche de la lentille d'eau douce au-dessus du niveau de la mer. Selon l'interprétation des sondages TDEM la profondeur de l'eau douce est de 8 mètres dans la zone 7 et environ à 24 mètres dans la zone 12. Le TDEM ne permet pas de déterminer le niveau de la mer et des lentilles d'argiles. Les couches de très faibles résistivités des profils pourraient être soit des aquifères contenant de l'eau salées / saumâtres, soit des aquiclades d'argile. Ces deux ensembles assez conducteurs sont contenus dans des encaissants plus résistants qui pourraient être des sables non saturés. L'évolution du climat a des implications considérables sur la disponibilité quantitative et la qualité des ressources en eau. Au risque d'épuisement de la ressource, se superpose le risque d'intrusion saline dans les nappes du bassin sédimentaire côtier. En TDEM, les couches de très faibles résistivités des profils pourraient être soit des aquifères contenant de l'eau salée/ saumâtre, soit des aquiclades d'argile. Les couches de résistivité élevées pourraient être des aquifères contenant de l'eau douce ou du sable non saturé. Afin de lever toute équivoque concernant la nature des sols de différentes résistivités (particulièrement sable à eau saumâtre ou argile), il est nécessaire de réaliser des forages pour étudier la granulométrie afin de connaître la lithologie de ces zones. La zone étudiée n'est pas totalement saturée. L'épaisseur de la zone non saturée est en moyenne de 2 mètres.

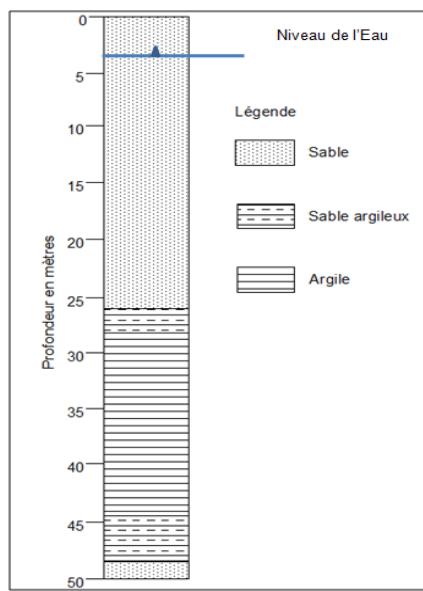


Figure 6 : Log de forage du piézomètre PU2 Togbin-plage jusqu'à 50 m de profondeur. Source : [5]

Une contrainte majeure dans cette étude est l'accessibilité à l'information. On dispose d'un accès ponctuel à la qualité des eaux souterraines des nappes phréatiques captées par des puits. Les informations obtenues sont trop fragmentaires pour rendre compte de la complexité des interfaces eaux salées eaux douces observées. La méthode géophysique TDEM permet d'interpoler entre ces observations ponctuelles dans la partie de l'aquifère non accessible à l'observation directe. Il devient alors possible d'augmenter la résolution des observations sur des zones ciblées, comme l'interface eau douce eau salée des aquifères du Quaternaire de la zone côtière.

5. Conclusion

La méthode TDEM est un outil précis, rapide et efficient pour la cartographie latérale de l'intrusion saline et l'estimation de la profondeur de l'interface eau douce - eau salée. La grande profondeur d'investigation disponible pour la méthode TDEM constitue un avantage certain pour la détermination de la profondeur de l'intrusion saline. La méthode géophysique en TDEM a permis de caractériser l'intrusion saline dans l'aquifère côtier du Sud Bénin. Cette caractérisation s'est faite par la discrimination des terrains à forte résistivité susceptibles de contenir de l'eau douce de ceux à faibles résistivités liés à l'intrusion saline. L'estimation des épaisseurs de l'intrusion saline par l'inversion des logs de sondages TDEM a abouti à la définition de l'épaisseur de la lentille d'eau douce et au calcul du volume de la réserve en eaux douce. L'intrusion saline est à 8 m en moyenne de profondeur pour la sous - zone 7 et de 25 m pour la sous- zone 12.

- La lentille d'eau douce a 6 m en moyenne d'épaisseur pour la sous-zone 7 et de 23 m pour la sous-zone 12.
- Le volume d'eau douce estimé : $5\ 040\ 000\ m^3$ et de $16\ 800\ 000\ m^3$

L'analyse des résultats des données et informations collectées sur le terrain, il y a une intrusion saline dans les nappes phréatiques du quaternaire de la plaine littorale, captées par des puits à proximité de l'océan et la lagune côtière. Ce phénomène constitue un grand risque pour la réserve de la lentille d'eau douce, lors de l'augmentation du niveau marin. La corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et les mesures de résistivités TDEM permet d'envisager une utilisation de cette méthode pour

le suivi de la qualité de la nappe et de l'avancée de l'intrusion tout en préservant l'environnement. Pour l'exploitation d'eau douce de la plaine littorale, il est recommandé de ne pas réaliser des ouvrages exploitations à gros débit pour éviter les remontés d'eau salée. Plutôt, multiplier les ouvrages à faibles débits (puits).

Références

- [1] - J-C. COMTE & O. BANTON, "Apport de la tomographie électrique à la modélisation des intrusions salines dans les aquifères côtiers, Exemple des aquifères gréseux des Îles-de-la- Madeleine" (Québec, Canada), Proc. 5^e Colloque GEOFCAN, Orléans, France, 20-21 Sept (2005) 83 - 86
- [2] - L. CREEL, "Ripple effects", Population and coastal regions, Population Reference Bureau, *Making the Link*, (2003) 1 - 8
- [3] - L. LAUBIER, "Changement et vulnérabilité des peuples marins côtiers", Edition Pages (2003)
- [4] - L-M. SOGNON, "Contribution de la Géophysique à l'étude de l'interface eau douce-eau salée sur la bordure Sud-ouest du Lac Nokoué", (2013)
- [5] - N. YALO et al., "Delimitation of the Salt Water Wedge in the Shallow Coastal Aquifer by TDEM Method at Togbin (South Benin)", (2012)
- [6] - B. EL MANSOURI & al., "Mise en évidence et étude du phénomène de upconing dans la nappe côtière du Rharb (NW du Maroc)". IGME Madrid, (2003) ISBN.84-7840-470-8
- [7] - M. SEGAL & U. SHAVIT, "The origin and mechanisms of salinization of the Lower Jordan River", (2004)
- [8] - R. A. FREEZE & J. A. CHERRY, "Groundwater", Pentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1979) 604 p.
- [9] - 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. Thèse Doctorat ès-Sciences. Univ.C. A. DIOP de Dakar, Sénégal, (1998) 278 p.
- [10] - M. GOLDMAN, F. NEUBAUER, "Groundwater exploration using integrated geophysical techniques". *Surv. Geophys.* 15 (1994) 331-361
- [11] - U. KAFRI and M. GOLDMAN, "The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity" *Journal of Applied Geophysics* 57 (2005) 167 - 178
- [12] - D. V. FITTERMAN, M. T. STEWART, "Transient electromagnetic soundings for groundwater". *Geophysics* 51 (1986) 995 - 1006
- [13] - M. GOLDMAN, et al., "Detection of freshwater/seawater interface by the time domain electromagnetic (TDEM) method in Israel". Proc. 10th SWIM, Ghent, (1988) 329 - 344 pp.
- [14] - E. A. KONTAR, Y. R. OZOROVICH, "Geo-electromagnetic survey of the fresh/salt water interface in the coastal southeastern Sicily". *Cont. Shelf Res.* 26, (2006) 843 - 851
- [15] - HDEKOEIJER, "Zone Côtier Béninoise", (2007) 387 p.
- [16] - 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)
- [17] - J. P. TATEST, "Les formations sédimentaires quaternaires actuelles du littoral du Togo et de la République Populaire du Bénin". Recherches françaises sur le quaternaire. Supplément au bulletin AFEQ, (1977) 1977 - 19.
- [18] - J. LANG, G. PARADIS, et L. M. OYEDE, "Le domaine margino-littoral du Bénin (Golfe de Guinée-Afrique de l'Ouest) : âge holocène et mise en place marine des « sables jaunes »". *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 7 N° 5/6 (1988)

- [19] - R. MALIKI, "Étude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou (A.O.)". Thèse de Doctorat du 3ème cycle. UCAD Dakar, Sénégal, (1993) 162 p.
- [20] - M. BOUKARI, A. ALASSANE et F. AZONSI, "Evaluation par la méthode DRASTIC de la vulnérabilité de la nappe phréatique de Cotonou (Bénin méridional, Afrique de l'Ouest)" Publication *Africa Geoscience Review*. Vol.16, N° 3 (2009)
- [21] - A. ALASSANE, "Etude Hydrogéologique du Continental Terminal et des formations de la plaine Littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin)": Identification des aquifères et Vulnérabilité de a nappe Superficielle", (2004)
- [22] - M. BOUKARI, "Réactualisation des connaissances hydrogéologiques relatives au bassin sédimentaire côtier du Bénin". Rap. DH. Appui à la Gestion des Ressources en Eau (AGRE). Cotonou Bénin, (2002)
- [23] - M. DESCLOITRES, "Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : Application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de le Fournaise (La Réunion)". Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6. (1998) 238 P.
- [24] - G. E. ARCHIE, "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, (1941) 54-62 P.
- [25] - G. V. KELLER, " Rock and mineral properties". In *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, vol.1, Nabighian, M., Editor. Society of Exploration Geophysicists, (1988)
- [26] - UNION EUROPEENNE, "Directive du conseil 98/83/EC sur la qualité de l'eau attendue pour la consommation humaine". Directive adoptée le 3 Novembre (1998)
- [27] - G. DE MARSILY, "Quantitative hydrogeology", Academic Press. (1986)
- [28] - L. NIELSEN et al., "Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings". *Journal of Applied Geophysics* 62 (2007) 1 - 15
- [29] - A. HAOUCHINE et al, "Changements climatiques et activités anthropiques : impacts sur les aquifères côtiers en Algérie". (2015)
- [30] - 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. L'UAC et l'Université doctoral Côte d'opale, (2011) 291p.
- [31] - N. YALO, R. LAÏBI, T. N'TCHA, "Influence des paramètres hydroclimatiques sur la recharge de la ressource en eau souterraine : cas du sud-est du plateau d'Allada, Université d'Abomey-Calavi, (2008) 12 p.
- [32] - M. GOLDMAN & al, "Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method." *Geoexploration*, 28 (1991) 153-174 p.
- [33] - M. AL-GARNI, H. EL-KALIOUBY, "Delineation of saline groundwater and sea water intrusion zones using transient electromagnetic (TEM) method", Wadi Thuwal area, Saudi Arabia. *Arab. J. Geosci.* (2011) 655 - 668
- [34] - H. EL-KALIOUBY, O. ABDALLA, "Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer", North Oman. *Journal of Applied Geophysics* 115 (2015) 59 - 64