



CARACTERISATION GEOPHYSIQUE DU BISEAU SALE DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL TERMINAL A LA BORDURE SUD-OUEST DU LAC NOKOUE AU BENIN

GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF SALTED BEVEL OF THE CONTINENTAL TERMINAL AQUIFER AT THE SOUTHWESTERN EDGE OF LAKE NOKOUÉ IN BENIN

SOGNON L.M.^{1,2}, YALO N.¹, LAWSON F.A.^{1,2,3}, ALLE C.^{1,2,3}

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

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

³IRD/IGE, Institut de Recherche pour le Développement, Institut des Géosciences de l'Environnement, 08 BP 841 Cotonou, Bénin (IGE),

louismarc.sognon@gmail.com

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation géophysique du biseau salé de l'aquifère du Continental Terminal à la bordure Sud-ouest du lac Nokoué au Bénin. La zone d'étude est située dans le bassin sédimentaire côtier précisément sur le plateau d'Allada à la bordure Sud-Ouest du lac Nokoué au Bénin. 14 sondages ERT et EM 34 ont été menés pour obtenir des cartes de résistivité et de conductivité afin de caractériser le biseau salé. L'application de la loi d'Archie et les cartes de résistivités obtenues ont permis d'estimer que la zone du Continental Terminal saturée en eau salée a une résistivité comprise entre 10 et 30 Ohm.m. Celle saturée en eau saumâtre a une résistivité comprise entre 30 et 120 Ohm.m. Enfin, le Continental Terminal saturé en eau douce a une résistivité supérieure ou égale à 120 Ohm.m. La profondeur moyenne de l'intrusion saline est 20 mètres. L'épaisseur de la lentille du biseau salé varie entre 8 et 20m avec une orientation partant du lac Nokoué vers le champ de captage de Godomey.

L'épaisseur de la lentille d'eau douce définie par la méthode géophysique corrèle à 67% avec celle mesurée dans les puits et forages.

Mots Clés : intrusion saline, ERT et EM 34, Continental Terminal.

ABSTRACT

This study focuses on the geophysical characterization of the saline bevel of the Continental Terminal aquifer at the southwestern edge of Lake Nokoué in Benin. The study area is located in the coastal sedimentary basin precisely on the Allada plateau at the southwestern edge of Lake Nokoué in Benin. 14 ERT and EM 34 soundings were conducted to obtain resistivity and conductivity maps to characterize the salt wedge. The application of Archie's law and the resistivity maps obtained made it possible to estimate that the area of the Continental Terminal saturated with salt water has a resistivity of between 10 and 30 Ohm.m. That saturated in brackish water has a resistivity of between 30 and 120 Ohm.m. Finally, the Continental Terminal saturated in fresh water has a resistivity greater than or equal to 120 Ohm.m. The average depth of saline intrusion is 20 meters. The thickness of the salt bevel lens varies between 8 and 20m with an orientation starting from Lake Nokoué to the Godomey catchment field. The thickness of the freshwater lens defined by the geophysical method correlates to 67% with that measured in wells and boreholes.

INTRODUCTION

Les zones côtières sont les plus densément peuplées et les plus intensément utilisées de la planète, 45% de la population mondiale vit sur une bande côtière (Allé C, 2013).

Au Bénin l'inégale répartition de la ressource en eau dans le bassin sédimentaire côtier crée un risque majeur de pénurie qui augmente continuellement face à l'accroissement démographique et aux besoins croissants du développement socio-économique et industriel (Sognon, 2017).

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 (Yalo, 2013). Cet aquifère du Continental Terminal du plateau d'Allada est très sensible du fait de sa proximité avec la grande agglomération du Bénin (Cotonou, 679012 habitants)

d'une part et de son voisinage avec la mer, le lac Nokoué et les lagunes à eaux salées ou saumâtres d'autre part. Il est soumis à diverses pressions anthropiques (croissance urbaine; agriculture intensive; développement industriel et tourisme) auxquelles s'ajoute une forte vulnérabilité aux changements climatiques provoquant une intrusion saline accentuée par l'exploitation intense de ce système aquifère depuis 1956 (Boukari, 1998). Plusieurs études ont été déjà consacrées au système aquifère du Continental Terminal particulièrement dans le quartier de Godomey parce que le phénomène d'intrusion saline commence à affecter les forages du champ de captage de Godomey géré par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB). Un certain nombre de puits à grand diamètre et forages situant dans les périmètres du champ de captage de Godomey sont déjà mis hors service en raison d'une forte élévation de la concentration d'eau salée (Boukari ; 1998).

Cependant, pour étudier le phénomène d'intrusion saline, les méthodes géophysiques constituent des outils d'investigation d'une grande pertinence. En particulier, les méthodes électriques et électromagnétiques qui sont sensibles au contraste de résistivité existant entre l'eau douce et l'eau salée apparaissent comme des techniques privilégiées. Ce travail envisage une caractérisation géophysique du biseau salé de l'aquifère du Continental Terminal à la bordure Sud-ouest du lac Nokoué au Bénin à partir des méthodes de la tomographie de résistivité électrique (ERT) et l'électromagnétique (EM).

CADRE GENERAL

Le lac Nokoué est le plus grand lac du Bénin, il couvre une superficie de 150 km² à l'étiage. Situé au Sud-Est du pays, il est compris entre les parallèles 6°20' et 6°30' Nord et les méridiens 2°20' et 2°35'Est. S'étendant sur les départements de l'Ouémé, de l'Atlantique et du Littoral, il est limité à l'Ouest par le plateau d'Allada, à l'Est par la lagune de Porto-Novo, au Nord par la plaine d'inondation du fleuve Ouémé et de la rivière Sô puis au Sud par la ville de Cotonou. Le chenal de Cotonou et le canal de Totchè relie respectivement le lac à l'océan Atlantique et à la lagune de Porto-Novo.

Le lac Nokoué a une longueur moyenne de 20 km dans sa direction Est-Ouest et une largeur de 11 km dans sa direction Nord-Sud.

La zone d'étude est la bordure Sud-Est du lac Nokoué appartenant au périmètre rapproché du champ de captage de Godomey et au plateau d'Allada (Figure 1).



Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Climat et dynamique hydrologique

En raison de sa situation géographique, la zone d'étude est soumise à un climat subéquatorial caractérisé par une alternance de deux saisons des pluies et deux saisons sèches de durées inégales. La grande saison sèche varie de la mi-novembre à la mi-mars et la grande saison des pluies débute à la mi-juillet pour s'achever à la mi-septembre. La petite saison sèche varie de la mi-mars à la mi-juillet et la petite saison pluvieuse de la mi-septembre à la mi-novembre. L'humidité est forte et varie entre 72 et 95% (Foscolo, 1995). Les eaux issues des précipitations enregistrées sur le bassin supérieur (Nord) et moyen (Centre) du Bénin en août, sont immédiatement évacuées vers le Sud. Ceci explique les crues rapides du fleuve Ouémé et de la rivière Sô qui forment avec le lac Nokoué et la région deltaïque une superficie de 450 km², soit trois fois la superficie habituelle du lac (Petrequin, 1984). Le lac Nokoué est en réalité caractérisé par des interactions continentales et marines dues à des apports saisonniers d'eau salée de l'océan Atlantique et d'eau douce du fleuve Ouémé et de la rivière Sô. La majeure partie de ces rives est marécageuse.

Relation entre le lac Nokoué et l'Océan Atlantique

En période de crue (Septembre à novembre), le niveau du lac Nokoué est un peu moins de 1 m au-dessus du niveau moyen de la mer lorsque le chenal est ouvert et à un peu plus de 1m lorsque ce dernier est fermé (Boukari, 1998). Dans ce deuxième cas, l'effet de la marée ne se fait pas sentir. En période d'étiage (décembre à août), le niveau du lac devient légèrement inférieur au niveau moyen de la mer lorsque le chenal est fermé mais on note encore une relique de

la propagation des ondes de marée. Lorsque le chenal est ouvert, le niveau du lac s'équilibre avec celui de l'océan aux influences cycliques de la marée. Comme dans le cas de l'Ouémé, la crue maximale se situe en Octobre-Novembre avec l'arrivée des eaux de l'intérieur du pays. Son amplitude a été d'environ 75 cm.

Géologie

La zone d'étude est localisée sur le plateau d'Allada qui est l'un des sept plateaux dont est constitué le bassin sédimentaire côtier. Le plateau d'Allada est limité au Nord par la dépression de la Lama, à l'Ouest par la vallée du Couffo et le lac Ahémé, au Sud par l'océan Atlantique et à l'Est par la vallée du delta de l'Ouémé et le lac Nokoué. Le plateau s'élève progressivement à une altitude variant de 40 m au Sud à 140 m au Nord (Boukari, 1998). Notre zone d'étude, est située au Sud-Est du plateau et ses principaux traits caractéristiques sont : un plateau de terre de barre qui se localise au Nord des dépressions lagunaires et des cordons littoraux au Sud. L'ensemble du plateau d'Allada constitue superficiellement une entité géologique d'âge Miocène-Pliocène - Pléistocène ou Continental Terminal. Il est limité au Nord par un affleurement d'âge Eocène, latéralement par de puissants remplissages alluviaux- sablo-vaseux d'âge Quaternaire. Au Sud, il est limité par les sables également quaternaires du cordon littoral. Les formations du plateau d'Allada ont été constituées par le dépôt, postérieur à l'époque éocène, des matériaux de démolition des reliefs du Nord, attaqués par l'érosion. Sous 10 à 20 mètres de terre de barre, couche argilo-sableuse oxydée, elles se composent d'une alternance de sables de granulométrie variées, de graviers et galets et d'horizons argileux. La tranche supérieure serait plus grossière, ou comporterait moins d'intercalations argileuses que la partie profonde. Les dépôts étant continentaux, la plupart des couches sont en principe lenticulaires, sans continuité. Les plateaux appartiennent au bassin sédimentaire côtier du Sud-Bénin.

Hydrogéologie

Le Continental Terminal est un aquifère complexe, à nappe libre. Il se subdivise superficiellement en trois sous-unités géomorphologiques représentées d'Est en Ouest par les plateaux de Sakété, Allada et Comé dans la partie méridionale du bassin. Il est caractérisé par des niveaux statiques relativement profonds, pouvant atteindre et même dépasser 50 mètres, ce qui rend sa réalimentation par les eaux superficielles et météoriques aléatoire, exception faite toutefois des

zones de bordure de plateau où ces niveaux deviennent plus ou moins superficiels. C'est le cas en particulier des zones de bordures sud qui se caractérisent en outre par une épaisseur plus importante de l'aquifère (Boukari ; 1998). Elles offrent de ce fait des débits très intéressants pouvant atteindre 200 m³/h. Les réservoirs sont constitués des couches de sable d'épaisseur variable à granulométrie grossière située juste à la base de la Terre de Barre affleurante, et qui constitue un sol sidérolithique de 9 m d'épaisseur provenant du démantèlement de sols latéritiques (Houessou et Lang, 1979). Pour Guilcher (1959), cette couche de sable sur une couche argileuse plus ou moins discontinue se serait mise en place dans des conditions subsahariennes tropicales avec des consolidations sporadiques dans la plaine littorale, au Nord et au Sud. Les sables jaunes situés immédiatement au Sud de la lagune Djonou, où la nappe phréatique présente un dôme piézométrique, joueraient alors un véritable rôle de réalimentation de cette lagune mais aussi et surtout du champ de captage de Godomey.

L'intrusion saline

Durant les 30 dernières années, le développement socio-économique des villes de Cotonou, d'Abomey-Calavi et ses environs a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau au niveau du champ de captage de la SONEB à Godomey.

A l'étape 1 : de 1956 à 1975 il existait un équilibre naturel entre l'interface eau douce et eau salée au niveau du champ de captage de Godomey qui assurent l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou et de la commune d'Abomey-Calavi et ses environs.

A l'étape 2 : de 1975 à 1990 l'équilibre naturel de l'interface qui existait entre eau douce et eau salée est déformé et augmente le cône de rabattement des forages à gros débit.

A l'étape 3 : de 1990 à ce jour, l'équilibre naturel de l'interface qui existait entre eau douce et eau salée est rompu et laisse la place à l'intrusion saline au niveau de quelques forages dans le champ de captage de Godomey. Le même phénomène s'observe au niveau des puits à grand diamètre dans les départements du Littoral et de l'Atlantique. Donc les aquifères sédimentaires des départements du Littoral et de l'Atlantique au Bénin qui assurent l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou et d'Abomey-Calavi sont menacés par l'intrusion d'eau salée. Un certain nombre de puits de pompage situés dans le champ de captage de Godomey sont déjà mis hors service en raison d'une forte élévation de la concentration d'eau salée.

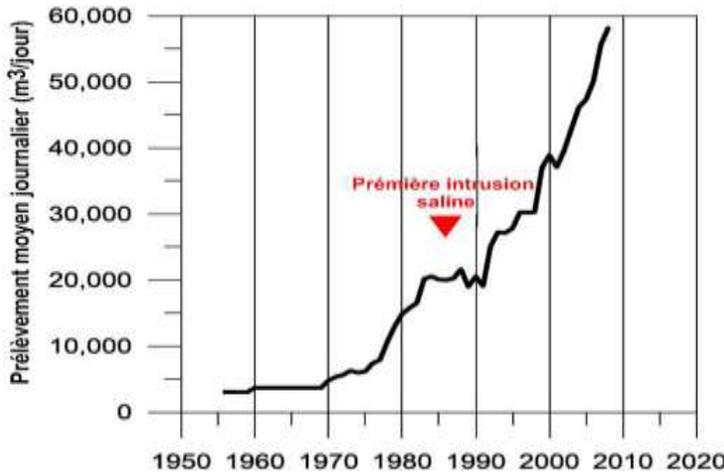


Figure 2 : Surexploitation de l'eau souterraine et intrusion marine au champ captant de Godomey (Sognon et al., 2017)

Le phénomène d'intrusion saline est un processus actif qui correspond à une rupture de l'équilibre hydrodynamique entre l'eau douce et l'eau de mer par (i) une baisse importante de la charge et des flux d'eau douce et/ou (ii) une augmentation de la charge d'eau de mer. Ce déséquilibre se traduit par une avancée de l'eau de mer dans l'aquifère et une dégradation souvent importante de la ressource en eau douce, sensible dès que la part d'eau de mer atteint 2% (Custodio, 1997 in Comte, 2008).



Figure 3 : Les facteurs liés à l'intrusion saline (De Montety, 2008 modifié par Sognon, 2017)

On peut distinguer 3 facteurs principaux susceptibles de causer une intrusion marine : Un facteur naturel « géologique », un facteur changement climatique et un facteur anthropique.

(i) Le facteur géologique correspond à la remontée du niveau marin depuis l'Holocène. Le niveau marin a fortement varié depuis 10 000 ans (d'une centaine de mètres environ) et n'a atteint une certaine stabilité que depuis 6000 ans (e.g. Labeyrie et al., 1976; L'Homer et al., 1981; Edmunds et al., 2001; Vella et al., 2005). Depuis la stabilisation du niveau marin, les eaux marines ont pu être repoussées dans les aquifères où le gradient piézométrique était suffisamment élevé. Pour des aquifères à faibles gradients hydrauliques, l'intrusion marine n'a pas toujours pu être repoussée (Edmunds et Milne, 2001; Custodio, 2002; Post, 2004).

La présence d'eau marine dans un aquifère peut donc correspondre à une intrusion ancienne.

(ii) Le facteur changement climatique correspond à une baisse importante des précipitations entraînant la baisse de la charge et des flux d'eau douce et/ou une augmentation de la charge d'eau de mer.

(iii) Le facteur anthropique correspond à la surexploitation d'un aquifère. On parle de surexploitation lorsque les prélèvements d'eau excèdent la recharge et conduit à un abaissement du niveau piézométrique.

MATERIELS ET METHODOLOGIES

L'Electromagnétique (EM 34)

Le principe de cette méthode consiste à provoquer une induction électromagnétique dans les conducteurs situés dans le sol. Elle est uniquement sensible aux structures conductrices et est essentiellement employée pour des besoins de cartographie. Elle permet la réalisation de profils géophysiques dits «de reconnaissance» pour positionner des méthodes plus sophistiquées comme la tomographie de résistivité électrique. Malgré le fait que cette méthode soit parfois difficile en milieu industriel (induction dans lignes électriques, clôtures, etc...), elle fournit généralement des informations qualitatives et présente quelques avantages : d'une mise en œuvre rapide, d'être peu chère, d'être parfaite pour une première reconnaissance, d'être non invasive, pour une distance émetteur récepteur de 10, 20 et 40 m et une basse fréquence (respectivement 6,4kHz, 1,6kHz et 0,4kHz). La sensibilité de l'équipement est

de 0,2mS/m. Les mesures se sont effectuées aussi bien en mode dipôle vertical qu'en mode dipôle horizontal avec des bobines coplanaires.

Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)

En imagerie ERT les mesures des résistivités apparentes sont souvent réalisées à l'aide d'un dispositif quadripôle ABMN. Pour une même prospection, l'agencement du dipôle de mesure AB par rapport au dipôle d'injection MN est fixe, seuls les écartements inter-électrodes changent tout en maintenant les mêmes proportions dans la géométrie du dispositif.

En prospection ERT, un système de câbles multi-électrodes permet d'effectuer une grande combinaison de mesures à la fois verticalement (par écartement des électrodes) ou latéralement (par déplacement latéral du quadripôle), couvrant ainsi un domaine 2D, représenté sous la forme d'une pseudo-section de résistivité (Hallof, 1957, Edwards, 1977). Les variations des résistivités latérales (le long du profil) et verticales, sont ainsi prises en compte, mais une interprétation correcte implique une continuité des structures perpendiculairement au profil.

Parmi les dispositifs classiquement utilisés en VES (Sondage Electrique Vertical) comme en ERT, on retiendra les dispositifs Wenner (α et β), Schlumberger, dipôle-dipôle, pôle-dipôle, pôle-pôle, gradient et γ . Chacun possède une profondeur d'investigation, une résolution spatiale et une sensibilité aux structures et au bruit différentes. Dahlin et Zhou (2004) ont étudié et comparé chacun de ces dispositifs ERT 2D en termes de couverture et résolution spatiale, de sensibilité aux anomalies et au bruit et testé numériquement (à l'aide de modèles synthétiques 2D) leur capacité respective à imager correctement des structures géologiques variées.

Le dispositif Wenner- α ($W\alpha$) est utilisé dans le cadre de notre étude. Les quatre électrodes sont disposées à équidistance avec le dipôle de mesure situé à l'intérieur du dipôle d'injection : $AB = 3 MN$, permettant un bon rapport signal/bruit. Sa couverture 2D est parfaitement homogène et sa profondeur d'investigation moyenne. Le $W\alpha$ possède toutefois une assez faible résolution spatiale des structures mais une relativement bonne détermination en profondeur en comparaison avec d'autres dispositifs. Le $W\alpha$ est particulièrement adapté à l'imagerie des structures horizontales, telles que les milieux sédimentaires, mais beaucoup moins pour les structures verticales (Dahlin & Zhou, 2004).

Dans l'hypothèse que la répartition de l'intrusion saline en provenance de l'Océan Atlantique, du lac Nokoué et de la lagune côtière s'étend beaucoup plus horizontalement que verticalement, ce dispositif a été retenu pour la prospection.

Avant les mesures de terrain, le choix du dispositif et de l'écartement inter-électrode est optimisé par la modélisation synthétique. Elle constitue, avec la modélisation inverse, la modélisation numérique et permet de créer des jeux de données synthétiques basés sur un modèle synthétique représentant schématiquement la distribution de la résistivité en fonction du terrain.

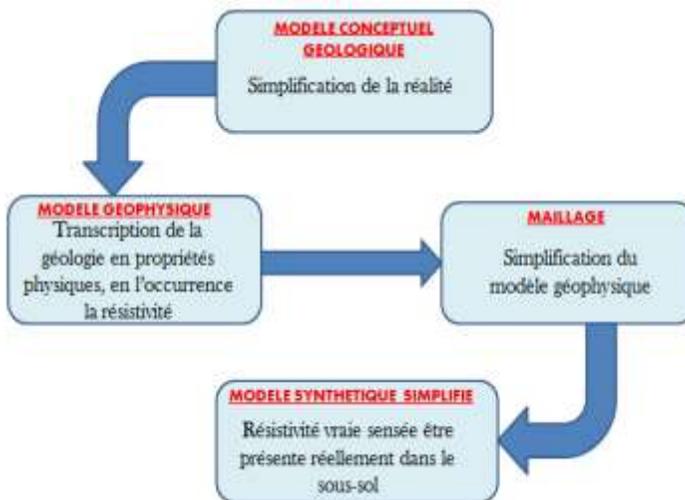


Figure 4 : Construction de modèle synthétique (source : Lawson F., 2012)

Intérêt de la résistivité pour l'étude de l'interface eau douce eau salée

Pour la prospection géophysique des ressources en eau souterraine, la résistivité des terrains (ou son inverse la conductivité) constitue un paramètre physique intéressant en tout premier lieu car il est directement corrélé à la minéralisation de l'eau présente dans la roche. Cette sensibilité à la minéralisation est favorable pour la détection de l'eau salée présente dans le sable.

La résistivité peut être influencée par : la porosité (formes et taille des pores), le degré de saturation (le pourcentage des vides rempli d'eau), la concentration des ions dans l'eau, et enfin la quantité d'argile mais aussi par la température (Descloitres, 1998).

La loi d'Archie : relation de la résistivité avec la porosité

Nous utilisons Archie pour l'étude car d'abord nous remplissons les conditions d'usage, à savoir, l'utiliser pour les terrains sableux. Egalement elle nous permet d'avoir une relation entre les différents paramètres qui sont présentés ci-dessous dans la définition de la formule.

Dans certains types de formations « simples » ou « propres » (c'est-à-dire sans argile), la loi d'Archie modifiée – dite loi d'Archie de saturation synthétise l'influence de certains paramètres par la formule suivante (Archie, 1942)

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

ρ_f : la résistivité de la formation en $\Omega.m$, (résistivité mesurée)

ρ_w : la résistivité de la solution en $\Omega.m$, (eau douce, eau salée, etc...),

\emptyset : porosité (rapport du volume des vides au volume total, sans dimension),

S_w : saturation (rapport du volume des vides remplis par l'eau au volume total des vides, sans dimension),

a : coefficient de saturation, (sans dimension),

m : facteur de cimentation, (sans dimension),

n : exposant de saturation (sans dimension).

Si la formation en question ne contient pas d'argile on peut, avec des hypothèses sur les valeurs de a , m et n , obtenir une estimation de la porosité (\emptyset) connaissant ρ_w , ou une estimation de la solution (eau d'imbibition) ρ_w connaissant \emptyset . Considérant qu'en dessous du niveau statique, la saturation est totale ($S=1$), alors la formule d'Archie se simplifie et devient :

$$\rho_f = a \frac{\rho_w \emptyset^{-m}}{1} = a \rho_w \emptyset^{-m} \quad (2)$$

Le facteur de saturation « a » est généralement proche de 1, mais peut atteindre des valeurs de 3.5 pour des roches volcaniques très poreuses (Keller, 1988 in Descloitres, 1998)

Le facteur de cimentation « m » traduit l'effet de la forme des particules. Il est égale à 1,3 pour des sphères et peut atteindre 1,85 pour des sables + coquilles (Jackson *et al.*, 1978). Le tableau 1 présente la valeur de ces coefficients.

Tableau 1 : Les coefficients de la loi d'Archie et l'intervalle de porosité correspondant à chaque type de roches (Keller, 1988)

Types de grains ou de roches	Coefficient m	Coefficient a	Porosité en (%)
Roches détritiques faiblement cimentées (sable, grès, certains calcaire)	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

On peut donc connaître facilement les différentes résistivités de l'eau d'imbibition (ρ_w) avec $\rho_w = \frac{\rho_f}{a\phi^m}$ si l'on connaît la résistivité mesurée de la formation (ρ_f) et les différents coefficients choisis selon la géologie.

Pour cette étude, la porosité a été évaluée afin de pouvoir déterminer avec Archie, la résistivité des eaux d'imbibition. Ainsi la caractérisation de ces dernières a été faite en fonction de leur résistivité respective. La saturation a été considérée comme totale ($S=1$) pour les profondeurs supérieures au niveau statique de l'eau dans les puits. La température quant à elle n'a pas influencé, car elle est plus ou moins constante autour de 27°C, du moins pour la période de mesure. L'influence de la concentration des ions constitue par contre, comme ça été dit plus haut, l'atout de ce paramètre pour différencier l'eau douce de l'eau salée ou eau de mer, à condition de faire l'hypothèse que le milieu contenant l'eau possède une porosité uniforme.

C'est ainsi que nous sommes arrivé 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.

Conductivité électrique de la nappe superficielle

Les mesures de conductivités électriques prises dans 80 puits répartis sur la zone d'étude, nous a permis de réaliser une carte de conductivité de la nappe phréatique afin d'effectuer quelques déductions quant à l'interface eau salée eau douce de la nappe en couplant cette interprétation avec celle de ERT. Des niveaux statiques ont également été relevés au niveau de ces puits.

Mise en œuvre des méthodes utilisées

L'Electromagnétique (EM 34)

La prospection géophysique a consisté à la mise en œuvre des profils et des sondages électromagnétiques sur le site. L'instrument de mesure utilisé est le Géonics EM 34 de la firme GEONICS LIMITED.

Nous rappelons que les trois espacements inter bobine supporté par, l'instrument EM 34 sont : 10 ; 20 et 40 m avec des fréquences respectives de 6400, 1600 and 400 Hz. Aussi faut-il souligner qu'avec cet équipement l'opérateur a la possibilité d'adopter soit une configuration verticale pour le dipôle correspondant à un positionnement en plan horizontal des bobines, soit une configuration horizontale du dipôle (bobine en plan vertical).

La réussite d'une prospection électromagnétique avec l'EM 34 nécessite la détermination de cinq (05) paramètres avant la mise en œuvre sur le terrain, que sont :

- L'écartement entre les bobines (10; 20 ou 40m).
- Le mode du dipôle (vertical ou horizontal).
- La direction des profils.
- Le pas d'échantillonnage ou de mesure.
- L'écartement entre les profils.

Dans le cas de la présente étude, l'écartement inter bobine déterminé à partir de la modélisation synthétique est de 20 m, avec une configuration horizontale du dipôle. 13 profils correspondant à 236 mesures ont été réalisés suivant une direction Est-Ouest, du Lac Nokoué au champ de captage de Godomey (Figure 5). Cet azimut a été choisi à cause de l'accessibilité et l'espace de mise en œuvre des profils. C'est un milieu hautement urbanisé. Les mesures ont été séparées de 10 m.

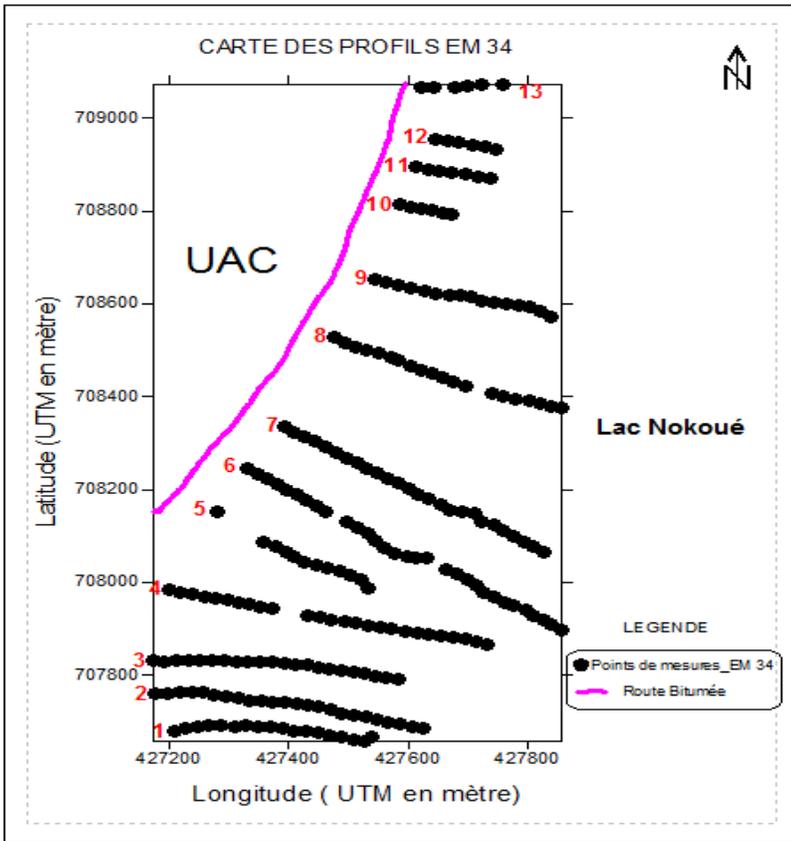


Figure 5 : Carte de profils EM 34

Tomographie de Résistivité Electrique

La zone d'étude est investiguée à partir de 14 profils orientés de l'Est à l'Ouest (Figure 6) dont les détails se trouvent dans le tableau n°2 ci-dessous.

Tableau 2 : Récapitulation des écartements utilisés

Ecartement de 3mètre	Ecartement de 3 et 5 mètre	Ecartement de 5 mètre
Profils n°7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 et 14	Profils n°5 et 6	Profils n°1 ; 2 ; 3 et 4

Avant l'inversion des données de terrain, il a d'abord fallu supprimer les données aberrantes.

Ce dispositif permet de réaliser quatorze (14) profils dans la zone d'étude (Figure 6).

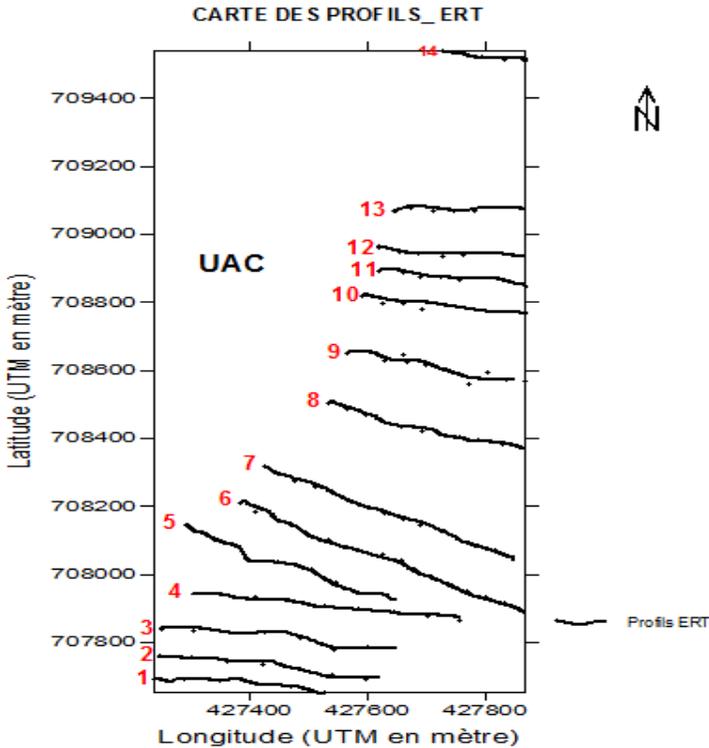


Figure 6 : Carte de profils de l'ERT

Essai de délimitation des interfaces entre les différentes eaux (eau douce, eau saumâtre et eau salée)

La variation de ρ_f est liée à la variation de ρ_w ou de ϕ , par hypothèse les paramètres (a et m) ne changent pas dans la zone d'étude. La variation de résistivité des cartes et des sections obtenues peut être alors traduite soit par une variation spatiale de ρ_w soit de ϕ en fixant l'un ou l'autre des deux paramètres. Si le milieu est complexe c'est à dire si ρ_w ou ϕ sont susceptibles de varier l'un et l'autre de façon simultanée, il devient alors impossible de déduire ρ_w ou ϕ des mesures de résistivité seules.

Comme hypothèse de travail, On pourrait supposer que l'aquifère sableux présente en moyenne des porosités constantes d'un point à l'autre de la zone d'étude.

Pour déterminer la résistivité ρ_f correspondant à la formation ou le terrain qui contient les eaux de différents types, il nous faut alors connaître d'une part ρ_w de l'eau d'imbibition dont nous voulons définir le périmètre, et d'autre part, la porosité \emptyset (considérée comme constante) ainsi que les paramètres a et m .

La valeur de la porosité n'étant pas connu, nous l'avons estimée avec la loi d'Archie transformée : ($\emptyset = \frac{\rho_f}{(a\rho_w)^{-1/m}}$).

Pour déterminer \emptyset , il faut être en présence d'une zone du terrain où la résistivité de l'eau d'imbibition peut être considérée comme constante à l'échelle du sondage ERT. C'est le cas de la bordure du Lac Nokoué : le terrain est saturé en eau douce dont nous connaissons ρ_w (441 μ S/cm ou 22.67 ohm.m) en mesurant la conductivité de l'eau douce avec un conductivimètre. La résistivité de la formation (sable + eau douce) est déterminée à partir des résultats issues des sondages ERT: ($\rho_f = 250$ ohm.m).

Pour les paramètres a et m , nous avons choisi ceux donnés par Keller ($a = 0.62$ et $m = 1.95$, voir tableau 1). Cette estimation nous donne une porosité totale des sables de 0,22 soit 22% (Keller).

En connaissant \emptyset , nous pouvons calculer ρ_w de l'eau salée à partir de la formule suivante :

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

La résistivité de la formation (sable + eau salée) est déterminée à partir des sondages ERT: ($\rho_f = 15$ ohm.m). Les mêmes paramètres de Keller ($a = 0.62$ et $m = 1.95$) sont utilisés. Ce calcul nous donne $\rho_w=1.26$ Ohm.m.

Nous avons considéré, pour la délimitation de la zone d'eau douce, une limite de potabilité de l'eau qui est de 1000 μ S/cm, soit 10 ohm.m. En effet, la limite de potabilité fixée par L'Union Européenne, (1998) est de 2500 μ S/cm soit 4 ohm.m. Mais la limite acceptée par la population riveraine de la bordure Sud-Ouest du Lac Nokoué s'est avérée être 1000 μ S/cm par des enquêtes de terrain. L'objectif étant de définir l'eau consommable pour la population, nous avons donc choisi cette valeur comme limite de potabilité (1000 μ S/cm).

Par conséquent l'eau de conductivité comprise entre $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ et $2500\mu\text{S}/\text{cm}$ est considérée comme eau saumâtre et l'eau de conductivité inférieure à $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ est considérée comme eau douce.

La ρ_w de saturation en eau salée calculée correspond à une résistivité de 1.26 Ohm.m , ce qui équivaut à $7937\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette valeur est sept 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.

Inversion et interprétations

ERT

La modélisation synthétique effectuée avant les travaux de terrain à essentiellement contribué au choix de l'écartement inter-électrode. L'écartement inter-électrode maximal que permet l'équipement est de 5m. Nous avons alors testés par modélisation synthétique les écartements 3 et 5m entre les électrodes en utilisant le modèle synthétique (**Figure 7**) construit sur la base des premières mesures test et des mesures sur affleurement.

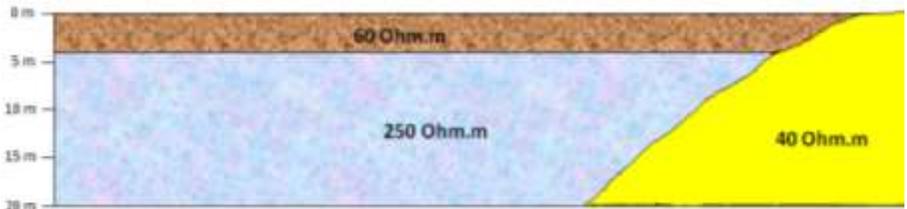


Figure 7 : Modèle Conceptuel

Le modèle synthétique simplifié qui en découle est présenté à la (Figure 8)

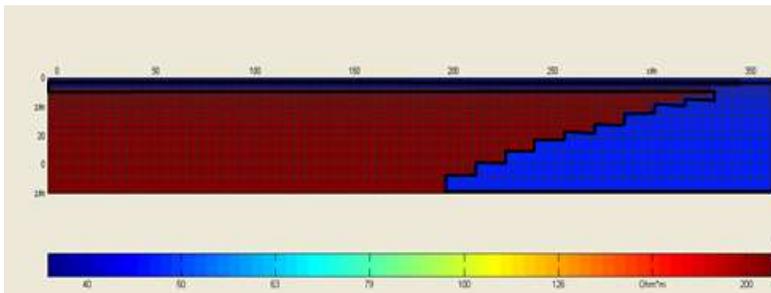


Figure 8 : Modèle synthétique simplifié

Selon Baker, $Z_e = 0,17 \times L$

Pour $e = 3$; $L = 3 \times 23 = 69$; $Z_e = 11,73$

Pour $e = 5$; $L = 5 \times 23 = 115$; $Z_e = 19,55$

Avec L la longueur totale du profil et Z_e la profondeur d'investigation

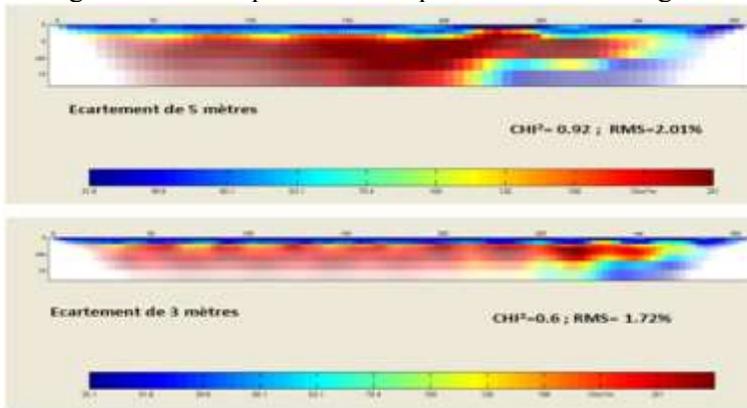


Figure 9 : Comparaison des écartements inter-électrode (3 et 5m)

Etude de la capacité de la méthode à caractériser l'interface eau douce eau salée

Afin de tester la capacité de la méthode à nous renseigner sur l'existence et la profondeur de l'interface eau douce eau salée, quelques questions se posent sur le modèle synthétique initial pour choisir les meilleurs paramètres d'inversions :

- Est que, ce modèle nous permet de voir l'interface eau douce eau salée?
- Est qu'une interface oblique serait observable par ce modèle ?
- Est-ce que la profondeur de l'intrusion pourrait être identifiée ?

1^{er} Cas : Lambda =15 (Figure 10)

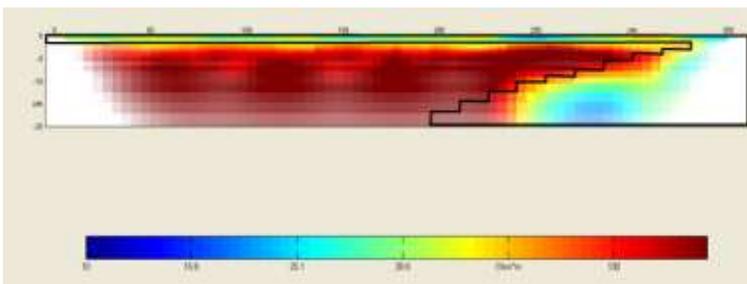


Figure 10 : Inversion du modèle synthétique avec Lambda 15

Les paramètres choisis dans le premier cas pour inverser le modèle synthétique simplifié sont les suivants : $\Lambda = 15$; $Z\text{-weight} = 1$; Blocky modèle = oui ; Robust inversion = oui ; $\text{CHI}^2 = 0.63$; $\text{RMS} = 1.75$.

2^{ème} Cas : $\Lambda = 120$ (Figure 11)

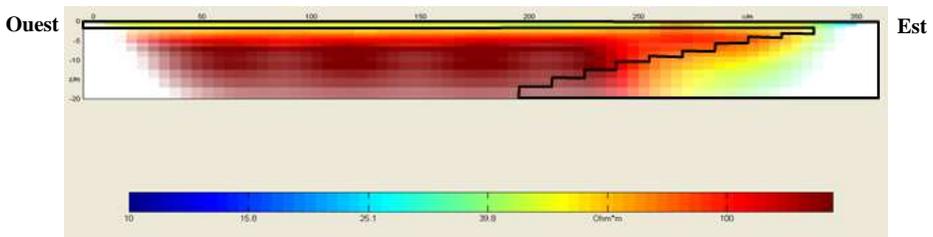


Figure 11 : Inversion du modèle synthétique avec $\Lambda = 120$

Les paramètres choisis dans le premier cas pour inverser le modèle synthétique simplifié sont les suivants : $\Lambda = 120$; $Z\text{-weight} = 1$; Blocky modèle = oui ; Robust inversion = oui ; $\text{CHI}^2 = 0.86$; $\text{RMS} = 3.25$.

L'inversion des modèles synthétiques avec les paramètres choisis nous donne des résultats qui convergent avec des $\text{CHI}^2 < 1$ et des $\text{RMS} < 10$ conformant aux critères de qualité mathématique préconisés pour le logiciel DC2DinvRes.

Ainsi, à la lumière de ces modélisations synthétiques nous choisissons comme des paramètres d'inversions des données de terrain ; les paramètres obtenus dans le premier cas de figure 25. C'est-à-dire $\Lambda = 15$; $Z\text{-weight} = 1$; Blocky modèle = oui ; Robust inversion = oui ; $\text{CHI}^2 = 0.63$; $\text{RMS} = 1.75\%$.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La carte de conductivité électromagnétique met en évidence une zone (en rouge) où les plus faibles conductivités apparentes (0 à 50 mS/m) sont observées (Fig.12). Ceci pourrait être la zone de l'aquifère saturé en eau douce. La zone en couleur jaune présente une conductivité intermédiaire apparente variant entre 50 et 80 mS/m. Elle représente une zone d'eau douce en dégradation vers l'eau saumâtre. La zone de couleur verte montre une conductivité apparente élevée allant de 150 à 180 mS/m, ce qui caractérise la présence de l'eau saumâtre dans cette zone.

Cartographie du biseau salé par EM 34

La quatrième zone de couleur bleu présente une conductivité apparente très élevée qui varie entre 180 à 200mS/m, ce qui caractérise la présence de l'eau salée à la bordure Sud Est du lac Nokoué. Cette carte montre que l'intrusion saline observée au niveau de l'aquifère du Continental Terminal et précisément au niveau du champ de captage de Godomey provient du Lac Nokoué.

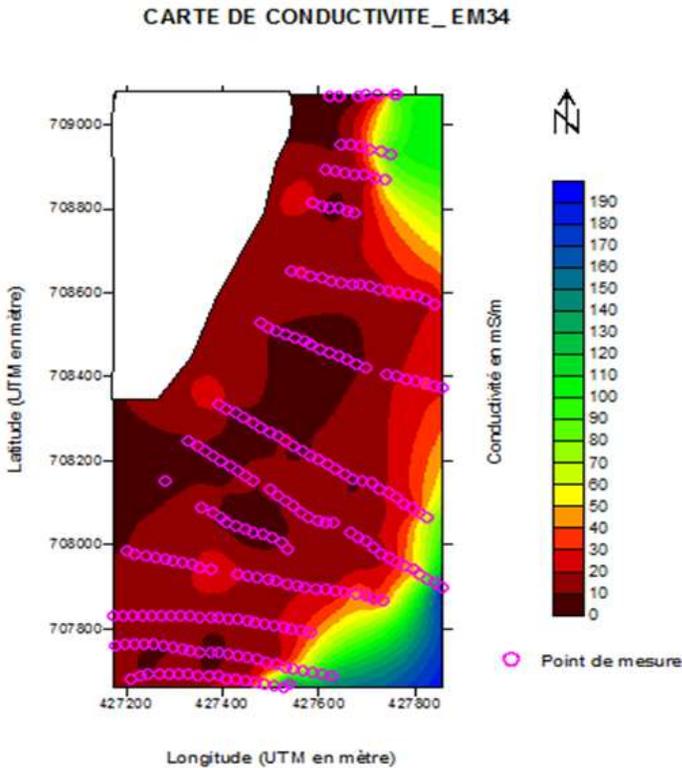


Figure 12 : Carte de conductivité électromagnétique réalisée à 20 mètres de profondeur

Caractérisation du biseau salé à partir Tomographie de Résistivité Electrique

Le profil ERT, représenté par la Figure 13, présente une convergence mathématique acceptable avec un $CHI^2=0,9$ mais le RMS est élevé (58,18%). Un grand ensemble conducteur s'étend du Lac Nokoué à une distance de 140 mètres de résistivité faible variant de 10 à 30 ohm.m est aussi contenu dans un

encaissant d'une résistivité allant jusqu'à 251 Ohm.m. Le RMS est plus élevé pour ce profil 8. Cela s'explique par le fait qu'on a plus de dispersions. La profondeur de cette zone conductrice atteint les 15m sur le profil 8 ce qui laisse envisager une augmentation de l'infiltration dans cette zone.

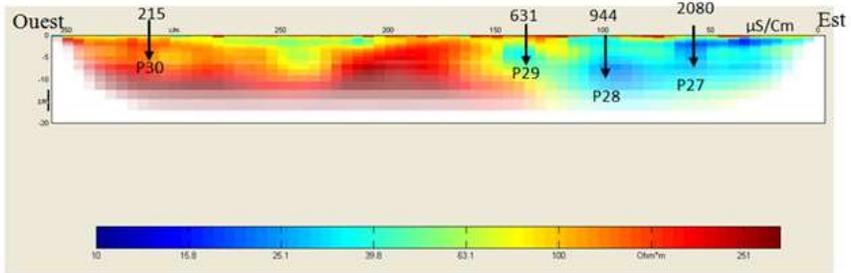
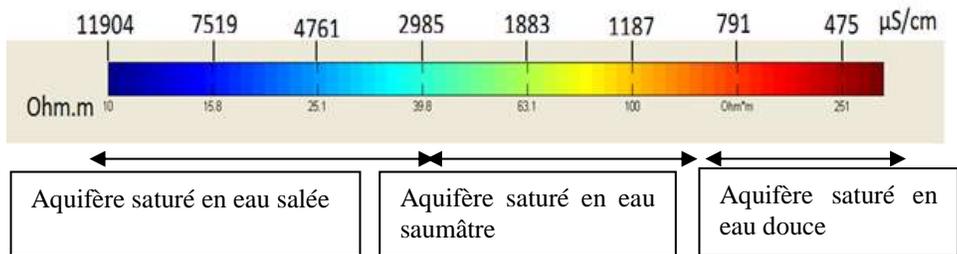


Figure 13 : Caractérisation du biseau salé à partir Tomographie de Résistivité Electrique

Ce profil confirme la présence de l'eau salé venant de Lac Nokoué, obtenu déjà par la carte EM34, Ceci confirme une complémentarité entre les méthodes ERT et EM 34.

Cette estimation d'eau douce s'applique à la saison sèche. En saison des pluies le niveau statique pourrait augmenter. La profondeur du biseau pourrait elle aussi augmenter (supérieur à 10m) Ainsi la réserve d'eau douce pourrait augmenter, car la géométrie de la lentille d'eau douce varie en fonction des précipitations et des prélèvements, selon Martin (1970).



Sur cette échelle de couleur on note deux unités, représentant deux échelles. Une en µS/cm qui est une transcription de la conductivité obtenue à partir de la loi d'Archie.

Elle permet de caractériser les aquifères de la zone d'étude. La seconde échelle est en Ohm.m et est obtenue à partir de l'inversion des données de terrain.

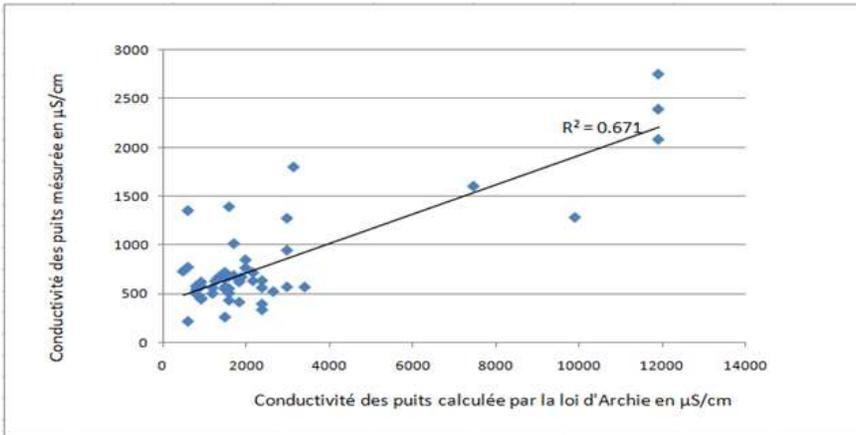


Figure 14 : Relation conductivité mesurée/conductivité calculée par la loi d'Archie

De l'analyse faite de la courbe de corrélation (Figure 14), il ressort que la liaison entre la conductivité des puits mesurée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la bordure du Lac Nokoué et la conductivité des puits calculée par la loi d'Archie en $\mu\text{S}/\text{cm}$ n'est pas très bonne ($R^2=0.671$). Ce qui pourrait être justifié par la loi d'Archie qui ne répond pas à l'hypothèse des sables argileux et aussi la porosité calculée (22%) à partir de la conductivité mesurée ($441\mu\text{S}/\text{cm}$ ou 22.67 ohm.m) dans un seul puits qui pourrait ne pas être uniforme sur toute la zone d'étude. Donc si l'aquifère ne présente en moyenne des porosités constantes d'un point à l'autre de la zone d'étude et la structure géologique de l'aquifère n'est pas homogène alors la conductivité mesurée dans les puits n'est pas conforme aux conductivités des puits calculée à base de la loi d'Archie.

D'après les coupes lithologiques il ressort que la zone d'étude en constitue des roches suivantes : Argile sableuse ; Sable argileux ; Sable ; argile sableuse avec de gravillon latéritique ; Sable argileux avec niveau de gravillon ; Argile et des gravillons latéritiques.

Les zones très conductrices révélées par l'ERT et le EM34 au niveau de la bordure du lac Nokoué sont constituées par des roches sablo-argileux avec de gravillon latéritiques.

En ERT, les couches de très faibles résistivités des profils pourraient être soit des aquifères contenant de l'eau salées/ saumâtres, soit des aquicludes d'argile. Les couches de résistivité un peu plus élevées pourraient être des aquifères contenant de l'eau douce. Ces deux ensembles assez conducteurs sont contenus

dans des encaissements plus résistants qui pourraient être des sols latéritiques non saturés.

Afin de lever tous équivoques concernant la nature des sols de différentes résistivités (particulièrement sable à eau saumâtre ou argile), nous avons effectué des forages à base de la tarière pour étudier la granulométrie afin de connaître la lithologie de ces zones (Figure 15).

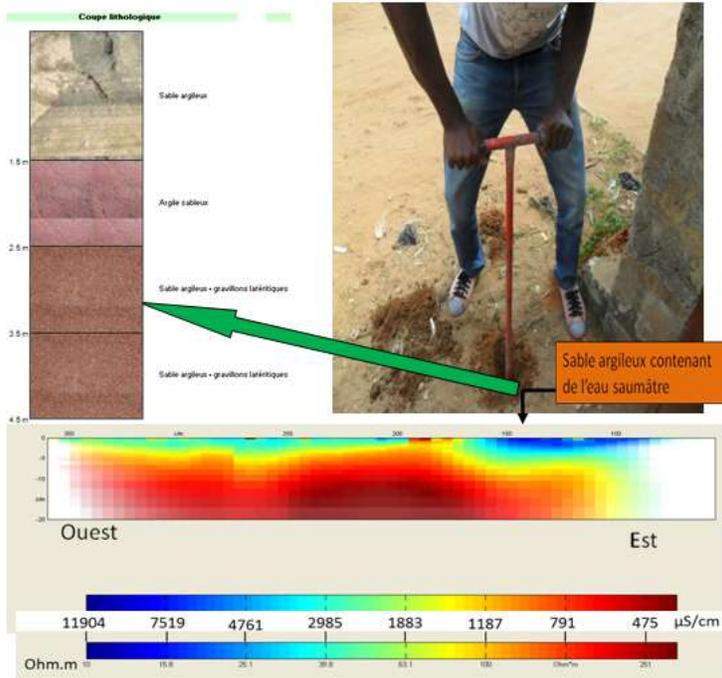


Figure 15 : Réalisation de sondage mécanique sur les panneaux ERT

L'étude des échantillons montre qu'ils sont constitués en majorité des sables argileux ce qui confirme la présence de la terre de barre.

Par conséquent les couches de très faibles résistivités des profils sont constituées de sable argileux contenant de l'eau salée/saumâtre.

Une contrainte majeure pour nous dans cette étude liée à la contribution de la géophysique pour la détermination de l'interface eau douce eau salée des nappes phréatiques sur la bordure du lac Nokoué est l'accessibilité à l'information. On dispose d'un accès ponctuel à la qualité des eaux souterraines des nappes phréatiques dans des puits. Les informations obtenues sont trop

fragmentaires pour rendre compte de la complexité des interfaces eaux salées eaux douces observées.

Les méthodes géophysiques permettent d'interpoler entre ces observations ponctuelles dans la partie de l'aquifère non accessibles 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 à nappe libres et phréatiques sur la bordure Sud-Ouest de lac Nokoué.

Limites de la méthode ERT : la mise en œuvre de cette méthode est assez lourde et l'injection du courant dans les terrains très secs est difficile.

Limites de l'interprétation ERT: la solution définie par ce processus d'inversion n'est pas unique : lors de l'interprétation d'un sondage électrique, plusieurs modèles de structure du sol (résistivité/épaisseur) différents peuvent reproduire aussi bien une même mesure. Cette indétermination est illustrée en premier lieu par la notion d'équivalence, qui particulièrement forte dans le cas où une couche fine est située entre deux couches résistantes.

Comparaison des cartes géophysiques avec les cartes de paramètres physico-chimiques.

Pour confirmer les résultats de la géophysique, plusieurs campagnes de mesures dans 80 puits ont été effectués pour étudier les paramètres physico-chimiques tel que: la conductivité ; la salinité et le Tds. De cette comparaison il ressort que : la salinité des nappes phréatiques capté par les puits à l'échelle de la bordure Sud-Ouest du lac Nokoué est superficielle et évolue du lac Nokoué vers le champ de captage de Godomey (Figure 16). L'épaisseur de la lentille d'eau douce définie par la méthode géophysique corrèle à 67% avec celle mesurée dans les puits et forages.

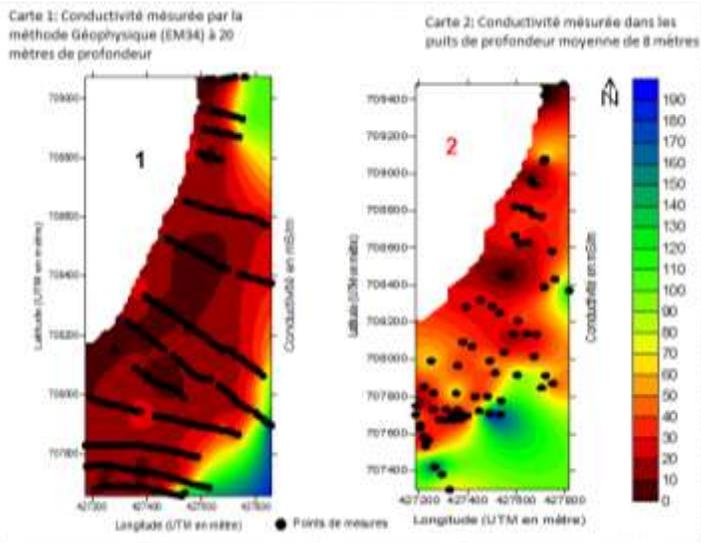


Figure 16 : Carte de conductivité et de la salinité des eaux de puits

CONCLUSION

Les méthodes géophysiques ont permis d'estimer la profondeur moyenne de l'intrusion saline à 20 mètres. L'épaisseur de la lentille du biseau salé varie et avance du lac Nokoué vers le champ de captage de Godomey. Le Continental Terminal saturé en eau salée a une résistivité comprise entre 10 et 30 Ohm.m. Celui saturé en eau saumâtre a une résistivité comprise entre 30 et 120 Ohm.m. Enfin, le Continental Terminal saturé en eau douce a une résistivité supérieure ou égale à 120 Ohm.m. L'épaisseur de la lentille d'eau douce définie par la méthode géophysique corrèle à 67% avec celle mesurée dans les puits et forages.

Les résultats géophysiques ont été confirmés par des études antérieures de (Boukari, 2008 et de Malik, 1998) qui ont aussi révélés, tout comme les mesures de conductivité électrique, qu'il s'agissait essentiellement d'une intrusion saline du champ de captage de Godomey venant du Lac Nokoué.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLE C. (2013). Etude de l'invasion saline dans l'aquifère côtier du quaternaire : Application de l'électromagnétisme en domaine temporel (TDEM) sur un site test à Togbin (Bénin), Mémoire de Master en Hydrogéologie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 95 p.
- ARCHIE G.E. (1941). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, Vol.146, pp. 54-62.
- BOUKARI M. (1998). 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-Science en Géologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 278p.
- COMTE J.-C., BANTON, O. (2005). 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. 5e Colloque GEOFCAN, Orléans, France, pp. 83–86.
- CUSTODIO, E. (2004). Myths about seawater intrusion in coastal aquifers, 18 SWIM proceedings. IGME, Cartagena, pp. 599-608.
- DAHLIN T. (1996), 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, First Break, pp. 275–283.
- DAHLIN T., ZHOU B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays Geophysical prospecting, Vol.52, pp. 379-398.
- DE MONTETY V. (2008). Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque - Cas de la Camargue (delta du Rhône, France), Thèse de Doctorat ès, Hydrologie. Université d'Avignon, France, 281p.
- DESCLOITRES M. (1998). 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 ès en Géophysique, l'Université de Paris 6, France, 238p.
- EDMUNDS, W.M., HINSBY, K., MARLIN, C., DE MELO CONDESSO, M.T., MANZANO, M., VAIKMAE, R. ET TRAVI, Y., (2001). Evolution of groundwater systems at the European coastline. In: EDMUNDS,W.M. & MILNE, C.J. (eds) Palaeowaters in Coastal Europe: Evolution of groundwater since the Late Pleistocene, Geological Society, London, Special Publication, pp. 289-311.
- FOSCOLO P. (1995). Le projet de développement de la pisciculture à Godomey en République du Bénin. Mémoire d'ingénieur des eaux et forêts. FSA de Gembloux Belgique, 82p.
- GUILCHER A. (1959). La région côtière du Bas-Dahomey occidental Bull IFAN, XXI, Vol. 3 et 4, pp. 357 – 424.

- HALLOF, P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology
- JACKSON P.D., Frischknecht, F.C., Kauahikaua, J., (1978). Three-layer inversions for 18 TDEM soundings in the cone crater area, SW rift zone of Kilauea volcano, Hawaii. USGS Open-File report, pp. 72-87.
- KELLER G.V., (1988). Rock and mineral properties. In Electromagnetic methods in Applied Geophysics, Vol. 1, Nabighian, M., Editor. Society of Exploration Geophysicists.
- LAWSON F., (2013). Etude d'une décharge à ciel ouvert à Hêvié : Application de la méthode de tomographie de résistivité électrique, Mémoire de Master en Hydrogéologie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 77 p.
- UNION E. (1998). Directive du conseil 98/83/EC sur la qualité de l'eau attendue pour la consommation humaine. Directive adoptée le 3 Novembre 1998.
- PETREQUIN P. (1984). Habitat lacustre du Bénin, une approche ethno archéologique. Edition recherche sur les civilisations. Paris, France, 214 P.
- SOGNON L.-M. (2013). Contribution de la Géophysique à l'étude de l'interface eau douce-eau salée sur la bordure Sud-ouest du Lac Nokoué, Mémoire de Master en Hydrogéologie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 88 p.
- SOGNON L.-M. (2017). 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, Afrique SCIENCE, pp. 289 – 302.
- SOGNON L.-M. (2017). Caractérisation géophysique du biseau salé dans les aquifères sédimentaires en zone côtière au Sud du Bénin, Colloque TACCOVAR 2017, Bénin 14 p.
- YALO N., DESCLOITRES M., ALLE C. (2013). Delimitation of the Salt Water Wedge in the Shallow Coastal Aquifer by TDEM Method at Togbin (South Benin), Vol.3, ISSN 2221-8386, pp. 21-29