

Connaissance des premiers mètres du sous-sol par la tomographie de résistivité électrique dans un contexte de constructions de bâtiments dans la localité de Bonoua (Sud de la Côte d'Ivoire)

Knowledge of the first few meters of the subsoil using electrical resistivity tomography in the context of building construction in Bonoua (South of Côte d'Ivoire)

BIKPO Aimé Marcel¹, KOUAMÉ Loukou Nicolas¹, OUATTARA Yacouba¹, KONÉ Fankélé Abou Dramane¹, SAMASSI Alassane²

1. UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire de Géologie, Ressources minérales et Énergétiques, Université Félix Houphouët Boigny, 22 BP : V 522 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. *(aimemarcelbikpo@gmail.com)

2. Cabinet Géosciences, Abidjan – Côte d'Ivoire

Résumé. L'objectif de ce travail est de caractériser le sous-sol d'un site de la localité de Bonoua (Sud de la Côte d'Ivoire) avant la réalisation d'édifices urbains afin de prévenir les risques d'effondrement de ces constructions. Ainsi, un résistivimètre de type Syscal Pro a été utilisé pour la mise en œuvre de la tomographie électrique en mode dipôle-dipôle. Les résultats obtenus sont des sections 2D du sous-sol atteignant 13 m de profondeur et des cartes de niveaux à 2 m, 5 m et 10 m. L'analyse de ces différentes cartes a permis de mettre en évidence des zones de faibles résistivités, indiquant la présence de sédiments meubles, saturés en eau, peu compacts, donc inappropriés pour supporter les fondations des bâtiments. En revanche, les zones à haute résistivité, associées à des sédiments plus compacts, offrent des conditions convenables à l'implantation des bâtiments.

Mots clés : tomographie électrique, résistivité, construction, Bonoua (Côte d'Ivoire).

Abstract. The aim of this study is to characterize the subsurface at a site in Bonoua (southern Ivory Coast) prior to the construction of urban buildings in order to prevent the risk of collapse. A Syscal Pro resistivity meter was used to carry out electrical tomography in dipole-dipole configuration. The results obtained are 2D sections of the subsoil up to 13 m deep and level maps at 2 m, 5 m and 10 m. Analysis of these different maps revealed areas of low resistivity, indicating the presence of loose, water-saturated sediments that are not very compact and therefore unsuitable for supporting building foundations. Conversely, high resistivity zones, typically correspond to very compact sediments, suitable for construction.

Keywords: electrical tomography, resistivity, construction, Bonoua (Ivory Coast).

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

Geophysical methods have a significant impact on pre-construction site characterisation in order to reduce recurrent building collapses in Côte d'Ivoire. Geophysical methods, which differ from the traditional geotechnical methods used for preliminary work prior to construction requiring spot drilling (Absi 1993), can be limited over large areas. They enable imaging of the subsurface, particularly at depth, and understanding of variations in subsurface properties both laterally and vertically (Guerrero 2014, Xu 2015).

Methodology and geological context

The geological context of the study site, located in Bonoua, a town in Côte d'Ivoire 40 km from the economic capital Abidjan, is that of the Côte d'Ivoire Sedimentary Basin. Drilling carried out by authors such as Assalé (2013) has revealed the lithostratigraphy of the area. The sediments found are mainly of Plio-Quaternary age (Aka 1991), and include clay sands, conglomerates, fine- and coarse-grained quartz sands, sandstone stonelines, kaolins, mudstones. The geophysical method used to achieve the objective of the study is electrical resistivity tomography, which

involves injecting an electric current into the ground, using a device called a resistivimeter, current wires and electrodes implanted in the ground. This method makes it possible to characterise the geological formations on the site according to their electrical resistivity and, above all, to map the risks by identifying sensitive areas with low resistivity and favourable areas for construction where resistivity is high.

This methodology was divided into three stages. First the acquisition step, then the processing step and finally the interpretation step.

- The acquisition step began with the delimitation of the study area. We explored a site of 9 ha, or 300 m x 300 m, and set up 4 measuring lines, each 300 m long, spaced 100 m apart, parallel and oriented N 240°. We used a Syscal Pro resistivity meter with 11 electrodes, including 2 current electrodes and 9 electrodes for measuring potential. We adopted a dipole-dipole configuration, with an inter-electrode spacing of 5 m, giving us a device length of 55 m. Barker (1989) established a relationship between the length of the device and the depth of investigation, which stipulates that the depth of investigation is between $0.195 \cdot L$ and $0.25 \cdot L$. This means that with this configuration, we were able to reach between 10.725 m and 13.75 m. We therefore took measurements on each line, covering the entire study area. Once the data had

been collected, it had to be processed using various software packages.

- The processing step began with the elimination of outliers using Prosys II software, then continued with Res2Dinv® software, which was used to process the data and bring out 2D resistivity pseudo-sections showing the lithological and structural variation of the subsoil both laterally and vertically. The pseudo-sections for each line were exported in *xyz format, which enabled us to create databases in Excel and use Geosoft software to produce level maps. This gave us maps at 2m, 5m and 10m, showing the distribution of resistivity over the entire study area. The EriViz software, for its part, enabled us to produce a 3D visualisation of the pseudo-sections.

Results and Discussion

Following data processing, the main results obtained are resistivity profiles and subsoil resistivity maps, which will be interpreted.

- The resistivity profiles enabled us to identify 3 geoelectric domains at the Bonoua site. A very shallow resistive domain at a depth of 5 to 6 m. According to the geological features of the study area, this domain may correspond to a formation of coarse sand, ferruginous sandstone or conglomerates. Below this layer, a conductive domain was identified, characterised by lower resistivity values, indicating the presence of saturated or loose sediments such as mud, soft clay and damp sand. Correlation of the various resistivity profiles at the site revealed an irregular vertical and lateral distribution of areas of high resistivity and areas of low resistivity. This information is crucial for selecting appropriate foundation types. Superficial and intermediate foundations not exceeding

5 m, in depth, were recommended in some places, while in other, deeper foundations were recommended elsewhere.

- This irregularity in the deposition and structure of the Bonoua geological strata was observed in previous study by Simon *et al.* (1984).

- The maps of resistivity levels at 2 m, 5 m and 10 m have made it possible to understand the spatial distribution of electrical resistivity and to identify sensitive areas, which therefore pose a risk to buildings. These areas show low resistivity values from the surface to depths and are mainly concentrated in the northern and north-eastern parts of the study site. For these areas, additional development work has been recommended prior to any construction. Favorable zones have been identified on the site, where values are very high from the surface to depth. These zones are located mainly in the southern and south-eastern parts of the study site, and offer a favorable environment for the installation of deep foundations such as piles. Similar work carried out by Oyeyemi *et al.* (2017) and Oloruntola *et al.* (2018) in Nigeria has helped to better guide the choice of foundations in order to avoid risks such as ground settlement.

Conclusion

The geophysical method of electrical resistivity tomography has demonstrated its effectiveness in assessing the surface characterisation of a construction site in Bonoua, Ivory coast. The mapping highlighted areas suitable for the construction of large buildings with important foundations (such as piles), and also delineated sensitive areas that require further investigation prior to any construction activities.

INTRODUCTION

La réussite de la réalisation d'un projet de construction d'infrastructures (routes, ponts, bâtiments,) passe par une bonne étude des caractéristiques du sous-sol, support sur lequel repose ces ouvrages (Guerrero 2014, Pelletier & Depinois 2020). Depuis quelques années, dans la ville d'Abidjan et même ailleurs en Côte d'Ivoire, on assiste à des effondrements de bâtiments dus d'une part, à une mauvaise connaissance des propriétés du sous-sol et d'autre part, à la mauvaise qualité des matériaux utilisés pour la construction. Généralement avant les travaux de construction de bâtiments, les propriétés géotechniques du sous-sol sont connues grâce aux sondages géotechniques in situ et analyses au laboratoire (Bonnard & Bonjour 1949). Toutefois, ces forages géotechniques sont limités car ils ne donnent que des renseignements ponctuels sur la variation verticale des propriétés du sous-sol (Absi 1993). La corrélation de ces informations ponctuelles à l'échelle de la parcelle étudiée est de ce fait dubitative étant donné que le sous-sol est hétérogène et que ses propriétés sont parfois variables d'un point à un autre (Guerrero 2014, Xu 2015). Dans ces circonstances, la mesure de façon continue des propriétés mécaniques utilisant les techniques non destructives comme la géophysique demeure une bonne approche de connaissance du sous-sol.

L'objectif de ce travail est donc de caractériser le sous-sol dans la localité de Bonoua par la tomographie de résistivité électrique avant la construction d'édifices en vue de prévenir d'éventuels risques d'effondrement.

LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cadre géographique

Bonoua est une ville d'Afrique de l'Ouest, situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Fig.1A,1B). Elle est située à 40 Km d'Abidjan et à 20 km de Grand- Bassam. Bonoua ne fait pas partie du district d'Abidjan mais appartient au «Grand Abidjan», et donc, est une zone d'extension de la ville d'Abidjan. Le site étudié se situe aux coordonnées géographiques, 3°35'21'' longitude Ouest et 5°15'21'' latitude Nord et couvre une superficie de 09 hectares (Fig.1C).

Quatre layons orientés N 240° chacun, ont été ouverts.

Cadre géologique

Bonoua est située dans la partie Est du bassin sédimentaire «On shore» de la Côte d'Ivoire. Les formations géologiques rencontrées à Bonoua sont d'âge Plio-Quaternaire (Fig. 2) (Delor *et al.* 1992). Les formations géologiques de cet âge sont principalement composées d'argiles sableuses, de sables argileux rougeâtres, d'argiles sombres, de sables marins (AKA 1991). Les travaux de Assalé (2013) ont permis de connaître la succession des formations géologiques de Bonoua sur une profondeur d'environ 10 m. On y retrouve des sables argileux, des conglomérats, des sables quartzeux à grains fins et grossiers, des stonelines de grès par endroit, des kaolins, des vases, etc.

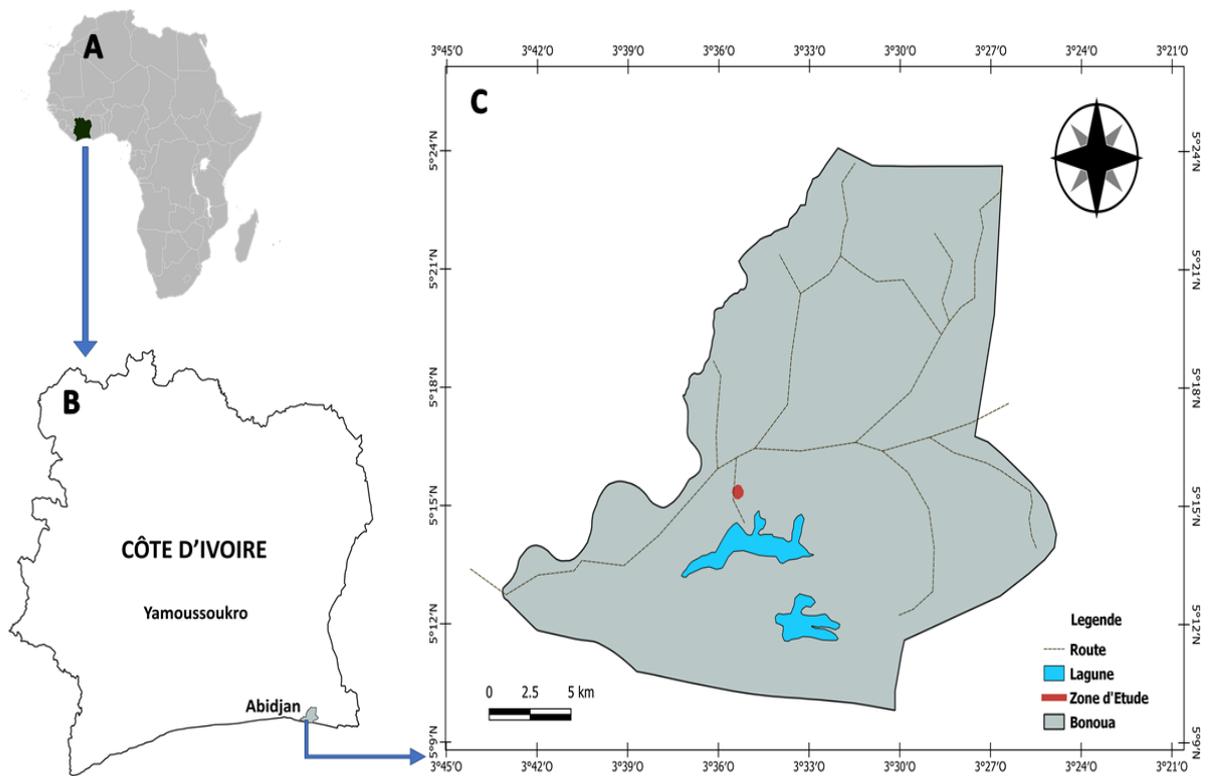


Figure 1. Localisation de la zone d'étude : A) carte d'Afrique; B) carte de la Côte d'Ivoire; C) carte de Bonoua.
 Figure 1. Location of the study area: A) Map of Africa; B) Map of Ivory Coast; C) Map of Bonoua.

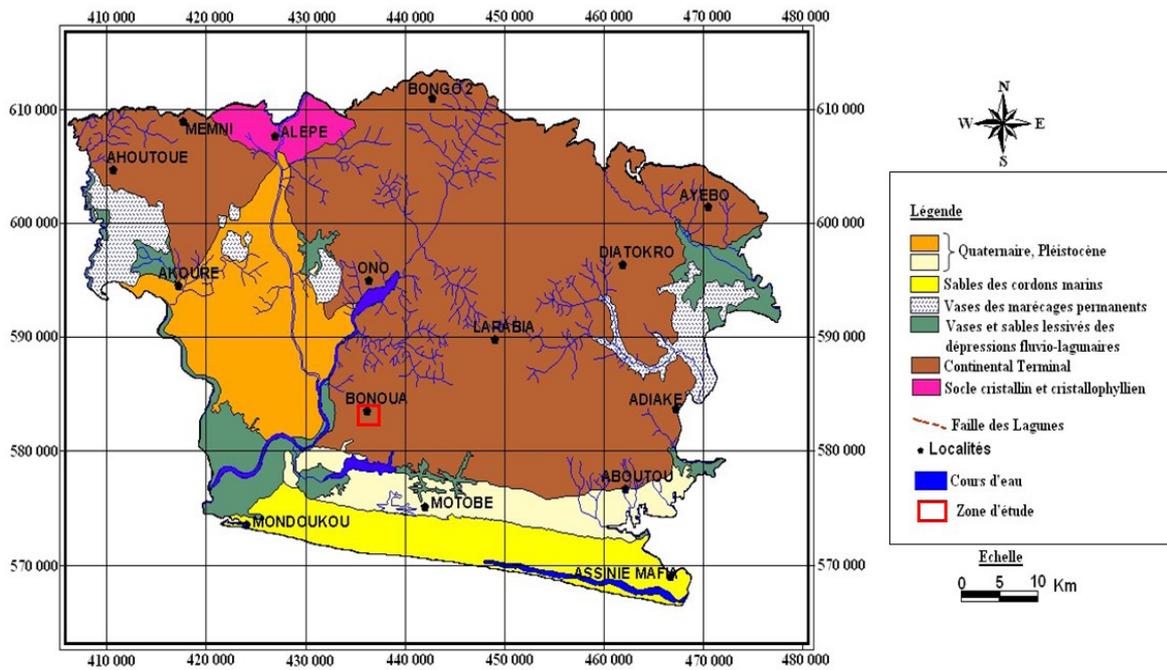


Figure 2 . Carte géologique de la région de Bonoua (Delor *et al.* 1992).
 Figure 2. Geological map of the Bonoua region (Delor *et al.* 1992).

MATERIEL ET METHODES

La présente étude a été initiée par la délimitation de la zone d'investigation à Bonoua, effectuée à l'aide du logiciel Google Earth. Ce site, désigné pour le développement de constructions immobilières, se situe dans un secteur d'expansion urbaine de la ville d'Abidjan, caractérisé par des incidents récurrents d'effondrements de structures. Afin d'évaluer la compétence des sols en amont des projets de construction, une campagne de prospection géophysique a été menée, employant la technique de tomographie de résistivité électrique (ERT). L'objectif principal était de caractériser la stabilité du sous-sol et d'optimiser les plans de construction, en vue de minimiser les risques d'affaissement dans la zone étudiée.

La phase préliminaire de l'étude a consisté en l'implantation de profils de mesure. Cette opération a nécessité l'utilisation d'une boussole, d'un récepteur GPS, de deux rubans métriques, de deux machettes, d'un marqueur indélébile, de piquets, de bandes de signalisation et d'un carnet de terrain. Ces instruments ont permis d'orienter les lignes de mesure et de déterminer les coordonnées géoréférencées de chaque profil et point de mesure.

Suite à l'implantation des profils, l'acquisition des données a été réalisée au moyen d'un résistivimètre Syscal Pro, configuré en mode dipôle-dipôle pour l'exécution de la tomographie électrique. Les logiciels Prosys II, Res2Dinv® et Oasis montaj (Geosoft) ont été utilisés pour le traitement des données et la génération de représentations graphiques illustrant la distribution de la résistivité électrique dans le sous-sol.

Le principe de la tomographie électrique repose sur les fondements des méthodes électriques en courant continu, qui permettent de sonder les propriétés électriques du sous-sol en injectant un courant électrique et en mesurant les différences de potentiel résultantes.

Principe de la méthode

Un courant continu d'intensité I est injecté dans le sol au moyen de deux électrodes métalliques A et B (ou C_1 et C_2) implantées en Surface. À l'aide de deux autres électrodes métalliques M et N (ou P_1 et P_2) implantées en surface également (Fig.3), on mesure la différence de potentiel ΔV résultant de la circulation du courant électrique (Astier 1971).

La méthode de tomographie de résistivité électrique consiste spécifiquement en l'utilisation d'un dispositif multi-électrodes (plusieurs M et N) atteignant parfois 72 électrodes, permettant une acquisition 2D ou 3D haute résolution par combinaison de sondage et traîné électriques (Griffiths *et al.* 1990, Dahlin 1993, Griffiths & Barker 1993, Dahlin & Bernstone 1997). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'investiguer le sous-sol le long d'un profil, de manière latérale et verticale (Dahlin 2001). Elle est utilisée pour étudier la variation d'épaisseur des couches géologiques (Palacky 1987, Keller & Frischknecht 1966, Li *et al.* 2018), l'interface zone saturée / zone non saturée (Archie 1942, Ebong *et al.* 2021), la limite d'intrusion d'eau salée (Eissa *et al.* 2015, Kazakis *et al.* 2016, Hasan *et al.* 2021), la mise en évidence des zones faillées (Monahan 2013, Eluwole *et al.* 2020).

Mise en œuvre sur le terrain

Dans le cadre de ce travail, la tomographie électrique avec 11 électrodes dont 2 électrodes d'injection de courant et 9 électrodes de mesure du potentiel, disposées en mode dipôle-dipôle et espacées de 5 m chacune, a été effectuée. Les mesures ont été faites sur quatre layons orientés N240°(ENE-WSW),

longs de 300 m et espacés de 100 m ; la superficie de la parcelle d'étude est de 300 m x 300 m soit 9 hectares (Fig. 4). La profondeur d'investigation est estimée entre $0,195 \cdot L$ et $0,25 \cdot L$ (Barker 1989) avec : $L = (n + 2) \cdot a$

Où L est la longueur totale du dispositif, a est l'espacement entre les électrodes, n est le nombre d'espacement entre les électrodes de potentiel M N et une électrode de courant B.

Dans ce travail, $L = (9+2) \times 5 = 55$ m, donc la profondeur d'investigation est comprise entre 10,725 m et 13,75 m.

Traitement des données

Les données brutes collectées sur le terrain à l'aide du résistivimètre, ont subi un prétraitement à l'aide du logiciel Prosys II, puis un traitement avec les logiciels Res2Dinv®, Geosoft et Eriviz avant de fournir les coupes géoélectriques et les cartes de distribution de la résistivité électrique dans le sous-sol.

- la phase de prétraitement : Elle a consisté à appliquer un filtre afin d'éliminer les données aberrantes. Pour ce faire le logiciel Prosys II a été utilisé. Le facteur qualité $Q \leq 2\%$ a été choisi pour toutes les valeurs.

- la phase de traitement : les logiciels Geosoft et Res2Dinv® ont permis de traiter les données. Le traitement avec Res2Dinv® s'est effectué en plusieurs étapes : d'abord, les mauvaises données qui n'ont pas été repérées dans Prosys II ont été éliminées dans le menu *Exterminate bad data points*, ensuite les paramètres de traitement ont été définis dans les menus *Change settings* puis *Forward modeling method setting* pour choisir la méthode des éléments finis. Par ailleurs, le raffinement au $\frac{1}{2}$ du pas de mesure a été appliqué dans *Use model refinement* et aussi, une maille d'éléments finis a été choisie dans *Finest mesh*. Après avoir défini tous ces paramètres, l'inversion a été lancée dans le menu *Carry out inversion*. Cette inversion a permis d'obtenir des pseudo-sections 2D de résistivité électrique en fonction de la profondeur. Le nombre d'itération lors de l'inversion a été fixé à 3, pour un pourcentage d'erreur RMS autour de 5%. La dernière étape dans Res2Dinv® a consisté à exporter les pseudo-sections de résistivité en des valeurs numériques de résistivité dans le menu *Export* puis *xyz files*. Les données de résistivité au format *xyz files* ont permis de constituer des bases de données Excel pour le traitement dans Geosoft. Le logiciel Geosoft a permis à travers ses paramètres de *database* et de *Grid and image* de réaliser des cartes de résistivité, couvrant toute la superficie d'étude à différents niveaux de profondeur. Le logiciel Eriviz a permis la visualisation 3D des pseudo-sections.

L'application de cette méthodologie a permis d'obtenir les résultats suivants.

RESULTATS ET DISCUSSION

Sections de résistivité électrique

La figure 5 présente quatre pseudo-sections montrant la distribution de résistivité électrique le long des profils L0, L100, L200 et L300. Ces images 2D définissent la structuration du sous-sol aussi bien latéralement qu'en profondeur en fonction des valeurs de résistivité. Ces valeurs sont comprises entre 200 Ohm.m et 5000 Ohm.m sur une profondeur maximale de 13 mètres. Trois principales anomalies ont pu être identifiées. Une anomalie résistante (ZR) dont les valeurs de résistivité sont comprises entre 1500 Ohm.m et 5000 Ohm.m, représentée par les couleurs allant du marron au violet, une anomalie conductrice (ZC) dont les valeurs de résistivité sont inférieures à 700 Ohm.m et dont les couleurs varient dans les

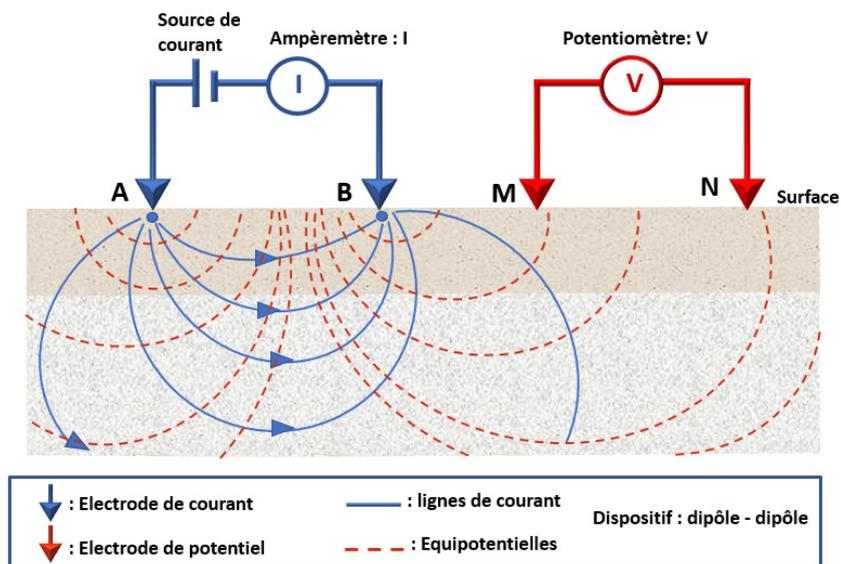


Figure 3 . Principe de la méthode électrique (Chouteau et Giroux, 2006 modifié).
 Figure 3. Principle of the electrical method (Chouteau & Giroux, 2006 modified).

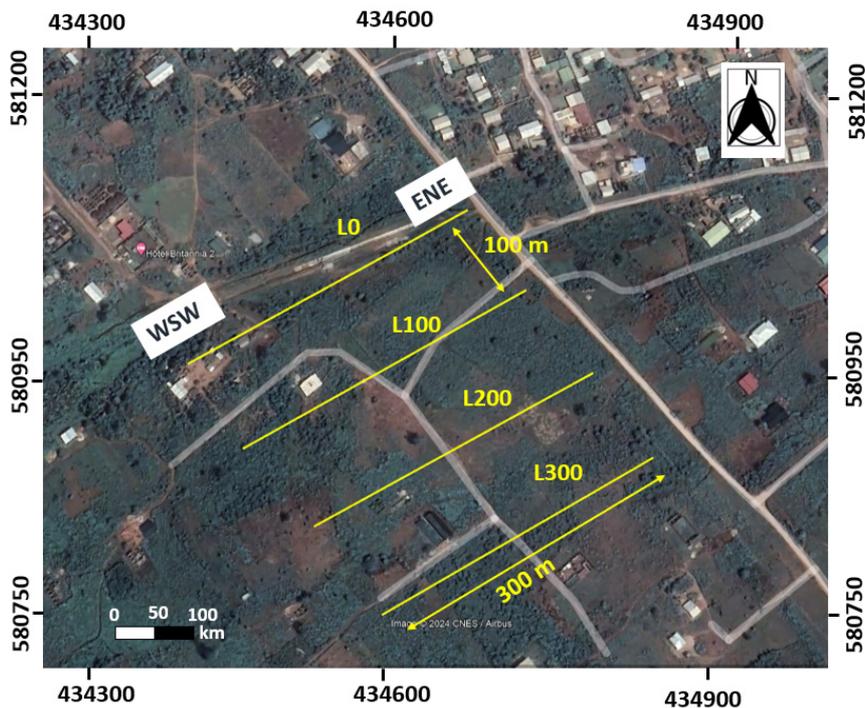


Figure 4 . Grille de prospection (Extraite de Google Earth, le 12 Avril 2023).
 Figure 4. Survey grid (extracted from Google Earth, April 12, 2023).

nuances de bleu et enfin, la zone intermédiaire se caractérise par les couleurs évoluant du vert au jaune et des résistivités comprises entre 700 et 1500 Ohm.m. L'anomalie résistante s'étend sur plus de 190 m au niveau de la ligne L0 (Fig. 5A) à partir du piquet 110 m. Cette anomalie d'une épaisseur variante entre 5 et 6 m au niveau de la ligne L0, devient plus épaisse au niveau des autres lignes, mais présente également des discontinuités au niveau des lignes L100, L200, L300, respectivement entre les stations 110 m et 160 m, 180 m et 210 m, et 250 m et 280m (Fig. 5B, 5C et 5D).

Cette anomalie, selon la géologie de la zone étudiée peut correspondre à une formation de sable grossier ou compacte de grès ferrugineux ou de conglomérats (Fig. 2). Cette couche dont l'épaisseur varie entre 5 et 6 m est propice pour supporter des fondations inférieures à 5 m comme les fondations superficielles ou intermédiaires. La présence de discontinuité dans cette couche, a permis de suivre l'extension latérale de cette couche sur l'ensemble du site afin mieux orienter les zones favorables en cas de construction. L'anomalie conductrice présente une grande épaisseur depuis la surface jusqu'en profondeur et est intercalée au Sud-Ouest de la ligne

L0 par l'anomalie intermédiaire ; cette anomalie conductrice disparaît progressivement vers les autres lignes de mesure. Elle correspond à une couche saturée, une zone de sédiments meubles et fait penser à du sable humide, des argiles meubles ou des vases qui doivent nécessiter des mesures spéciales comme le décapage ou le renforcement des fondations. La couche de transition qu'on retrouve en intercalation des deux premières et sur tous les profils du site présente une gamme de résistivité moyenne, faisant penser au complexe sablo-argileux qui nécessite des analyses approfondies avant la construction de bâtiments à étages surtout.

Visualisation 3D des profils

La figure 6 présente une vue d'ensemble des profils L0, L100, L200 et L300 du site étudié.

Sur chaque profil, une décroissance de la surface vers la profondeur des valeurs de la résistivité électrique est observée. Cela montre que, sur l'ensemble de la zone prospectée, les couches géologiques sont moins résistantes en allant en profondeur. L'ensemble du site d'étude présente une couche géologique très résistante proche de la surface, d'une épaisseur moyenne de 5 à 6 m. Ce qui signifie que les fondations à ce niveau ne doivent pas excéder 5 m.

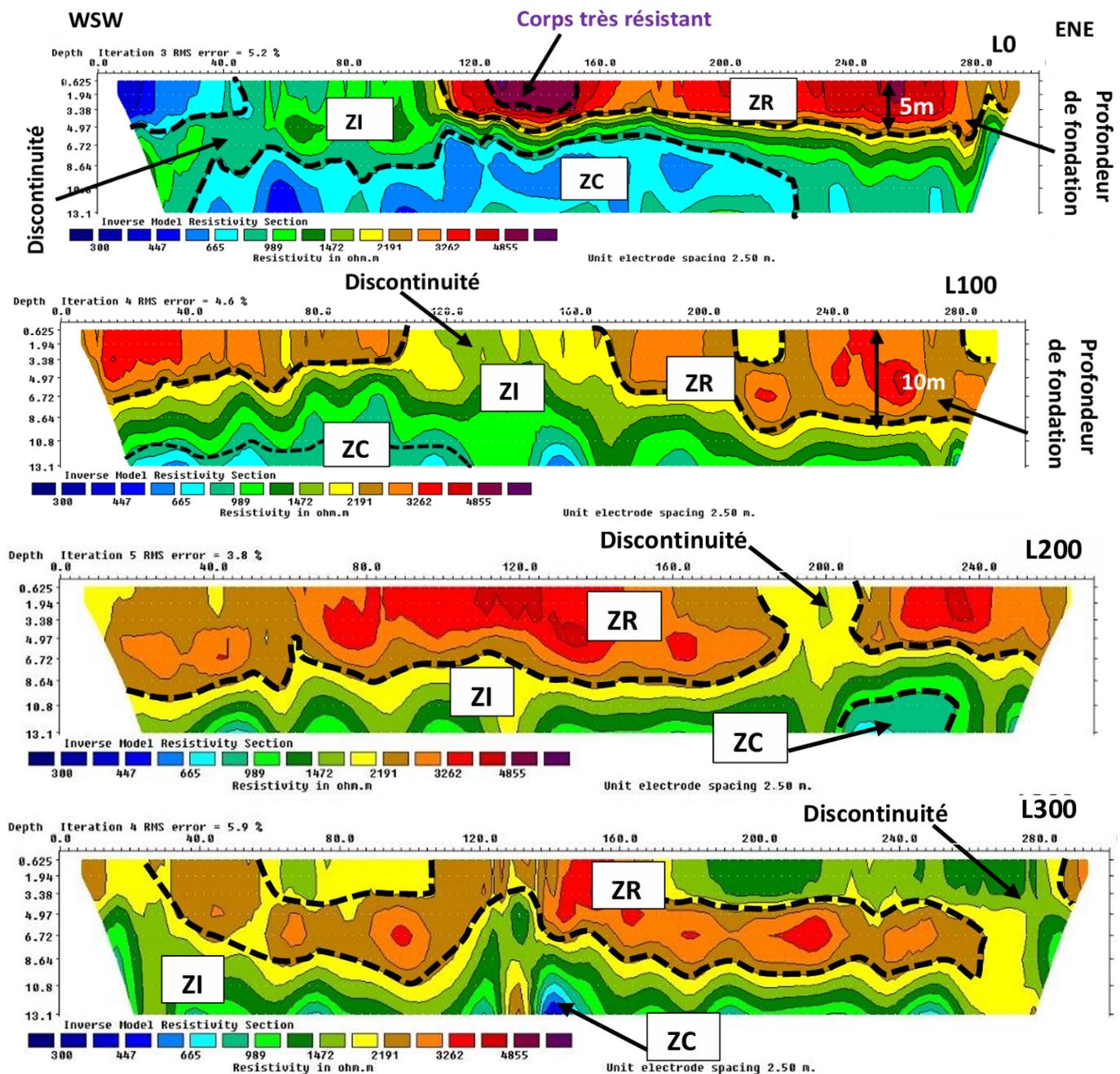


Figure 5 . Pseudo-sections de résistivité du site de Bonoua.
Figure 5. Resistivity pseudo-sections of the Bonoua site.

Le domaine conducteur est beaucoup superficiel au niveau de la ligne L0 et s'enfonce progressivement vers les autres lignes. Cela montre un enfouissement de ce domaine de la ligne L0 vers la ligne L300, ce qui indique que la fouille des fondations devrait être plus profonde en tendant vers le Sud et le Sud-Est.

Carte de niveaux

La figure 7 présente des cartes de distribution de la résistivité électrique sur l'ensemble du site de Bonoua à différents niveaux de profondeur (2, 5 et 10 m).

Sur ces cartes (Fig. 7), les trois zones géoélectriques identifiées sur les pseudo-sections sont mises en évidence ici. La zone résistante (ZR), indiquée par les couleurs allant du rouge au magenta, la zone conductrice (ZC) (couleur variant dans les

teintes de bleu) et la zone intermédiaire (ZI) dont les couleurs varient entre le jaune et le vert. Sur la carte à 2 m de profondeur (Fig. 7A), la zone conductrice est étalée essentiellement dans les parties Nord-Est et Sud du site étudié. Néanmoins, elle diminue avec la profondeur pour ne rester qu'au Nord-Est du prospect sur la figure 7C. Cette zone conductrice qu'on observe au Nord-Est de la zone d'étude et qui est bien identifiable à 10 m de profondeur au Nord et au Nord-Est de la carte, correspond à l'endroit sensible qui constitue une zone à risque pour la construction de bâtiments et devra faire l'objet d'un aménagement supplémentaire en cas de travaux. Quant au domaine résistant, bien qu'il occupe l'Est et l'Ouest du site étudié, il se réduit conséquemment au Sud à 10m de profondeur. Cela veut dire que la partie australe du site étudié

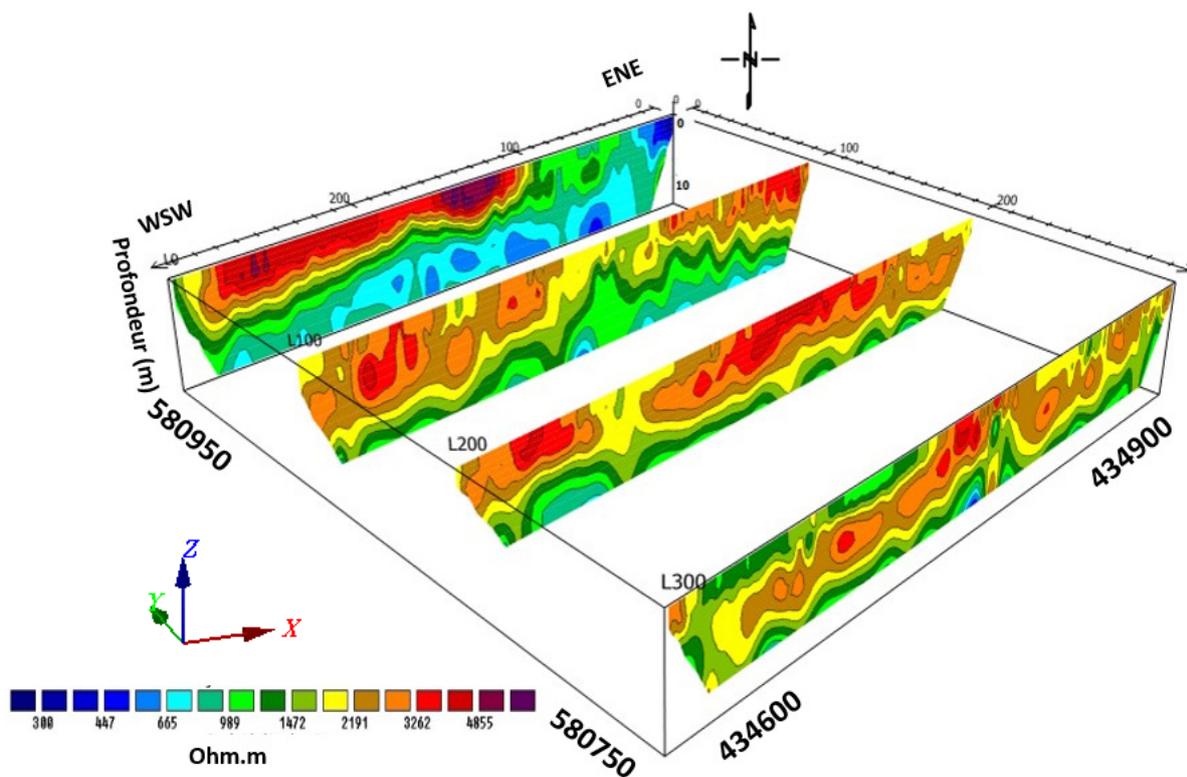


Figure 6. Visualisation 3D des profils du site de Bonoua.

Figure 6. 3D visualization of Bonoua site profiles.

peut abriter des fondations plus profondes comme les pieux pour des grands bâtiments.

DISCUSSION

La tomographie électrique a été employée pour explorer la structure interne du sous-sol jusqu'à 13 m de profondeur sur le site de Bonoua, comme une étude préliminaire avant toute construction. Les données de résistivité ainsi obtenues ont permis d'identifier la composition du sous-sol, de repérer les discontinuités, et de distinguer les zones propices et celles à éviter pour ériger des bâtiments.

Concernant la composition lithologique, cette étude a révélé la présence de trois couches géoélectriques distinctes: une couche résistante en surface qui serait une formation sédimentaire compacte telle que les sables grossiers, les conglomérats ou

les grès ferrugineux une couche intermédiaire, et une couche conductrice en profondeur qui serait des argiles meubles ou des vases. Toutefois, ces couches géologiques présentent des variations locales avec la couche conductrice parfois en surface et la couche résistante en profondeur. Cette observation a été faite dans les travaux de Simon *et al.* (1984), qui ont identifié des couches conductrices telles que les vases molles et des sables moyens entre 0 et 3 m de profondeur, ainsi que des formations plus résistantes en profondeur et une structuration inverse par endroit, avec des couches plus résistantes proches de la surface et les plus conductrices en profondeur. Ces observations effectuées à Bonoua, concordent avec la structuration du sous-sol mise en évidence dans notre étude.

Dans le cadre de la caractérisation des sites avant les constructions, l'analyse des pseudo-sections a permis de mettre en évidence la continuité latérale des propriétés

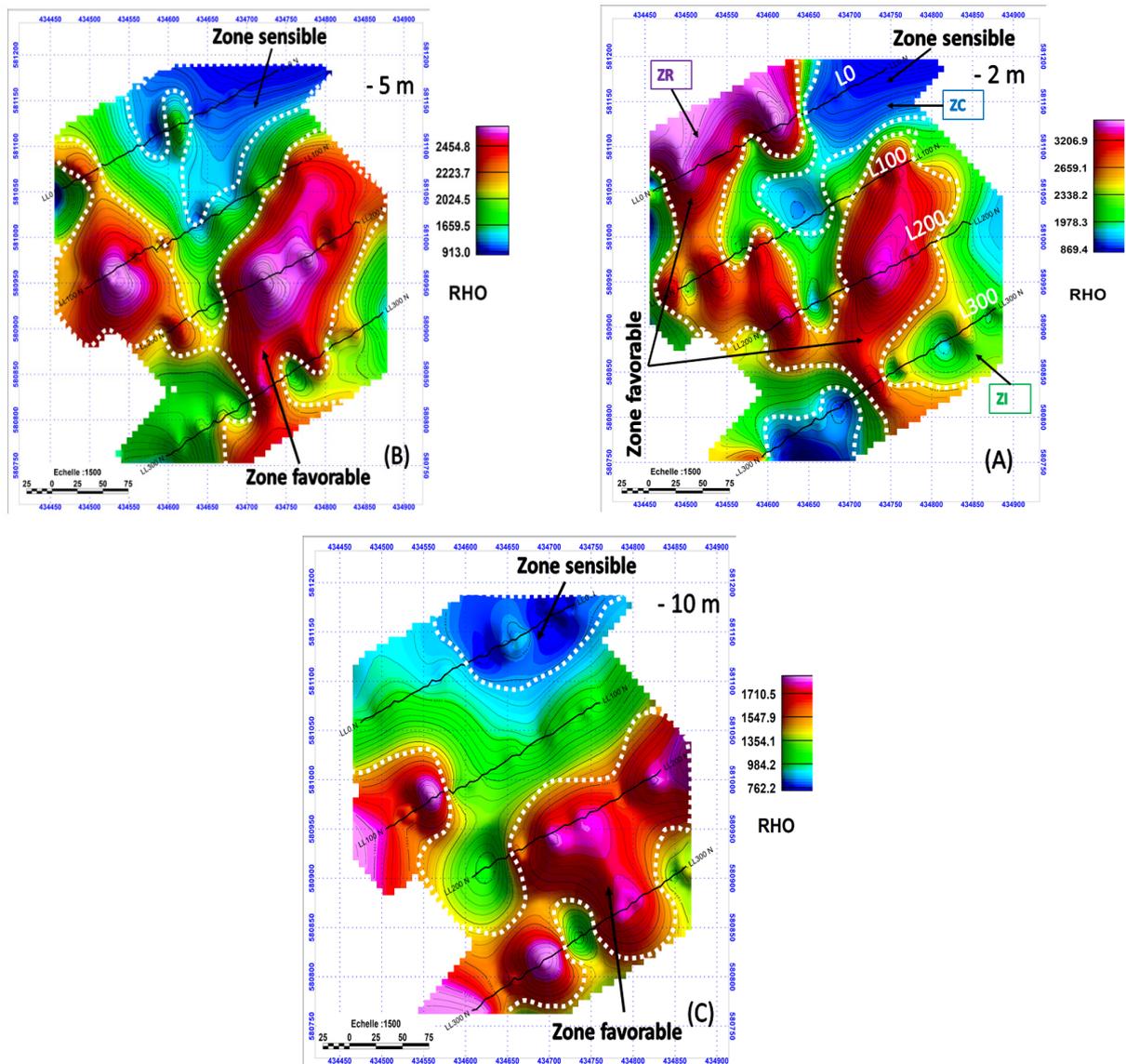


Figure 7. Cartes de résistivité électrique à 2 m, 5 m et 10 m.
 Figure 7. Electrical resistivity maps at 2 m, 5 m, and 10 m.

physiques des couches géologiques. Cela a permis de voir le long des profils les incohérences dans la structuration du sous-sol, d'identifier des épaisseurs de couches pouvant être source d'instabilité des bâtiments, ce qui a permis de recommander des profondeurs optimales pour les fondations des bâtiments, en se basant sur les valeurs de résistivité et l'épaisseur des anomalies résistantes. Sur certains profils des couches conductrices ont été identifiées en dessous des couches résistantes en surface, cela a conduit à indiquer des profondeurs de fondations ne devant pas excéder les 5 m pour garantir la stabilité des constructions. Tandis que sur d'autres profils, les couches résistantes étaient plus profondes avec des couches superficielles proches de la surface, cela a permis de proposer des fondations plus profondes pouvant atteindre ces couches à 10 m de profondeur. Des travaux similaires réalisés par Oyeyemi *et al.* (2017) au Nigeria ont également souligné l'importance des fondations profondes, comme les pieux en se basant sur l'analyse des profils de résistivité électrique, pour

prévenir les tassements des formations superficielles sous des charges élevées. Par ailleurs, les études de Oloruntola *et al.* (2018) au Nigeria, concernant la caractérisation d'un site avant la construction d'une station de traitement d'eau par la tomographie électrique ont indiqué sur les profils de résistivité des zones sensibles et des zones adéquates en fonction de la profondeur pour les fondations de la construction. L'analyse des cartes de résistivité électrique a permis de délimiter sur toute la superficie étudiée des zones de faible résistivité électrique en fonction de la profondeur constituant des zones à risque pouvant être source d'instabilité des constructions et pouvant provoquer des effondrements des bâtiments. Des conclusions pareilles ont été tirées dans les travaux de Rizzo *et al.* (2019) et Cappozzoli *et al.* (2019) en Italie. Toutes ces observations ont contribué à enrichir notre compréhension des risques géotechniques et des stratégies de fondation. Leur résultats convergent avec les nôtres, en mettant en évidence les zones de faible résistivité comme présentant un risque

accru d'effondrement des bâtiments, tandis que les zones résistantes offrent des opportunités d'implantation sécurisées pour les futurs bâtiments.

CONCLUSION

Une campagne géophysique a été réalisée à Bonoua (Sud de la Côte d'Ivoire). L'objectif était de caractériser le sous-sol en prévision de futurs projets de construction, avec pour but ultime de réduire les risques d'effondrement des bâtiments en Côte d'Ivoire. À travers cette étude, trois domaines géoélectriques discontinus ont pu être identifiés sur la base des valeurs de la résistivité électrique. Tout d'abord, un domaine résistant a été défini, correspondant aux formations géologiques robustes telles que le sable grossier, les grès ferrugineux et les conglomérats. Ce domaine, observé principalement dans les parties Nord-Ouest et Ouest du site, présente une épaisseur moyenne de 5 à 6 m. En dessous de cette couche, un domaine conducteur a été identifié, caractérisé par des valeurs de résistivité plus faibles, indiquant la présence de sédiments saturés ou meubles comme les vases, les argiles molles et le sable humide. La présence de cette couche conductrice représente un risque pour les fondations profondes, ce qui a conduit à la recommandation de limiter la profondeur des fondations à moins de 5 m dans ces zones. Cependant, une observation intéressante a été faite dans les parties Sud et Sud-Est du site, où le domaine résistant s'étend jusqu'à une profondeur de 10 m depuis la surface. Cette configuration offre un environnement favorable à la construction des fondations profondes comme les pieux. En revanche, dans la partie Nord-Est du site, un domaine conducteur a été détecté jusqu'à une profondeur de 10 m, constituant ainsi une zone à risque. Avant toute implantation de bâtiments dans cette zone, des mesures d'aménagement spécifiques devront être prises pour garantir la stabilité des structures.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de la société LBTP (Laboratoire de Bâtiments et Travaux Publics) de Côte d'Ivoire qui a mis à notre disposition l'appareil géophysique, le résistivimètre Syscal Pro et ses accessoires dont des fils de connexion et des électrodes pour effectuer les levés géophysiques sur le terrain. Également, nous remercions les propriétaires terriens du site de Bonoua qui nous ont donné l'autorisation de faire l'étude géophysique sur leurs différentes parcelles. Les auteurs tiennent également à exprimer leurs vifs remerciements à l'éditeur en chef du « Bulletin de l'Institut Scientifique » prof. ACHAB Mohammed et aux évaluateurs de la revue prof Abderrahime NOUAYTI et prof Afaf AMINE de l'Université Mohammed-V de Rabat pour leur contribution significative à l'amélioration du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Absi E. 1993. Pathologie des fondations et des ouvrages en terre. *Annales de l'institut technique du bâtiment et des ouvrages en terre*, 516, 61-138.
- Aka K. 1991. *La sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : essai de modélisation*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 233p.
- Archie G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME. Institute of Mining, Petroleum Engineers*, 146, 54-62.
- Assalé P. 2013. *Caractérisation sédimentologique, palynologique, géochimique et paléoenvironnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (est du bassin onshore de côte d'ivoire)*. Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, 403p.
- Astier J.L. 1971. *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie*. Paris, Masson, 278p.
- Barker R.D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 8, 1031-1037.
- Bonnard D. & Bonjour J. 1949. Estimation préalable des tassements des constructions. *Géotechnique and Magazine of Concrete Research*, 1, 3, 148-159.
- Capozzoli L., De Martino G., Polemio M. *et al.* 2019. Geophysical Techniques for Monitoring Settlement Phenomena Occurring in Reinforced Concrete Buildings. *Springer Nature, Surveys in Geophysics*, 41, 575-604.
- Chouteau M. & Giroux B. 2006. *Géophysique appliquée II-GLQ 3202- méthodes électriques, notes de cours. École polytechnique de Montréal*, 14, 149p.
- Dahlin T. 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences, Elsevier*, 1019-1029.
- Dahlin T. 1993. *On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications*. Thèse de Doctorat, Lund University, 187 p.
- Dahlin T. & Bernstone C. 1997. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode array. *In: Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems*, 2, Reno, Nevada, 927-935.
- Delor C., Diaby I., Yao B. *et al.* 1992. Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Grand-Bassam. *Mémoire de la Direction de la géologie de Côte d'Ivoire*, 4, 30 p.
- Ebong E. D., Abong A. A., Ulem E.B. *et al.* 2021. Geoelectrical Resistivity and Geological Characterization of Hydrostructures for Groundwater Resource Appraisal in the Obudu Plateau, Southeastern Nigeria. *Natural Resources Research*, 30, 3, 2103-2117.
- Eissa M. A., Mahmoud H.H., Shouakar-Stash O. *et al.* 2015. Geophysical and geochemical studies to delineate seawater intrusion in Bagoush area, Northwestern coast, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 121, 365-381.
- Eluwole A.B., OlaOlorun A.O., Ademilua O.L. *et al.* 2020. Subsurface electrical resistivity modelling over a suspected fault zone at Ojirami, Southwestern Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 2543-2551.
- Griffiths D.H. & Barker R.D. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 211-226.
- Griffiths D.H., Turnbull J. & Olayinka A. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8, 4, 85-91.
- Guerrero O. 2014. *Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, Bordeaux, 220p.
- Hasan M.F.R., Fransiska C.D., Suaidi D.A. *et al.* 2021. Identification of seawater intrusion using geoelectrical resistivity method in the Goa Cina Beach Malang Area, Indonesia. IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science, Bristol*, 739, 1-7.
- Kazakis N., Pavlou A., Vargemezis G. *et al.* 2016. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern

- Thermaikos Gulf, Greece. *Science of The Total Environment*, 543 (A), 373-387.
- Keller G. V. & Frischknecht F.C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. *Pergamon press, Oxford*, 7-517.
- Li S., Xu S., Nie L. *et al.* 2018. Assessment of electrical resistivity imaging for pre-tunneling geological characterization – A case study of the Qingdao R3 metro line tunnel. *Journal of Applied Geophysics*, 153, 38-46.
- Monahan S. M. 2013. Investigating fault structure using electrical resistivity tomography. Faculty of Physics Department, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 20p.
- Oloruntola M.O., Folorunso A.F., Odukoya A.M. *et al.* 2018. Geotechnical and geophysical investigation of subsoil for construction of a waste water treatment plant in coastal environment, southwestern Nigeria. *Journal of Earth and Atmospheric Research*, 1, 1, 51-60.,
- Oyeyemi K. D., Aizebeokhai A. P., Adagunodo T. A. *et al.* 2017. Subsoil characterization using geoelectrical and geotechnical investigations: implications for foundation studies. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8, 10, 302–314.
- Palacky G. J. 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. In: Nabighian MN (ed) *Electromagnetic methods in applied geophysics*, volume 1, *Society of Economic Geologists (SEG) Investigations in Geophysics*, 3, 53–129
- Pelletier B. & Depinois S. 2020. Prédiction, suivi et retro-calcul des tassements de la centrale nucléaire de Belleville. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Lyon, 1-8.
- Rizzo E., Capozzoli L., De Martino G. *et al.* 2019. Urban geophysical approach to characterize the subsoil of the main square in San Benedetto del Tronto town (Italy). *Engineering Geology*, 257, 105133, 1-9.
- Simon P., Caratini C., Charpy N. *et al.* 1984. Sédimentologie et palynologie du Crétacé terminal et du Tertiaire de la région de Bonoua (Cote d'Ivoire). *Géologie méditerranéenne*, 11, 1, 77-85.

Manuscrit reçu le 11/07/2024
Version révisée acceptée le 21/03/2025
Version finale reçue le 14/04/2025
Mise en ligne le 05/05/2025