

Tomographies de Résistivité Electrique appliquées à l'implantation de forages AEP à Bouna et Doropo dans la région du Bounkani (Nord-est) de la Côte d'Ivoire

[Electrical Resistivity Tomography applied to the installation of AEP boreholes at Bouna and Doropo in the Bounkani region (North-East) of Côte d'Ivoire]

Armel Kouadio KOUAME¹, Marc YOUAN TA^{1,2}, Yapo Assi Martia³, Bertrand Hounnigbo AKOKPONHOU⁴, Omer Zéphir de LASME⁵, Amandine Carine Mbiafeu NJEUGE², Kouamé Loukou Nicolas³, and Yalo Nicaise⁴

¹Laboratory of Soil, Water and Geomaterials Sciences, University Felix Houphouët Boigny of Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

²University Research Center of Remote Sensing and Application (CURAT), University Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Géologie, Ressources Minérales et Energétique, University Felix Houphouët Boigny Abidjan, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire of Applied Hydrology, National Water Institute (INE), University of Abomey-Calavi, 01BP. 526 Cotonou, Benin

⁵Department of Geosciences, Training and Research Unit, University Péléforo Gon Coulibaly, Korhogo, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: To meet this need for permanent water availability for rural populations in the departments of Bouna and Doropo in Bounkani, Côte d'Ivoire (north-east), this study set out to identify ten sites for the installation of future boreholes designed to boost the production of water for human consumption. Five (05) panels of electrical resistivity tomography (ERT) were carried out using a Syscal-Pro Switch 36 resistivity meter (Iris Instruments, France) connected to 04 flutes of 36 metal electrodes regularly spaced 10 metres apart by 1070 m according to the pole-dipole (PD) configuration. The results identified conductive corridors within the crystallophyll basement, corresponding to fractures oriented preferentially E-W, NE-SW and NW-SE. The 2D electrical resistivity tomography panels also reveal a structure composed of two layers (alterites and fissured zone) superimposed on the sound bedrock. Hydrogeological analysis of lithological variations and geometric parameters of structural discontinuities (thickness of alterites, thickness, range of electrical resistivities and extension of fissured zone) have led to the proposal of eleven (11) sites suitable for the installation of high-volume boreholes. These future drilling points will help to alleviate the shortage of drinking water in the targeted localities in the area.

KEYWORDS: Electrical Resistivity Tomography (ERT), groundwater, Fracture, Bouna, Doropo, Ivory Coast.

RESUME: Pour répondre à ce besoin de disponibilité permanente en eau des populations rurales des départements de Bouna et Doropo dans le Bounkani, en Côte d'Ivoire (Nord-est), cette étude s'est proposé d'identifier dix sites pour l'implantation de futurs forages destinés à renforcer la production d'eau pour la consommation humaine. Cinq (05) panneaux de tomographies de résistivité électrique (TRE) ont été réalisés à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro Switch 36 (Iris Instruments, France) connecté à 04 flûtes de 36 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 1070 m selon la configuration pôle-pôle (PD). Les résultats obtenus ont permis d'identifier, au sein du socle cristallophyllien, des couloirs conducteurs qui correspondent aux fractures orientées préférentiellement E-W, NE-SW et NW-SE. Les panneaux de tomographie de résistivité électrique-2D révèlent également une structure composée de deux couches (altérites et zone fissurée) superposés au substratum rocheux sain. L'analyse hydrogéologique des variations lithologiques et des paramètres géométriques discontinuités structurales (épaisseurs d'altérites; épaisseur, gammes de résistivités électriques et extension de zone fissurée) ont permis de proposer onze (11) sites favorables à l'implantation de forages à gros débits d'exploitation en eau. Ces futurs points de forages permettront de pallier au déficit en eau potable dans les localités ciblées de la zone.

MOTS-CLEFS: Tomographie résistivité électrique (TRE), eaux souterraines, Fracture, Bouna, Doropo, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

A l'instar des pays d'Afrique subsaharienne, la question de la disponibilité et de l'approvisionnement en eau potable n'est guère reluisante dans le nord-est de la Côte d'Ivoire. L'inégale répartition de ce patrimoine fragile, le réchauffement climatique de la planète avec son corollaire de désertification et/ou d'inondation, les différentes formes de pollution et le contexte géologique dominé essentiellement par les terrains cristallins et cristallophylliens sont autant de facteurs qui concourent à la raréfaction de cette ressource naturelle dont la demande se fait toujours plus en plus pressante [1]. Dans la région du Bounkani, Nord-est de la Côte d'Ivoire, ces difficultés se posent avec acuité dans les zones rurales: Malgré un réseau hydrographique dense, la quasi-totalité des cours d'eaux de la région tarissent pendant la saison sèche, les rendements des forages baissent considérablement et les populations sont obligées parfois d'adopter des pompes intermittentes pour espérer des remontées d'eau [2]. Dans un tel contexte, la recherche de ressources pérennes capables de résister aux fluctuations saisonnières devient cruciale. Les eaux souterraines sont la seule source d'approvisionnement en eau potable pour les populations locales et ces réserves sont localisées à travers les aquifères isolés de socle granitique fissuré, d'arènes sablo-argileuses et d'alluvions qui présentent une configuration très complexe pour laquelle l'hétérogénéité est a priori non prédictive [3]. Les progrès réalisés dans l'utilisation des données à référence spatiale ont mis en évidence l'utilité de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) comme outils indispensables dans la cartographie des fractures et leurs tendances [4], [1], [5], [6]. Il a été déjà montré comment les images satellitaires et aéromagnétiques sont utilisées pour la cartographie de fractures majeures dans le secteur d'études [6]. L'apport de nouveaux outils et méthodes avec des stratégies d'investigation plus fine comme la tomographie de résistivité électrique (TRE) permettent d'apporter des informations additionnelles et très précises sur la localisation des sites d'intérêt hydrologique. Selon [7], il est indispensable de faire appel à des méthodes complémentaires notamment les méthodes géophysiques non destructives dans la prospection des aquifères du socle. Les tomographies TRE apportent un niveau de définition plus élevé du sous-sol. Par ailleurs, Plusieurs études ont montrés que le succès de l'emplacement d'un forage dépend du fait qu'il intercepte les fractures dans le substratum rocheux et que ce dernier soit recouvert d'une forte épaisseur d'altération qui assure la fonction de stockage des eaux souterraines [8], [9]. Dans cette étude, une tentative est faite pour identifier sur les profils TRE, les sites présentant les indices de productivité. L'objectif principal de ce travail est donc de caractériser la structure interne des aquifères fracturés afin de proposer des sites favorables à l'implantation de forages à gros débits d'exploitation en zone de socle capables de résister aux fluctuations saisonnières extrêmes.

2 CADRE GEOGRAPHIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La zone d'étude couvre un ensemble géographique composé de deux départements: Bouna et Doropo, localisés dans la région du Bounkani au nord-est de la Côte d'Ivoire. Elle est située entre les latitudes 8°31' et 9°58'N et les longitudes 2°35' et 4°19'W et s'étend sur une superficie de 16 318.9 km² soit 5 % de la superficie nationale (figure 1). Toutefois, plus la moitié de sa superficie est occupée par le Parc national de la Comoé (PNC) qui se déploie sur 11 090 km². La population y est estimée à 442 982 habitants [10]. Malgré son étendue, la zone d'étude se trouve entièrement dans un milieu physique homogène. Le relief est principalement constitué de plateaux et de plaines, subhorizontaux, extrêmement monotones. On note cependant de hautes collines et barres de roches vertes d'orientation nord-sud s'élevant à 500-600 mètres dans le nord-ouest (Monts Yévélé et Wabélé). Le réseau hydrographique présente une architecture très dense marquée par les affluents des deux principaux cours d'eaux de la région que sont la Comoé et la volta noire (figure 1). Géologiquement, la zone se situe dans le domaine paléoprotérozoïque. Elle est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques classées répartis de façon inégale dans le domaine quaternaire (Holocène) et le domaine birimien [11], [12] (figure 2).

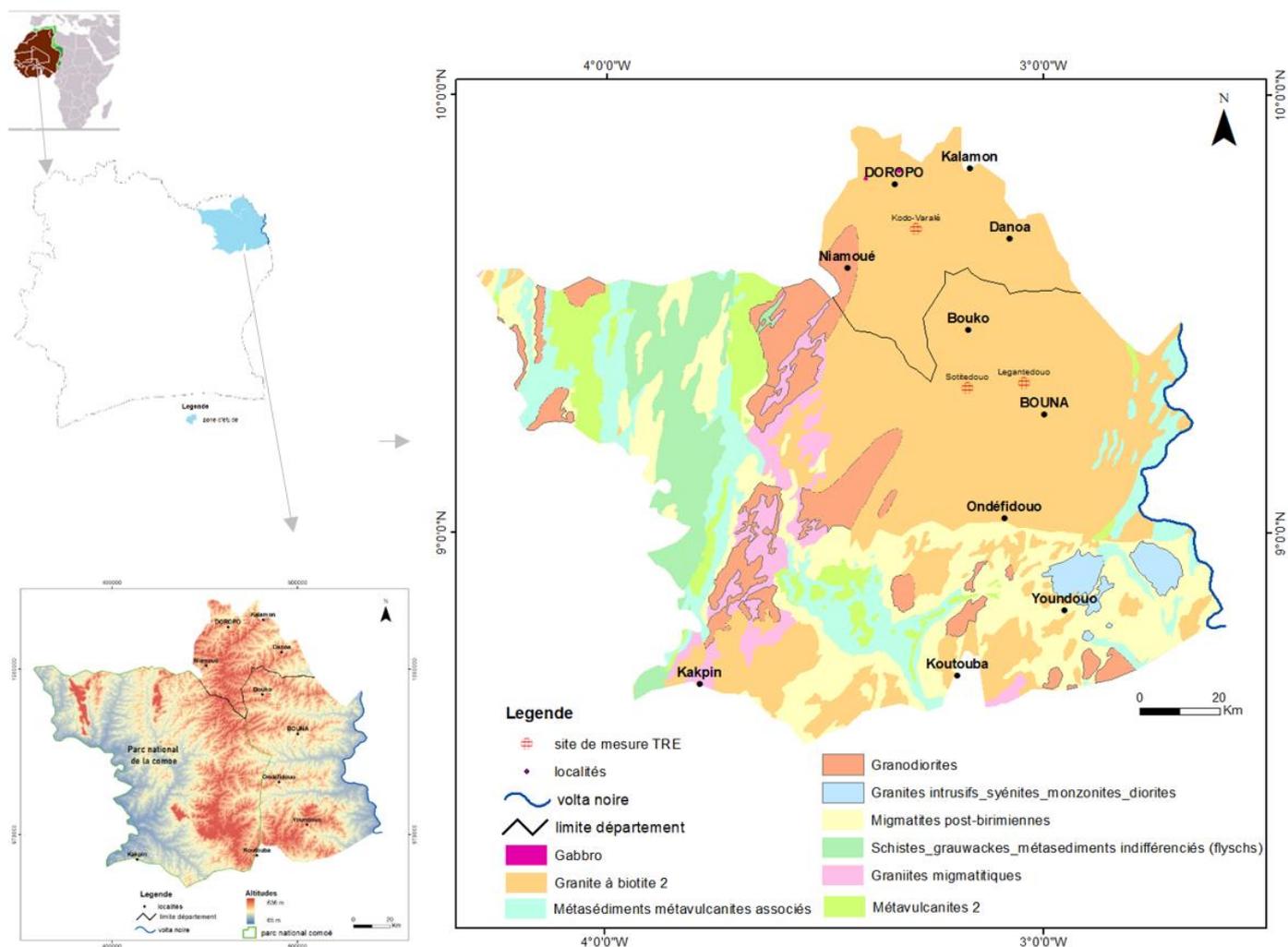


Fig. 1. Présentation de la zone d'étude

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 DONNÉES ET ÉQUIPEMENTS UTILISÉS

L'acquisition des panneaux électriques a été effectuée avec un système multi-électrodes automatique comprenant une boîte de commutation, un résistivimètre Syscal-Pro Switch 36 (Iris Instruments, France), plusieurs câbles de 18 sorties le tout étant paramétré à l'aide d'un ordinateur. Des tiges métalliques en acier placées à intervalles réguliers de 10 mètres sur 1070 m constituent les électrodes. Elles sont toutes connectées à une sortie individuelle située sur les câbles et, suivant leur position, permettent soit d'injecter le courant dans le sol, soit de mesurer un potentiel. Le reste du matériel de mesure est composé de flûtes et connecteurs de flûtes, de files d'attaches plastiques, de décimètre et d'équipements de terrain (marteaux, GPS, véhicule etc...).

3.2 MÉTHODES D'ACQUISITION DES PANNEAUX ÉLECTRIQUES

3.2.1 ACQUISITION DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ

L'acquisition des données de terrain s'est faite le 17 mai 2021, selon la procédure de « roll-along » qui correspond à une succession de sondages électriques et de trainés électriques les uns à côté des autres par recouvrement ½ le long de la ligne des électrodes. Pour des raisons d'investigation de grandes profondeurs et en se référant aux travaux réalisés en milieux cristallins et cristallophylliens [13], [14], [5], c'est la configuration Pôle-Dipôle qui a été adoptée. Avec cette géométrie, les dipôles de réception MN et d'injection AB sont séparés, la profondeur d'investigation est plus grande [15] et elle nécessite de mettre deux électrodes théoriquement à l'infini.

3.2.2 ACQUISITION DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ

Les données acquises sur de terrain ont subies une série de prétraitements et des traitements avant leurs interprétations. Un filtrage a été opéré à l'aide du programme Prosys II (version 2.29, Iris Instruments) selon le paramètre de qualité, $Q (< 5\%)$ et le niveau de voltage $V (> 0.3 \text{ mV})$.

Les données de résistivité obtenues à l'issue du filtrage sont représentées sous la forme d'une pseudo-section qui met en évidence des résistivités apparentes, (ρ_a). Celles-ci ne sont pas directement interprétables et doivent faire l'objet d'un traitement appelé inversion. Ce processus de modélisation réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv permet, par l'application d'un algorithme mathématique d'optimisation du jeu de données, le calcul des résistivités modélisées par la méthode des moindres carrés (least-squares inversion). Le pourcentage d'erreur RMS (Root Mean Square) établi à l'issue de la convergence entre les mesures effectuées sur le terrain (résistivités apparentes mesurées) et les résistivités apparentes calculées sur le modèle discrétisé définit la compatibilité du modèle avec le jeu de données. La littérature s'accorde à considérer les modèles finaux comme fiables lorsque l'erreur est inférieure à 5 % [16]. Ce sont au total quatre (4) profils de résistivité électrique qui ont été réalisées dans trois (03) localités retenues en fonction de l'occurrence des fractures repérées sur les images satellitaires et aéromagnétiques et surtout des de la proximité des localités riveraines (tableau 1). Ces profils ont été disposés de sorte à recouper perpendiculairement ces fractures.

Tableau 1. Sites sélectionnés pour la TRE

| Sites | Coordonnées UTM | | TRE réalisées | Longueur (m) | Direction |
|-------------|-----------------|---------|---------------|--------------|-----------|
| | X (m) | Y (m) | | | |
| Legantedouo | 489620 | 1039818 | 2 | 1 070 | NW-SE |
| Kodo | 468341 | 1069335 | 1 | 1 200 | NE-SW |
| Sotitedouo | 498407 | 1023719 | 1 | 1 200 | NW-SE |

3.2.3 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION HYDROGÉOPHYSIQUE DES AQUIFÈRES FRACTURÉS

Les résultats après inversion des données de résistivité apparente donnent des images électriques de résistivités "vraie du sous-sol qui permet à la fois une interprétation qualitative des différentes unités géologiques des sections 2D, la caractérisation et la validation des discontinuités structurales, l'interprétation hydrogéologique des modèles géophysiques 2D et l'identification des sites favorables à l'implantation de forages à gros débits d'exploitation.

L'interprétation des unités géologiques se fonde sur la moyenne des gammes de résistivité obtenues à partir des diagraphies de résistivité électrique réalisées à Sanon (Burkina Faso) localisé le bassin de la volta dans le même contexte géologique que la zone d'étude [17], [18]. Ces gammes de résistivité sont en accord avec la table des résistivités des roches et minéraux établie par [19]. Ainsi ce sont les valeurs 200 et 1666 $\Omega.m$ qui ont été choisis comme limite afin de distinguer chacune des trois principales couches (altérites, zone fissurée et roche saine). L'analyse 2D des sections de l'imagerie électrique a permis de discriminer aisément des discontinuités structurales importantes qui peuvent être des fractures, des contacts géologiques et les zones filoniennes. Sur les sections, ces discontinuités sont représentées par des couloirs souvent remplies par des produits d'altération marquées par de faibles valeurs de résistivité (inférieur à 200 $\Omega.m$) enfoncés dans les couches successives. L'interprétation hydrogéologique des imageries haute définition des différents panneaux électriques de la TRE a consisté à faire une corrélation des paramètres géophysiques (résistivité) avec les différents compartiments constituant la zone de socle dans le but de mieux apprécier les couloirs.

L'identification de sites favorables à l'implantation de forages a obéi à un certain nombre de critères visant à cibler dans un premier temps les séries représentant une succession de couches aquifère avec une épaisse couche d'altérites (fonction de stockage d'eau) et une bonne extension et épaisseur de la zone fissurée/fracturée [9], [5]. Il a consisté également à éviter les discontinuités verticales marquées par les résistivités trop faibles traduisant de probables terrains colmatés par les argiles tout en privilégiant la localisation en aval des bassin-versant hydrogéologiques [20]. Aussi, la présence d'une d'enclaves de faibles résistivités en profondeur dans la zone fissurée est considérée comme une zone préférentielle dite zone humide indiquant le stockage des eaux souterraines. L'analyse comparative des paramètres géométriques des anomalies sur les modèles hydrogéologiques (épaisseurs d'altérites; épaisseur, gammes de résistivités électriques et extension de zone fissurée; direction des axes conducteurs) a permis d'identifier les sites préférentielles des futures implantations dans chaque localité.

4 RESULTATS ET INTERPRETATION

4.1 ANALYSE 2D ET INTERPRÉTATION DES SECTIONS TRE

Les résultats après inversion des données de résistivité apparente donnent des images électriques de résistivités vraies du sous-sol (figure 2), ce qui permet une interprétation quantitative des données.

On a systématiquement observé, sur chacune des images électriques, la présence de zones très conductrices dont la résistivité est très faible représentées en des tons de bleu sur toutes les images électriques ($< 200 \Omega.m$) et dont l'extension latérale et verticale est variable. Ces zones, faiblement résistantes correspondent avec forte probabilité aux niveaux argileux humides et aux altérites. Le deuxième niveau représenté en tranches jaune-orangé apparaît dans les images électriques comme une plage de valeurs moyennes de résistivité (200 à $1600 \Omega.m$). Ce niveau correspond à la zone fissurée et est aussi caractérisé par une extension variable latéralement et verticalement. La troisième catégorie de zones d'anomalies de résistivité représentées par les couleurs rouges-violet ($> 1600 \Omega.m$) au bas de toutes les sections forme le socle sain.

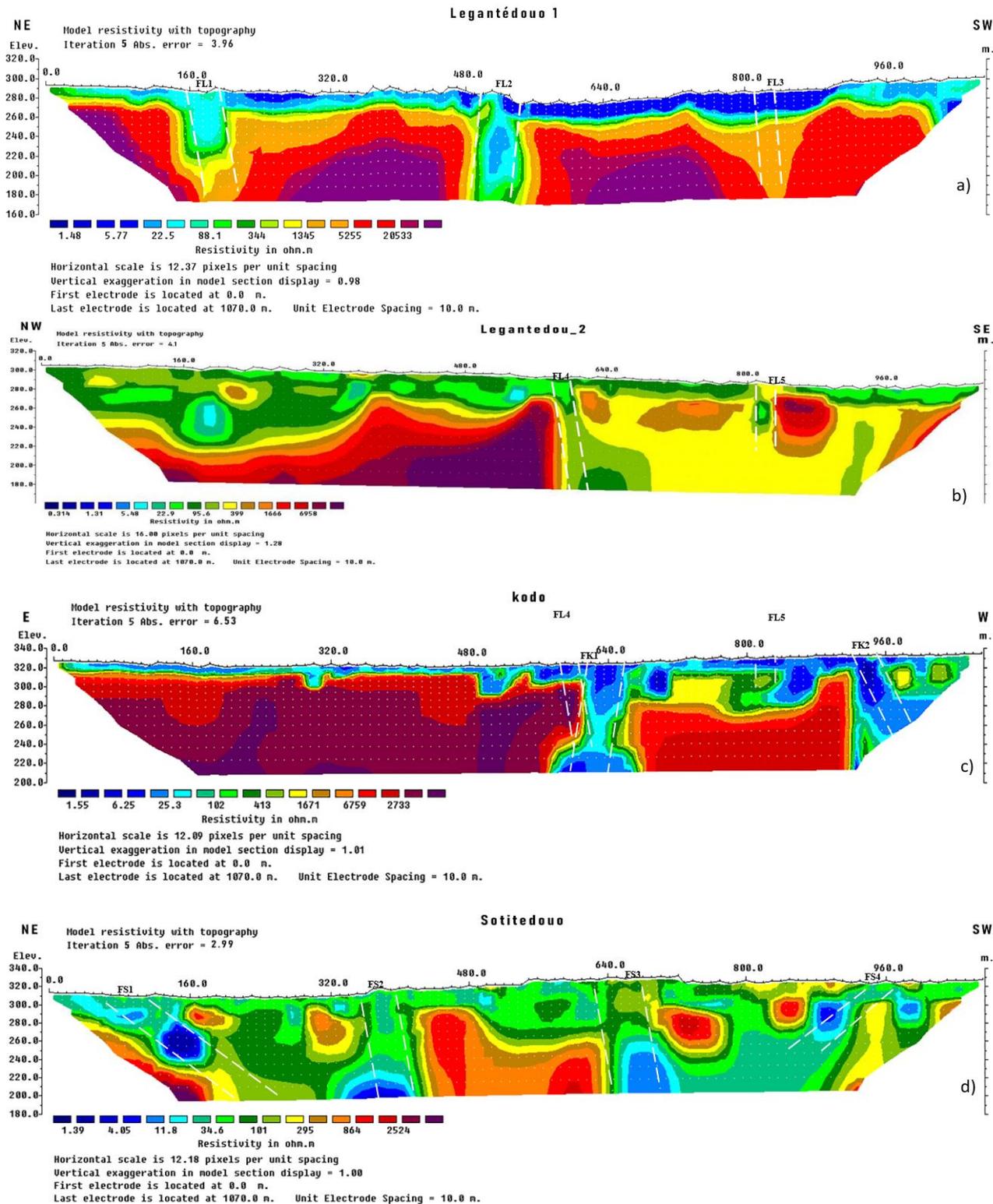


Fig. 2. Panneaux électriques caractérisant les structures régionales: a) Legantédouo; b) Kodo; c) Sotitedouo

4.2 CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE ET VALIDATION DES DISCONTINUITÉS STRUCTURALES

L'analyse 2D des sections de l'imagerie électrique permet de discriminer aisément des discontinuités géologiques importantes (figure 2). Ces discontinuités peuvent être des fractures, des contacts géologiques et les zones filoniennes. Sur les sections, ces discontinuités sont représentées par des couloirs souvent remplis par des produits d'altération marquées par de faibles valeurs de résistivité (inférieur à 1000 $\Omega.m$) enfoncés dans les couches successives.

Les deux sections réalisées dans les granites de Legantédouo rendent compte de la présence de limites franches. Sur les profils de Legantédouo 1 (figure 2a), trois (03) couloirs (FL1, FL2 et FL3) bien marqués au niveau des abscisses 150-190 m, 500-550 m et 790-810 m. Les deux premiers sont orientés NE-SW et le troisième EW. Ils présentent une grande extension favorable à une bonne accumulation des eaux. Le second profil de Legantédouo 2 (figure 2b) quant à lui, présente deux couloirs (FL4 et FL5) très expressifs au niveau des abscisses 580-600 m et 810-830 m. Le profil réalisé à Kodo (figure 2c) d'une longueur de 1070 m montrent l'existence de deux zones conductrices avec faibles résistivités observée entre les abscisses 620 - 660 m et 930 - 960 m. Ces zones conductrices correspondent à des débris et des produits d'altération argileux. Les basses résistivités peuvent aussi indiquer la saturation en eau. L'extension moyenne de cette zone conductrice est de l'ordre de 50 m. La zone conductrice semble bien se corrélérer avec les discontinuités majeurs observés sur les images aéromagnétiques et les indices de terrain. Une alternance de zone résistante avec fortes résistivités ($>$ à 2000 Ohm.m) est mise en évidence. Ces zones résistantes peuvent être attribuées à des granites plus compacts et secs. La section de Sotitédouo (figure 2d) présente quatre couloirs (FS1, FS2, FS3 et FS4) situés respectivement entre les abscisses 120 – 160 m, 340 – 420 m, 630 – 690 m et 940 – 970 m) qui mettent en évidence des anomalies pouvant atteindre 110 m de profondeur orienté NS et NW-SE. Les zones de très faibles résistivités sur ces axes conducteurs traduisent une saturation en eau.

Les orientations de ces différents axes sont semblables à celles des linéaments issus du traitement des images satellitaires et aéromagnétique visés par les panneaux. Le tableau 2 résume les caractéristiques géométriques des zones de fractures identifiées sur les sections de TRE.

Tableau 2. *caractéristiques géométriques des zones de fractures: x = distance sur le profil; Gr = Gamme de résistivité; EF = épaisseur de la zone fracturée et ZF = extension de la zone fissurée*

| Fracture | x (m) | Gr ($\Omega.m$) | Coordonnées | | EF (m) | ZF (m) | O |
|----------|-------|-------------------|-------------|---------|--------|--------|-------|
| | | | X (m) | Y (m) | | | |
| FL1 | 180 | 30-5255 | 494628 | 1035545 | 30 | 40 | NO-SE |
| FL2 | 510 | 1,48-344 | 494802 | 1035266 | 0 | 40 | NS |
| FL3 | 830 | 1,48-5255 | 494900 | 1034963 | 70 | 30 | NO-SE |
| FL4 | 600 | 30-95,6 | 495148 | 1035159 | 00 | 20 | NO-SE |
| FL5 | 820 | 30-399 | 495285 | 1034970 | 40 | 20 | NS |
| FK1 | 640 | 1,55-102 | 468608 | 1069526 | 0 | 40 | NO-SE |
| FK2 | 930 | 1,55-25.3 | 468425 | 1069856 | 0 | 30 | NE-SO |
| FS1 | 100 | 1,39-295 | 481022 | 1030967 | 30 | 30 | NE-SO |
| FS2 | 580 | 1,39-50 | 481392 | 1030658 | 0 | 40 | NO-SE |
| FS3 | 650 | 11,8-200 | 481436 | 1030617 | 0 | 50 | NO-SE |
| FS4 | 950 | 4,05-34,6 | 481673 | 1030415 | 0 | 20 | N-S |

4.3 INTERPRÉTATION HYDROGÉOPHYSIQUE DES MODÈLES GÉOPHYSIQUES 2D

La corrélation établie entre les paramètres géophysiques (résistivité) et les différents unités géologiques de la zone a permis de réaliser les modèles hydrogéologiques interprétés (figures 3). Il ressort les informations ci-après: (i) la présence d'une épaisseur d'altération dans la zone qui varie de 8 m (Kodo) à 60 m (Legantedouo_2 et Kodo); (ii) une zone de fracture qui se traduit par une zone fissurée altérée bien développée et (iii) la roche saine où se situe localement et très probablement des failles ayant permis l'approfondissement de la zone fissurée altérée. Un recouvrement résistant (résistivité supérieure à 228 $\Omega.m$) apparaît au niveau des profils de Legantedouo et Sotitedouo au nord de la zone d'étude, correspondant aux carapaces indurées de cuirasse latéritiques secs.

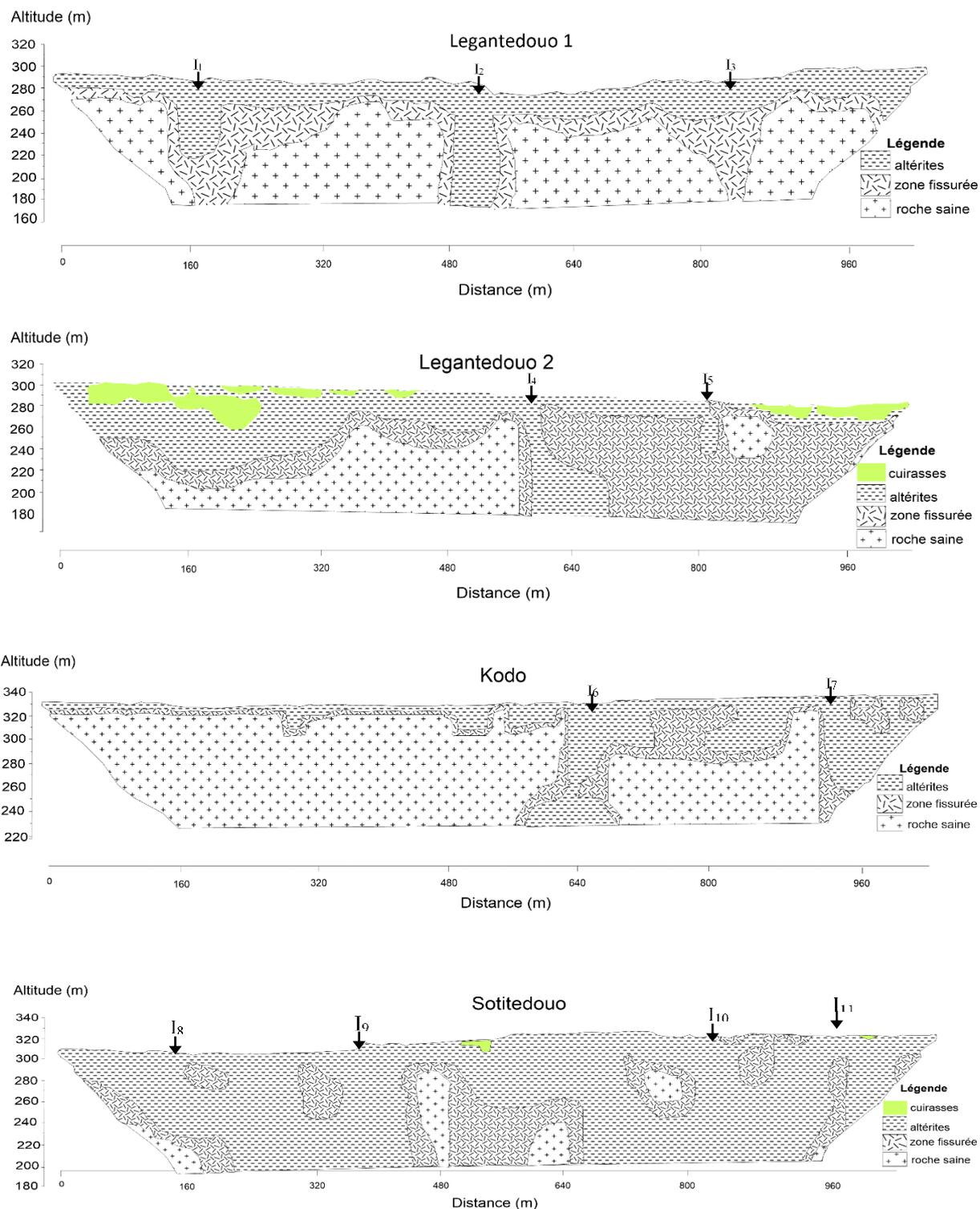


Fig. 3. Modèles hydrogéologiques des sections TRE et potentiels points d'implantation de forages à Legantedouo, Kodo et Sotitedouo

4.4 IDENTIFICATION DE SITES FAVORABLES À L'IMPLANTATION DE FORAGES AEP

Une analyse comparative des propriétés et paramètres géométriques des anomalies sur les sections TRE: épaisseurs d'altérites; épaisseur, gammes de résistivités électriques et extension de zone fissurée; orientation des axes conducteurs (tableau 3) a permis d'identifier des sites favorables à l'implantation de futures forages AEP à gros débit d'exploitation.

Tableau 3. Synthèse des sites favorables aux implantations: x = distance sur le profil; Gr = Gamme de résistivité; EA = épaisseur des altérites; EF = épaisseur de la zone fracturée et ZF = extension de la zone fissurée

| Fracture | Potentielles implantations | x (m) | Gr (Ω .m) | Coordonnées | | EA (m) | EF (m) | ZF (m) | O |
|----------|----------------------------|-------|-------------------|-------------|---------|--------|--------|--------|-------|
| | | | | X (m) | Y (m) | | | | |
| FL1 | I_1 | 180 | 30-5255 | 494628 | 1035545 | 60 | 40 | 40 | NO-SE |
| FL2 | I_2 | 510 | 1,48-344 | 494802 | 1035266 | 100 | 00 | 40 | NS |
| FL3 | I_3 | 830 | 1,48-5255 | 494900 | 1034963 | 30 | 70 | 30 | NO-SE |
| FL4 | I_4 | 600 | 30-95,6 | 495148 | 1035159 | 120 | 00 | 20 | NO-SE |
| FL5 | I_5 | 820 | 30-399 | 495285 | 1034970 | 50 | 70 | 20 | NS |
| FK1 | I_6 | 640 | 1,55-102 | 468608 | 1069526 | 80 | 30 | 40 | NO-SE |
| FK2 | I_7 | 930 | 1,55-25.3 | 468425 | 1069856 | 80 | 30 | 30 | NE-SO |
| FS1 | I_8 | 100 | 1,39-295 | 481022 | 1030967 | 90 | 20 | 30 | NE-SO |
| FS2 | I_9 | 580 | 1,39-50 | 481392 | 1030658 | 100 | 00 | 40 | NO-SE |
| FS3 | I_{10} | 650 | 11,8-200 | 481436 | 1030617 | 90 | 10 | 50 | NO-SE |
| FS4 | I_{11} | 950 | 4,05-34,6 | 481673 | 1030415 | 20 | 90 | 20 | N-S |

 Bon

 Moyen

 Faible

A Legantedouo, Toutes les implantations présentent des épaisseurs d'altérites acceptables (> 24,08), la moyenne à l'échelle du bassin (tableau 3) pouvant assurer la fonction de stockage de eaux souterraines et des extensions latérales de la zone fracturée relativement acceptables (30 m en moyenne). En dehors de I_2 et I_4 , l'épaisseur de la zone de fissures est bonne pour les autres implantations de la localité. Pour ces dernières, les dimensions des réservoirs sont les plus probantes pour l'obtention de forages à gros débit. Aussi toutes les implantations ciblent des fractures dont les orientations sont considérées comme les plus productives de la zone. Par ailleurs, les implantations I_1 , I_3 et I_4 ciblent des fractures qui épousent des directions dites productives dans la zone. Au regard de ces caractéristiques, I_1 et I_3 à un moindre niveau sont les implantations jugées préférentielles à Legantedouo. Parmi les deux sites potentiels dans la localité de Kodo, l'implantation I_6 offre les meilleures caractéristiques de sites favorables à la présence d'eau avec une épaisseur et extension de la zone fissurée ainsi que une épaisseur des altérites largement au-dessus de la moyenne. Dans la localité de Sotitédouo, toutes les implantations excepté I_{11} présentent des épaisseurs d'altérites et des extensions de la zone fracturée acceptables. Parmi elles, seule I_8 présente une assez-bonne épaisseur de la zone fracturée. Elle est donc considérée comme l'implantation préférentielle dans la zone.

5 DISCUSSION

Bien que la cartographie structurale dans les milieux cristallins et cristallophylliens donne de précieuses informations pour la recherche d'eau souterraine, il apparait nécessaire de confirmer et de caractériser la structure à l'échelle locale avant d'entreprendre les travaux d'implantation de forages [21]. Les méthodes géophysiques sont classiquement employées afin d'identifier la structure locale de la zone fracturée. En Afrique de l'Ouest, les méthodes géophysiques les plus utilisées dans la recherche d'eau sont des méthodes électriques (trainé et sondage électrique) et l'électromagnétisme [22], [21], [23]. En Côte d'Ivoire, l'utilisation de la géophysique a débuté depuis les années 1960 avant de connaître son développement en début des années 1990 [24] 25], [26] avec l'introduction des méthodes électriques et magnétiques appliquées à la recherche minière et la réalisation de forages captant les fractures profondes de socle.

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait appel à la tomographie de résistivité électrique (ERT, Electrical Resistivity Tomography) très peu ou pas utilisée dans les projets de prospection des ressources en eaux souterraines en Côte d'Ivoire. Elle constitue une innovation et a été utilisée pour la validation des fractures au sol, mais aussi pour la caractérisation des paramètres géométriques (largeur, épaisseur du recouvrement, profondeur,...) de l'aquifère. Cette méthode convient du fait que l'identification des aquifères productifs en zone de socle est très contraignante à cause de leur forte hétérogénéité et cela nécessite l'apport des mesures géophysiques. Selon [27], la description détaillée des structures aquifères par la géologie et par l'imagerie géophysique TRE est essentiel pour la compréhension des réservoirs fracturés. C'est le dispositif de type Pôle-dipôle (PD) qui a été utilisé dans cette étude pour effectuer les mesures. Les travaux [27], [28] réalisés dans les mêmes contextes ont aussi utilisé ce dispositif et il a prouvé son efficacité dans la caractérisation 2D des aquifères fracturés. Selon [28] le dispositif (PD) est bien approprié pour étudier jusqu'à 100 m de profondeur les formations et les structures géologiques.

L'analyse des panneaux électriques réalisés sur les sites sélectionnés dans la zone d'étude a permis de mettre en évidence jusqu'à 120 m de profondeur, plusieurs structures linéaires et couloirs aquifères susceptibles d'être des réservoirs potentiellement actifs. En effet, l'ensemble des structures linéaires repérées sur les panneaux électriques sont orientées principalement NW-SE et NE-SW. Ces différentes directions sont en accords avec les principales directions repérées sur les images satellitaires et aéromagnétiques. La concordance entre les directions principales des structures géologiques identifiées sur les panneaux électriques avec la carte structurale témoigne que les linéaments extraits des images

satellitaires sont vraisemblablement associés à des fractures. Ainsi, contrairement aux travaux de [14], l'utilisation de la TRE dans la présente étude a permis de valider certains linéaments. Tout comme dans le socle cristallin du département de la Donga au Bénin [5], la tomographie de résistivité électrique à l'aide du dispositif Pôle-Dipôle a également fourni de très bons résultats. On note également de bons résultats dans plusieurs régions du monde notamment dans le Massif Armoricaire situé au nord-ouest de la France avec [27]. L'utilisation de l'imagerie géophysique de la TRE dans 04 localités dans la région du Bounkani a permis également de déterminer avec précision trois couches: la zone altérée (ZA) ou altérites au-dessus de la zone fracturée au-dessus du socle sain. En effet, l'épaisseur moyenne de la ZA sur tous les panneaux électriques est comprise en moyenne entre 8 et 60 m avec des résistivités inférieures à 200 Ω .m. De très importantes couches altérites pouvant atteindre 100 m au-dessus de la zone fracturée ont été enregistrées. Quant à l'épaisseur de l'horizon fracturé, elle est très variable sur les différents profils. Elle a été estimée entre 5 et 100 m avec des résistivités moyennes comprises entre 200 et 1666 Ω .m. la troisième couche avec des résistivités très élevées pouvant aller au-delà de 5000 Ω .m témoigne de la nature saine de la roche (RS). Les fractures identifiées ont principalement été caractérisées en fonction des trois compartiments: Zone des altérites, zone fissurée et la Roche saine. De nombreux travaux similaires de différents auteurs: [29], [14], [28], réalisés dans le même contexte ont abouti à ce type de caractérisation dans les roches cristallines. L'application de la TRE dans les départements de Bouna et Doropo a permis de mieux caractériser la géométrie des principales cibles hydrogéologiques. Ainsi, 12 sites d'implantation ont été proposés dans au terme de cette étude consécutivement à la caractérisation de l'environnement immédiat. Plusieurs travaux réalisés dans le socle Précambrien de l'Afrique de l'Ouest témoignent que le taux de succès de forage [30], [28] et la productivité des forages [31], [30] sont liés à l'utilisation des méthodes géophysiques.

6 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de caractériser la structure interne des aquifères fracturés afin de proposer des sites favorables à l'implantation de forages à gros débits d'exploitation en zone de socle. Elle a prouvé l'utilité de la tomographie de résistivité électrique-2D dans la caractérisation des aquifères de socle. Les résistivités électriques le long des profils réalisés révèlent une structure composée de deux couches (altérites et zone fissurée) superposés au substratum rocheux sain. Elles ont permis également la mise en évidence des variations lithologiques et des discontinuités pouvant être attribuées à la présence de fractures, des contacts géologiques et les zones filoniennes. Onze (11) des couloirs identifiés présentent des caractéristiques favorables à l'implantation de forages à gros débits. Les résultats préliminaires de cette campagne de prospection géophysique dans les départements de Bouna et Doropo ont permis de montrer que: La tomographie de résistivité électrique apparaît comme une méthode géophysique particulièrement intéressante pour la cartographie des sites hydrauliques actifs. Il serait intéressant de réaliser régulièrement de nouvelles compagnes de prospection géophysique supplémentaires (Résonance magnétique des protons (RMP)) pour quantifier ces ressources.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Swiss Centre for Scientific Research for the funding of project N°234/2020 between the Strategic Research Support Program (PASRES) and the Soil, Water and Geomaterials Sciences Laboratory (SSEG) of the UFR of Earth Sciences and Mining Resources (STRM), Abidjan, Côte d'Ivoire.

REFERENCES

- [1] Youan Ta M. Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236 p., 2008.
- [2] Armel Kouadio KOUAME, Marc YOUAN TA, Bertrand Hounignbo AKOKPONHOU, Omer Zéphir de Lasmé, Fernand Koffi KOUAME, Contribution of LandSat OLI imagery and field indices to the structural cartography of the aquifer system of Black Volta catchment in Côte D'Ivoire, International Journal of Innovation and Applied Studies, IJIAS, ISSN: 2028-9324, Vol. 39, No. 2, (sous presse).
- [3] Biemi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. ès Sc. Nat., Université. Abidjan, 493 p.
- [4] Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody, 430p.
- [5] Akokponhou H. B., Yalo N., Lasmé T., Youan TA M., Alassane A., Kouamé K. J., Akokponhou Y. N., Hounton C.C., Suanon F. (2017). Contribution of Remote Sensing to the Structural Mapping of Aquifers with Large Water Flows in the Crystalline Hard-Rock in the Department of Donga (North-West of Benin). Int. J. of Emerging Tech. and Adv. Eng., Vol. 7, p.392-403.
- [6] Armel. K. Kouame, Marc Youan Ta, O. Zéphir De Lasmé, Derving Baka, Carine. A. M. Njeugeut, Fernand K. Kouame, Analysis of Fracture Networks of the Black Volta Catchment in Côte D'ivoire, 2019; Journal of Geography, Environment and Earth Science International (JGEESI) ISSN: 2454-7352, n°46635, Feb. 2019, 1-14p.

- [7] Guerin R. Et Chalikakis K. (2015). Les outils pour détecter les ressources hydrologiques. Eau à découvert. Chapitre III.28, p.148-149, CNRS, France.
- [8] Olayinka Ai., Yaramanci U. (2000). Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting* 48 (2), p. 293-316.
- [9] Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse de doctorat Université de Poitiers, 272 p.
- [10] Recensement Général de la Population et de l'Habitat, INS, 2021.
- [11] Bessoles B. (1977). Géologie de l'Afrique: Le craton Ouest-africain. Mémoire. B.R.G.M., France, n° 88, 403 p.
- [12] Lüdtke G., Hirdes W., Konan G., Kone Y., Yao C., Diarra S. et Zambélé Z. Géologie de la région haute Comoé nord, avec carte géologique 1/100000. Bulletin n°1, ed.: République du Côte d'Ivoire; Ministère des ressources minières et pétrolières.; direction de la géologie, 178.
- [13] Barker R, Moore J (1998) The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge* 17: 1454–1458.
- [14] Soro D.D., Koita M., Biaou C.A., Outoumbe E., Vouillamoz J.-M., Yacouba H., Guerin, R. (2017). Geophysical demonstration of the absence of correlation between lineaments and hydrogeologically useful fractures: case study of the Sanon hard rock aquifer (central northern Burkina Faso). *J. Afr. Earth Sci.* pp. 842-852.
- [15] Loke MH (2015) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, E-mail: drmhloke@yahoo.com, geotomo@gmail.com, p 176.
- [16] Loke MH (2014) Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method, geoelectrical imaging 2D & 3D, GEOTOMO SOFTWARE, Malaysia.
- [17] Thiéblemont D, Goujou JC, Egal E, Cocherie A, Delor C, Lafon JM, Fanning CM. 2004. Archean evolution of the Leo Rise and its Eburnean reworking. *Journal of African Earth Sciences* 39 (3–5): 97–104.
- [18] Lompo M. 2010. Paleoproterozoic structural evolution of the Man-Leo Shield (West Africa) Key structures for vertical to transcurrent tectonics. *Journal of African Earth Sciences* 58 (1): 19–36.
- [19] Loke, M.H., (2011). Electrical resistivity surveys and data interpretation. in Gupta, H (ed.), *Solid Earth Geophysics Encyclopaedia* (2nd Edition) «Electrical & Electromagnetic» Springer-Verlag, pg. 276-283.
- [20] Baltassat J-M, Maurice B., Reninger P-A (2017). Tomographies de résistivité électrique appliquée à l'implantation d forages AEP sur sites à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP- 67169-FR, 71 p., 32ill., 4 tabl., 14 ann.
- [21] Adepelumi A. A., Yi M. J., Kim J. H., Ako B. D., Son J. S. (2006). Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 14 (7), p. 1284-1306.
- [22] Koussoube Y, Savadogo A. N., Nakolendousse S. (2003). Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de Bidi, province du Yatenga)«, *Revue de Télédétection*, vol. 3, n° 5, p. 419-427.
- [23] Coulibaly A. (2014). Contribution de la méthode de résistivité électrique (Traînés et Sondages électriques) à la localisation d'aquifères en zone de socle cristallin et cristallophyllien: cas de la région de Tanda, (Nord-est de la Côte d'Ivoire) Thèse de doctorat. Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire). 211p.
- [24] K. E. G. Kouakou, B. C. Sombo, Z. B. Digbehi, F. W. Kouassi, A. P. Sombo Et L. N. Kouame, Utilisation de la prospection géophysique par résistivité électrique pour la recherche d'eau souterraine dans le département de Tanda (Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 83, N° 2 (2012) 230– 244.
- [25] Sombo A. P. Application des méthodes de résistivités électriques dans la détermination et la caractérisation des aquifères de socle en Côte d'Ivoire. Cas des départements de Sikensi et de Tiassale (Sud de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 20.
- [26] A. YAPO, A. P. SOMBO and K. F. TANO, Lithostructural mapping by geophysical imagery of a granite deposit at Gbamakro in the department of Bouaké (Central Côte d'Ivoire) *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*. Vol. 7, Issue 5 Ser. I (2019) 10– 18.
- [27] Roques C. (2013): Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin: Implications en termes de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn. Thèse de doctorat Université de Rennes 285p.
- [28] Alle I. C., Descloitres M., Vouillamoz Jm., Yalo N., Lawson F.M.A., Adihou A. C., (2018). Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa, *Journal of African Earth Sciences* 139, p. 341-353.
- [29] Descloitres M., Ruiz L., Sekhar M., Legchenko A., Braun J.-J., Mohan Kumar M. S., Subramanian S. (2008). Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrological Processes*, 22 (3), p. 384-394.
- [30] Vouillamoz JM, Lawson FMA, Yalo N, Descloitres M. 2015. Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. *Journal of Hydrology* 520: 379–386.
- [31] Dibi B., Inza D., Goula B.T.A., Savane I. et Biemi J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences & Technologie*, Vol. 13, pp. 22-31.