

Tomographie électrique et estimation des réserves de Granite pour une exploitation de carrière à Brofodoume, Sud-Est de la Côte d'Ivoire

DJROH Simon Pierre^{1,2*}, AKA Ehui Beh Jean Constantin¹, OUATTARA Yacouba¹, GNOLEBA Serge P. Déguine³, AHADÉ Yaba Mariana Aimée^{1,2}, KOUAME Loukou Nicolas¹.

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.

² Bureau de Recherche Géophysique Côte d'Ivoire, 01 BP: 4765 Abidjan 01, Cocody M'Badon, Côte d'Ivoire.

³ Ministère des Mines et de la géologie, District de Yamoussoukro, BP: 772 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

* Auteur Correspondant: DJROH Simon Pierre

email: djrohsp@gmail.com

ORCID iD: 0000-0002-1964-782X

Résumé

La quantification de matériaux granitiques est primordiale pour une exploitation rationnelle de carrière afin de fournir les granulats nécessaires pour les travaux d'infrastructure pour l'expansion de la ville d'Abidjan. Cette étude, réalisée à Brofodoumé, présente une autre approche dans l'évaluation du potentiel granitique par la tomographie électrique 2D. Cette technique consiste à explorer le sous-sol par la mesure des contrastes de résistivité électrique avec la configuration poly-pôles à pas multiples. Les résultats obtenus sont des sections images 2D dont l'analyse montre que la profondeur du toit granitique serait comprise entre 0,2 et 60 mètres. Ils relèvent également la présence de quelques fractures notamment des discontinuités NW-SE à ~ 20 m de profondeur, qui pourraient limiter son exploitation. Le modèle tridimensionnel (3D) expose un granite de forme irrégulière, sub-affleurent sur la bordure occidentale du prospect et estime son potentiel exploitable à ~ 7 millions de tonnes.

Mots-clés : Granite, Tomographie 2D, Modélisation 3D, Brofodoumé, Côte d'Ivoire.

Abstract

Quantification of granitic materials is essential for rational quarrying to provide the aggregates needed for infrastructure works for the expansion of the city of Abidjan. This study, carried out in Brofodoumé, presents an alternative approach to the evaluation of the economic potential of a granitic (felsic) pluton using 2D electrical tomography. This technique consists of exploring the subsurface by measuring electrical resistivity contrasts with the multi-step poly-pole configuration. The results obtained are 2D image sections whose analysis shows that the depth of the granitic roof is between 0.2 and 60 metres. They also show the presence of some fractures notably a NW—SE discontinuity at ~ 20 m depth with hydrogeological potential that could limit its exploitation. The three-dimensional (3D) model shows an irregularly shaped granite, sub-flush on the western edge of the prospect and estimates its exploitable potential at ~ 7 million tonnes.

Keywords : Granite, 2D tomography, 3D modelling, Brofodoume, Côte d'Ivoire.

Received: 01/09/2022

Accepted: 13/09/2022

DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/jcas.v18i2.4>

© The Authors. This work is published under the Creative Commons Attribution 4.0 International Licence.

1. Introduction

En Afrique de l'Ouest tout comme en Côte d'Ivoire, plusieurs études ont été menées sur les granitoïdes du Paléoprotérozoïque (Junner, 1940 ; Bodin, 1951 ; Arnould, 1961 ; Koffi *et al.*, 2013) pour leurs classifications selon les critères pétrographiques, géochimiques, géochronologiques et géotectoniques (Ouattara et Koffi, 2014). Ces roches présentent un intérêt économique dans le développement industriel, l'habitat et des grands travaux (Berton et Primel, 1983 ; Benbaqqal *et al.*, 2016 ; Assandé *et al.*, 2022). A cet effet, suite aux réformes structurelles de l'Etat ivoirien pour réhabiliter les voiries et les infrastructures essentielles, la cartographie et la quantification des granites sont indispensables. C'est dans cette optique que la présente étude a été réalisée afin d'évaluer la quantité de délais à excaver et le potentiel granitique souterrain par

interprétation des imageries 2D de la tomographie électrique.

2. Cadres géographique et géologique

Située au Nord-Est du District d'Abidjan, la zone d'étude est située dans la sous-préfecture de Brofodoumé (Figure 1). Cette localité bénéficie d'un climat de type attiéen, transitoire entre deux saisons de pluie et deux saisons sèches. Sur le plan pédologique, on y rencontre essentiellement des sols ferrallitiques ou quartzeux reposant sur un socle granitique.

Au plan géologique, le prospect est situé dans la zone de contact entre le socle précambrien et le bassin sédimentaire (Tagini, 1971 ; Bessoles, 1977 ; Camil, 1984 ; Delor *et al.*, 1992). Il est composé essentiellement de granite, des sédiments de comblement et du Continental terminal (Figure 2).

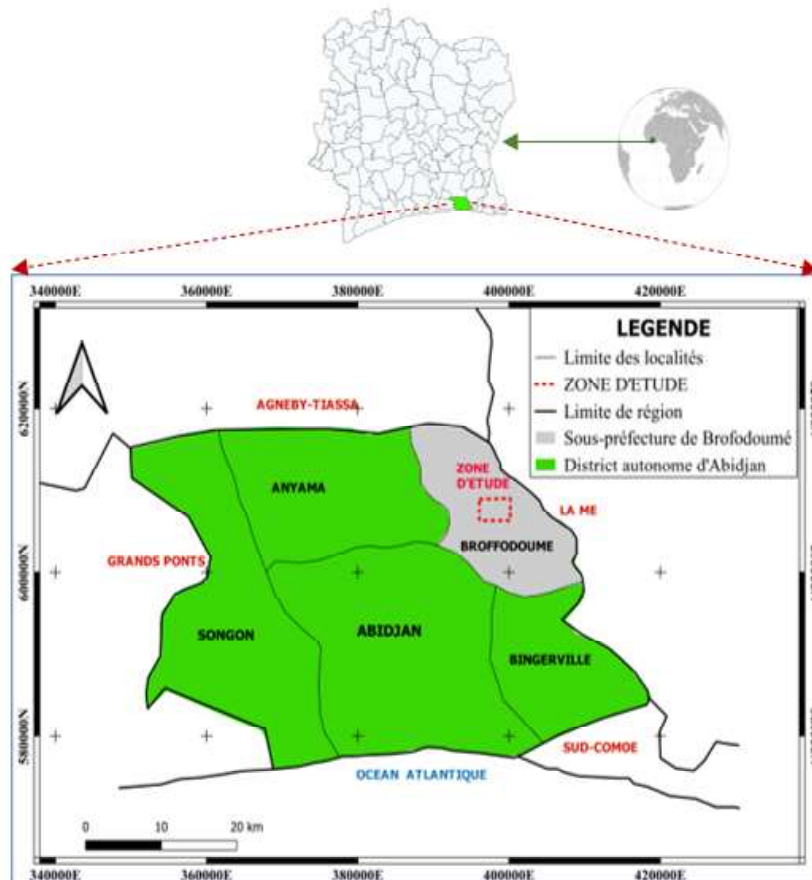


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

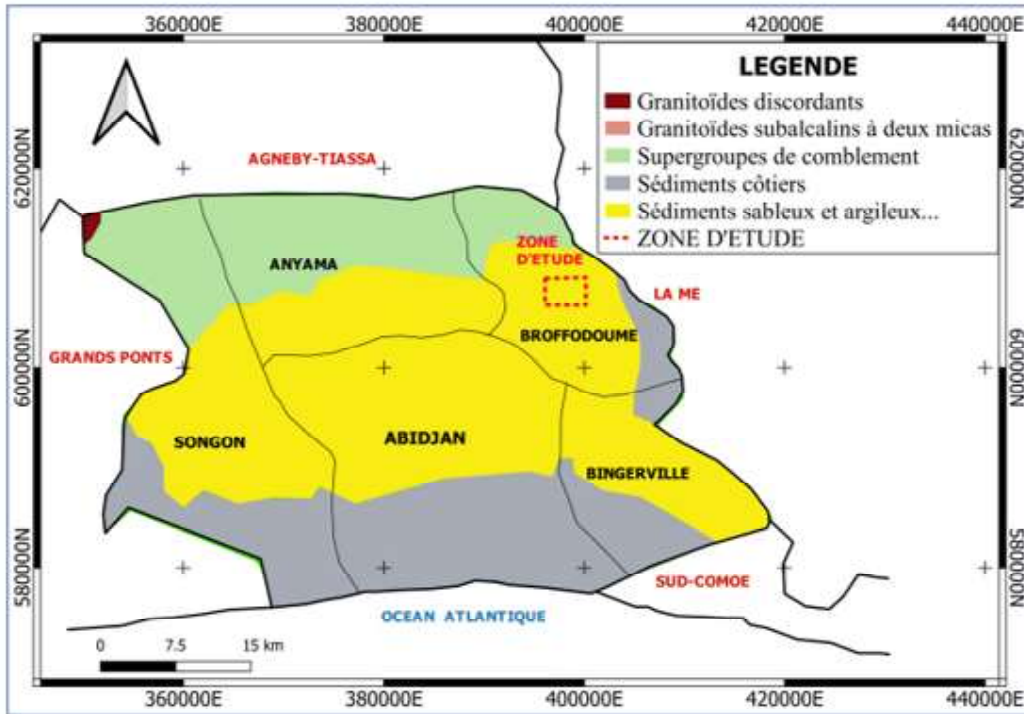


Figure 2 : Carte géologie de la zone d'étude, Delor *et al.* (1992).

3. Méthodologie

La configuration pôle-dipôle a été utilisée pour la collecte des résistivités apparentes avec un résistivimètre Syscal Pro Switch 48. Le principe consiste à injecter, pour chaque station, un courant dans le sous-sol et à mesurer la différence de potentiel qui en résulte. Les valeurs de la résistivité apparente (ρ_a) sont calculées, pour différents pas de mesure, à partir de la relation :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

Avec I : intensité du courant (A), ΔV : la différence de potentiel (V) et K : facteur géométrique (m).

Celles-ci sont rapportées à différents niveaux de profondeur qui sont déterminés avec la distance de séparation entre le pôle d'injection et les dipôles de réception (Figure 3). La profondeur investiguée est donnée selon Mathieu et Baisset (2015) par l'expression empirique suivante :

$$P = 0.36 a (n + 1) \quad (2)$$

Avec P : profondeur ; n : niveau d'acquisition ; a : la distance entre deux électrodes consécutives.

L'organisation des résistivités en fonction de la profondeur représente une pseudo-section qui permet de faire le contrôle qualité des valeurs recueillies (Figure 3).

L'interprétation quantitative 2D est assurée par le logiciel *Res2DinV*[®]. Il subdivise la pseudo-section en plusieurs cellules qui sont centrées sur chaque valeur de la résistivité en profondeur. Ce logiciel propose, par la méthode des moindres carrés et après plusieurs itérations, un modèle calculé qui est l'imagerie vraie du sous-sol avec une erreur RMS inférieur à 5 % (Edwards L. S., 1977). Ce modèle image renseigne, pour chaque profil, sur l'épaisseur de déblai et la profondeur du toit granitique ainsi que la présence de fracture éventuelle.

Le volume du granite exploitable est calculé avec le module *Voxel* de *Geosoft*. Ce logiciel procède d'abord à la sommation de toutes les sections images 2D et, soustrait les valeurs de résistivité inférieure à 2500 Ohm.m qui sont associées aux déblais. Ensuite, il propose un modèle 3D en intégrant les paramètres géométriques des

résistivités conservées ($\rho_a \geq 2500 \text{ Ohm.m}$) et procède au calcul volumique de celui-ci. Ainsi, pour une profondeur d'exploitation fixée à 100 mètres, le potentiel granitique exploitable est estimé avec l'équation suivante :

$$Qg = V \cdot d \quad (3)$$

Où, Qg : quantité du granite en tonne (t) ;
 V : volume (m^3) et d : la densité du granite.

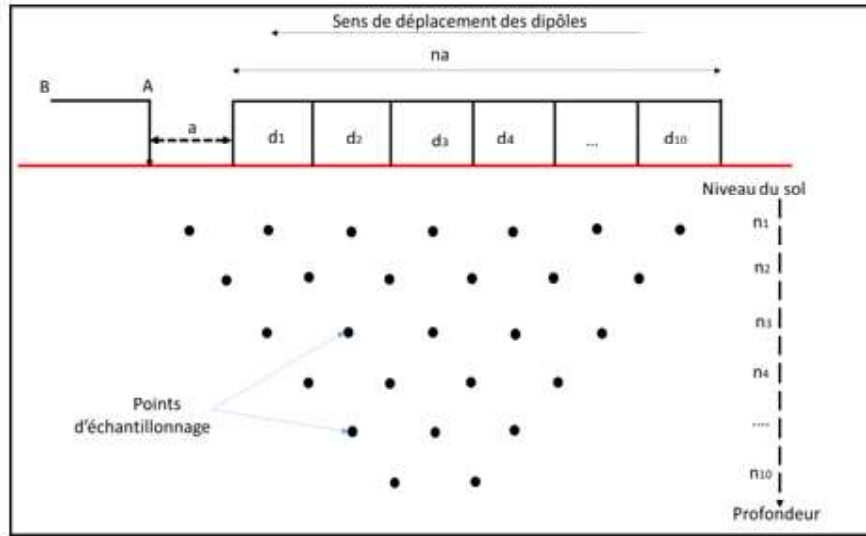


Figure 3 : Dispositif pôle-dipôle

4. Résultats et discussion

4.1 Etude qualitative

La carte de la résistivité apparente, pour une investigation correspondant à 20 mètres de profondeur, est illustrée à la figure 4. Celle-ci est caractérisée par une variation de résistivité de 147 à 5650 Ohm.m et traduit une hétérogénéité du milieu étudié. Ainsi, on distingue trois domaines de résistivité en fonction des signatures électriques. Le premier domaine, représenté par la couleur bleue, correspond aux valeurs de résistivité inférieure à 600 Ohm.m et est associé aux formations géologiques conductrices. Il se rencontre au Nord et au Sud du prospect. Sur la carte géologique locale, il se superpose à un ensemble composé de sable et d'argile latéritique. Le second domaine cartographié est, quant à lui, défini par une signature électrique modérée, caractérisée par des valeurs de résistivité qui oscillent de 600 à 1300 Ohm.m et une coloration verte à jaunâtre (Figure 4). Ce domaine traduit la réponse de la saprolite granitique. Il occupe la

partie centrale du prospect et les périphériques des zones de résistivité élevées. Cette signature indique la proximité du toit granitique. Enfin, le troisième domaine exprime une forte signature électrique avec des valeurs de résistivité apparente qui sont supérieures à 1300 Ohm.m. Il est matérialisé par les couleurs rouge-orangé et magenta qui correspondent à la signature électrique du granite sain. Deux compartiments se distinguent :

- Le premier qui occupe la bordure occidentale du prospect, est plus développé et épouse la direction N-S.
- Le second, orienté NE-SW, est plus réduit et est localisé sur le rebord oriental. Ces structures résistantes présentent assez de distorsions et des discontinuités qui sont provoquées par des fractures. Celles-ci sont principalement orientées selon les directions NE-SW, NW-SE et E-W, et ont fortement affecté le compartiment granitique principal (Figure 4).

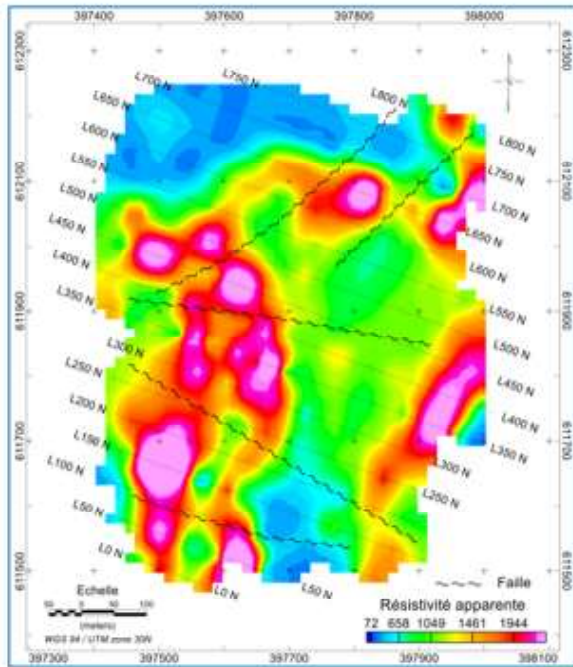


Figure 4 : Carte de résistivité électrique

4.2 Etude quantitative

Les sections images 2D de résistivité traduisent la coupe géo-électrique vrai-profondeur des différents profils de mesure. Sur l'ensemble des résultats, quatre profils ont été sélectionnés pour présenter la structuration du sous-sol (Figure 5). Les résistivités vraies du site ont des valeurs comprises entre 126 et 5961 Ohm.m sur une profondeur maximale de 100 mètres. Deux types de conducteurs (*C1* et *C2*) et deux domaines résistants (*R1* et *R2*) sont identifiés sur les sections images. Les anomalies de types *C1*, plus superficielles, sont des roches conductrices ($\rho_a < 353$ Ohm.m) qui sont associées aux produits d'altération supergène. Il regroupe généralement les sables, les argiles d'altération et la saprolite. Leurs épaisseurs correspondent aux déblais à excaver pour atteindre le toit granitique (Figure 5). Les anomalies de types *C2*, beaucoup plus profondes, sont généralement logées entre les roches résistantes (*R1*) et ont des résistivités comprises entre 353 et 625 Ohm.m. Ces anomalies traduisent la signature électrique des altérations ou/et des fractures qui affectent le

granite en profondeur. Elles sont assez représentées sur les parties centrale et orientale des sections 2D. Ces conducteurs *C2* seraient probablement des aquifères potentiels (Figure 5). Les roches résistantes (*R1* et *R2*) traduisent, quant à elles, la réponse du granite. Le type *R1*, de résistivité supérieure à 2500 Ohm.m, correspond au substratum granitique sain dont la profondeur moyenne s'élève à 20 mètres environ. Toutefois, il a par endroits des profondeurs relativement faible, de l'ordre de 0,2 à 6 mètres, comme l'illustrent les sections L350N et L450N. Le types *R1* est beaucoup homogène du côté ouest par rapport au Centre et à l'Est des sections où il est affecté par des fractures de directions NE-SW, NW-SE et E-W.

L'effet conjugué des fractures et l'altération supergène ont favorisé la formation des anomalies de type *R2*. Ces dernières ont des résistivités élevées et traduisent la réponse des blocs granitiques rencontrés proche de la surface et parfois à mi-profondeur (Figure 5).

Pour l'ensemble des sections, la profondeur du toit granitique oscille entre 0,20 et 60 mètres environ. Cette évaluation a contribué à l'élaboration de la carte d'iso-épaisseur de recouvrement qui détermine l'épaisseur de déblai à excaver au niveau de chaque station de mesure (Figure 6). Cette carte discrimine trois principaux niveaux de recouvrement. Le premier est défini par une faible épaisseur de couverture et est marqué par une teinte rouge. Il totalise une épaisseur maximum de 6 mètres de déblai et serait idéalement le lieu pour l'implantation du front de taille pour l'exploitation. Il couvre

principalement le Sud-Ouest du prospect. Le second niveau correspond aux déblais dont l'épaisseur est comprise entre 7 et 14 mètres. Il est marqué par une teinte blanche et occupe le Sud-Ouest, l'Ouest et le Nord-Est du site. Quant

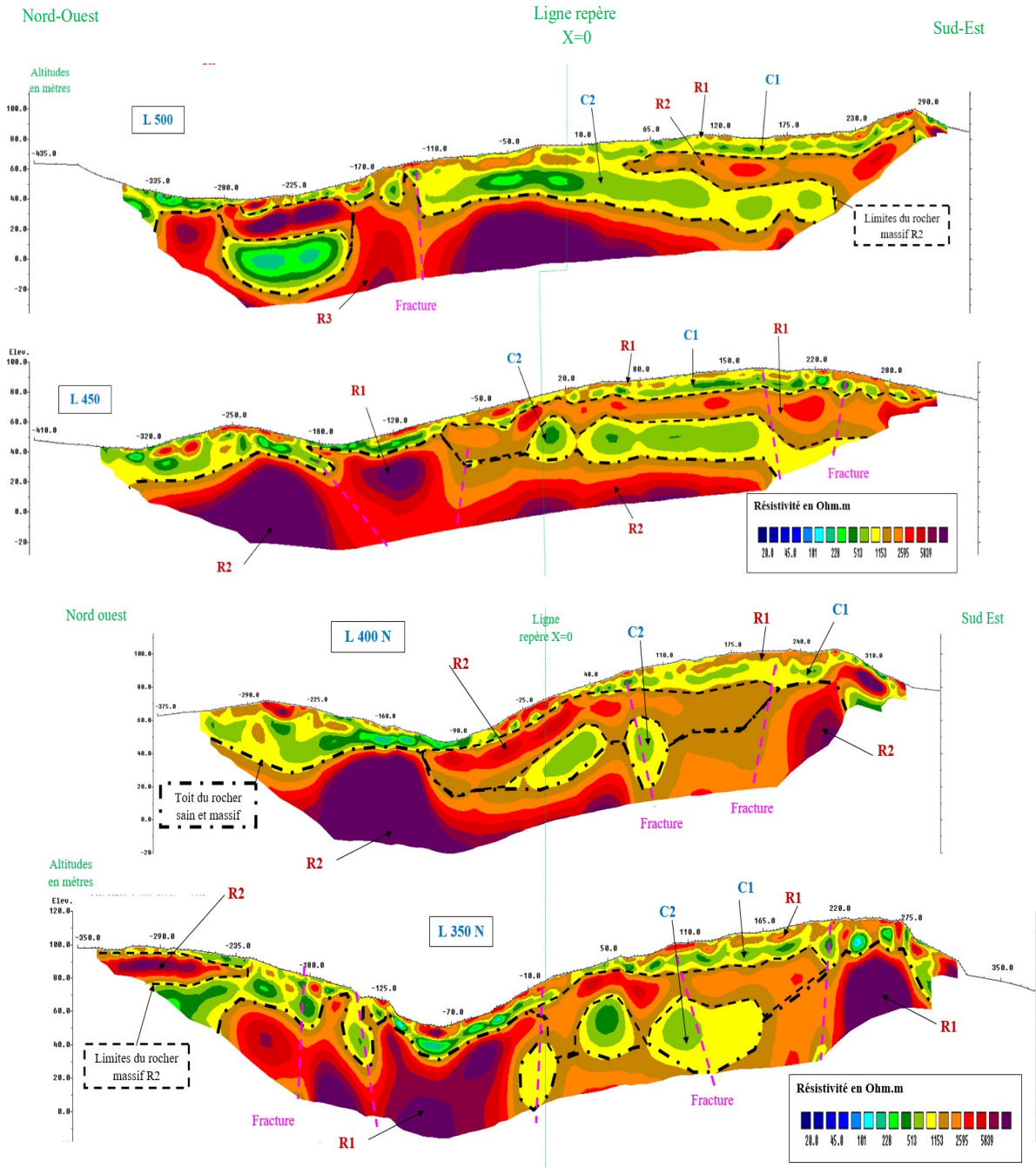


Figure 5 : Sections images 2D de la résistivité pour quatre lignes (L 350N à L 500N, cf **Figure 4**) obtenues à partir des données SEV en utilisant la configuration Pôle-Dipôle sur le site de Brofodoumé. Le pluton granitique (R1) est représenté par la coloration rouge foncé à violet sur ces sections.

au dernier niveau, il est marqué par les teintes bleues et est associé aux grandes puissances de recouvrement dont l'épaisseur évolue de 20 à 60 mètres. Sa répartition est assez grande et couvre le Sud, le Centre, l'Est et le Nord du prospect (**Figure 6**).

Les surfaces de chaque niveau de déblai sont aisément évaluées à partir de la carte iso-épaisseur. En effet, le produit de ces surfaces avec la puissance de chaque couche permet d'estimer le volume total à excaver pour chaque couche de déblai. Ces quantités sont primordiales pour le calcul des charges lors du dimensionnement de la carrière.

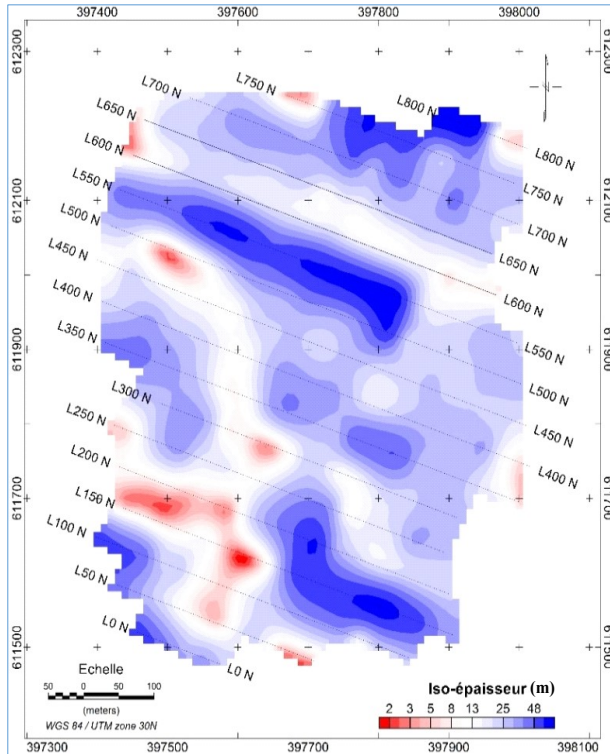


Figure 6 : Carte d'iso-épaisseur de recouvrement.

Le module *Voxel* de *Geosoft* propose un modèle 3D qui intègre les paramètres géométriques des résistivités conservées ($\rho_a \geq 2500 \text{ Ohm.m}$) et projette un volume de granite exploitable à **2,8 millions m³** environ (Figure 7). Quant à la masse de granite exploitable, elle correspond au produit de ce volume par la densité moyenne du granite (2,67 T/m³). Ainsi, la réserve totale évaluée sur ce prospect avoisine **7 millions de tonnes** de granulats. Cette quantité est appréciable d'autant plus qu'elle correspondrait à environ 15 années d'exploitation en raison de 1500 tonnes produits par jour.

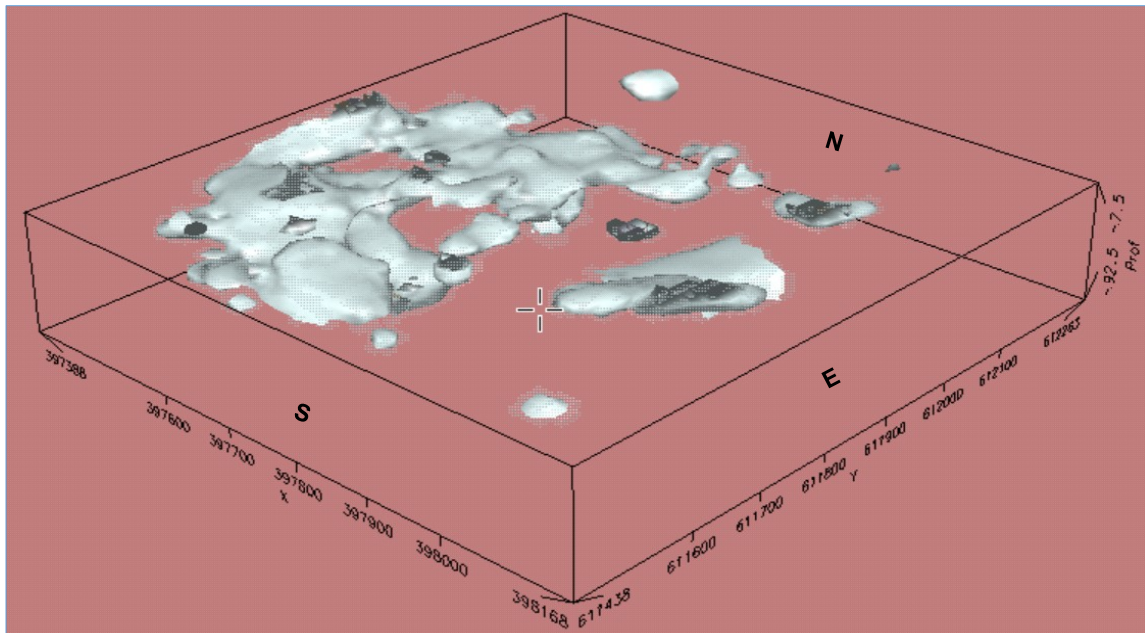


Figure 7 : Modèle 3D du granite exploitable

4.3 Discussion

La tomographie électrique a mis en évidence deux ensembles lithologiques de propriétés électriques différentes. Il s'agit des formations conductrices ($\rho_a < 625 \text{ Ohm.m}$), d'une épaisseur maximale de 60 mètres, qui recouvrent le substratum

granitique de résistivité apparente supérieure à 2500 Ohm.m. Les carottages mécaniques réalisés par **Kra et al. (2016)** à l'Ouest du prospect, sur les bordures de la commune d'Abobo, permettent d'attester que ces formations conductrices correspondent à un ensemble géologique composé

de sables, d'argile-sableuses et d'argile bariolées. Ces produits d'altération supergène ont par endroits 110 mètres d'épaisseur, ce qui justifie les profondeurs variables du toit granitique mis en évidence sur les sections images de résistivité (*cf figure 5*). **Adopo et al. (2014)** décrivent les mêmes caractéristiques stratigraphiques de ces formations dans la province de Adiaké qui est localisée au Sud-Est de la zone d'étude.

Du point de vue structural, les directions préférentielles des fractures majeures identifiées sont le NW-SE, le NE-SW et E-W. Les travaux d'**Assoma et al. (2018)**, axés sur la cartographie des discontinuités structurales du Sud de la Côte d'Ivoire, ont également mis en évidence des fractures dont les directions concordent avec celles identifiées sur le prospect de Brofodoumé. Il en est de même pour les résultats des travaux de **Sombo (2012)** effectués dans la localité de Sikensi ; site situé au Nord-Est de la zone d'étude où le socle serait majoritairement affecté par des fractures orientées NE-SW.

Le modèle 3D réalisé intègre les paramètres géométriques qui sont associés à la répartition spatiale des résistivités supérieures à 2500 Ohm.m et projette un volume de 2,8 millions de m³ (*cf Figure 7*). **Urvois et al. (2009)** propose, en revanche, une autre approche basée sur les systèmes d'information géographique qui permettent d'actualiser l'inventaire des roches massives et aussi d'identifier les secteurs les plus favorables à la mise en exploitation. Cette technique qui est différente de la modélisation effectuée dans ce travail n'intègre pas les paramètres souterrains.

5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de proposer une autre approche dans l'évaluation du potentiel granitique en vue d'une exploitable à partir de la tomographie 2D. Les résultats obtenus ont révélé

d'une part que le toit granitique varie de 0,20 à 60 mètres de profondeur, et ont d'autre part favorisé l'évaluation des épaisseurs de déblai pour le dimensionnement et l'implantation du front de taille de la carrière. Le modèle 3D expose un massif souterrain de forme irrégulière dont le volume est estimé à 2,8 millions de m³ qui correspond à ~7 millions de tonnes de granulats. Cependant, quelques fractures profondes qui affectent ce granite pourraient limiter son exploitation avec l'arrivée probable d'eau souterraine. La modélisation synthétique des données de la tomographie électrique 2D avec le logiciel *Geosoft* apparaît accessible et efficace pour la quantification des matériaux granitiques.

Remerciements

Les auteurs témoignent leur gratitude au Bureau de Recherche Géophysique qui a accepté, dans le cadre de ce projet universitaire, de mettre à notre disposition les données d'étude de terrain.

Références

Adopo. K. L., Atto. D. Y, Wango T.-E., Assare F. Y. P., Kesse. M., Monde S. et Aka K. (2014). Contribution à la lithostratigraphie de la région d'adiaké (bassin sédimentaire onshore est ; Côte d'Ivoire). BIOTERRE, Rev. Inter. Sci. de la Terre, Vol. 14, pp. 47-62.

Ahoussi K. E., (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de doctorat, Univ. Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, 270 p.

Arnould M. (1961) : Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord de la Côte d'Ivoire et de la Haute Volta méridionale. Bulletin, 1, 174 p., Abidjan, Côte d'Ivoire, 174 p.

Assandé A. A., Traoré B., Fofana M., Ouattara S., ADJA M. G., BOFFOUE M. O. et Emeruwa E. (2022). Caractérisation physique et mécanique des cuirasses : perspectives d'utilisation en construction en Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 264–280.

Assoma T.V., Koudou A., Adiaffi B., Koffi F. K., (2018). Caractérisation des structures géologiques par analyse morpho-structural d'image d'ombrage (ASAR ENVISAT et MNT SRTM) et géostatique du Sud de la Cote d'Ivoire. *European Scientific Journal*, vol.14, N°15, pp. 208-209.

Benbaqqal H., Masrouf A., Benyassine E.M., et Erragragui M., (2016). Approche du SIG pour la valorisation des carrières de matériaux de construction. Cas d'étude/ : Ex-Région septentrionale de Meknès-Tafilalet, Maroc, *Rev. J. Mater. Environ. Sci.* N°7, pp. 2342-2343.

Berton Y. et Prime L. (1983). Méthodologie d'étude des ressources en granulats. BRGM, 14.EG.45, pp.1-2.

Bessoles B. (1977). Géologie de l'Afrique : Le craton ouest-africain. Paris, M. BRGM, France, n°88, 404 p.

Bodin L. (1951). Contribution à l'étude des granites birimiens de l'A.G.F. Bulletin Dir.Min. A. O.F., Dakar N°6. Unpublished Report, pp.24-62.

Camil J. (1984). Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire) : implication pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelle. Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire). 306 p.

Chouteau M. et Giroux B., (2006). Géophysique appliquée II, GLQ 3202 méthodes électriques, notes de cours, 75 p.

Delor C., Ibrahima D., Tastet J.P., Yao B., Siméon Y., Vidal M. et Dommanget A. (1992). Carte géologique de la Côte-d'Ivoire à 1/200 000, feuille Abidjan, 1ère édition. Direction de la Géologie, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Edwards L. S. (1977). Modified pseudo-section for resistivity and IP, *Geophysics*, 42(5), pp 1020-1036.

Fon et al (2012): *International Journal of Geosciences*

Junner N.R. (1940). Geology of the Gold Coast and Western Togoland (with Revised Geological Map). Gold Coast Geological Survey Bulletin No. 11, 75 p.

Koffi B. G., Ouattara G., Kouamelan A. N. et Deroin J. P. (2013). Etude pétro-structurale des volcano-plutonites des Monts du Yaouré : Contribution à la compréhension du contexte métallico-tectonique de la minéralisation aurifère (Centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 2, N° 4, pp. 635-644.

Kra A. C., Assale F. Y. P., Yao N. J.-P., Monde S. et Aka K. (2016). Caractérisation sédimentologique et minéralogique des formations du Tertiaire-Quaternaire de la région d'Anyama au Sud de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, Vol. 12, N°. 3, pp. 251-265.

Mathieu F. et Baïssat M. (2015). Prospection géophysique par la méthode du panneau électrique sur les sites de Sparouine et de l'îlet Bastien – commune de Saint-Laurent du Maroni-Guyane. BRGM, France. Rapport final N° 64467,78 p.

N'go Y.A., Gone L. D., Savane L. et Goble M. M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Est de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydro-climatique et physique. *Afrique science* 01 (1), pp. 127-144.

Ouattara G. et Koffi B. G. (2014). Typologie des granitoïdes de la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire -Afrique de l'Ouest) : Structurologie et Relations Génétiques. *Afrique SCIENCE*, Vol. 10, N° 2, pp. 258–276.

Sombo A. P. (2012). 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 Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat U., Univ. Félix Houphouët Boigny, 170 p.

Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat d'État ès Science Naturelle, Université de Lausanne (Suisse), et SODEMI, Abidjan, 302 p.