

IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES DISSOLUTIONS PSEUDO-KARSTIQUES DES CALCAIRES GRÉSEUX PAR IMAGERIE ÉLECTRIQUE 2D ET 3D À AÏN BENIAN, ALGER OUEST.

Fatma KHALDAOUI *, Mohamed DJEDDI* et Yacine DJEDIAT *

RÉSUMÉ

L'imagerie de résistivité électrique en 2D et 3D est un outil particulièrement adapté pour la caractérisation des milieux fissurés dans des contextes géologiques qui nécessitent toujours une investigation de détail avant l'exécution de tous travaux de génie civil. C'est le cas de cette étude réalisée par prospection électrique multi-électrodes en configuration dipôle-dipôle sur un site situé à l'ouest d'Alger dans la localité d'Aïn Benian. L'imagerie électrique a été appliquée dans des formations géologiques du Quaternaire déposées en terrasses étagées afin d'en caractériser la géométrie et le niveau de dégradation de la cimentation. Ceci a eu pour impact l'apparition de cavités à toutes les échelles d'observation. La méthode utilisée a permis de mettre en évidence un réseau de cavités souterraines à faible profondeur. Les résultats obtenus montrent une corrélation probable entre l'orientation des axes de cavités et la direction de fracturation locale. Nous avons pu évaluer l'efficacité de la technique précitée pour mettre en évidence ces phénomènes, car l'absence d'affleurement rend leur détection plus compliquée. Les sondages carotés entrepris sur les anomalies détectées ont confirmé nos observations géophysiques.

Mots-clés - Fissuration - Cavité - Karst - Imagerie de résistivité électrique - Aïn Benian.

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF PSEUDO-KARST DISSOLUTION OF SANDY LIMESTONES BY 2D AND 3D ELECTRICAL TOMOGRAPHY IN AIN BENIAN, WESTERN ALGIERS.

ABSTRACT

Electrical resistivity imaging in 2D and 3D is a suitable tool for characterizing fissured media in geological settings that still require a detailed survey before the execution of all civil engineering works. It is the case of this study carried out by multi-electrode resistivity system using a dipole-dipole array on a site located in the Northwest of Algiers (Aïn Benian). The electrical imaging was used in recent geological formations of Quaternary terrace deposits in order to characterize the geometry, as well as the level of the cementing degradation which had an impact for the creation of voids at all the observation scales of observation. The method we have used allowed to identify a network of underground caverns at shallow depth. The results show a correlation between the probable orientation of the cavities axes and the direction of fracturing.

* Département de Géophysique, Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire, USTHB, BP. 32, El Alia Bab Ezzouar, Alger, Algérie. Email: khalfati@yahoo.fr

- *Manuscrit déposé le 25 Janvier 2012, accepté après révision le 13 Septembre 2012.*

We evaluated the effectiveness of the technique used to detect such subsurface features as karstic sandy limestones. However, the drilled cores beneath the detected anomalies confirmed our geophysical observations.

Keywords - Cracking - Cavity - Karst - Electrical resistivity imaging - Ain Benian.

1. INTRODUCTION

Les méthodes de prospections électriques sont largement utilisées dans les investigations géophysiques de sub-surface pour la résolution de problèmes hydrogéologiques, géotechniques ou environnementaux (Griffiths et Barker, 1993; Dahlin, 1996; Pellerin, 2002; De la Vega *et al.*, 2003; Guerin *et al.*, 2004; Wilkinson *et al.*, 2005; Najine *et al.*, 2006; Casas *et al.*, 2008). Une des techniques les plus fréquemment utilisées en méthodes électriques est l'imagerie électrique multi-électrodes, également appelée tomographie de résistivité électrique (ERT). Cette dernière nécessite donc un grand nombre d'électrodes, généralement disposées le long d'un ou plusieurs profils. Les mesures des variations de résistivité

sont effectuées de manière automatique (Dahlin, 2001) dans un espace bidimensionnel ou tridimensionnel.

La présence de fissures ou de zones de fracturation, favorables à la dissolution chimique d'origine naturelle (cavités karstiques), et de galeries souterraines anthropiques dans la localité d'Aïn Benian (fig. 1), constitue un réel danger pour les infrastructures à réaliser. L'implantation d'un ouvrage de génie civil nécessite, dans ce cas une investigation détaillée de la zone étudiée. L'absence d'affleurement en surface impose une reconnaissance géophysique, en particulier, la technique ERT. Cette approche permet une bonne connaissance de la répartition spatiale des zones de dissolution (Robert *et al.*, 2009).

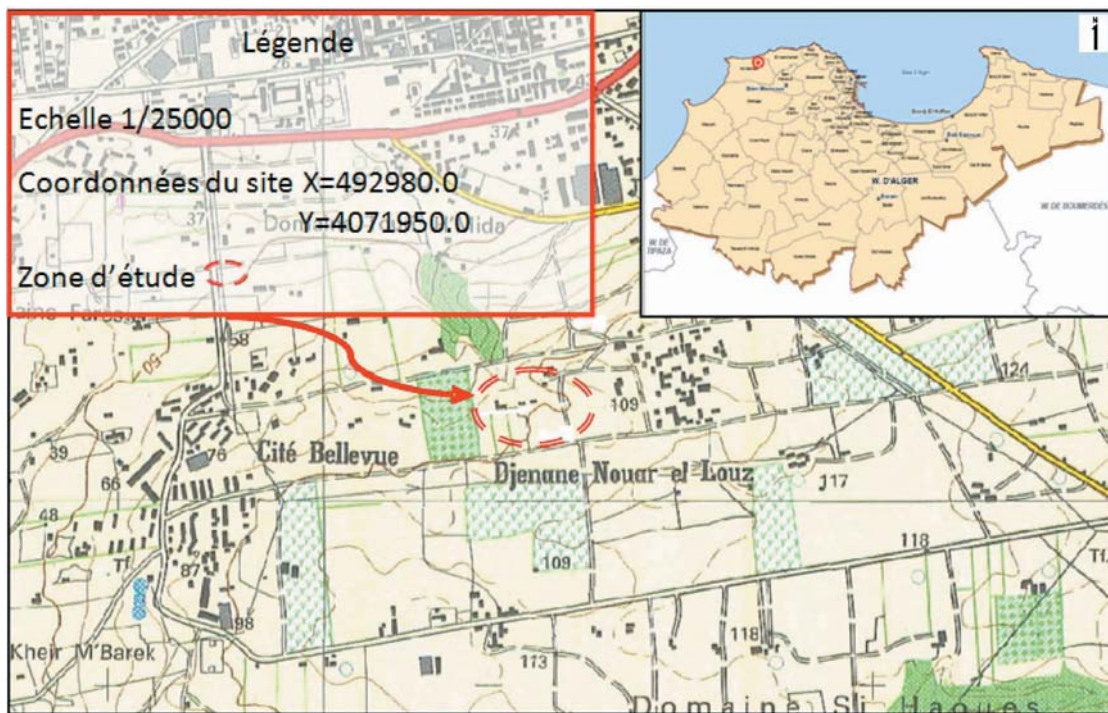


Fig. 1 - Situation géographique du site d'Aïn Benian
Geographical location of the Ain Benian area

2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.1. Les formations géologiques du site d'Aïn Benian

La localité d'Aïn Benian est située sur le flanc nord d'une structure géologique complexe formée d'un socle cristallophyllien (massif d'Alger) et de sa couverture sédimentaire néogène et quaternaire (Glangeaud et *al.*, 1952). Le Néogène est formé par les marnes du Plaisancien à la base et par les mollasses calcaires et gréseuses de l'Astien au sommet (Yassini, 1973). Le Quaternaire est essentiellement détritique et formé de bas en haut par le Calabrien, le Sicilien et le Tyrrhénien (Aymé, 1952; Betrouni, 1983; Saoudi, 1982). Le Calabrien est concordant sur l'Astien avec des faciès détritiques grossiers caractéristiques (Aymé, 1952). Le Sicilien est formé d'une alternance de molasses littorales et de sols rouges. Les dépôts marins côtiers détritiques du Tyrrhénien sont disposés en terrasses marines éta-

gées (fig. 2). Ils débutent à la base par un poudingue hétérométrique à ciment calcaire remaniant des éléments du socle d'Alger de nature gneissique et de la molasse du Pliocène moyen (Astien). Ces poudingues correspondent au faciès q^{2bm} de la carte géologique de Chéraga à 1/50 000 (Aymé, 1952, 1964). Sur ces poudingues, repose une dune tyrrhénienne partiellement consolidée dans laquelle s'intercalent des niveaux marins micro-conglomératiques et des paléosols notée q^{2bd} sur la carte précitée. Les dunes littorales sont des arénites calcaires, riches en débris bioclastiques marins et en sables siliceux, discordantes sur les marnes du Pliocène inférieur (Plaisancien) et sur le socle cristallophyllien d'Alger. La circulation des eaux souterraines dans ces dunes, a favorisé l'apparition de cavités souterraines métriques marquées souvent par la présence de travertins sur les parois et l'accumulation de sable siliceux provenant de la déconsolidation-érosion des voûtes.

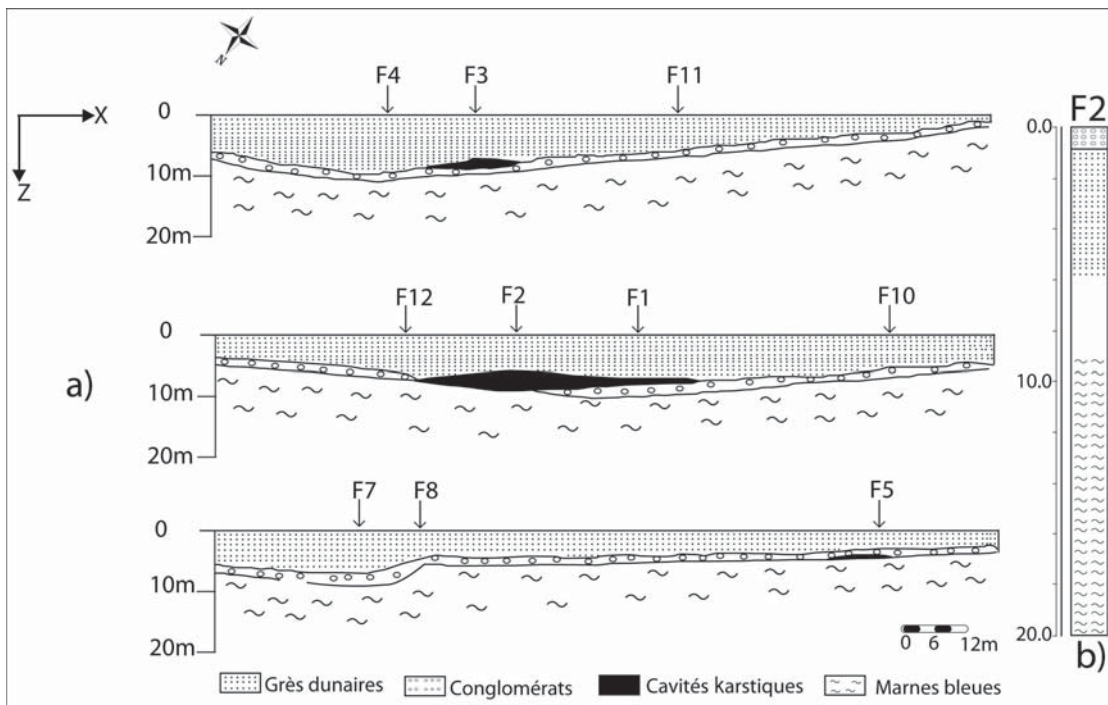


Fig. 2 - Coupes géologiques schématisées restituées à partir des sondages carottés

schematic geological cross-section restored from drilling:

- a) Représentation schématique de la géologie du site (*Schematic representation of the site geology*).
 b) Colonne lithologique simplifiée du forage F-2 (*Simplified lithological column of the borehole F-2.*)

2. 2. Processus de formation des cavités karstiques

Les formations dunaires sont partiellement cimentées car dans ces matériaux, le ciment carbonaté a subi plusieurs phases de dissolution (fig. 3a) et de recristallisation au cours de la diagenèse précoce pendant le Tyrrhénien. Le réseau de fracturation a favorisé le drainage des eaux d'infiltration et par conséquent la dissolution des liaisons carbonatées inter-particulaires.

Cela suppose très probablement, une circulation des eaux dans un réseau de fractures ouvertes avec soutirage de fines issues des espaces intergranulaires et un entraînement gravitaire souterrain de particules sableuses plus grossières (fig. 3b), à la différence des vrais karsts qui se forment en domaine purement calcaire par dissolution des carbonates. L'orientation des cavités pseudo-karstiques semble intimement liée aux directions de la fracturation. Nous avons remarqué que sur le site étudié, les axes des cavités sont orientés N110°. Par ailleurs, des mesures sur des fractures à l'affleurement et à proximité du site ont donné des directions N110° et N60°. L'orientation N110° correspond à celle de la faille de Thénia- Heu-

raouas (Glangeaud et *al.*, 1952; Djediat, 1996). Cela suggère à l'origine, un écoulement d'orientation préférentielle N110°.

3. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE EN 2D ET 3D

La méthodologie de l'ERT consiste à mettre en œuvre un grand nombre de quadripôles, les électrodes sont généralement enfoncées dans le sol et reliées à un résistivimètre multi-électrodes dans lequel la séquence de mesure est programmée. Un courant continu I est injecté à un couple d'électrodes (appelé A_i et B_i) et la différence de potentiel " ΔV " qui en résulte, est mesurée par plusieurs autres couples d'électrodes M_i et N_i . La résistivité électrique " ρ_a " caractérise la capacité à laisser passer le courant et dépend à la fois de la teneur en eau du milieu, de la minéralisation, de la porosité, de la saturation et de la fissuration (Keller, 1988). Elle peut être exprimée en fonction de la différence de potentiel et de l'intensité du courant (Keller et Frischknecht, 1966; Ward, 1990) par:

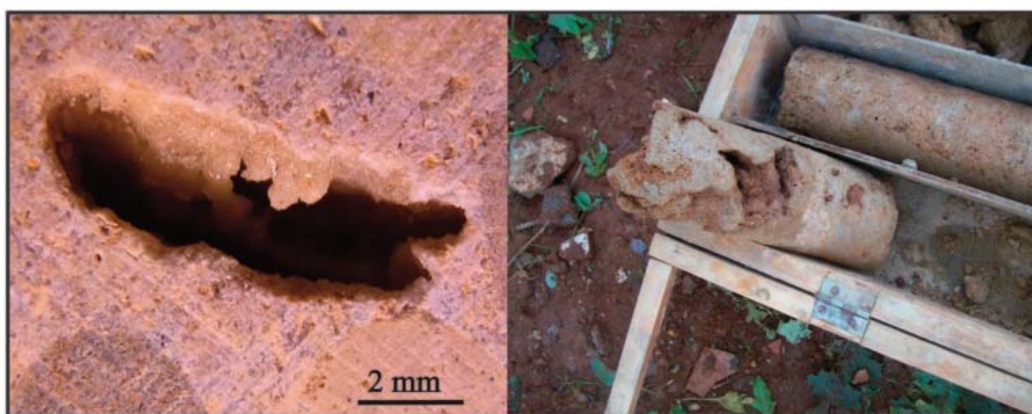


Fig. 3 - Forme de dissolution dans les grès dunaires

Dissolution in the sandstone dunes

- a)** Poche karstique en développement : micro-cavité de dissolution avec cristallisation de calcite géodique sur les parois de la cavité (***karst pocket development: micro-cavity with crystallization of calcite dissolution on the walls of the cavity***).
- b)** Cavité karstique en développement traversée par la carotte (***developing karst cavity cross-cut by the core***).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} ;$$

où k est une constante géométrique qui dépend de la configuration des quatre électrodes.

La figure 4 présente le principe d'une acquisition en imagerie électrique 2D et 3D.

En effet, cette méthode permet d'une part de localiser précisément les hétérogénéités de subsurface et d'autre part, de mettre en évidence un modèle du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement (Griffiths et Turnbull, 1985; Parasnis, 1986; Loke et Barker, 1996a, b; Dahlin, 2001). La distribution des résistivités vraies dans le milieu prospecté est obtenue par une procédure d'inversion (Loke et Barker, 1996a; Maurer et al., 2000; Friedel, 2003). Cette dernière est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre les résistivités mesurées et les résistivités calculées à partir d'un modèle de résistivité électrique (Loke et Barker, 1996a, b) qui se rapproche le mieux des données mesurées. Deux techniques de modélisation numérique peuvent être utilisées: la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis (Dey et Morrison, 1979; Loke et Barker 1996a, b; Silvester et Ferrari, 1990).

La finalité de ce travail est d'obtenir une image électrique du terrain qui permet de visualiser les hétérogénéités du sous-sol.

4. APPLICATION

L'outil utilisé pour l'acquisition des données électriques en 2D et 3D, est le système multi-électrodes d'IRIS instrument (Syscal junior) de 48 électrodes. La configuration adoptée pour la mesure de la résistivité apparente est le dipôle-dipôle. Ce type de configuration est très sensible aux variations horizontales de la résistivité, donc idéal pour détecter des structures verticales.

La méthodologie adoptée sur le terrain a consisté d'abord, à réaliser un certain nombre de panneaux de résistivité en 2D parallèles (fig.5) dans le but de cartographier une zone plus large et pour avoir une vision de l'ensemble des cibles. Afin d'affiner les résultats de la représentation 2D, une acquisition en 3D (Dahlin et al., 2002; Osella et al., 2005) a été réalisée à des endroits spécifiques où une meilleure résolution est souhaitée. La configuration en 3D (fig. 4b) montre une grille d'électrodes de 16 x 3 m avec un espacement entre les électrodes de 3 m. Elle permet d'avoir une couverture plus régulière du sous-sol dans les deux directions x et y .

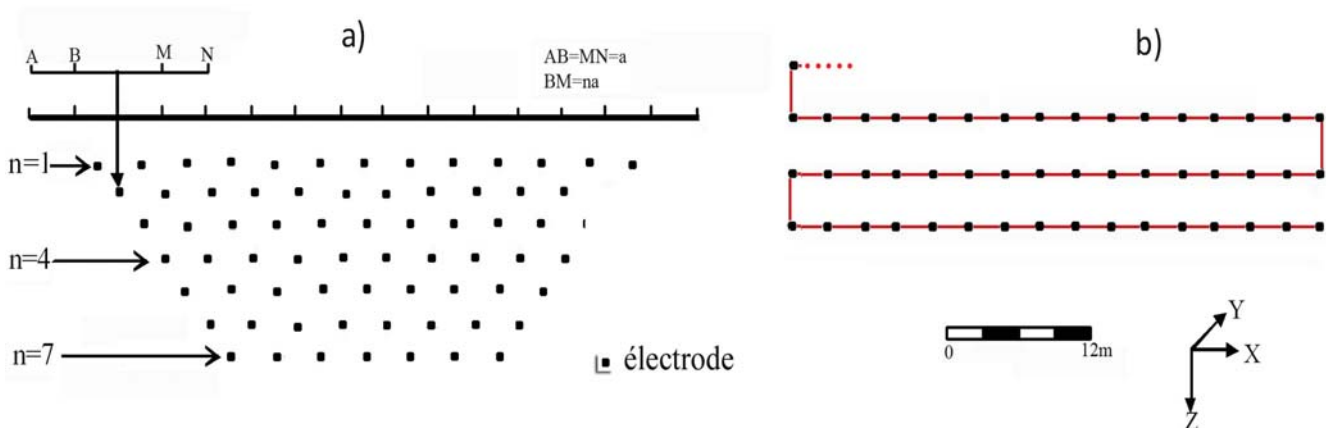


Fig. 4 - Processus d'acquisition en imagerie électrique pour une configuration de type dipôle-dipôle en 2D (à gauche) et 3D (à droite).

Sequence of measurements for a 2D (left) and 3D ERT(right)

Pour l'identification des hétérogénéités de subsurface jusqu'à 20 m de profondeur, cinq panneaux électriques parallèles ont été réalisés sur une superficie d'environ 11500 m² (fig. 5). Les panneaux électriques sont orientés ENE-WSW avec une longueur de 141 m pour chaque profil. Plusieurs sondages géotechniques (fig. 5) ont été implantés sur le site pour vérifier les résultats des profils de résistivités.

Le traitement des données de résistivités apparentes mesurées, a été effectué en appliquant un algorithme itératif basé sur la méthode des éléments finis (Sasaki, 1992; Loke et Barker, 1996a; Loke, 2002). Pour l'optimisation des données des

résistivités, l'utilisation de la technique quasi-Newton, permet de diviser le terrain étudié en petits blocs en forme de prismes et de déterminer la résistivité vraie pour chaque bloc qui minimise l'écart entre les résistivités observées et calculées (Loke et Barker, 1996a).

Les résistivités des faciès géologiques sont reportées sur des diagrammes de discrimination afin d'obtenir une meilleure restitution géologique du profil électrique (fig. 6). L'avantage de ces restitutions issues de l'interprétation des panneaux est, qu'elles permettent de traduire la distribution de résistivités en une réalité géologique.

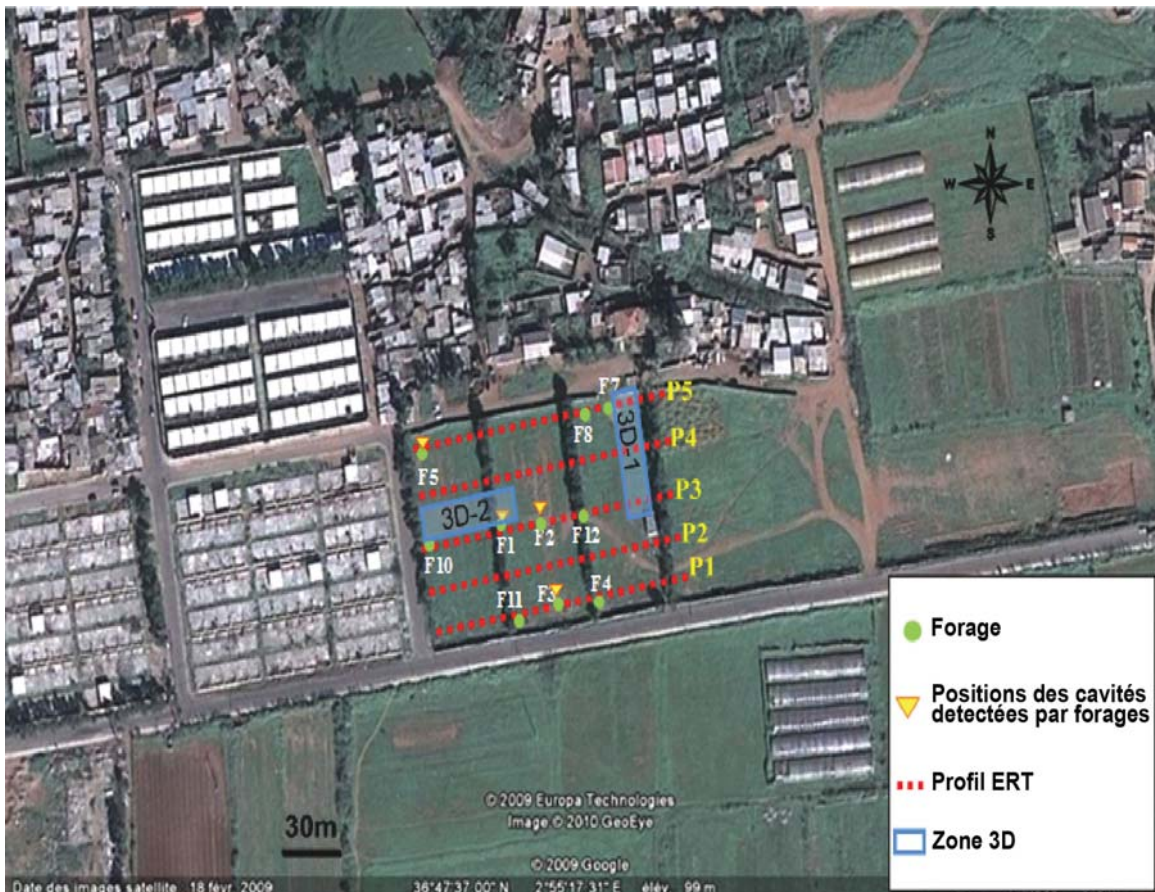


Fig. 5 - Vue aérienne du site d'Aïn Bénian et positions des forages et des profils d'imagerie électrique.

Aerial view of the Aïn Benian site and locations of the boreholes and electrical imaging profiles

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1. Cas de l'imagerie électrique en 2D

Les profils d'imagerie électrique ont été réalisés suivant la direction ENE-WSW. La profondeur d'investigation atteinte est de 20 m.

Sur tous les profils (fig. 7), on remarque la présence d'un recouvrement superficiel de résistivité inférieure à 200 Ohm.m. Ce recouvrement est formé essentiellement de sables argileux rubéfiés qui correspond, en fait, à la couche pédologique superficielle de faible épaisseur, de l'ordre de 2 m. Ces sables argileux surmontent une formation dunaire de calcaires gréseux du Pléistocène supérieur à stratifications obliques; ce sont des dunes lapidifiées, qui s'étendent quasiment le long des profils et leurs résistivités va-

rient entre 500 et 2000 Ohm.m. Ces dunes sont partiellement consolidées à cause d'une succession de phénomènes de dissolution, recristallisation des liants calcaires, liée à une diagenèse précoce dans ces matériaux (Djediati *et al.*, 2011). Ceci a pour conséquence la création de vides à différentes échelles (microscopique à macroscopique, fig. 3).

L'investigation multi-électrodes fait ressortir certaines anomalies, à l'exemple du profil 3 (fig. 6), caractérisées par des résistivités élevées (> à 10 000 Ohm.m) et pouvant atteindre parfois 30 000 Ohm.m. Les corrélations entre les résultats obtenus sur ce profil et les sondages géotechniques (fig. 3a) permettent d'associer ces anomalies à des macros-vides karstiques dans les calcaires gréseux (Sweeting, 1972).

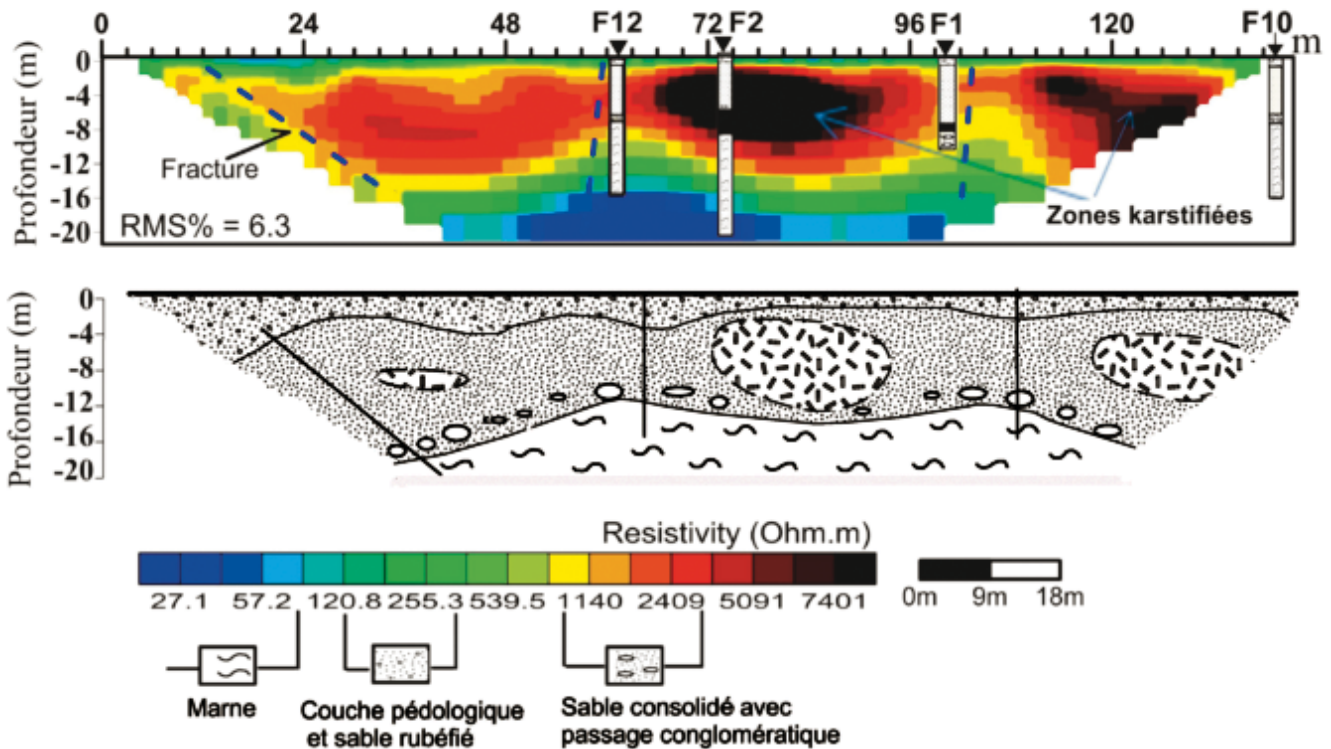


Fig. 6 - Modèle de résistivité électrique obtenu par dispositif dipôle-dipôle et interprétation géologique du profil 3

Resistivity models obtained by a dipole-dipole array and geological interpretation on profile 3

En effet, une anomalie négative a été identifiée par l'imagerie électrique 2D à l'extrémité ouest du terrain. Elle reflète une forte diminution de la résistivité dans les calcaires gréseux et pourrait être une cavité remplie d'un matériau conducteur, probablement de l'eau de surface qui s'infiltre à travers des fissures et des pores. En profondeur, sous les calcaires gréseux, le terrain présente des résistivités faibles ($< 70 \text{ Ohm.m}$), ce sont très probablement des marnes, qui agissent comme un substratum imperméable à la base des cavités karstiques.

Douze sondages carottés (F1 à F12) d'une profondeur moyenne de 20 m ont été implantés sur ce site. Des indices de fissuration - fracturation ont

été mis en évidence dans certains forages à partir de 2 m (sondages F4 et F5). Les résultats géophysiques mettent aussi en évidence une variation latérale des résistivités électriques, qui pourraient s'expliquer par la présence de fractures qui ont des directions relevées plus au nord sur le terrain, en l'occurrence $N110^\circ$ et $N60^\circ$. On constate une diminution de la résistivité orientée, suivant des directions parallèles aux zones karstifiées des calcaires gréseux et cela pourrait être dû, très probablement, à des discontinuités décrites plus haut qui encadrent les couloirs de drainage des eaux souterraines, favorisés par le réseau de fractures mis en évidence par les mesures géophysiques et les sondages carottés.

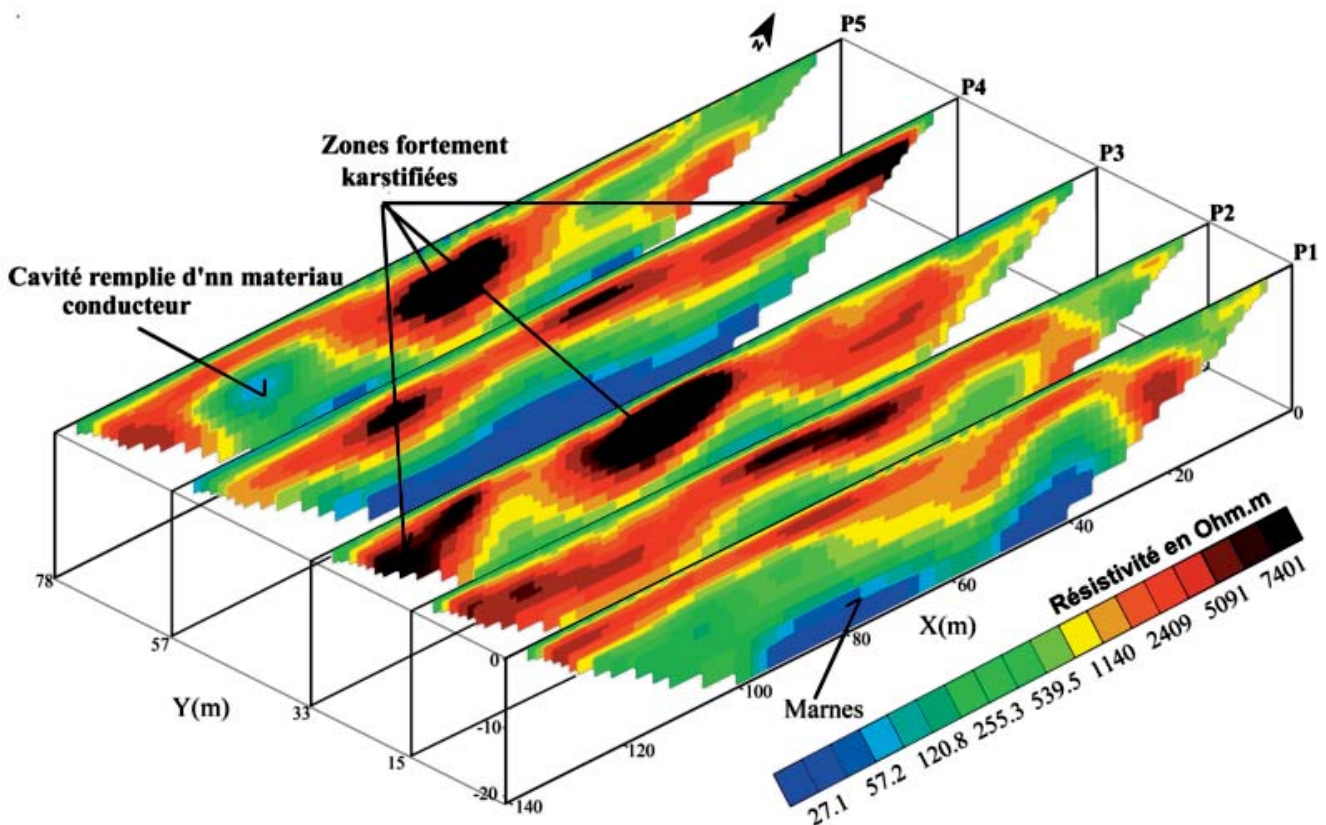


Fig. 7 - Visualisation 3D des coupes de résistivité interprétées des profils P1, P2, P3, P4 et P5

3D visualization of interpreted ERT profiles P1, P2, P3, P4 and P5

5.2. Cas de l'imagerie électrique en 3D

Une acquisition tridimensionnelle (3D) a été réalisée dans deux zones (3D-1, 3D-2), afin d'étudier la distribution 3D des résistivités électriques (fig. 5). La profondeur d'investigation maximale est de 10 m environ. Les résultats de l'inversion 3D des résistivités montrent une distribution (fig. 8) de zones de très forte résistivité ($> 10\,000$ Ohm.m). Ces fortes résistivités sont orientées selon une direction nord ouest-sud est. Elles pourraient

être liées, comme nous l'avons souligné précédemment, à des cavités, traduisant une phase de karstification intense dans cette région. Dans ce cas il pourrait s'agir d'un réseau de cavités karstiques (Szalai *et al.*, 2002), orientées suivant la direction précitée en relation avec le réseau de fracturation.

6. CONCLUSION

Les résultats obtenus par l'application de l'imagerie électrique en 2D et 3D ont permis l'identification et la caractérisation des zones de dissolution chimiques dans le sous-sol de ce secteur d'Aïn Benian. Leur connaissance est d'une importance fondamentale pour les projets de construction envisagés sur ce site. Les résultats de l'étude ont permis d'identifier un certain nombre de cavités karstiques dans les calcaires gréseux liés à la dissolution des carbonates par les eaux souterraines. Ces cavités ont, d'après nos résultats, des orientations N110° et N60°. La direction N110° correspond à un réseau de fractures connues dans la Mitidja au sens large et plus particulièrement au niveau de la faille de Thénia-Heuraoua. L'analyse des résultats de l'imagerie électrique couplée avec les données des sondages géotechniques met en relief l'existence de cavités associées à la fracturation. Ces dernières sont organisées en réseaux constituant des axes d'écoulement privilégiés de même direction que le réseau de fractures précité. Sur la base de ces résultats, nous pouvons montrer clairement l'état de la dégradation et de la complexité du réseau des pseudo-karsts du sous-sol d'Aïn Benian. Nous supposons à l'issue de ce travail, que la genèse de cette pseudo-karstification est très probablement liée à des écoulements souterrains interstitiels drainé par des fractures quaternaires.

Finalement, l'application de l'imagerie électrique est très efficace dans les milieux à géologie complexe comme les zones karstiques, notamment si elle est appuyée par des données géologiques et géotechniques issues de sondages.

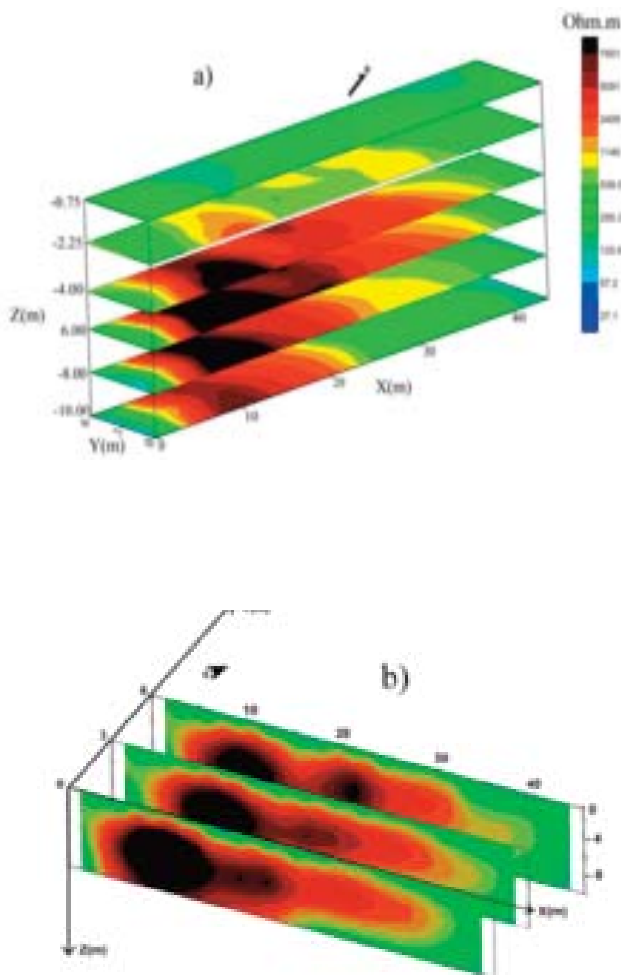


Fig. 8 - Modèle 3D de résistivité électrique (3D-1)

3D model of the electrical resistivity (3D-1)

a) série de sections en profondeur (*horizontal depth sections*); b) série de sections latérales (*vertical sections*).

BIBLIOGRAPHIE

- AYMÉ, A. 1952. Le Quaternaire littoral des environs d'Alger, *Actes du Congrès Panafricain de la pré-histoire, Alger*, II session, pp. 243-246.
- AYMÉ, A. 1964. Carte géologique d'Alger au 1/50 000. *Service Géologique de l'Algérie*.
- BETROUNI, M. 1983. Le Pléistocène supérieur du littoral ouest algérois. *Thèse 3^e Cycle, Université d'Aix-Marseille*, 52 fig., XIII pl. h.t., 202 p.
- CASAS, A., HIMI, M., DIAZ, Y., PINTO, V., FONT, X. AND TAPIAS, J.-C. 2008. Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. *Environmental Geology*, 54, pp. 515-520.
- DAHLIN, T. 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14 (7), pp. 275-283.
- DAHLIN, T. 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 27(9), pp. 1019-1029.
- DAHLIN, T., BERNSTONE, C. AND LOKE, M.-H. 2002. A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 67 (6), pp. 1692-1700.
- DE LA VEGA, M., OSELLA, A. AND LASCANO, E. 2003. Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasolina-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics*, 54, pp. 97-109.
- DEY, A. AND MORRISON, H.-F. 1979. Resistivity modelling for arbitrary shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, pp. 753-780.
- DJEDIAT, Y. 1996. Étude géologique et géotechnique de la Mitidja nord orientale. *Thèse de Magistère Univ. des Sci. et de la Tech. d'Alger*, 33 fig., 3 pl. h.t., 106 p.
- DJEDIAT, Y., YELLES CHAOUICHE, A. ET SEMROUD, B. 2011. Déformations synsédimentaires quaternaires dans les terrasses marines du littoral algérois (Algérie centrale). *Bull. Serv. Géol.*, vol. 22, n° 3, pp. 299-313.
- FRIEDEL, S. 2003. Resolution, stability and efficiency of resistivity tomography estimated from a generalized inverse approach. *Geophysical Journal International*, 153(2), pp. 305-316.
- GLANGEAUD, L., AYMÉ, A., CAIRE, A., MATTAUER, M. ET MURAOUR, P. 1952. Histoire géologique de la province d'Alger, Publ. XIX C.G.I., Alger, *Mono. rég., 1^o série, Algérie*, 25, 40 figs., 3 pl. h.t., 142 p.
- GRIFFITHS, D.-H. AND TURNBULL, J. 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break*, 7(3), pp. 16-20.
- GRIFFITHS, D.-H. AND BARKER, R.-D. 1993. The use of multi-electrodes resistivity imaging in gravel prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, 49, pp. 245-254.
- GUERIN, R., BÉGASSAT, P., BENDERITTER, Y., DAVID, J., TABBAGH, A. AND THIRY, M. 2004. Geophysical study of the industrial waste land in Montagne du Nord (France) using electrical resistivity. Near Surface. *Geophysics*, 2 (3), pp. 137-143.
- KELLER, G.-V. 1988. Rock and mineral properties. In : Nabighian, M. N., and Corbett, J. D., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics-Theory*, 1: *Soc. Expl. Geophysics*, pp. 13-51.
- KELLER, G. AND FRISCHKNECHT, F. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. *Pergamon Press, New York*, 517 p.
- LOKE, M.-H. 2002. Rapid 3D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D and 3D, Geotomo. Software*, 44p.
- LOKE, M.-H. AND BARKER, R.-D. 1996a. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 131-152.
- LOKE, M.-H. AND BARKER, R.-D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical prospecting*, 44, pp. 499-523.
- MAURER, H., BOERNER, D.-E. AND CURTIS, A. 2000. Design strategies for electromagnetic geophysical surveys. *Inverse Problems*, 16, pp. 1097-1117.

IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES DISSOLUTIONS PSEUDO-KARSTIQUES DES CALCAIRES GRÉSEUX
PAR IMAGERIE ÉLECTRIQUE 2D ET 3D À AÏN BENIAN, ALGER OUEST.

- NAJINE, A., JAFFAL, M., AÏFA, T., FILAHI, M., ARIOUA, A., BOUKDIR, A., ANDRIEUX, P. ET REGIBA, F. 2006.** Reconnaissance de cavités souterraines par tomographie électrique et radar géologique dans le centre ville de Beni-Mellal (Maroc), *Bull. Lab. Ponts et Chaussées*, n° 26, pp. 83–89.
- OSELLA, A., DE LA VEGA, M. AND LASCANO, E. 2005.** 3D electrical imaging of an archaeological site using electric and electromagnetic methods. *Geophysics*, 70 (4), pp. 101–107.
- PARASNIS, D.-S. 1986.** Principles of applied geophysics. *Chapman and Hall*, fourth edition, 429p.
- PELLERIN, L. 2002.** Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, 23 (2–3), pp. 101–132.
- ROBERT, T., DASSARGUES, A., BROUYÈRE, S., KAUFMANN, O., HALLET, V. AND NGUYEN, F. 2009.** Using electrical resistivity tomography and self-potential methods for wells implementations in fractured limestones. Near Surface 2009. *15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics A32*.
- SAOUDI, N. 1982.** Pliocène et Pléistocène inférieur et moyen du Sahel occidental d'Alger. *Thèse 3^e cycle, Géologie du Quaternaire, Univ. Aix-Marseille 2*, 2 vol., 227 p.
- SASAKI, Y. 1992.** Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, pp. 453-464.
- SILVESTER, P.-P. AND FERRARI, R.-L. 1990.** Finite elements for electrical engineers, second ed. *Cambridge University Press, Cambridge*, 514p.
- SWEETING, M.-M. 1972.** Karst landforms. *Macmillan, London*, 362 p.
- SZALAI, S., SZARKA, L., PRÁCSE, E., BOSCH, F., MÜLLER, I. AND TURBERG, P. 2002.** Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. *Geophysics*, 67, pp. 1769–1778.
- WARD, S.-H., 1990.** Resistivity and induced polarization methods. In geotechnical and environmental geophysics, vol. 1, Ward, S.H. Editor. *Society of Exploration Geophysicist*, pp. 147-190.
- WILKINSON, J., CHAMBERS, P., MELDRUM, R., OGILVY, R.-D. AND MELLOR, C. 2005.** A comparison of self-potential tomography with electrical resistivity tomography for the Detection of abandoned mine- shafts. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10, pp. 381–389.
- YASSINI, I. 1973.** Nouvelles données stratigraphiques et micro-faunistiques sur la limite Pliocène inférieur - Pliocène moyen (Plaisancien-Astien) dans la région d'Alger. *Rev. micropaléont.*, 16(4), pp. 229-248.