

Reconnaissance de cavités souterraines par tomographie électrique et radar géologique dans le centre ville de Béni-Mellal (Maroc)

Abdessamad NAJINE *

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc

Mohammed JAFFAL

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc.

Tahar AÏFA

Université de Rennes 1, France

Mustapha FILAHI

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc

Abdelkrim ARIOUA

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc

Ahmed BOUKDIR

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc

Pierre ANDRIEUX

Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Fayçal REJIBA

Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

RÉSUMÉ

La ville de Béni-Mellal a été fondée sur des terrains affectés par un important réseau de grottes et de cavités souterraines qui sont à l'origine des nombreux effondrements constatés de nos jours. Afin de tester l'efficacité des méthodes géophysiques à localiser et cartographier ces cavités, les techniques du panneau (ou tomographie) électrique et du radar géologique ont été mises en œuvre dans une parcelle de l'ancienne Médina. Les résultats obtenus révèlent clairement l'existence de cavités souterraines dans le sous-sol, dont la plus importante s'étend sur une cinquantaine de mètres carrés environ.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

RECONNAISSANCE OF UNDERGROUND CAVITIES BY MEANS OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY AND GEOLOGICAL RADAR IN THE BÉNI-MELLAL CITY CENTER (MOROCCO)

The city of Béni-Mellal was built on soils containing a sizable network of grottoes and underground cavities that have given rise to many ground collapses in recent times. In order to test the efficiency of geophysical methods for localizing and mapping these cavities, the techniques of electrical panels (or tomographies) and geological radar have been implemented on a parcel in the city's old Medina. The results obtained clearly show the presence of underground cavities in the subsoil, with the largest of these pockets extending approximately fifty square meters.

FIELD: Engineering sciences

* E-mail : najine7@yahoo.fr

INTRODUCTION

La ville de Béni-Mellal a été construite sur des terrains présentant de nombreuses cavités et grottes souterraines. Ces cavités résultent pour la plupart du phénomène de dissolution naturelle des matériaux carbonatés des terrains de fondation. Certaines ont été anciennement creusées par les habitants pour satisfaire des besoins domestiques (abris, sites de stockages, fosses sceptiques, etc.). Ces cavités peuvent provoquer des effondrements des constructions et des infrastructures de la ville (voierie, canalisations, etc.). L'orientation des aménagements au sein du périmètre urbain de la ville de Béni-Mellal nécessite donc la cartographie détaillée et la caractérisation de ces cavités.

Les contrastes notables des propriétés physiques existant entre les cavités (air) et leur encaissant offrent un contexte très favorable pour les caractériser par des méthodes géophysiques. On propose dans cette étude de mettre en œuvre les techniques du panneau (ou tomographie) électrique et du radar géologique pour la détection et la délimitation des cavités souterraines en milieu urbain. L'utilisation de ces méthodes géophysiques dans la reconnaissance des cavités a donné des résultats satisfaisants dans d'autres contextes [1-7]. Dans les zones où la résistivité des matériaux est faible, la profondeur d'investigation du radar est très limitée et on ne peut rien conclure quant à la présence ou l'absence de cavité si aucune réflexion n'est visible dans les coupes-temps radar. Au contraire, si la résistivité est forte et la profondeur d'investigation du radar géologique suffisante, la présence ou l'absence de signaux réfléchis dans les coupes-temps permet de conclure quant à la présence ou l'absence d'interfaces réfléchissantes dans le proche sous-sol [2, 8].

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La ville de Béni-Mellal fait partie de la zone des collines qui constitue un chaînon bordier du Haut Atlas dont le substratum est principalement formé de matériaux d'âge Maestrichtien-Eocène et de brèches attribués à l'Eocène supérieur continental [9]. La puissance de la série continentale dépasse légèrement 100 m. D'une manière générale, on y observe une succession de couches rouges, de conglomérats plus ou moins cimentés et des calcaires lacustres généralement roses, parfois travertineux. Ces calcaires apparaissent aussi bien dans la partie inférieure qu'au sommet de la série sédimentaire [10].

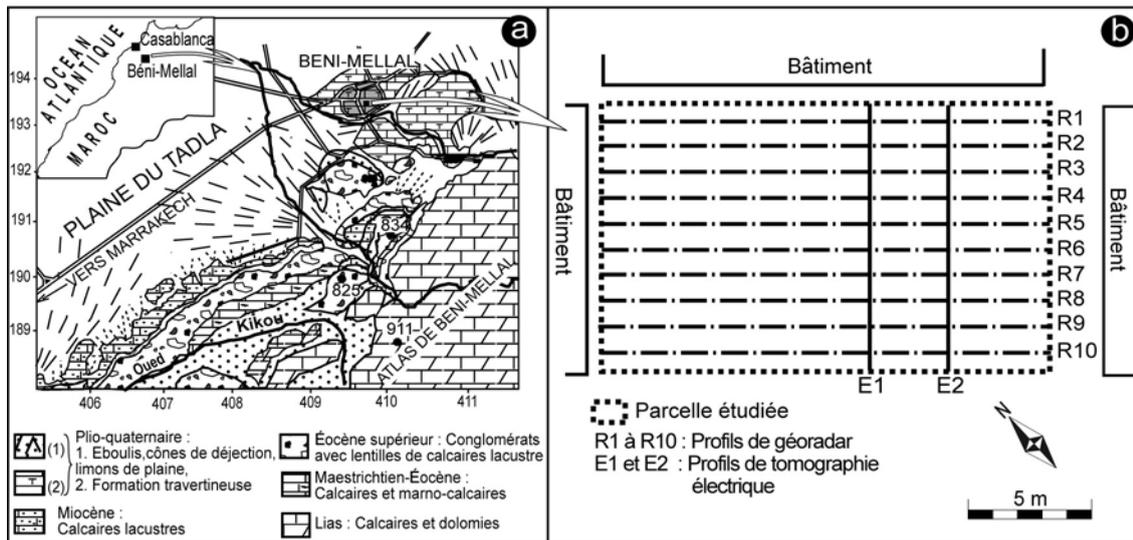
Dans ce contexte régional de nature essentiellement carbonatée, les phénomènes de dissolution ont entraîné l'apparition d'un système complexe de karsts souterrains de taille variable et de forme irrégulière. A cela s'ajoutent les cavités artificielles anciennement creusées par les habitants. Ainsi, aujourd'hui, le sous-sol de la ville de Béni-Mellal abrite un réseau de cavités d'une étonnante densité.

MÉTHODOLOGIE

Le levé géophysique a été réalisé sur une superficie restreinte d'environ 400 m² correspondant à une parcelle de l'ancienne Médina. Cette parcelle est entourée de maisons effondrées qui étaient donc construites sur un substratum comportant des cavités. L'objectif des mesures est de montrer si ces cavités se poursuivent ou non sous la parcelle étudiée. Pour ce faire, cette superficie a été couverte par dix profils de radar géologique recoupés perpendiculairement par deux profils de tomographie électrique (Fig. 1).

La tomographie électrique utilise un dispositif multi-électrodes permettant d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes [11]. Dans la présente étude, la configuration pôle-pôle a été adoptée pour garantir une meilleure profondeur d'investigation et avoir un signal suffisant pour les grandes séparations d'électrodes. Le dispositif de mesures est constitué notamment d'un résistivimètre de type Syscal R1-Plus de IRIS Instruments et d'un système de connexion pouvant recevoir jusqu'à 32 électrodes espacées de 0,5 m. Les données acquises sont présentées sous forme de panneaux de résistivité. Chaque mesure est reportée au milieu du dispositif d'acquisition à une cote correspondant à la valeur de la séparation courante des électrodes mobiles [12, 13]. Des modèles du sous-sol montrant la distribution en coupe de la résistivité sont calculés à partir des panneaux en utilisant la méthode d'inversion des données de Loke et Barker [14].

La seconde méthode géophysique utilisée dans cette étude est le radar géologique. Son principe consiste à générer, au moyen d'une antenne émettrice, une impulsion électromagnétique qui se propage dans le sous-sol et se réfléchit sur les interfaces des formations géologiques caractérisées par



□ **Figure 1**
a. Localisation de la zone d'étude ; b. Grille du levé géophysique.

des contrastes de permittivité diélectrique. L'impulsion réfléchiée est enregistrée à travers une antenne réceptrice [15-17]. Cette méthode est cependant fortement influencée par la conductivité électrique de l'encaissant qui provoque l'atténuation du signal et limite la profondeur d'investigation [18].

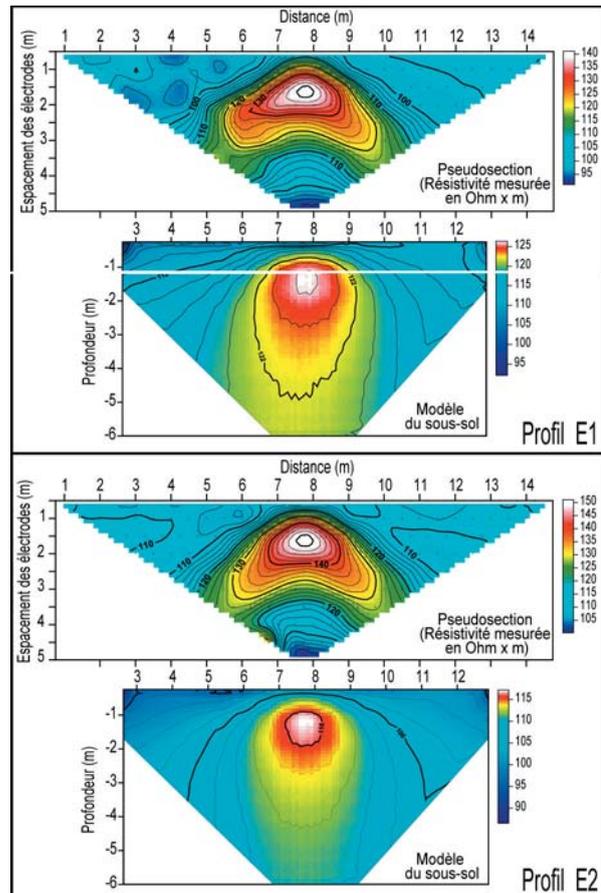
RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les mesures de tomographie électrique ont permis d'établir deux panneaux correspondant aux profils E1 et E2 (Fig. 2). Sur chacun de ces panneaux, on observe une nette anomalie en chapeau correspondant à une cible résistante très superficielle. Cette anomalie de forme symétrique est située au milieu des profils ; la source qui la génère est donc symétrique comme on peut clairement l'observer sur les modèles obtenus par inversion des données. En effet, ces modèles montrent un corps central résistant dont le centre se situe à une profondeur de 1,5 m. Compte tenu du contexte local de l'étude menée sur un sous-sol comportant un réseau dense de cavités souterraines, comme en témoignent les constructions effondrées aux alentours de la parcelle étudiée, le corps résistant mis en évidence durant le présent levé doit correspondre à une cavité.

Sur ces panneaux, on remarque un très faible contraste de résistivité apparente de quelques dizaines de pour-cent alors que le contraste de résistivité des matériaux (calcaire altéré-air) est infini. Cela est à peu près le maximum théorique pour une cavité dont le toit est très proche de la surface du sol. Pour une cavité plus profonde, ce contraste entre les résistivités apparentes peut tomber rapidement à quelques dizaines de pour-cent et ne peut donc se distinguer du bruit de mesure. Cela ne signifie pas qu'il faille renoncer aux mesures électriques pour des cavités plus profondes, car ces mesures peuvent permettre d'avoir des renseignements supplémentaires susceptibles de valider ou non les résultats du radar géologique.

Le levé du radar géologique a été mis en œuvre sur une dizaine de profils espacés de 10 m et longs de 16,5 m couvrant la totalité de la parcelle étudiée. La figure 3 présente les enregistrements correspondant aux profils R2 à R7. La conversion temps-profondeur des radargrammes a été effectuée en utilisant la formule $P = V \times T$ (P : profondeur calculée en mètre ; T : le temps mesuré en nanoseconde ; $V = 0,15$ m/ns : vitesse moyenne de propagation des ondes radar, estimée pour les terrains de fondation formés essentiellement de calcaires au niveau du site étudié). Des surlignages de couleurs différentes ont été rajoutés pour mettre en relief les principaux éléments mis en évidence par les enregistrements. Les traits rouges désignent les zones de réflexions et de diffractions trop peu étendues ou trop proches de la surface pour être interprétées comme des cavités. Les lignes jaunes indiquent des réflecteurs correspondant probablement aux toits des cavités. On remarque l'inversion de phase de ces signaux par rapport à la réflexion sur la surface du sol (interface air-sol) ; ces derniers

■ **Figure 2**
 Résultats de la tomographie électrique :
 panneaux de résistivité E1 et E2 et modèles
 du sous-sol correspondants.



sont en effet caractérisés par une alternance noir-blanc-noir alors que les réflexions surlignées en jaune sur les toits présumés des cavités sont blanc-noir-blanc. Cela correspond à un changement de signe du coefficient de réflexion, cohérent avec une interface sol-air. En fait, la polarité d'une réflexion radar lorsque l'onde traverse le toit de la cavité, c'est-à-dire lorsqu'elle passe du sol vers l'air contenu dans cette cavité, devrait être l'inverse de celle obtenue en surface lorsque cette même onde s'achemine de l'air vers le sol. Bien entendu, cette inversion se produit à chaque fois qu'il y a un changement de signe du coefficient de réflexion à travers les interfaces du sous-sol. Le toit d'une cavité est l'un des cas où ce phénomène se produit. Ce n'est certes pas le seul, mais le fait d'avoir des inversions des réflexions plaide en faveur de l'existence de cavités souterraines.

On constate que les toits des cavités potentielles se situent entre 1 et 2 m de la surface. Cela est en accord avec les résultats de la tomographie électrique qui mettent en évidence un corps résistant dont le centre se situe à 1,5 m environ. Les profondeurs d'investigation de l'ordre de 2 m valident le choix des fréquences d'antennes (225 MHz). Cependant, le test d'antennes à plus basse fréquence (100 MHz) permettrait d'atteindre des profondeurs d'investigation plus importantes sans que la perte de résolution soit rédhibitoire. Ces profondeurs d'investigation constatées sont cohérentes avec celles que l'on peut estimer à partir du calcul de la longueur caractéristique du matériau (1 m dans ce cas) : la profondeur d'investigation des radars courants est d'environ trois fois la longueur caractéristique du sol, soit 3 mètres.

Finalement, la projection en plan de la trace des échos radar interprétés sur les radargrammes comme issus de toits de vide souterrain permet de délimiter une grande cavité (C1) s'étendant sur toute la longueur de la parcelle étudiée et deux petites cavités C2 et C3 (Fig. 4). Sur cette figure, des étoiles symbolisent les centres des corps résistants interprétés en tant que cavités sur les panneaux électriques. On constate que ces étoiles coïncident parfaitement avec le centre de la grande cavité (C1). On note donc une bonne concordance entre les résultats géophysiques du radar géologique et de la tomographie électrique. Cela corrobore l'interprétation proposée dans cette étude qui évoque l'existence de cavités dans le sous-sol de la parcelle étudiée.

Deux sondages mécaniques de contrôle (SM1 et SM2) ont été dernièrement réalisés afin de vérifier l'existence de la cavité C1. Leurs résultats confirment nos interprétations. En effet, les deux sondages SM1 et SM2 ont recoupé un vide souterrain aux profondeurs respectives de 1,48 m et 1,44m. Par contre, un troisième sondage (SM3) réalisé en dehors des cavités interprétées n'a pas traversé de vide souterrain (Fig. 4 et 5).

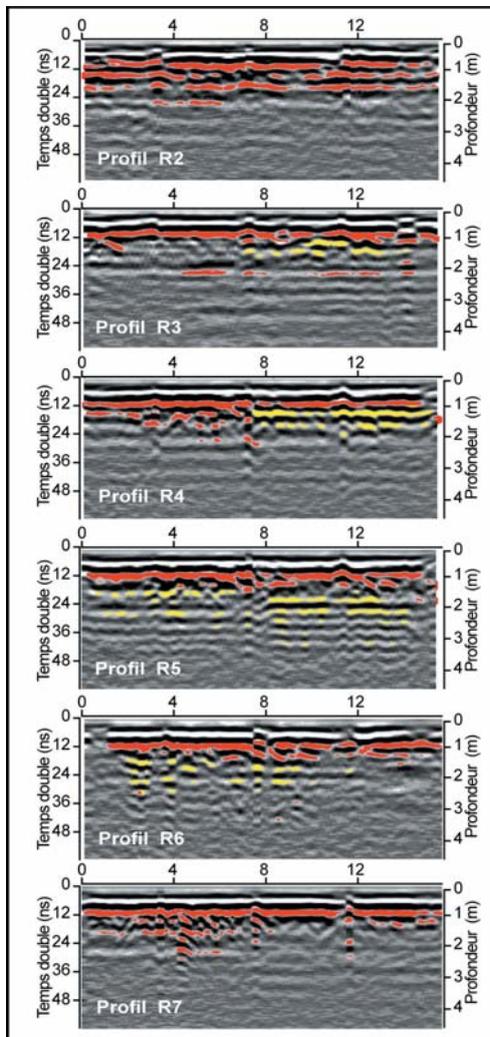


Figure 3
Enregistrements radar géologiques des profils R2 à R7 montrant des réflexions énergétiques issues des interfaces de cavités.

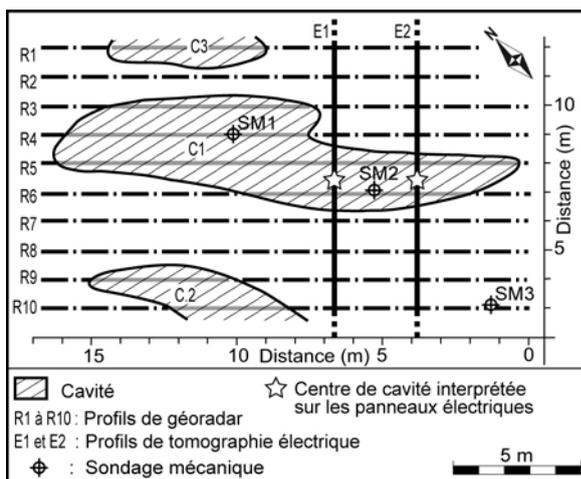
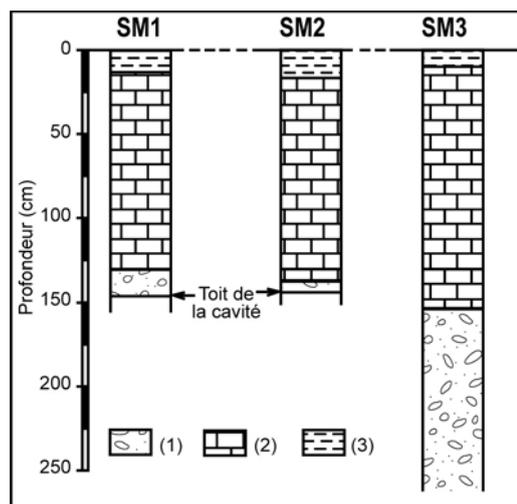


Figure 4
Localisation des cavités souterraines mises en évidence par les levés géophysiques.

Figure 5
 Logs stratigraphiques des sondages mécaniques réalisés pour contrôler les anomalies géophysiques.
 1. Sable à galets faiblement cimentés.
 2. Calcaire dur à ciment siliceux.
 3. Alluvions et limons.



CONCLUSION

Les résultats des premières expérimentations entreprises dans l'ancienne Médina de Béni-Mellal illustrent l'intérêt de la tomographie électrique et du radar géologique dans la détection et la délimitation des cavités souterraines. Une des difficultés de l'interprétation des données géophysiques sur ce site réside dans le caractère hétérogène du massif de fondation. En effet, il est très rare que le massif encaissant soit physiquement homogène et l'anomalie due à la cavité pourra se superposer à celles qui tiennent à l'hétérogénéité du sous-sol. Toutefois, la combinaison des données des panneaux électriques et de celles du radar géologique a permis de réduire considérablement ces indéterminations.

Il faut signaler que, si les panneaux électriques ne reflètent pas les hétérogénéités du sous-sol, c'est à cause du lissage qui leur a été appliqué en vue d'atténuer les hautes fréquences et de rehausser l'anomalie principale engendrée par la cavité souterraine.

La méthodologie établie dans le cadre de ce projet sera susceptible d'être appliquée (éventuellement avec quelques modifications comme, par exemple, des profils radar perpendiculaires à la direction présumée des cavités pour mieux en préciser la géométrie) non seulement aux zones urbanisées, mais aussi aux terrains en cours d'aménagement. La généralisation de cette étude sur l'ensemble des zones à risque aidera à élaborer un système d'information géographique qui permettra aux aménageurs d'intervenir en amont et de prévenir les conséquences d'un affaissement ou d'un effondrement gravitaire.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action intégrée (MA/02/45) entre l'université Cadi Ayyad et Mohammed 1^{er} (Maroc) et l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI, France). Les auteurs remercient les cadres de l'Agence urbaine de Béni-Mellal pour leur contribution à l'acquisition des données sur le terrain et Monsieur Richard Lagabrielle du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour sa collaboration et ses recommandations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AL-FARES W., BAKALOWICZ M., ALBOURY Y., VOUILLAMOZ J.-M., DUKHAN M., TOE G., GUERIN R., Contribution de la géophysique à l'étude d'un aquifère karstique – Exemple : le site karstique du Lamalou, 3^e Colloque GEOFCAN, Orléans, 25-26 septembre 2001.

- [2] AZEMARD P., GARCIAZ J.-L., Recherche des karstifications sous la plate-forme du TGV Méditerranée, *Journée Scientifique et Technique, Radar*, Nantes, France, mai 2001.
- [3] CASAS A., LAZAROR., VILAS M., BUSQUET E., Detecting karstic cavities with ground penetrating radar at different environments in Spain. *Proceeding of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Japan, 1996, pp. 455-460.
- [4] DENG S., ZUO Z., WANG H., The application of ground penetrating radar to the detection of shallow faults and cavities. *Proceeding of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Ontario Canada, 1994, pp. 1115-1120.
- [5] DECEUSTER J., KAUFMANN O., Application des tomographies en résistivité électrique 3D à la reconnaissance de zones karstifiées, Belgique, 4^e Colloque GEOFCAN, Paris, 23-24 septembre 2003.
- [6] MIEHE J.-M., FEUGA B., VACHETTE C., Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique, 4^e Colloque GEOFCAN, Paris, 23-24 septembre 2003.
- [7] ROTH M.J.S., MACKEY J.R., MACKEY C., NYQUIST J.E., A case study of the reliability of multielectrode earth resistivity testing for geotechnical investigations in karst terrains, *Engineering Geology*, 65, 2002, pp. 225-232.
- [8] LAGABRIELLE R., GRANDSERT P., MILLEREAU S., NEBIERIDZE S., Performances comparées de méthodes géophysiques pour la détection de cavités dans les limons. Exemple de la station d'essais de la SNCF sur la LGV Nord, *Journée Scientifique et Technique, Radar*, Nantes, France, octobre 2003.
- [9] BOURCART J., Notice explicative de la carte géologique d'exploration du territoire autonome du Tadla au 1/200.000, *Notes Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 58 bis 1942, 44 pages.
- [10] CHOUBERT G., FAURE MURET A., Lexique stratigraphique du Maroc, *Notes Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 134, 1956, 165 pages.
- [11] EDWARDS L.S., A modified pseudosection for resistivity and induced polarization, *Geophysics*, 42, 1977, pp. 1020-1036.
- [12] PARASNIS D.S., *Principles of applied geophysics*, Fifth Edition, Chapman & Hall (Editors) London, 1997, 429 pages.
- [13] TELFORD W.M., GELDART L. P. SHERIFF R.E., *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, 1995, 770 pages.
- [14] LOKE M. H., BARKER R. D., Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44, 1996, pp. 131-152.
- [15] CLARK D. Near surface effects workshop, *The leading Edge*, 6, 1987, pp. 8-9.
- [16] DUBOIS J.C., Borehole radar experiment in limestone: analysis and data processing, *First Break*, 13, 2, 1995, pp. 57-67.
- [17] FALK L., OLSON O., SANDBERG E., FORSLUND O., LUNDMARK L., A directional antenna for borehole radar, *Proceeding 3rd OECD/NEA Stripa Symposium*, Stockholm, 1989, pp. 61-72.
- [18] POTTECHER G., A synthetic pulse GPR based on a network analyser, *Third International Conference on Ground Penetrating Radar*, Denver, may 1990, pp. 14-18.

