

## Contribution des méthodes géophysiques à la cartographie des cavités souterraines de l'ancienne médina de Boujad (Maroc)

### [ Contribution of geophysical methods in mapping underground cavities of the ancient medina of Boujad (Morocco) ]

*Achraf Kharmouch<sup>1</sup>, Abdessamad Najine<sup>1</sup>, and Amina Wafik<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal, Morocco

<sup>2</sup>Département de Géologie, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

---

Copyright © 2020 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:** Boujad is a Moroccan city located in the region of Beni Mellal - Khenifra, and is considered until now as a spiritual center welcoming travelers from the Kingdom in search of religious precepts. Investigations carried out in the ancient medina of this city reveal the presence of underground cavities of natural and anthropic origin, which repeatedly cause collapses and considerable human and material damage. In order to characterize the subterranean network of this city, a geophysical study was carried out by means of electrical prospecting of the subsoil, complemented by a seismic refraction investigation, in order to investigate the geological and geophysical characteristics of the underground cavities, and then to produce a detailed mapping of the anomalies detected within the ancient medina of Boujad. The geophysical investigations thus revealed a heterogeneous subsoil dominated by limestone formations and sheltering several underground anomalies, and allowed, by superimposing the maps of anomalies drawn up at the end of each technical investigation, then correlating and verifying the results collected in relation to the data from the surveys and preliminary investigations, to draw up a synthetic map of the main areas concerned by the presence of cavities which are quite varied and spread over the entire extent of the ancient medina of Boujad.

**KEYWORDS:** Boujad, medina, underground cavity, electrical panel, seismic refraction.

**RESUME:** Boujad est une ville marocaine située dans la région de Béni Mellal - Khenifra, et est considérée jusqu'à présent comme centre spirituel accueillant les voyageurs issus du Royaume en quête de précepte religieux. Les enquêtes tenues dans l'ancienne médina de cette ville révèlent la présence de cavités souterraines d'origines naturelle et anthropique, qui causent à maintes reprises des effondrements et des dégâts humains et matériels considérables. Pour caractériser le réseau sous-cavé de cette ville, une étude géophysique a été réalisée moyennant la prospection électrique du sous-sol, complétée par une investigation par sismique réfraction, dans le but d'investiguer les caractéristiques géologiques et géophysiques des cavités souterraines, puis de produire une cartographie détaillée des anomalies détectées au sein de l'ancienne médina de Boujad. Les investigations géophysiques ont ainsi révélé un sous-sol hétérogène dominé par des formations calcaires et abritant plusieurs anomalies souterraines, et ont permis, moyennant la superposition des cartes d'anomalies dressées à l'issue de chaque technique d'investigation, puis la corrélation et la vérification des résultats récoltées par rapport aux données des enquêtes et investigations préliminaires, de dresser une carte synthétique des principales zones concernées par la présence de cavités qui sont assez diverses et s'étalent sur toute l'étendue de l'ancienne médina de Boujad.

**MOTS-CLEFS:** Boujad, médina, cavité souterraine, panneau électrique, sismique réfraction.

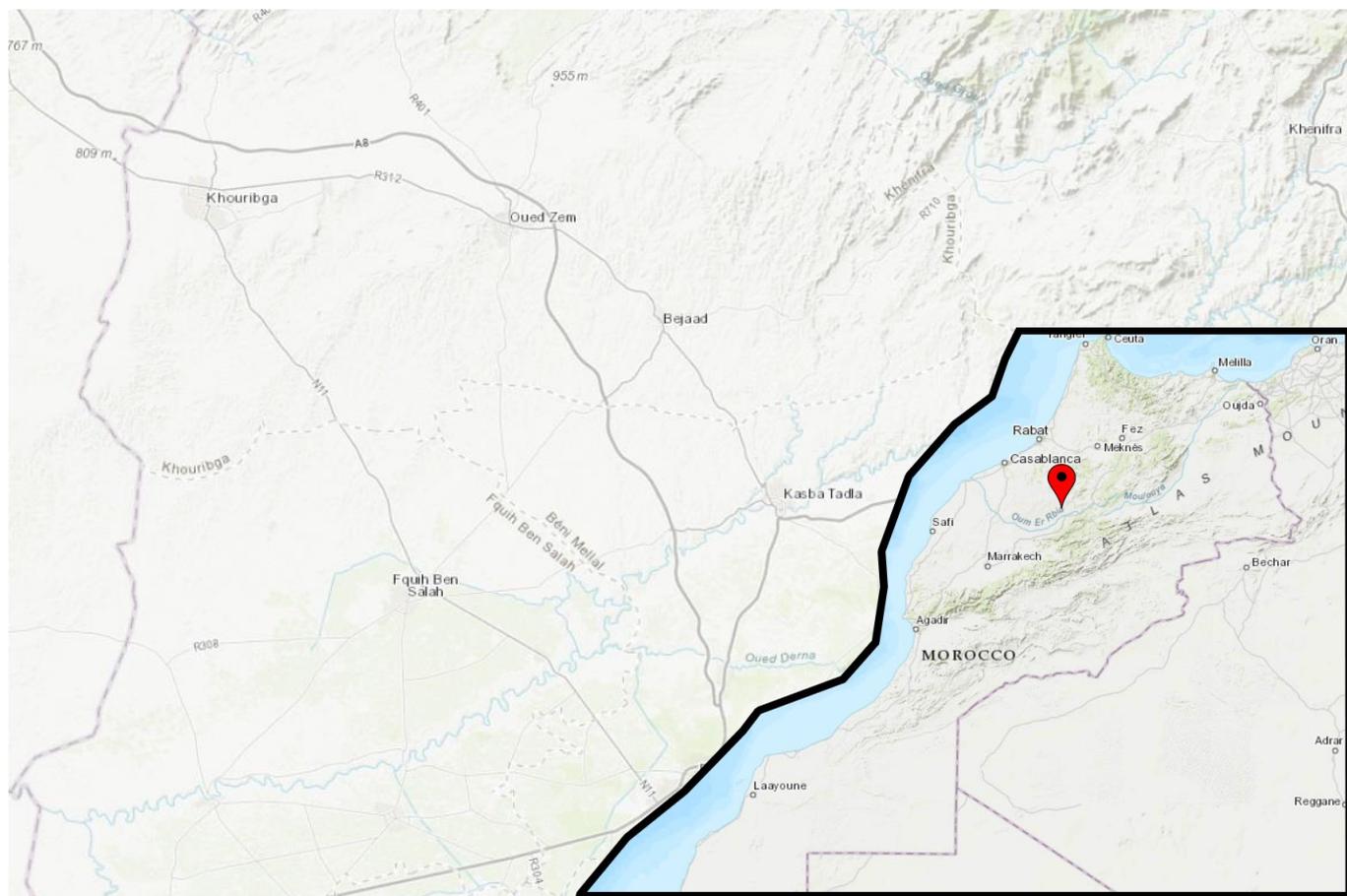
## 1 INTRODUCTION

La ville marocaine de Boujad est située dans la région de Béni Mellal - Khénifra. Depuis sa création, la ville fut considérée comme un centre culturel important, et fut dotée d'un ensemble d'écoles dont l'enseignement diversifié dispensé a permis de fournir des oulémas parmi les plus distingués à travers le Royaume. La ville de Boujad accueille jusqu'à présent un centre spirituel destiné par les voyageurs en quête d'enseignement religieux; la zaouïa Charkaouia.

Les études et prospections menées sur le sous-sol de la ville de Boujad ont permis de constater un grand nombre de cavités souterraines d'origines naturelle et anthropique. Ces vides souterrains ont causés maintes fois des affaissements, des fontis et des effondrements, et donc des pertes humaines et matérielles considérables. À ces effets s'ajoutent les instabilités des constructions et des infrastructures de la ville. Cette situation fait donc appel à la nécessité de la caractérisation méthodique des cavités souterraines de Boujad, notamment à travers les méthodes géophysiques, afin d'orienter les aménagements urbains au sein de la ville.

Il s'agit principalement de mettre en œuvre les méthodes géophysiques du panneau électrique et de sismique réfraction pour détecter et délimiter des cavités souterraines présentes dans le milieu urbain de Boujad, ces deux techniques étant très favorables dans le contexte du site étudié présentant des contrastes considérables des propriétés physiques du vide souterrain et de son milieu encaissant, notamment à la lumière des résultats satisfaisants qu'ont offerts ces méthodes géophysiques lors de la reconnaissance des cavités souterraines dans d'autres contextes [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. L'objectif principal de cette étude étant d'investiguer les caractéristiques géophysique des cavités souterraines dans l'ancienne médina de Boujad, et de produire une cartographie détaillée de ces anomalies détectées.

## 2 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE



**Fig. 1. Localisation géographique de la ville de Boujad**



La ville de Boujad se situe au niveau de la frontière du plateau des phosphates et de la plaine de Tadla.

D'après la carte géologique du Maroc [10], les affleurements rencontrés dans la zone de la ville de Boujad appartiennent au terrain crétacé.

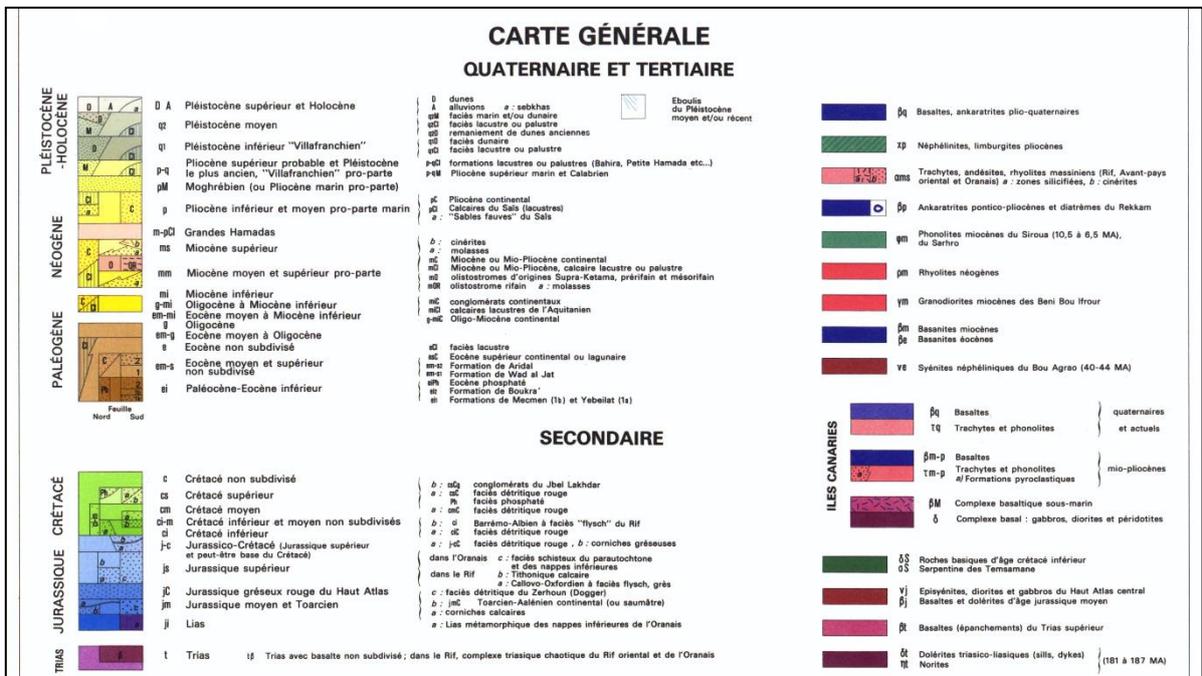
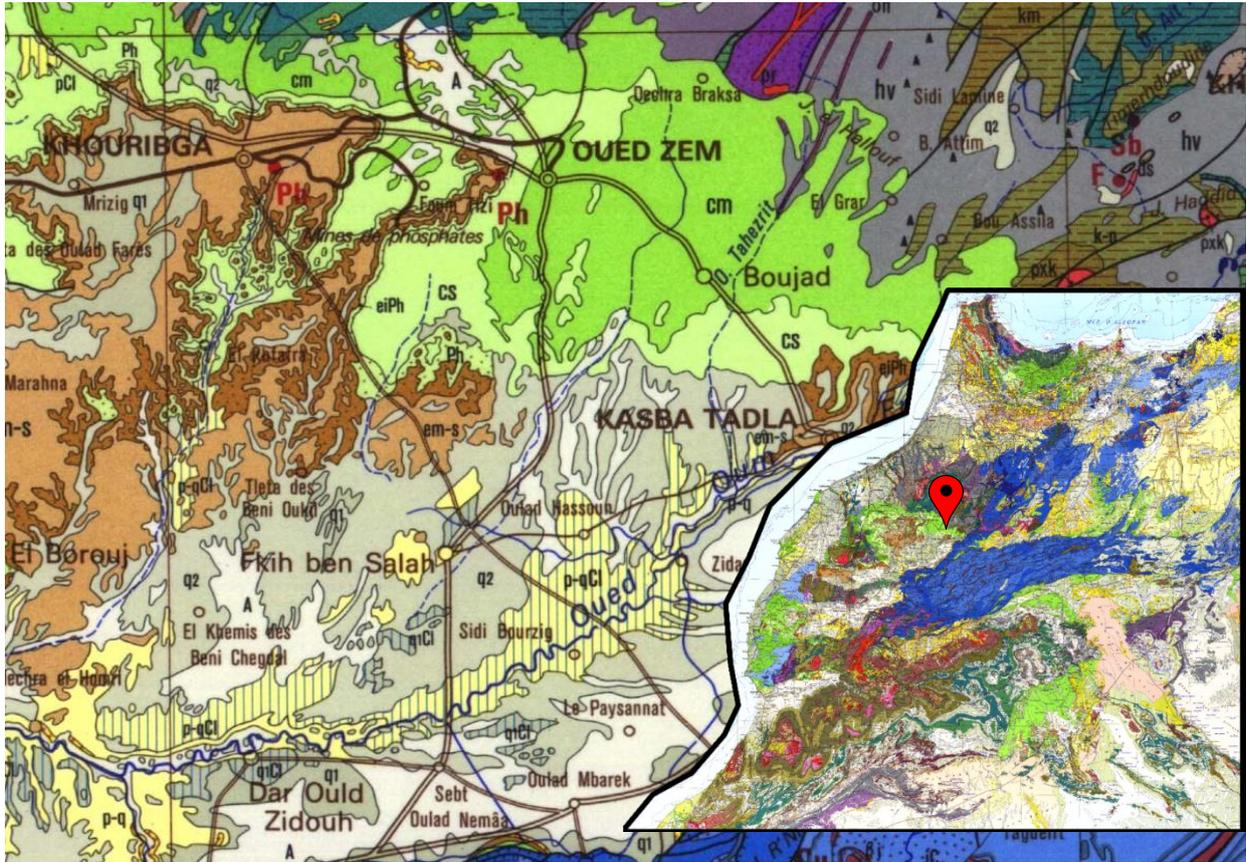


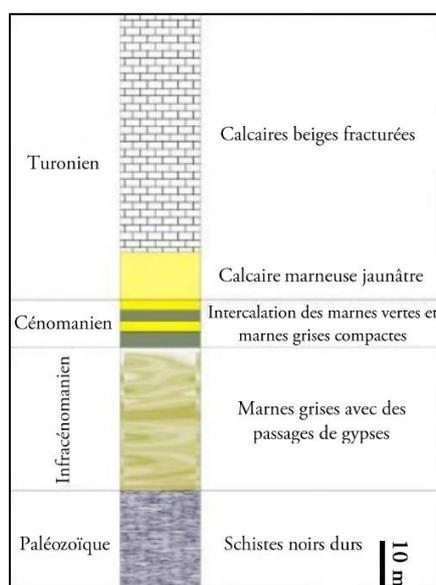
Fig. 2. Carte géologique de la zone de Boujad [10]

En effet, les affleurements géologiques de cette région sont dominés par les formations calcaires du Turonien, dont l'épaisseur varie de 20 m au Sud de Settat à 60 m aux pieds de l'Atlas [11].

Du nord de la ville de Boujad vers son sud, et à partir de son centre, on trouve les affleurements géologiques suivants:

- Le Cénomanién, formé dans sa base de conglomérats, de marnes jaunes, et d'une intercalation marno-calcaire;
- Le Turonien, constitué de calcaire de nuance blanche à beige, avec une partie de dolomite et de calcaire rouge brun;
- Le Maastrichtien, où l'on trouve des marnes phosphatées au sommet de calcaires intercalaires métriques, à l'addition d'argiles blanches et de marnes.

Quant à la description verticale des formations géologiques de la ville, elle peut être appréciée à travers la coupe lithologique suivante, fournie par une étude d'évaluation environnementale du projet d'assainissement de la ville de Boujad [11]:



**Fig. 3. Affleurements géologiques de Boujad [11]**

### **3 MATÉRIEL ET MÉTHODES**

Un diagnostic du sous-sol de l'ancienne médina de Boujad a été mené durant les mois de juin, juillet et août 2019 dans le cadre d'une étude géophysique couvrant la totalité de cette zone suivant un planning prédéterminé.

En effet, et à l'issu des premières données préliminaires récoltées sur le site à étudier, des visites de terrain ont été programmées à l'amont de la phase géophysique pour reconnaître le site, définir les accès à suivre pour la mise en œuvre des techniques d'investigation, et recueillir toute donnée complémentaire (validation des modèles géologiques prédéfinis, relevé visuel de l'état du cadre bâti et des pathologies apparentes, investigation des indices de surface se trouvant à proximité des alentours de l'ancienne médina) et pour révéler les éventuelles anomalies susceptibles de créer des distorsions des mesures et signaux géophysiques en surface (antennes électromagnétiques, pylônes ...).

Sur la base des visites préliminaires, il a été procédé à la définition des dispositifs de mesures adaptés au contexte de la zone étudiée. Ainsi, le diagnostic géophysique s'est basé sur deux techniques principales, choisies pour permettre de perfectionner les outils d'investigation suite à une superposition puis corrélation des différents résultats obtenus. La première technique étant la **prospection électrique**, mise en œuvre moyennant cinquante sondages électriques et cinquante sections de tomographie électrique. Cette technique permet d'échantillonner la résistivité tout au long d'un profil donné sur une profondeur donnée, à travers l'acquisition d'un grand nombre de mesures basées sur les combinaisons de quatre électrodes. La variation importante de résistivité permet de retracer les différentes sources enfouies résistantes ou conductrices, et donc de déceler les anomalies susceptibles de correspondre à des cavités souterraines. Le calcul des modèles de résistivités se fera via la méthode d'inversion des données de Loke et Barker [6]. Cette méthode va permettre de détecter les sources résistantes, et de délimiter leur forme à travers leur résistivité intrinsèque. L'efficacité de la modélisation par cette méthode a été

largement prouvée dans de multiples cas d'études géophysiques appliquées à la reconnaissance d'un sous-sol proche et en particulier à la détection et à la cartographie des cavités souterraines [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

La deuxième méthode adoptée, la **sismique réfraction**, mise en œuvre sur deux-cent vingt profils sismiques, permet de localiser des cavités pour des profondeurs généralement d'une vingtaine ou trentaine de mètres, à travers le principe de réfraction d'ondes sismiques dans le sol. L'acquisition des résultats escomptés se fait à travers la dromochronique; représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Ces derniers sont espacés de manière régulière au long du profil étudié, et l'enregistrement des signaux en provenant se fait simultanément via un sismographe synchronisé avec la source.

Les méthodes géophysiques précitées ont été appliquées sur une grille de coordonnées préétablie, ayant une densité de pas permettant de généraliser la prospection sur la totalité de l'ancienne médina de Boujad avec un pouvoir de résolution concluant, tout en optimisant le processus des mesures réalisées.

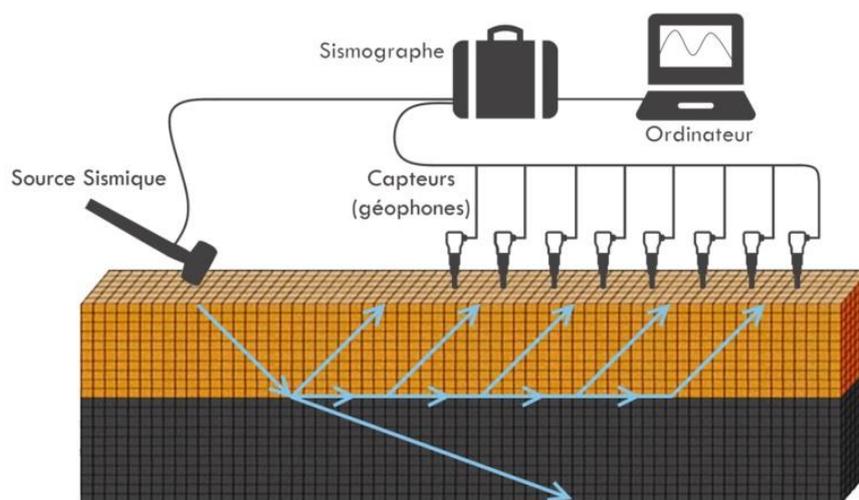
À cet issu, la méthode électrique a été mise en œuvre au niveau des espaces dégagés telles les rues et ruelles, les places et placettes, les aires de stationnement et les jardins. Tandis que la méthode sismique a été appliquée au niveau des maisons (dont les habitants nous ont permis la réalisation des mesures) et dans certaines zones dégagées.

Des sondages électriques d'étalonnage de la première méthode ont été mis en œuvre au préalable au droit de quelques affleurements, en vue d'amorcer les interprétations initiales des mesures enregistrées. Ensuite des profils électriques ont été judicieusement implantés, et la densité des mesures a été adapté au fur et à mesure de l'avancement du procédé d'acquisition de données, pour permettre d'avoir une meilleure imagerie du sous-sol.

La configuration retenue pour la méthode électrique est celle de Schlumberger, disposant les couples d'électrodes (A-M) et (N-B) à une distance supérieure ou égale à cinq fois l'écartement entre les électrodes A et M (égale à l'écartement entre N et B). Cette disposition permet ainsi de caractériser les variations superficielles de la résistivité dans le sous-sol tout en garantissant une meilleure résolution de la méthode en surface.

Les niveaux d'incertitude relatifs aux bruits artificiels ont été maîtrisés via un contrôle permanent et régulier des mesures: le facteur de qualité de chaque mesure est vérifié, et chaque profil électrique est visualisé afin de s'assurer de la cohérence des mesures. Tout doute relatif à une donnée mesurée est traduit par l'édition de la donnée et l'affichage des profils de résistivité apparente pour s'en assurer.

L'acquisition des données de la sismique réfraction s'est opérée moyennant des géophones à espacement régulier au long des profils sondés, et un sismographe enregistrant les signaux issus des géophones actifs, celui-ci étant synchronisé avec la source.



**Fig. 4. Dispositif expérimental de la sismique réfraction**

La configuration des paramètres de distances entre la source des tirs et les géophones actifs s'est faite à la lumière de la notion de fenêtre d'observation optimale [12] introduite pour définir un mode opératoire séparant les signaux sismiques mesurés des éventuels bruits environnants.

Ainsi, après les essais de prospection préliminaire, le premier géophone actif est déposé généralement à une distance de la source égale à la moitié de la profondeur d'investigation escomptée, tandis que le dernier géophone est mis en place par rapport à la source au double de cette distance de profondeur cible. Pour assurer un échantillonnage spatial adéquat de cette fenêtre d'observation, la distance inter-géophones est prise en pratique entre 0,5 et 5 mètres. Les mesures sismiques sont alors opérées dans divers endroits de l'ancienne médina de Boujad, tout en tenant compte de ces différents paramètres et des précautions vis-à-vis les éventuels signaux perturbants précités.

Il est à rappeler que la sismique réfraction se base sur les ondes de compression (ondes premières P), étant les plus rapides et facilement reconnaissables, et dont la réfraction aux toits des couches permet de calculer les vitesses de propagation dans ces milieux traversés et leurs épaisseurs. L'existence d'une anomalie souterraine, en l'occurrence des vides, se traduit en pratique par un retard enregistré dans le temps de parcours des ondes sismiques dans le terrain traversé, et par des phénomènes physiques tels l'amortissement des amplitudes des ondes ou leur diffraction.

Les données sismiques recueillies seront alors corrélées aux données de la tomographie électrique, pour permettre une confrontation systématique des mesures avant de pouvoir lever les incertitudes et dresser une cartographie des cavités souterraines au niveau de l'ancienne médina de Boujad.

#### 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'interprétation des résultats obtenus est faite suite à un traitement et une analyse des données géophysiques récoltées, tout en gardant à l'esprit les informations géotechniques et géologiques disponibles pour le site étudié. Ainsi, et suite à l'achèvement de l'acquisition des mesures géophysiques, il a été procédé à l'établissement des graphiques relatifs aux sondages électriques réalisés, et à l'élaboration des panneaux de résistivité électrique et des dromochroniques sismiques.

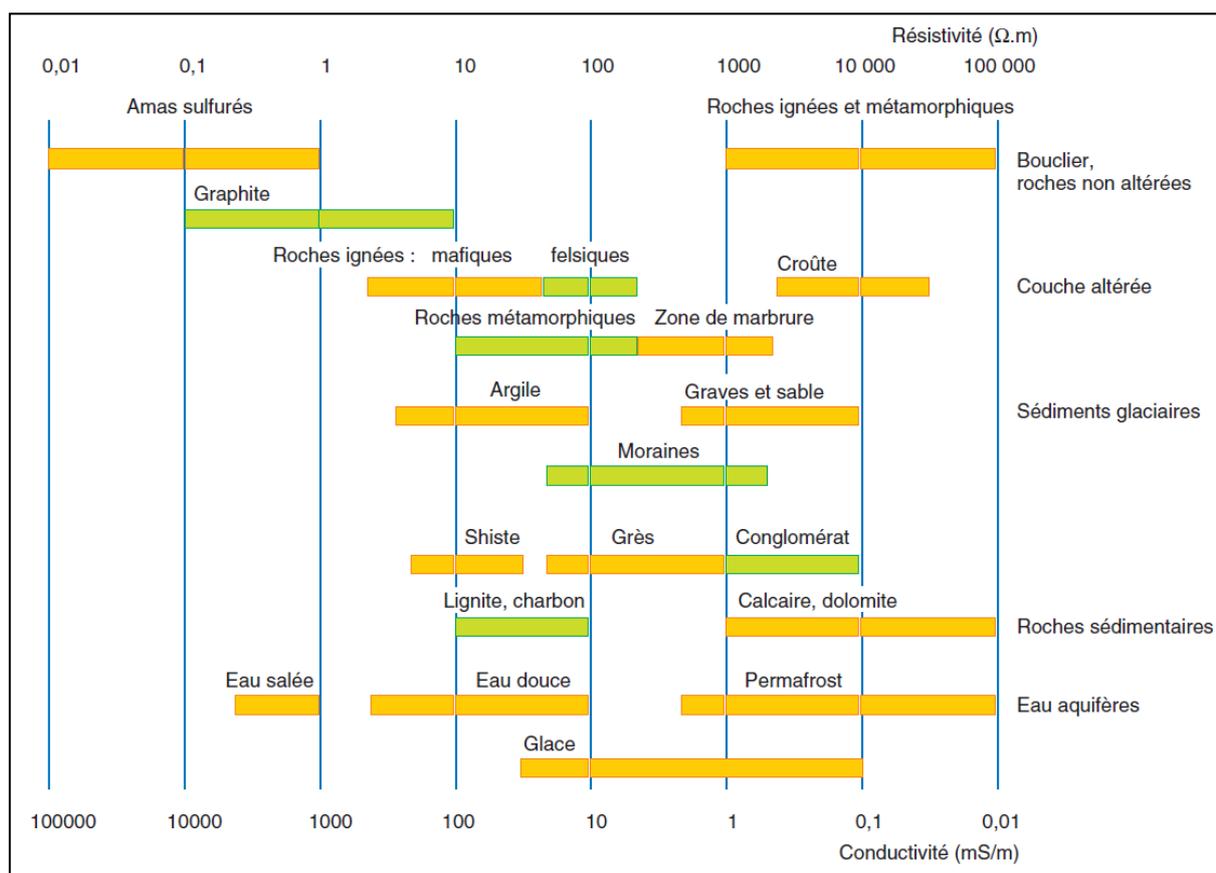
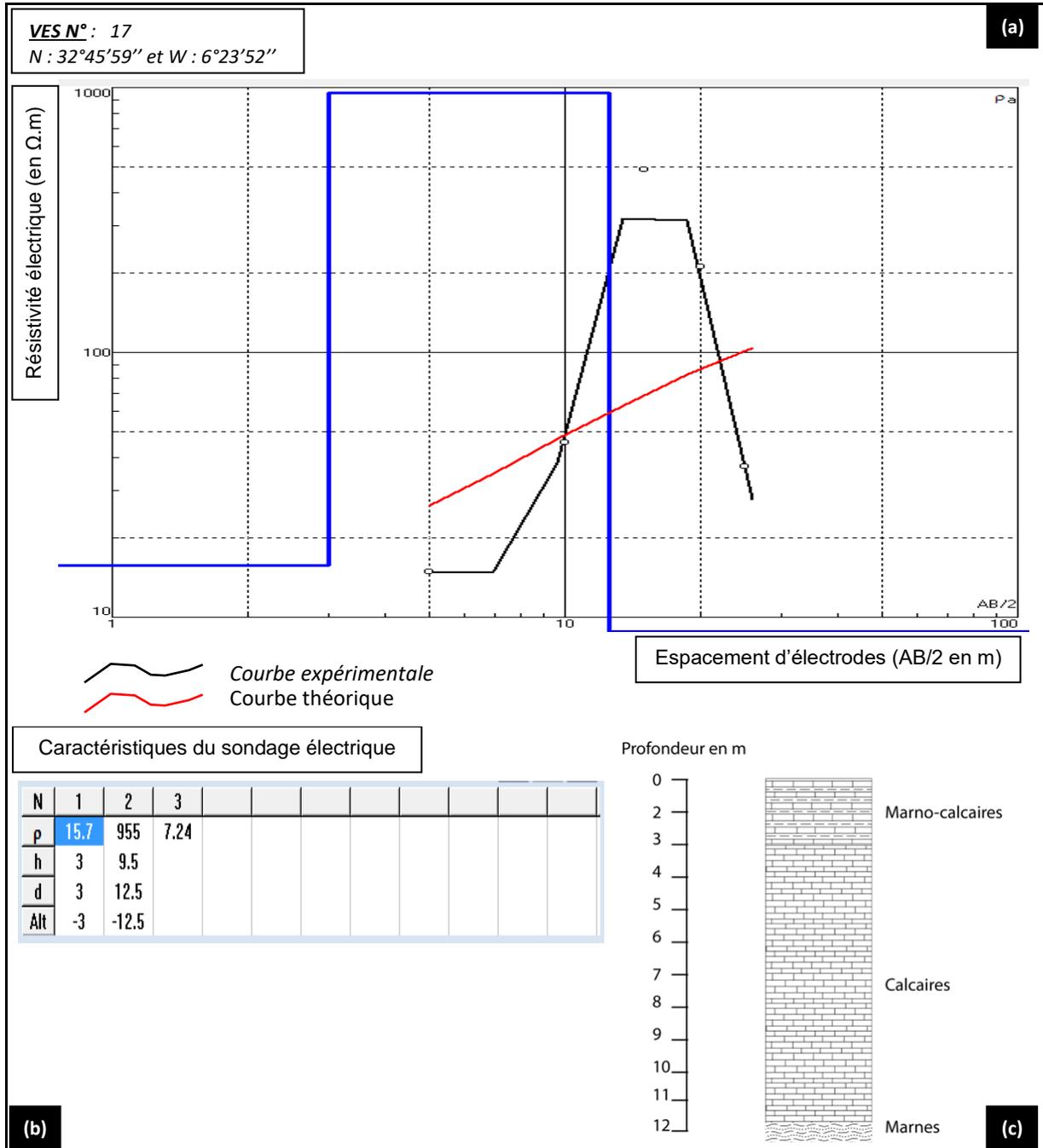


Fig. 5. Gamme des résistivités des principaux sols terrestres [13]

L'analyse des résultats des cinquante sondages électriques réalisés montre clairement des contrastes remarquables des valeurs de résistivité apparente, interprétés par des variations brutales de la lithologie des couches sous-jacentes. Le travail de

Palacky en 1991 permet d'apprécier les gammes de résistivités des principaux sols terrestres (figure 5). La forme du diagramme électrique s'avère toutefois typique, à travers un modèle de sous-sol à trois niveaux d'épaisseurs variables, correspondant à la présence d'un milieu résistant, souvent des calcaires gréseux ou des bancs calcaro-dolomitiques, entouré de deux couches conductrices, principalement des calcaires marneux, ou des sables et microconglomérats (les résultats de deux sondages sont exposés à titre d'exemple dans la figure 6).



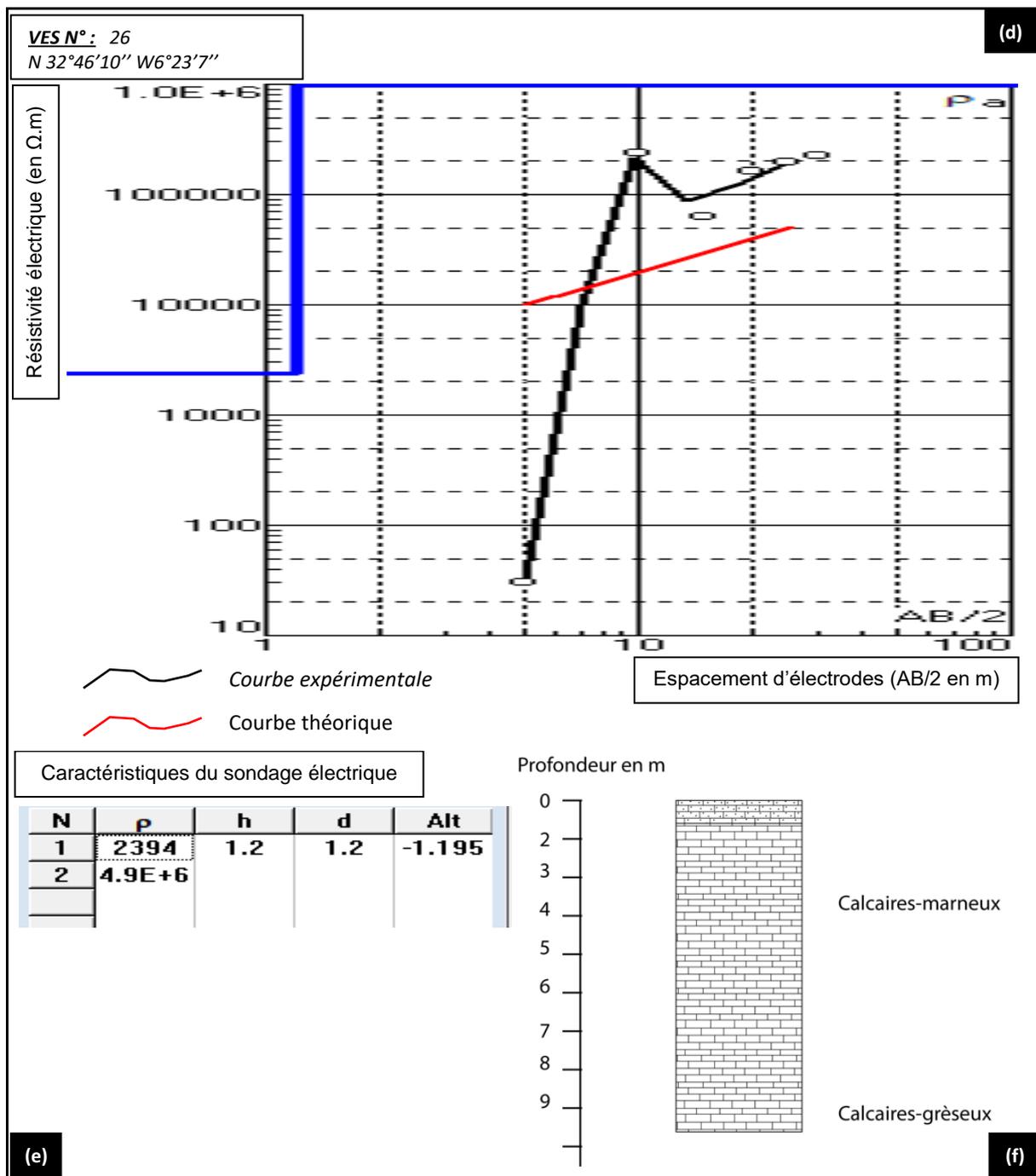
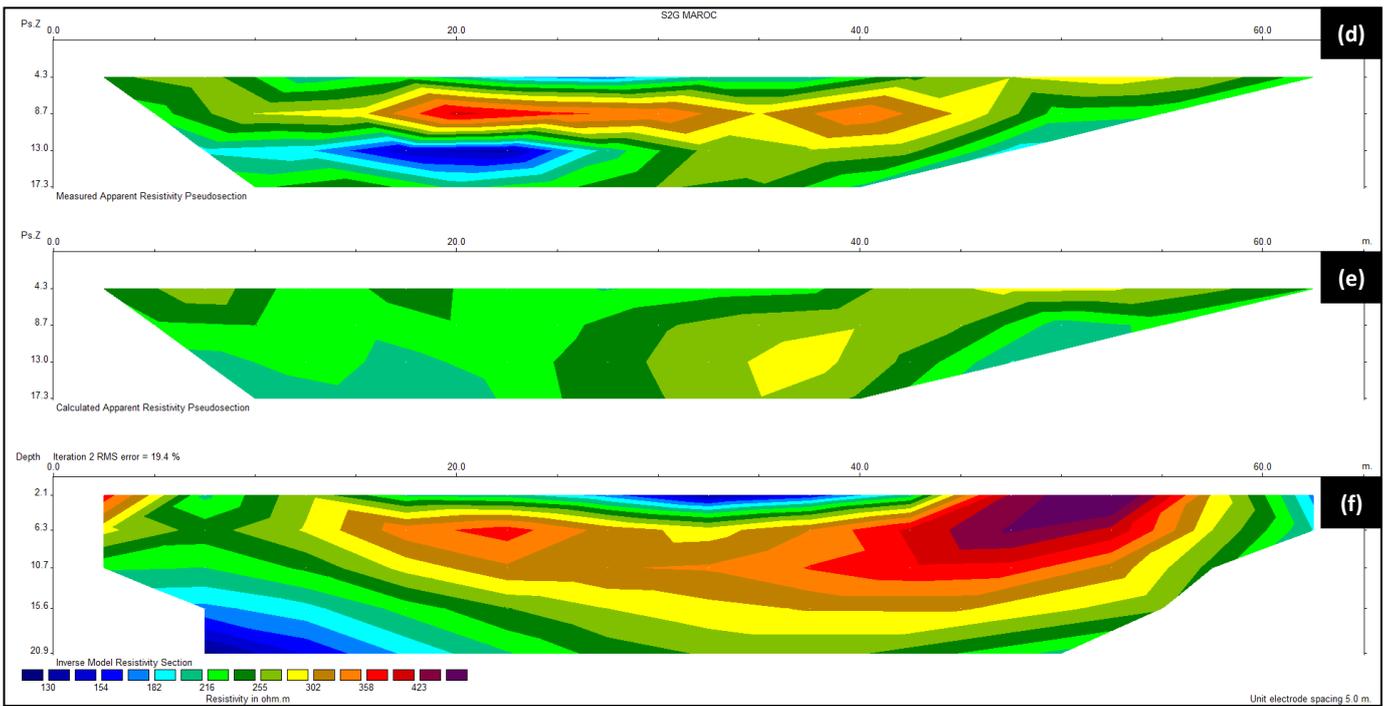
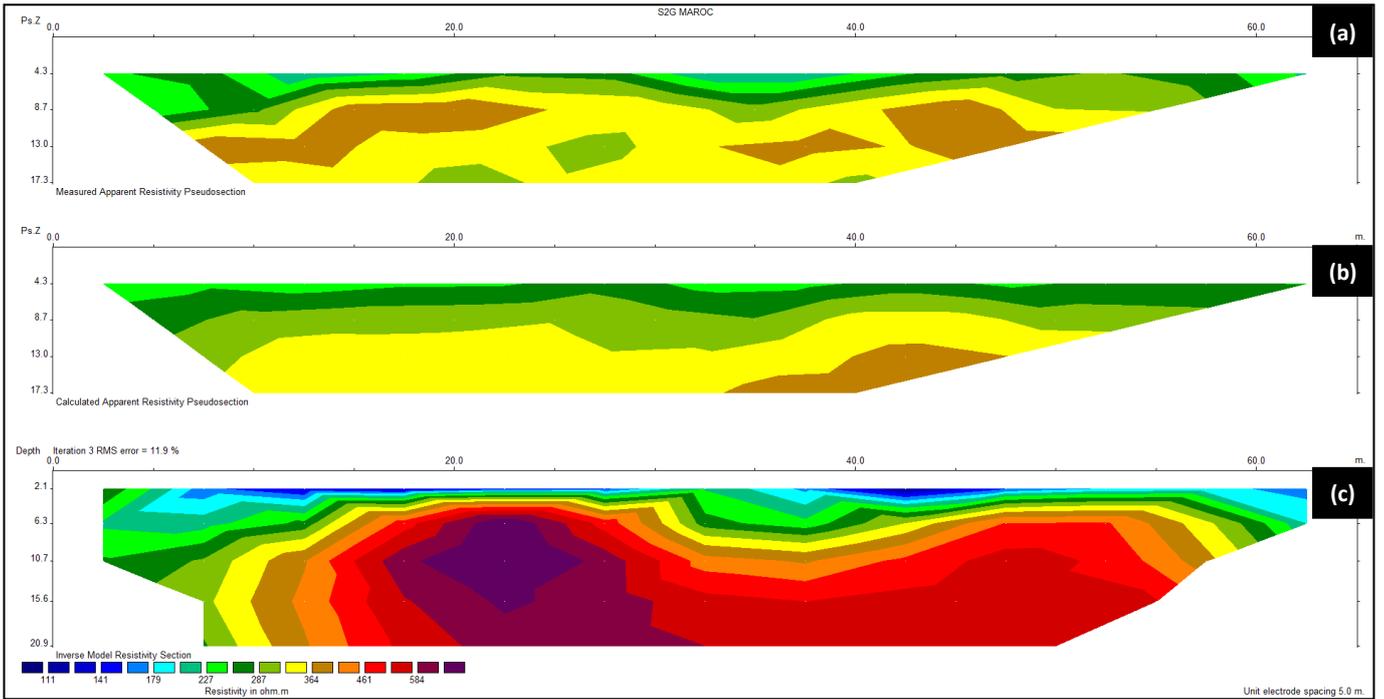


Fig. 6. Résultats des mesures électriques enregistrées au niveau des sondages 17 (a, b et c) et 26 (d, e et f).

a, d: courbes représentant la résistivité apparente en fonction de la distance entre électrodes d'injection (échelle logarithmique); b, e: tableaux des résultats des sondages; c, f: logs stratigraphiques synthétiques.

Les résultats des sondages électriques ont été complétés par les données des panneaux électriques, modélisés par des pseudo-sections du sous-sol montrant la distribution réelle de la résistivité apparents, moyennant le logiciel RES2DMOD [14], [15], puis par des cartes de résistivité inversée suite à une inversion des mesures grâce au logiciel RES2DINV [6].



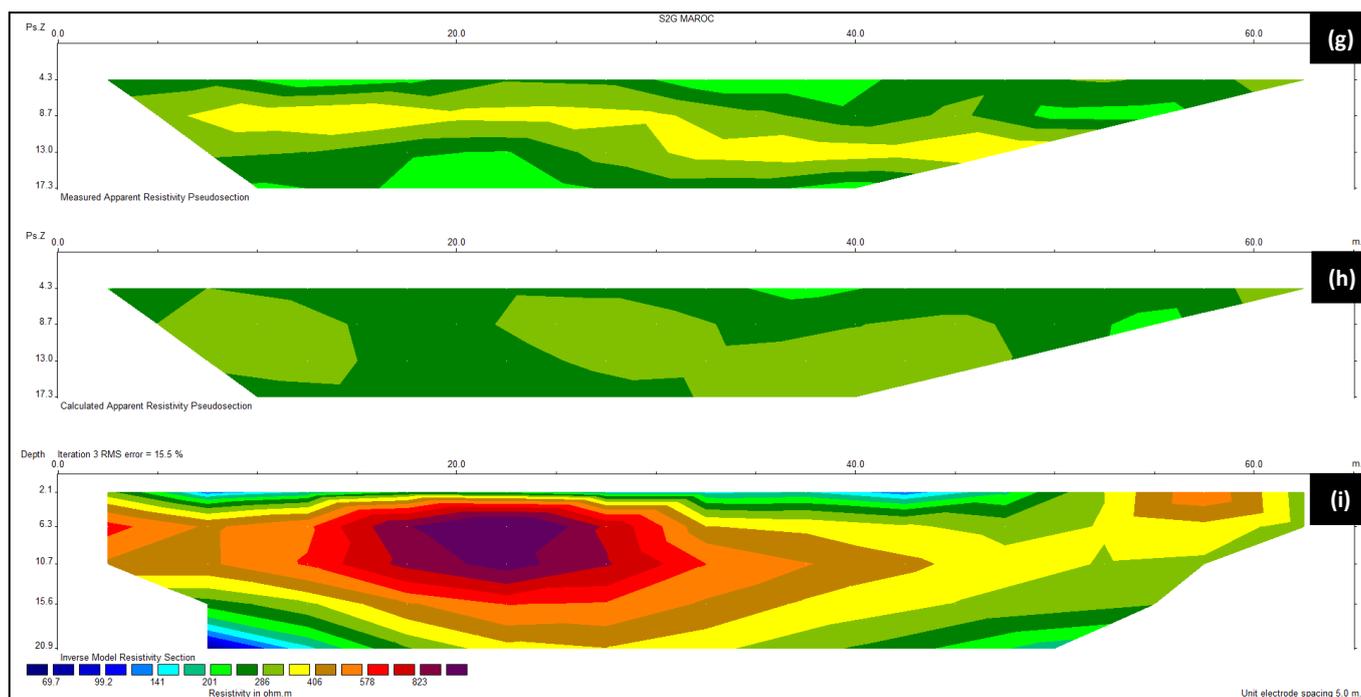


Fig. 7. Résultats de l'imagerie tomographique enregistrés au niveau des profils 18 (a, b et c); 46 (d, e et f) et 49 (g, h et i).

a, d et g: pseudo-sections des résistivités apparentes mesurées; b, e et h: pseudo-sections des résistivités apparentes calculées; c, f et i: cartes des résistivités inversées

La tomographie électrique a permis ainsi de visualiser la variation spatiale de la résistivité apparente (figure 7) définissant plusieurs sources enfouies conductrices ou résistantes par rapport à un encaissant, ce qui témoigne de l'hétérogénéité du sous-sol de l'ancienne médina de Boujad (terrains calcaires gréseux, marneux ou dolomitiques, abritant d'innombrables cavités), et permet de déceler des zones présentant des anomalies à forte résistivité, pouvant être interprétées à priori comme des vides souterrains.

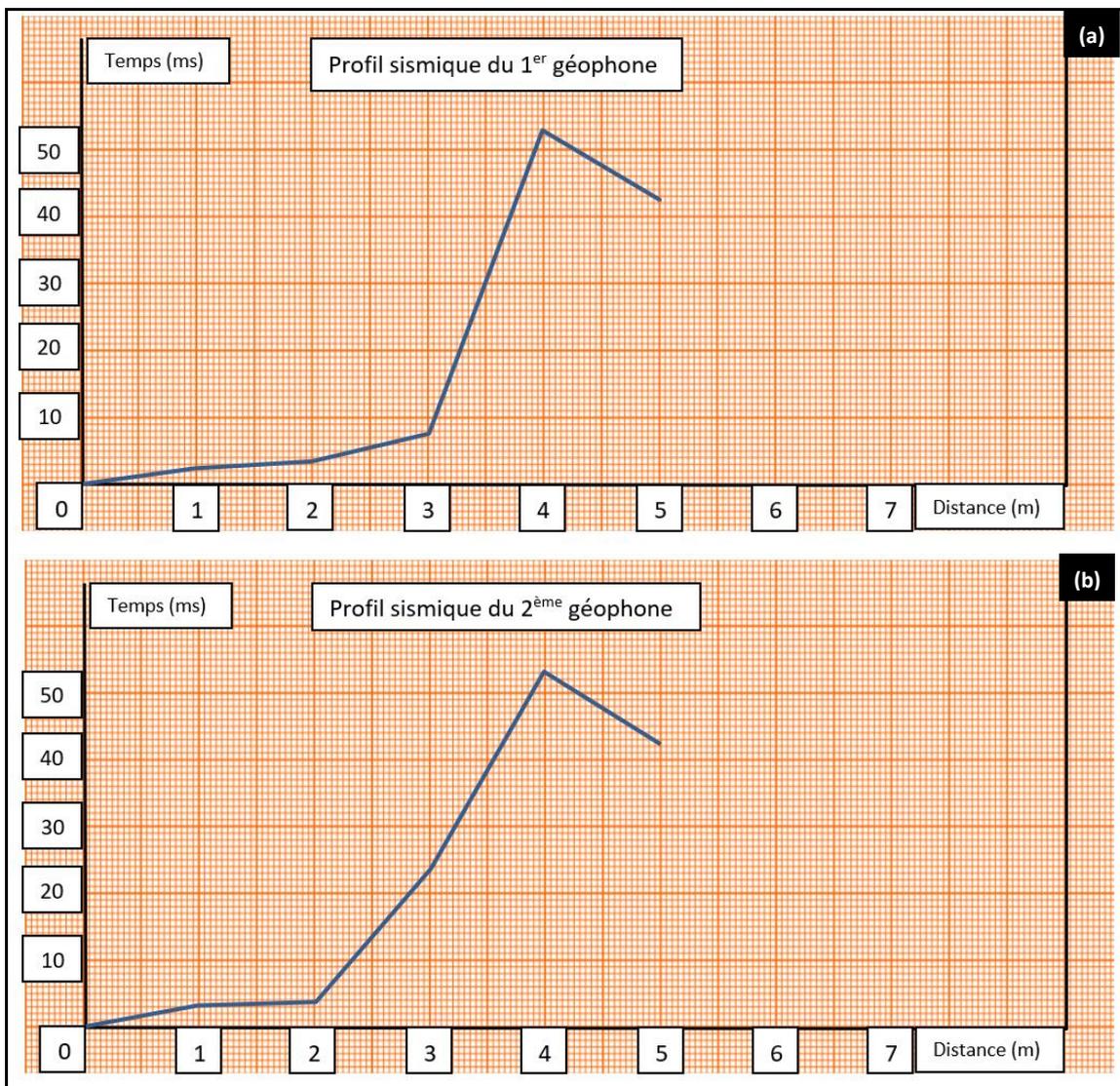
À l'issu d'une analyse affinée des diverses mesures de la prospection électrique, il a été procédé à une délimitation des zones présentant une forte résistivité, soit des anomalies susceptibles de présenter des cavités souterraines dans l'ancienne médina étudiée.

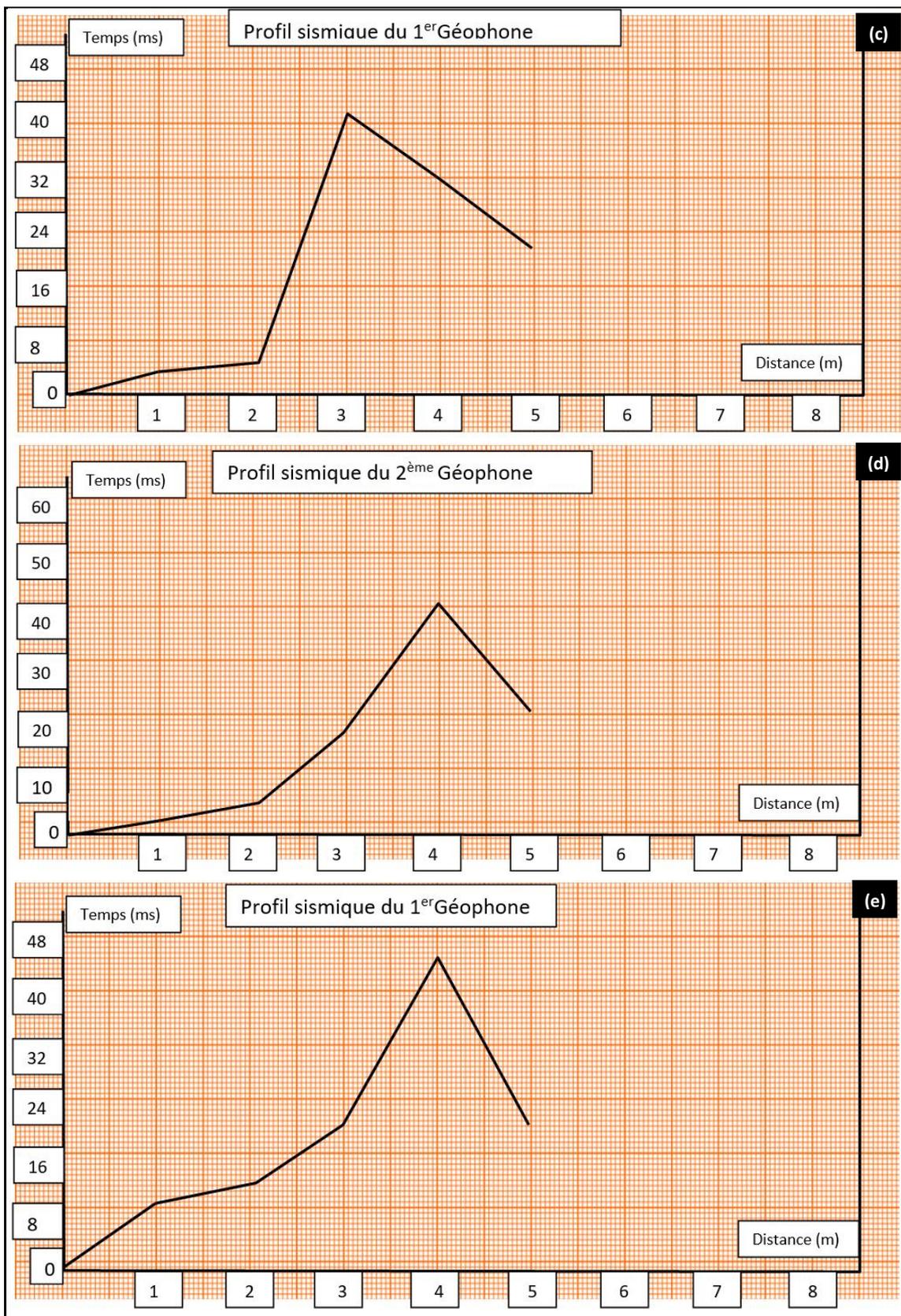
Il faut noter cependant que la méthode de prospection électrique est une technique d'investigation locale permettant de localiser des cavités grandes par rapport à leur profondeur, et dont la profondeur du toit (pour le cas d'une cavité de forme sphérique) est de l'ordre de grandeur de son rayon. Ainsi, en vue de confirmer d'une part les résultats électriques, et afin de mener des investigations à grande profondeur, des mesures sismiques ont été réalisées en complément à la première méthode.

Les résultats de la sismique réfraction sont présentés sous la forme de dromochroniques dont l'analyse et l'interprétation permet de déceler les zones à retard sismique, caractérisées par une diminution expressive de la vitesse de propagation des ondes sismiques. Les mesures présentées en l'occurrence dans le tableau 1 montrent des exemples de sur-délais enregistrés dans le temps de parcours des ondes concrétisés par de fortes pentes enregistrées dans les dromochroniques (figure 8), suite à la présence d'une anomalie souterraine.

Tableau 1. Mesures sismiques enregistrés au niveau des profils 7, 35, 90 et 180

		Distance source - géophone 1 (m)					
		1	2	3	4	5	6
		Distance source - géophone 2 (m)					
		1	2	3	4	5	6
Profil 7	Temps d'enregistrement - géophone 1 (ms)	2.0	3.6	7.0	53.0	42.4	-
	Temps d'enregistrement - géophone 2 (ms)	3.0	3.6	24.2	53.0	42.4	-
Profil 35	Temps d'enregistrement - géophone 1 (ms)	2.2	4.6	41.0	31.0	20.0	-
	Temps d'enregistrement - géophone 2 (ms)	6.2	9.6	19.0	42.0	24.0	-
Profil 90	Temps d'enregistrement - géophone 1 (ms)	9.8	12.4	23.6	46.8	23.6	-
	Temps d'enregistrement - géophone 2 (ms)	1.20	6.0	11.2	34.8	44.8	-
Profil 180	Temps d'enregistrement - géophone 1 (ms)	2.0	4.2	15.8	15.2	48.6	31.0
	Temps d'enregistrement - géophone 2 (ms)	2.4	5.8	12.6	27.8	17.4	18.6





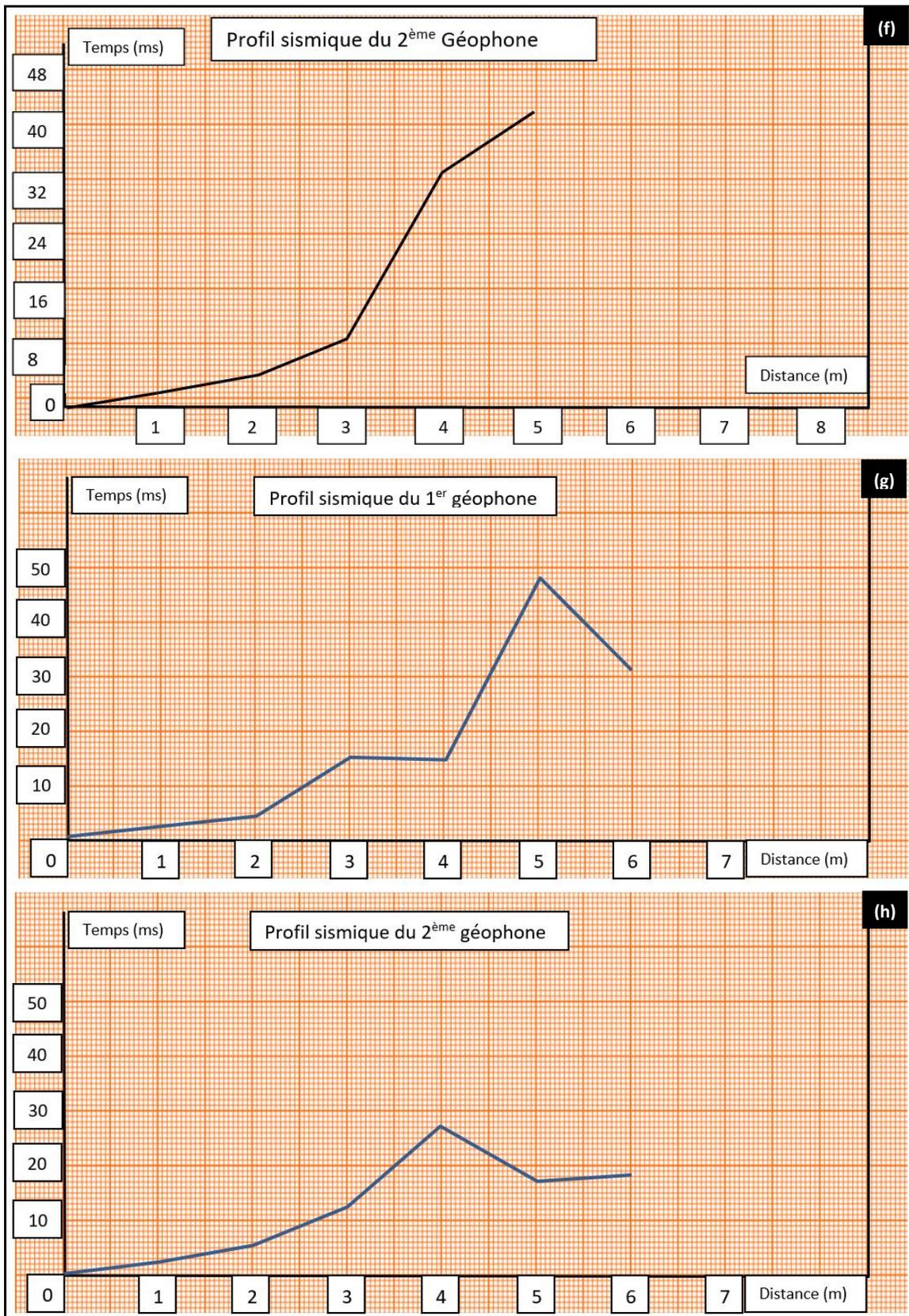
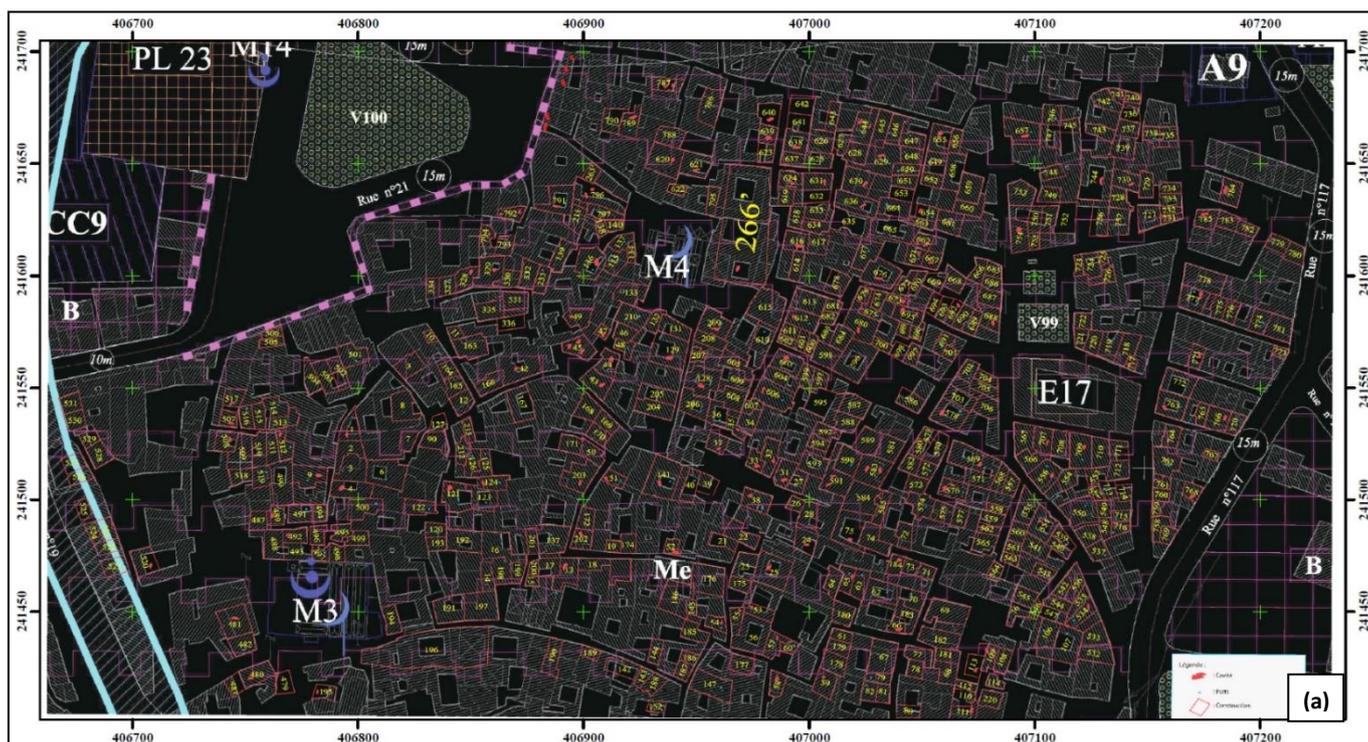


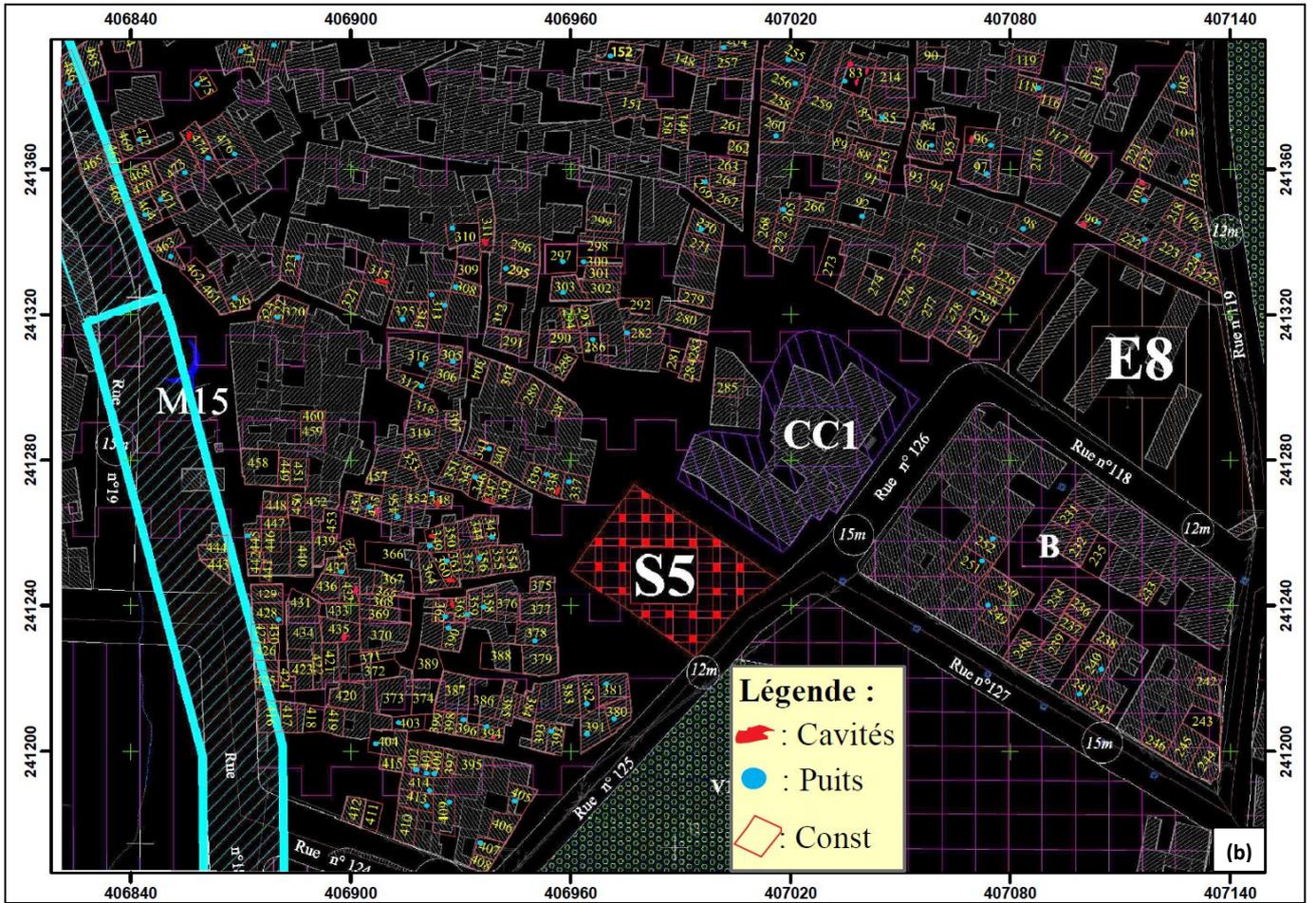
Fig. 8. Dromochroniques des profils profils 7 (a et b); 35 (c et d); 90 (e et f) et 180 (g et h).

a, c, e et g: dromochroniques enregistrées au niveau du premier géophone; b, d, f et h: dromochroniques enregistrées au niveau du deuxième géophone.

Les données géophysiques obtenues confortent en conséquence l'hypothèse de l'existence de cavités souterraines au niveau de l'ancienne médina de Boujad. Des corrélations ont été faites systématiquement entre les différents résultats obtenus, pour lever certaines incertitudes et affiner les modèles des cavités souterraines. En outre, compte tenu du fait que les résultats des enquêtes publiques ne permettront pas de mettre en évidence toutes les cavités enfouies, nous interprétons en tant que cavités souterraines les anomalies correspondant à des zones résistantes coïncidant avec un retard enregistré dans le temps de parcours des ondes sismiques.

Les anomalies détectées par les différentes techniques mises en œuvre ont été enfin projetées sur la carte de l'ancienne médina étudiée, et affinées et vérifiées grâce aux données de l'enquête. Une carte de synthèse de l'ensemble des données géophysiques a été alors élaborée montrant principalement les zones concernées par la présence de cavités souterraines (figure 9). Il faut noter que les anomalies détectées par la géophysique coïncident le plus souvent avec des indices pathologiques de surface.





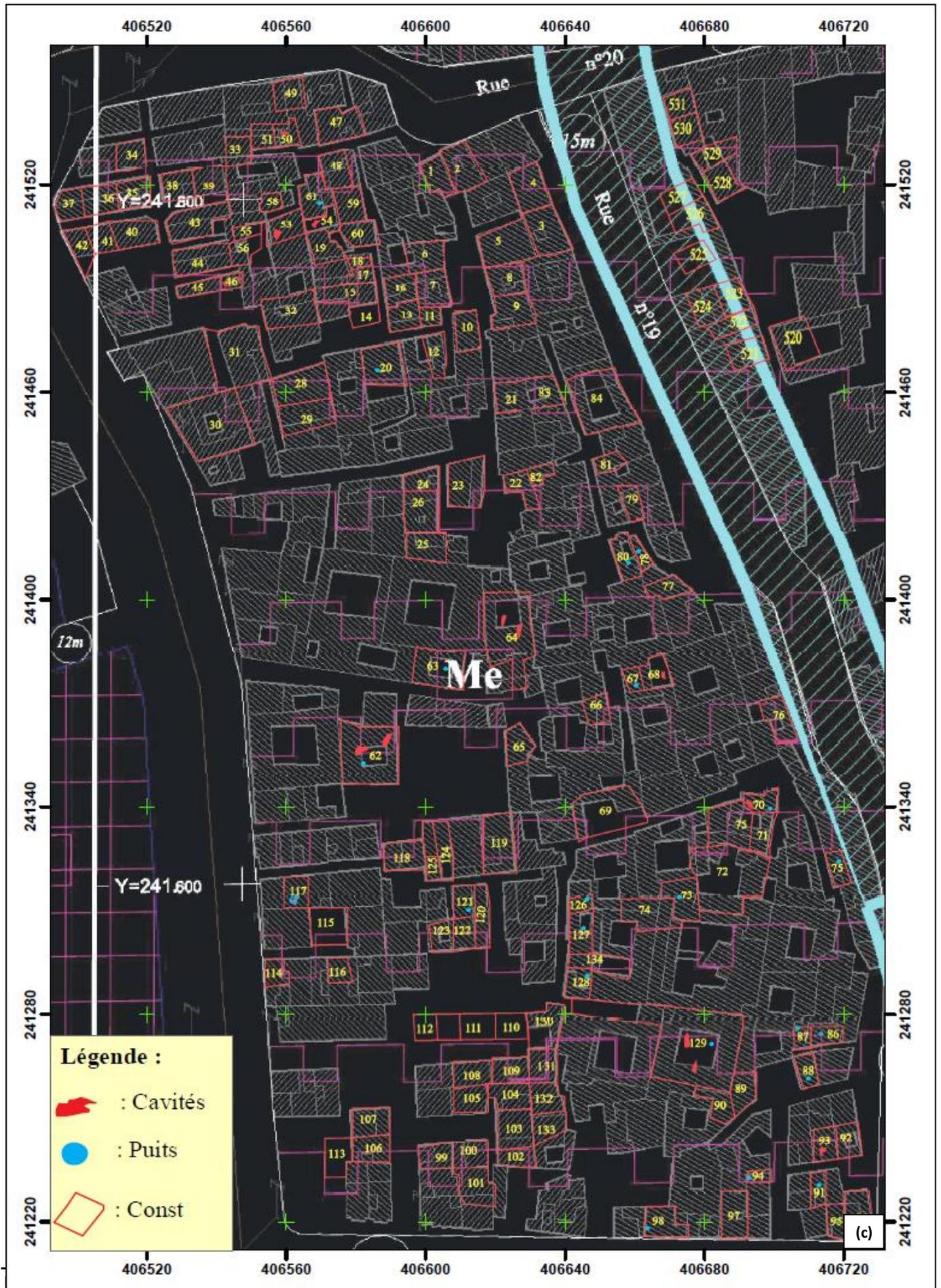




Fig. 9. Cartographie des cavités souterraines détectées à travers les zones (a, b, c et d) couvrant la totalité de l'ancienne médina de Boujad

Cette cartographie de répartition spatiale des cavités détectées montre une importante concentration des cavités souterraines dans le sous-sol des espaces prospectés. L'ensemble des cavités cartographiées sont situées dans des sols sédimentaires formés essentiellement de matériaux détritiques et renfermant des formations à dominante calcaire.

Au total deux cent quarante-huit cavité souterraine ont été détectées à l'issu de la présente étude, sur l'étendu d'une quarantaine de hectares environ de l'ancienne médina de Boujad.

## 5 CONCLUSIONS

Située à la frontière du plateau des phosphates et de la pleine de Tadla, la ville de Boujad abrite dans le sous-sol de son ancienne médina un important réseau de cavités souterraines d'origines diverses, détectés à travers la mise en œuvre de deux techniques d'investigation géophysique; celles de la prospection électrique et de la sismique réfraction, notamment suite aux résultats très favorables qu'ont offert ces méthodes lors de la reconnaissance des cavités souterraines dans des contextes similaires [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

À l'issu des cinquante sondages électriques, des cinquante sections de tomographie électrique, et des deux-cent vingt profils sismiques, réalisés sur l'étendue de l'ancienne médina de Boujad, un modèle typique du sous-sol s'est émergé; à savoir un sous-sol à trois niveaux d'épaisseurs variables correspondant à deux couches qui présentent une résistivité électrique relativement faible (généralement des calcaires marneux, ou des sables et microconglomérats), encaissant un troisième milieu

plus résistant (principalement des calcaires gréseux ou des bancs calcaro-dolomitiques). Ce modèle permet d'abord de valider les modèles géologiques bibliographiques affectés à la zone d'étude, dominés par des formations calcaires appartenant au terrain créacé. Il permet ensuite de se conformer aux constats de présence de plusieurs anomalies souterraines, notamment à travers la variation spatiale différée de la résistivité apparente des différentes couches du sous-sol, témoignant ainsi de leur hétérogénéité (terrains calcaires gréseux, marneux ou dolomitiques, abritant d'innombrables cavités).

Les résultats des pseudo-sections du sous-sol et des cartes de résistivité inversée ont permis ensuite de déceler des zones présentant des anomalies à fortes résistivité et pouvant présenter des vides souterrains. Ces résultats ont été comparés, puis complétés par les données recueillies des dromochroniques établies lors de l'investigation par méthode sismique, dont l'analyse a fait distinguer des zones abritant des anomalies souterraines causant un retard dans la propagation des ondes sismiques.

Confortent par conséquent l'hypothèse de l'existence de cavités souterraines au niveau de l'ancienne médina de Boujad, la présente étude a vu son achèvement par la superposition des cartes d'anomalies dressées à l'issue de chaque technique d'investigation, puis la corrélation et la vérification des données récoltées par rapport aux données des enquêtes et investigations préliminaires, avant de pouvoir élaborer une carte synthétique des principales zones concernées par la présence de cavités souterraines qui sont assez diverses et s'étalent sur toute l'étendue de l'ancienne médina.

En comparant les résultats de cette étude aux données des études similaires, notamment celles relatives à l'étude de reconnaissance des vides souterrains au niveau de l'ancienne médina de Béni Mellal [4], [5], [8], [9], et à l'étude des cavités souterraines de la ville de Zaouït Ech-Cheikh [3], les trois villes étant situées dans la même région, plusieurs constats particuliers se dégagent:

- Les trois villes sont situées dans des zones à particularités géologiques différentes: Boujad se localise entre les limites du plateau des phosphates et la plaine du Tadla, à affleurements appartenant au terrain créacé (à dominante calcaire et dolomitique); tandis que Béni Mellal se particularise par la diversité de son relief où la montagne épouse la plaine par le biais du piémonts remblayé de dépôts mio-plio-quadernaires formés d'alternances de conglomérats, de grès et de marnes et se terminant par des dépôts atlasiques lacustres. La ville de Zaouït Ech-Cheikh quant à elle est située au pied de la chaîne du Haut-Atlas, où la série stratigraphique est essentiellement formée de calcaires et calcaires dolomitiques attribués au Lias inférieur reposant généralement sur des formations permo-triasiques composées d'argiles rouges et de basaltes doléritiques, alors que les affleurements d'âge quadernaire consistent en des dépôts travertineux tufeux, gréseux et conglomératiques;
- Les anciennes médinas des trois villes ont connu et connaissent encore des affaissements, des fontis et des effondrements causant des pertes humaines et matérielles considérables. On peut observer également dans ces trois sites des signes pathologiques d'instabilités au niveau de leur ancien bâti;
- Le sous-sol de ces anciennes médinas est formé d'un réseau dense de cavités souterraines de formes irrégulières et de tailles variables.

Des trois constats précédents on peut avancer que les cavités souterraines abritant les anciennes médinas précitées sont derrière la plupart des effondrements observés, et que la vétusté du cadre bâti est un facteur aggravant de cette situation, d'où la nécessité des études géophysiques méthodiques qui s'imposent pour dresser des cartographies des vides souterrains, et aider à mieux orienter les aménagements dans le périmètre urbain, afin de sauvegarder les anciennes constructions des médinas qui constituent pour les pouvoirs publics, à l'échelle nationale, une priorité en matière de valorisation du patrimoine, en égard à leurs valeurs architecturale et historique.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions les services du laboratoire de Géotechnique et du Génie Civil (S.2.G) pour nous avoir facilité l'accès aux sites objets de la présente étude, pour avoir fourni les équipements nécessaires pour la tenue des investigations et essais, et pour leur accompagnement durant la récolte des données.

## REFERENCES

- [1] W. Al-Fares, M. Bakalowicz, Y. Alboury, J. M. Vouillamoz, M. Dukhan, G. Toe et R. Guérin, "Contribution de la géophysique à l'étude d'un aquifère karstique - Exemple: le site karstique du Lamalou", 3ème Colloque GEOFCAN, Orléans, France, 2001.
- [2] J. Deceuster et O. Kaufmann, "Application des tomographies en résistivité électrique 3D à la reconnaissance de zones karstifiées", Belgique, 4<sup>ème</sup> Colloque GEOFCAN, Paris 23-24 Septembre, 2003.
- [3] D. El Azzab, A. Najine, M. Filahi, "Tomographie électrique: Délimitation des zones à contrastes de résistivité électrique et choix de dispositif de mesure. (Étude synthétique pour applications aux cavités souterraines de l'ancienne médina de Béni-Mellal)", *First Scientific Meeting on Geophysics*, Maroc, 2007.
- [4] K. El Khammari, A. Najine, M. Jaffal, T. Aïfa, M. Himi, D. Vásquez, A. Casas, P. Andrieux, "Imagerie combinée géoélectrique - radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc)", *Géophysique Interne*, (C.R. Géoscience), 2007.
- [5] M. Filahi, A. Najine, M. Jaffal, S. Badrane, A. Boukdir, A. Arioua, D. El Azzab, P. Andrieux, M. Himi, A. Casas, "Reconnaissance des vides souterrains en milieu urbain par les techniques géophysiques - cas de l'ancienne Médina de Béni-Mellal (Maroc)", *First scientific meeting on geophysics*, 2007. Consulté sur: [https://www.researchgate.net/publication/321496052\\_Reconnaissance\\_des\\_vides\\_souterrains\\_en\\_milieu\\_urbain\\_par\\_les\\_techniques\\_geophysiques\\_-cas\\_de\\_l'ancienne\\_Medina\\_de\\_Beni-Mellal\\_Maroc](https://www.researchgate.net/publication/321496052_Reconnaissance_des_vides_souterrains_en_milieu_urbain_par_les_techniques_geophysiques_-cas_de_l'ancienne_Medina_de_Beni-Mellal_Maroc)
- [6] M. H. Loke et R. D. Barker, Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, vol. 44, pp. 131-152, 1996.
- [7] J. M. Mieke, B. Feuga et C. Vachette, "Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique", 4<sup>ème</sup> Colloque GEOFCAN, Paris, France, 2003.
- [8] A. Najine, M. Jaffal, T. Aïfa, M. Filahi, A. Arioua, A. Boukdir, P. Andrieux et F. Regiba, "Reconnaissance de cavités souterraines par tomographie électrique et radar géologique dans le centre-ville de Béni-Mellal (Maroc)". *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 260, pp. 83-89, 2006.
- [9] A. Najine, F. Radouani, L. Bahi, T. Aïfa, S. Badrane, et Z. Ouzerbane, "Apport des méthodes géophysiques à l'étude des vides souterrains en milieu urbain - Cas de l'ancienne médina de Béni-Mellal", 2015. Consulté sur: <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01154079>
- [10] Service géologique du Maroc, Carte géologique du Maroc (1/1.000.000), *Éditions du Service Géologique du Maroc*, Rabat, Maroc, 1985.
- [11] Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable, *Evaluation environnementale du projet d'assainissement de la ville de Bejaad*, 2015. Consulté sur <http://www.onep.ma/grands-projets/2014/PV-sensibilisation-EIE-OuedZem-Boujaad/Rapport-EIE-Bejaad%20.pdf>
- [12] J. C. Cook, "Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitudes", *Geophysics*, vol. 30, no. 4, pp. 527-538, 1965.
- [13] G. J. Palacky, "Resistivity characteristics of geological targets. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics", *Society of Exploration Geophysicists*, vol. 1, pp. 53-129, 1991.
- [14] D. H. Griffith et R. D. Barker, "Two-dimensional resistivity imaging and modelling in area complex geology". *Journal of Applied Geophysics*, vol. 29, pp. 211-226, 1993.
- [15] M. H. Loke, *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, 2002. Consulté sur [https://www.academia.edu/11991713/Electrical\\_imaging\\_surveys\\_for\\_environmental\\_and\\_engineering\\_studies\\_A\\_practical\\_guide\\_to\\_2-D\\_and\\_3-D\\_surveys?auto=download](https://www.academia.edu/11991713/Electrical_imaging_surveys_for_environmental_and_engineering_studies_A_practical_guide_to_2-D_and_3-D_surveys?auto=download)