



13 years ESJ
Special edition

Etude de la Vulnérabilité à l'Effondrement des Cavités de l'Ancienne Médina de Béni Mellal, Maroc

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Amrououssa Benmoussa

Abdessamad Najine

Rajji Abdelatif

Achraf Kharmouch

Said Bouhachim

Département de Géologie, Université Cadi Ayad
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n40p23](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p23)

Submitted: 07 August 2023

Accepted: 20 October 2023

Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Wafik A., Benmoussa A., Najine A., Abdelatif R., Kharmouch A. & Bouhachim S. (2023). *Etude de la Vulnérabilité à l'Effondrement des Cavités de l'Ancienne Médina de Béni Mellal, Maroc*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 23.

<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p23>

Résumé

Le recensement des cavités dans les zones urbanisées est indispensable pour empêcher la survenue de diverses causes de dommages liés à d'éventuels effondrements. Les cavités constituent également des cibles privilégiées pour les archéologues, car les vides laissés dans l'oubli sont des foyers potentiels de matériaux dévoilant des usages antérieurs. Ces cavités sont de tailles variées, leur origine est humaine ou non, dans des milieux externes ou sous des structures. Leur dimension, ainsi que les caractéristiques physiques du milieu extérieur dans lequel elles se trouvent, permettent l'utilisation de méthodes géophysiques différentes. Nous avons mis l'accent sur l'utilisation de deux méthodes géophysiques, les sondages électriques, la sismique réfraction et la tomographie par mesures de résistivité électrique, pour localiser et déterminer les cavités situées dans l'ancienne ville de Béni Mellal. Ce travail a pour objectif de procéder à établir une carte de vulnérabilité des cavités à

l'effondrement dans l'ancienne médina de Béni Mellal en appliquant la démarche d'analyse multicritère et la modélisation par éléments finis pour déterminer les poids des paramètres déterminants de la vulnérabilité. En effet la combinaison des résultats ont permis de caractériser les zones les cavités souterraines, correspondants à des cavités ou des karsts. La carte de vulnérabilité aux effondrements de ces cavités permettrait de circonscrire les principaux secteurs menacés, d'appréhender les dégâts, les éviter ou les réduire. Elle pourrait servir comme outil de base pour le traitement des cavités.

Mots clés: Iminifri, Travertins, Altération, Stabilité, Géophysique

Study of the Vulnerability to the Collapse of Cavities in the Old Medina of Béni Mellal, Morocco

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Amrououssa Benmoussa

Abdessamad Najine

Rajji Abdelatif

Achraf Kharmouch

Said Bouhachim

Département de Géologie, Université Cadi Ayad
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Abstract

The Geological and Geophysical study Inventories of cavities in urbanised areas are essential to prevent the occurrence of various causes of damage linked to possible collapses. Cavities are also prime targets for archaeologists, as forgotten voids are potential sources of materials revealing past uses. These cavities come in all shapes and sizes, and are of human or non-human origin, in external environments or beneath structures. Their size, as well as the physical characteristics of the external environment in which they are found, mean that different geophysical methods can be used. We have focused on the use of two geophysical methods, electrical soundings, seismic refraction and tomography using electrical resistivity measurements, to locate and determine the cavities located in the old town of Béni Mellal. The aim of this work is to draw up a map of the vulnerability of cavities to collapse in the old medina of Béni Mellal by applying the multi-criteria analysis approach and finite element modelling to determine the weights of the parameters determining vulnerability. Indeed, the combined results have made it possible

to characterise the subsurface hazard zones, corresponding to cavities or karsts. The map of vulnerability to collapse of these cavities would make it possible to identify the main areas at risk, to assess the damage, and to avoid or reduce it. It could serve as a basic tool for the treatment of cavities.

Keywords: Iminifri, Travertines, Weathering, Stability, Geophysics

Introduction

Le concept de " risques naturels " recouvre de nombreux phénomènes physiques différents, notamment tremblements de terre, effondrement des cavités, tsunamis, glissements de terrain, inondations, éruptions volcaniques, tempêtes violentes, tornades, etc. (Aitken, 2019). La présence de cavités dans le souterrain est une source éventuelle de certains dangers du point de vue environnemental, mais également du point de vue industriel et de la construction urbaine (Najine et al., 2006). La présence de vides souterrains se traduit dans quelques cas par la manifestation en surface de plusieurs désordres selon les modes de rupture et la nature du sol en place. Nous allons distinguer essentiellement trois types d'effondrement, à savoir celui localisé de type fontis, l'effondrement localisé par rupture de quelques piliers, et l'effondrement généralisé. Durant ces dernières décennies, la forte pression de l'urbanisme et le retentissement grandissant donné par les médias aux effets dévastateurs des catastrophes naturelles ont fait naître, un peu partout dans le monde, une prise de conscience nouvelle vis-à-vis de ces phénomènes. En effet, les populations n'acceptent plus la fatalité de ces catastrophes et va de pair avec le recours à « l'Etat protecteur » (Lechat, , 1991). Dans l'état actuel des connaissances, et à de très rares exceptions près, on ne sait pas prédire une catastrophe naturelle. Il est par contre possible, et c'est vrai dans le cas des effondrements causés par la présence de cavités souterraines, de déceler et de localiser les principaux secteurs où ces phénomènes ont le plus de chances de survenir. A partir de là, on peut dans le meilleur des cas chercher à les éviter ou à s'en protéger et, dans tous les cas, faire en sorte que leurs effets soient les moins dommageables possibles.

Contexte géographique et géologique

La ville de Beni-Mellal est située au pied du flanc nord du Haut Atlas central sur la route nationale 8 (ex-RP 24), qui relie les villes de Marrakech et Fès, à environ 205 km au nord-est de Marrakech et à environ 210 km au sud-est de Casablanca. La ville de Beni-Mellal est la capitale de la région économique de région Béni Mellal-khénifra et est considérée comme un centre économique régional en raison de sa situation géographique de plaque tournante, de son patrimoine historique et du fait qu'elle est la capitale d'une région riche et irriguée (Barakat et al., 2021). Du fait de sa situation entre le

Haut Atlas et la plaine du Tadla, l'agglomération est caractérisée par une topographie généralement accidentée (altitude moyenne 580 NGM). Elle s'étend au sud jusqu'à la source d'Ain Asserdoune (côte 723 NGM) et s'étire au nord dans la plaine jusqu'à la côte 480 NGM



A l'ancienne Médina de Béni-Mellal, des événements dramatiques d'effondrement d'habitations occasionnant des pertes de vies humaines et de biens ont fait, ces dernières, années la une de l'actualité. D'autres cas moins dramatiques, d'effondrements partiels ou de constructions menaçant ruine, sont relatés ici et là avec une fréquence qui semble s'accroître. L'existence de ces vides souterrains serait sans conséquences si ces exploitations ne se dégradaient pas au fil du temps sous les effets conjugués des eaux pluviales et domestiques et des surcharges importantes appliquées sur leur toit (Najine et al., 2010). Malheureusement, les risques liés à leur présence peuvent apparaître brutalement, sans qu'il ne soit possible d'en prévoir la survenue, ni l'importance (Figure 2).



Figure 2. Photos Cas d'effondrements survenus dans l'ancienne Médina de Béni-Mellal (Filahi, 2008)

Il est à noter que selon les indications connues, aucun secteur de la Médina n'est épargné, puisque plusieurs cavités « communiqueraient » entre elles, par un réseau de galeries émaillées et ramifiées. Les limites de ces grottes sont, dans la plupart des cas, indéfinies et ne respectent pas le plan parcellaire du terrain en surface du sol. Ainsi, une cavité « exploitée » par le propriétaire d'un logement donné, occuperait même le plus souvent, plusieurs sous-sols, relevant des propriétés voisines.

Les mesures préventives prises durant les dernières décennies, se sont montrées de portée limitée. En effet, les recensements des constructions vétustes, dont la stabilité est jugée incertaine, établis périodiquement à l'approche de chaque saison hivernale, n'ont pas permis de se prémunir systématiquement des dangers liés aux effondrements des bâtiments. Il n'est pas exclu, parfois, que les bâtiments d'apparence solide s'écroulent par effondrement des toits des cavités, alors que ceux jugés menacés d'effondrement, évacués de leurs habitants, continuent à défier les méfaits de la nature et de l'action humaine (Najine et al, 2006).

L'administration décrète l'évacuation des constructions jugées dangereuses. Cette décision ne devrait pas être un acte facile à prendre. Ce n'est pas un acte administratif anodin. Souvent elle est prise dans une conjoncture où l'émotion prédomine (après un effondrement), sans une expertise rigoureuse faite par des techniciens expérimentés et formés à cette pathologie.

Les anciennes constructions de cette médina ne nécessitent donc pas seulement des travaux d'entretien, de restauration ou de maintenance mais également un traitement approprié des cavités, dont la connaissance avait nécessité une étude géophysique détaillée et précise afin de déterminer leur état et leur véritable envergure : cette étude géophysique était nécessaire et urgente, compte tenu du danger permanent que ces cavités constituaient et du fait qu'elles ne pouvaient éternellement supporter à la fois les charges des

bâtiments et les effets induits par la circulation des véhicules. La cartographie de ces vides constituait également un jalon appréciable pouvant aider à mieux contrôler et orienter les aménagements au sein du périmètre urbain.

Les autorités et les responsables chargés de l'aménagement du territoire étaient conscients de cette problématique. Ils étaient engagés dans une politique ficelée pour mettre fin aux effets engendrés par la présence des cavités, en particulier la protection des biens et des personnes, et tracer les grands axes pour un développement harmonieux et durable du territoire. A cet effet, une convention de coopération scientifique et technique a été signée entre la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal et l'Agence Urbaine de la région Tadla-Azilal. La convention portait sur l'application des méthodes géophysiques pour la détection et la cartographie des cavités encaissées dans les terrains de fondation de l'ancienne Médina. Les résultats de cette étude ont permis de définir les dispositions d'ordre technique, opérationnel et financier susceptibles d'apporter la meilleure réponse possible aux problèmes posés par ces cavités (Najine et Jaffal, 2007).

Contexte géologique

La ville de Béni Mellal fait partie de la zone des collines. Le substratum de cette chaîne de l'Atlas est principalement constitué de matériel maestrichtien et de brèches attribuées par J. Bourcart à l'Eocène supérieur continental (Barakat et al., 2021). La puissance de la série continentale du Beni-Mellal est légèrement supérieure à 100 m. On observe en général une succession de couches rouges, de conglomérats plus ou moins cimentés et de calcaires lacustres généralement roses, parfois travertins (Bouchaou et al., 2014). Ces derniers apparaissent, d'une part, dans la partie inférieure et, d'autre part, dans la partie supérieure de la série.

Les forages exploratoires montrent des calcaires travertins avec un substratum de sable et de grès calcaire. On les trouve en bancs de 2 à 3 mètres d'épaisseur, cimentés au sommet et pulvérulents à la base. Ce sont des sols sursaturés en calcium et avec un pourcentage très élevé de magnésium. Ces calcaires travertins intercalés dans la série détritique sont déposés par les eaux courantes, probablement à proximité de sources lors d'une rupture d'approvisionnement en matériaux grossiers. Ils se présentent sous forme ondulée et sont présents dans presque toutes les cavités.

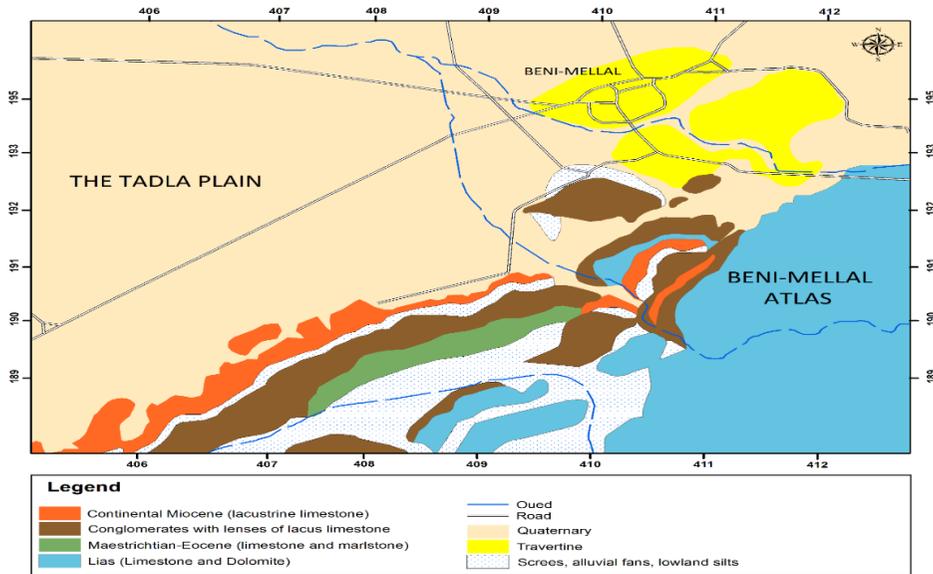


Figure 3 : Carte de géologie de la zone d'étude

Méthodes et matériel

Le programme d'investigation géophysique élaboré pour le diagnostic du sous-sol de la Médina de Béni Mellal sera mené suivant un planning logique et intégré permettant de couvrir la totalité de la zone à prospector et de recueillir le maximum d'informations géophysiques et structurales.

Lors de la phase initiale de l'étude, la matérialisation de la grille des mesures sera placée très en amont. Elle consistera à implanter une grille de mesures de manière à prospector la totalité de l'aire de l'étude. Le choix de la densité de mesures et du pas d'échantillonnage vont respecter certaines règles de manière à augmenter le pouvoir de résolution, à exploiter le maximum de données et enfin de tenir compte de la réalité de terrain.

Dans ce sens, il est important de signaler que la bonne connaissance du site et de sa géologie, des mesures de qualité et un déploiement couplé et quasi-simultané des techniques choisies permettront un perfectionnement des outils d'investigation.

Les méthodes choisies dans la cadre du présent marché offrent une panoplie de moyens qui permettront de caractériser le contenu du proche sous-sol à partir de mesures en surface d'un champ physique, l'objectif étant de révéler toute cavité susceptible de provoquer des distorsions du signal physique en surface.

- La prospection électrique permettra d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes. C'est une technique qui sert à échantillonner la résistivité le long d'un profil sur une profondeur donnée. Les modèles du sous-

sol montrant la distribution en coupe de la résistivité seront calculées à partir des panneaux en utilisant la méthode d'inversion des données de (Barker et Loke, 1996)

L'analyse fine de ces modèles permettra de se rendre compte des variations importantes de la résistivité intrinsèque correspondant aux différentes sources enfouies résistantes et conductrices par rapport à un encaissant dont le niveau de fond moyen est plus ou moins variable selon l'emplacement des profils de résistivité. On s'intéressera particulièrement aux sources résistantes susceptibles de correspondre à des cavités souterraines vides. Ainsi, sur chaque modèle du sous-sol obtenu par inversion, ces sources résistantes seront délimitées en se basant sur les valeurs de la résistivité intrinsèque des sources, leurs formes et la densité des contours qui les délimitent.

- La sismique réfraction est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités pour des profondeurs allant jusqu'à une quinzaine de mètres. Dans certaines conditions exceptionnelles, ces profondeurs d'investigation peuvent atteindre une quarantaine de mètres. Les résultats se présentent sous la forme d'une dromochronique qui est la représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Pour l'acquisition de données, on utilisera habituellement un dispositif dans lequel les géophones sont régulièrement espacés le long du profil sondé. Un sismographe, synchronisé avec la source, effectue l'enregistrement simultané des signaux provenant des géophones actifs. Les données géophysiques seront traitées, analysées, puis interprétées par le biais de programmes spéciaux et en tenant compte des informations géologiques disponibles pour chaque site. Des corrélations seront effectuées d'une manière systématique entre les données acquises dans les mêmes sites. Ces corrélations vont permettre de lever certaines indéterminations et d'affiner les modèles du sous-sol.

Principe de la méthode de prospection électrique :

Cette méthode consiste à envoyer dans le sol un courant d'intensité I au moyen de deux électrodes $C1$ et $C2$ et à mesurer la différence de potentiel V entre deux autres électrodes de réception $P1$ et $P2$ (Fig. 10 et 11).

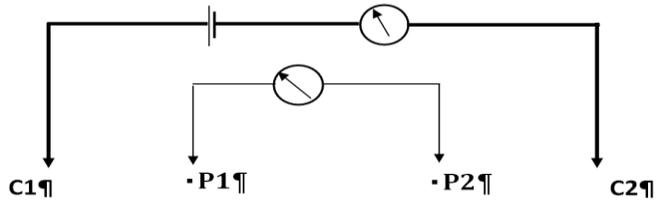


Figure 4. Schéma général d'une mesure de résistivité du sol à l'aide d'un dispositif de 4 électrodes

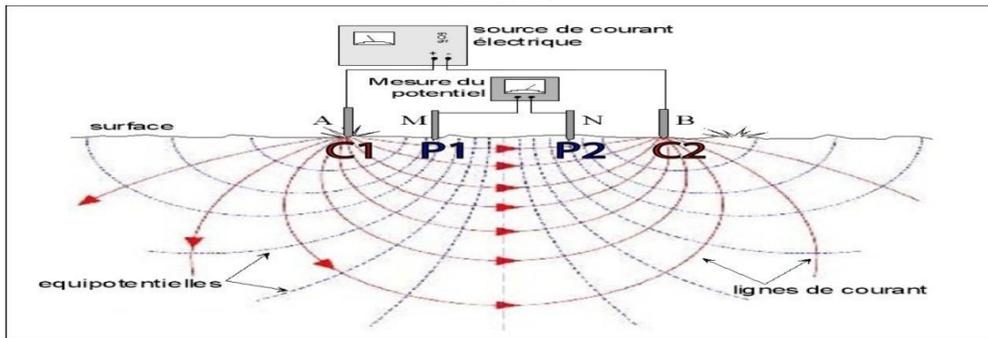


Figure 5. Lignes de courant équipotentielles induites par deux électrodes de courant C1 et C2

Au niveau des points P1 et P2, le potentiel s'exprime par les formules suivantes :

$$V_{(P1)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} \right)$$

La différence de p

$$= \rho \cdot I \left(\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} \right)$$

$$\Delta V_{RR} = V_{(P1)} - V_{(P2)} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right)$$

$$\rho = \frac{2\pi \cdot \Delta V_{R_1 P_2}}{I} \left(\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right)^{-1}$$

Lorsque le sol n'est pas homogène, la résistivité mesurée est dite apparente (ρ_a) car elle diffère de la résistivité réelle ou intrinsèque du sol. La valeur de résistivité apparente obtenue lors d'une mesure résulte en effet de la contribution de chacune des parcelles infinitésimales de sol traversées par le courant injecté, en fonction de leur résistivité et de leur localisation par rapport aux sources de courant. L'équation peut s'écrire de la façon suivante (Barker et Loke, 1996):

$$\rho_a = k.R = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{avec} \quad k = 2\pi \left(\frac{1}{P_1 C_1} - \frac{1}{P_1 C_2} - \frac{1}{P_2 C_1} + \frac{1}{P_2 C_2} \right)^{-1}$$

Si nous appliquons la loi d'Ohm à l'espace compris entre les deux équipotentiels correspondant aux électrodes C1 et C2, la résistivité Rho (ρ) du volume de terrain intéressé par la mesure est définie alors par la relation :

$$\rho = K V/I$$

Le facteur géométrique K dépend du dispositif de mesure utilisé, c'est-à-dire de la disposition relative des électrodes de courant et de potentiel. Dans le cas d'un dispositif Wenner- α , où $a = C1P1 = P1 P2 = P2C2$, le facteur géométrique K équivaut à : $2\pi a$

Pour la configuration Wenner (Fig. 12), la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité.

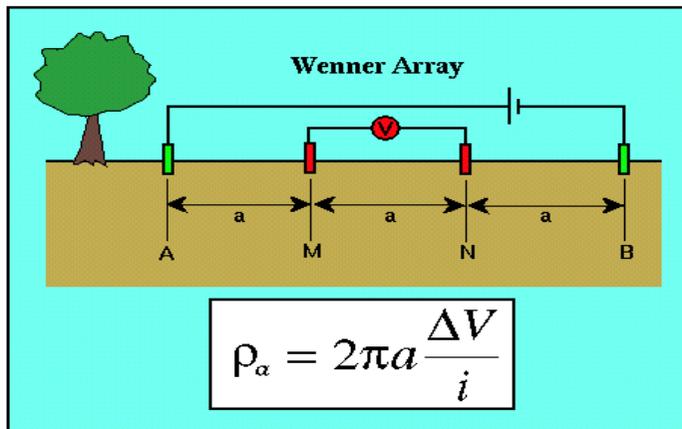


Figure 6. Dispositif Wenner et expression de la résistivité électrique apparente

L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Le dispositif Schlumberger présente l'avantage d'être très pratique sur le terrain lorsqu'on réalise des sondages électriques, on déplace deux électrodes au lieu de quatre.

• **Méthode Des Sondages Electriques :**

Dans ce cas, au lieu de déplacer comme la méthode précédente, l'ensemble du quadripôle, le centre de symétrie O du dispositif est maintenu fixe en un même point pendant qu'on augmente progressivement l'envergure de celui-ci en écartant de plus en plus les électrodes C1 et C2 (Fig. 13). Quand on augmente la distance C1C2 (=AB/2) des terrains de plus en plus profonds

interviennent dans la définition de la résistivité. Ceci permet de construire un graphique des variations de la résistivité apparente en fonction $AB/2$.

La distance MN est maintenue fixe et aussi petite que possible pendant un certain nombre de mesures, cela allège le travail manuel et évite le nombre des "à-coups de prise". Nous avons vu en effet que les hétérogénéités locales perturbent les mesures bien davantage quand passent à leur aplomb les électrodes MN qu'au passage des pôles AB. Il n'est cependant guère possible pratiquement de faire un sondage complet avec une seule position de MN. En effet pour les très grandes longueurs de ligne, le ΔV mesuré serait trop faible. On effectue alors ce que l'on appelle un débrayage.

Ces mesures appelées débrayages, effectuées avec le même AB pour deux MN successifs ont une grande importance, car elles permettent de voir et parfois de corriger les à-coups de prise dus aux changements de MN (Barker et Loke, 1996).

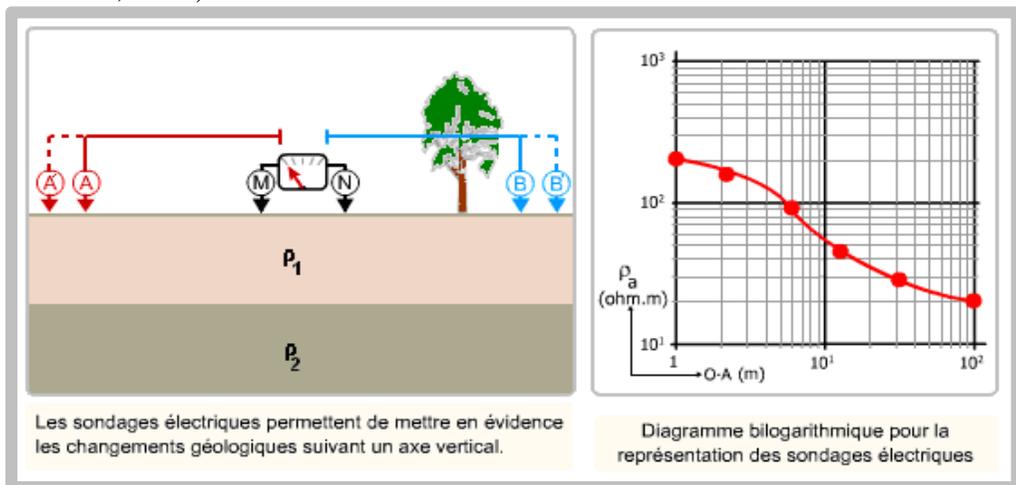


Figure 7. Présentation des résultats des sondages électriques sous forme d'un diagramme bilogarithmique

Principe de la méthode de prospection sismique réfraction :

La sismique réfraction est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités pour des profondeurs allant jusqu'à une quinzaine de mètres. Dans certaines conditions exceptionnelles, ces profondeurs d'investigation peuvent atteindre une quarantaine de mètres. Les résultats se présentent sous la forme d'une dromochronique qui est la représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Pour l'acquisition de données, on utilise habituellement un dispositif dans lequel les géophones sont régulièrement espacés le long du profil sondé. Un sismographe, synchronisé avec la source, effectue l'enregistrement simultané des signaux provenant des géophones actifs.

Les mesures sismiques seront conduites sur les surfaces couvertes de l'ancienne Médina, en tenant compte des conditions de terrain et en prenant les précautions nécessaires pour minimiser le bruit de surface. Ces données seront corrélées et confrontées systématiquement avec les autres données disponibles notamment celles de la tomographie électrique.

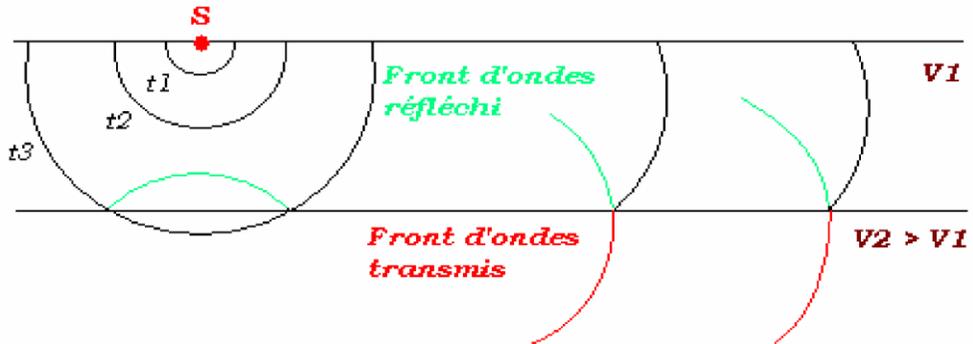


Figure 8. Principe de la méthode sismique réfraction



Figure 9. Materiel géophysique



Figure 10. Les photos de Equipement géophysique déployés dans l'investigation géophysique

Traitement des données par les logiciels

IPI2WIN est un logiciel de traitement des données conçu pour automatiser et semi automatiser les interprétations des sondages électriques (et/ou) introduire les tableaux issus des données de la polarisation obtenues dans la prospection électrique. Autrement dit, IPI2win est un programme pour une interprétation automatique (en 1D) et manuelle des courbes VES. Son mode d'interprétation est basé sur :

- ◆ La réception des courbes (VES) avec différents tableaux :
- ◆ Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, poteau - pôle.
 - ✓ La modification des paramètres du modèle de différentes manières :
 - ✓ Dans la feuille, sur la section transversale de la résistivité, en déposant la partie de la courbe de la résistivité.
- ◆ L'obtention de la feuille de calcul pour la saisie des données.
- ◆ L'obtention de la courbe d'inversion VES-IP.

RES2DINV est un programme informatique basé sur Windows, permettant le traitement et la détermination automatique d'un modèle bidimensionnel de résistivité pour le sous-sol à partir des données obtenues des enquêtes de l'imagerie électrique. Ce logiciel d'inversion des données électriques développé par (Barker et Loke, 1996) favorise la modélisation de la distribution des résistivités électriques dans le sous-sol. Autrement dit il permet de visualiser une pseudo-section des jeux de données acquis in situ. Il est possible d'identifier les points dits aberrants, qui sont dus à un rapport signal/bruit trop faible durant la mesure. Ce bruit provient essentiellement d'un défaut de contact, soit entre l'électrode et le câble, soit entre l'électrode et le sol, qu'il faut les éliminer en phase de traitement afin de mieux contraindre les formations de sub-surface et limiter la propagation d'erreur. Avant de lancer le processus d'inversion, il est recommandé de regrouper l'ensemble des mesures dans un même fichier pour permettre une inversion globale. Les modèles obtenus après traitement des données facilitent le repérage des zones souterraines contenant de l'eau pour exploitation.

SURFER n'est pas un logiciel de traitement, mais un outil de tracés de contours et de surfaces en 3 dimensions. Ce dernier convertit les données acquises (X, Y, Z) en cartes et surfaces afin de contrôler toutes les options graphiques et obtenir le résultat recherché. Son utilisation concerne plusieurs domaines : l'hydrologie, l'ingénierie, la géologie, l'archéologie, l'océanographie, la biologie, la géophysique, la médecine, la climatologie, la sylviculture etc.

Résultats et Discussion

Les sondages électriques A partir des résistivités obtenues par le résistivimètre et les distances entre les électrodes AB et MN appliquées sur

terrain, et leur insertion dans le logiciel IPI2Win. Nous avons obtenu les sondages électriques ($\rho = f(AB/2)$) des dix stations :

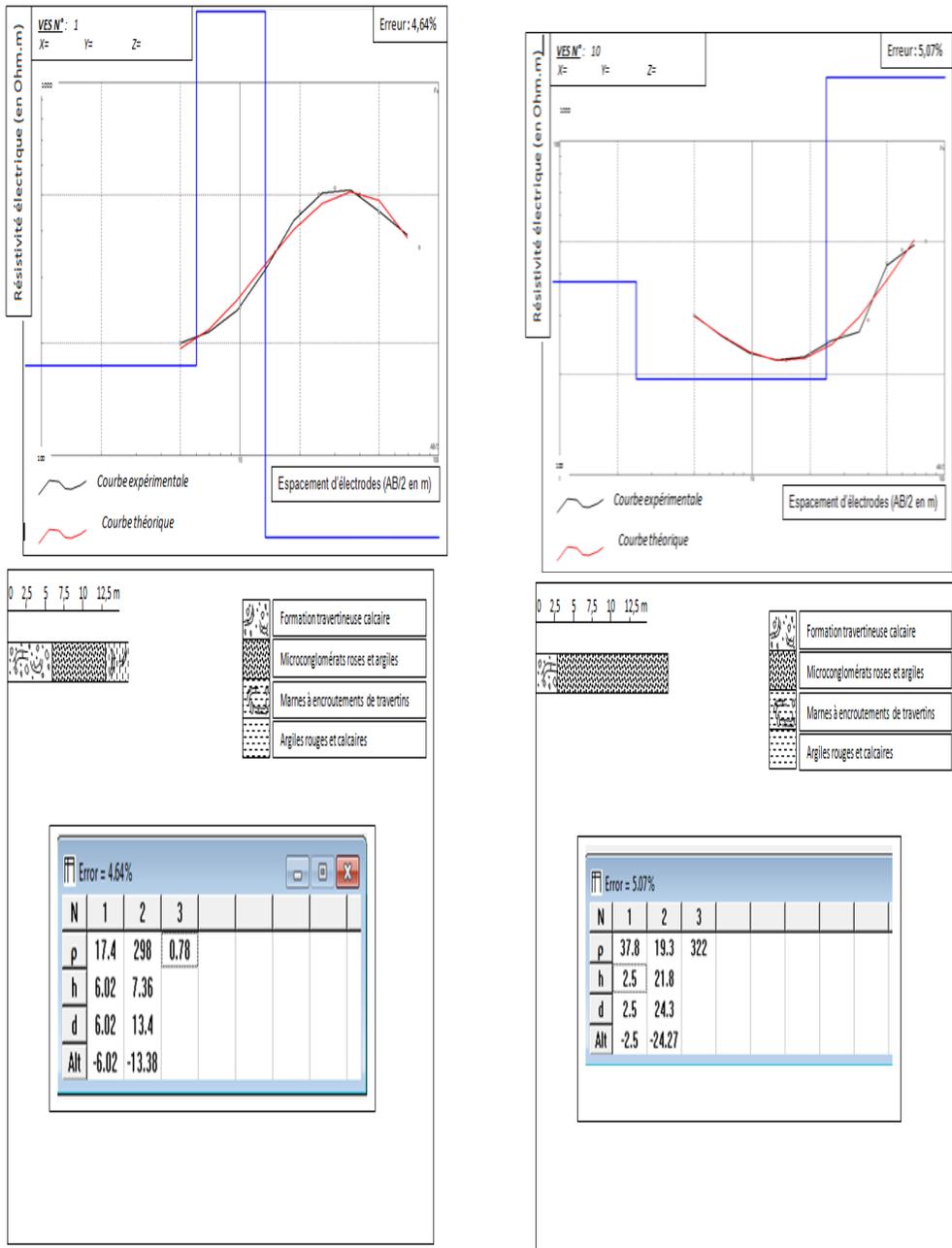


Figure 9. Diagramme de résistivité apparente en fonction de la profondeur et tableau des caractéristiques correspondant à chaque profil

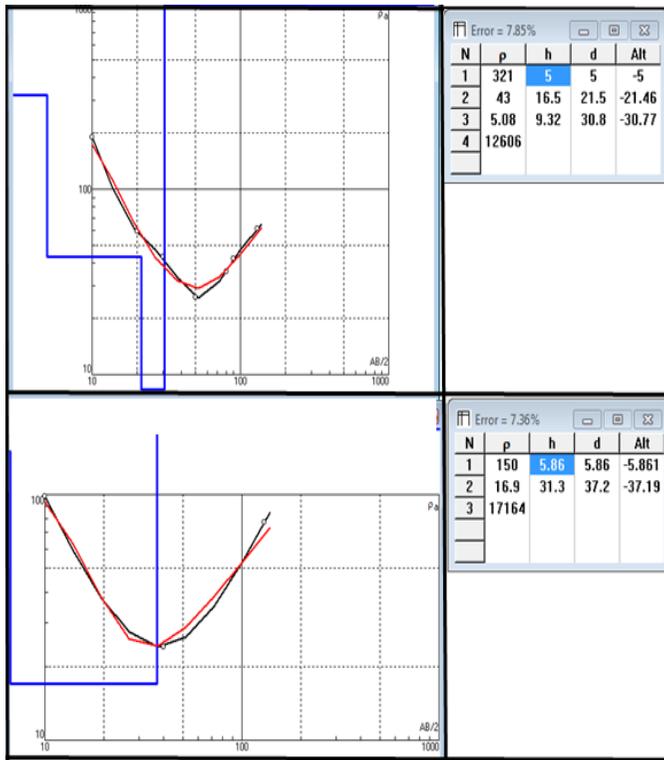


Figure 10. Diagramme de résistivité apparente en fonction de la profondeur et tableaux de caractéristiques correspondant à chaque profil (9 en haut et 10 en bas)

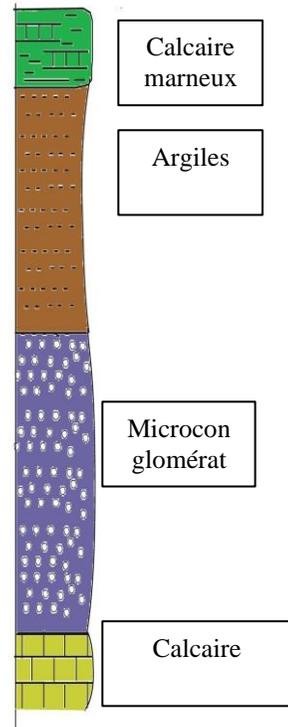


Figure 11. Log synthétique des différents sondages électriques

Sismique refraction:

A partir de l'introduction des données (les coordonnées, le temps d'arrivée de l'onde) dans le logiciel Surfer, nous avons obtenu les cartes ci-dessous :

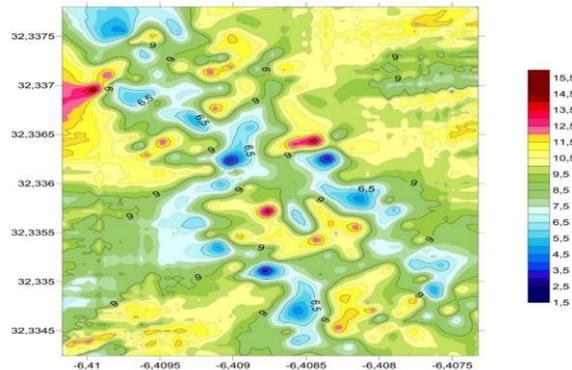


Figure 12. Carte de temps du géophone 1

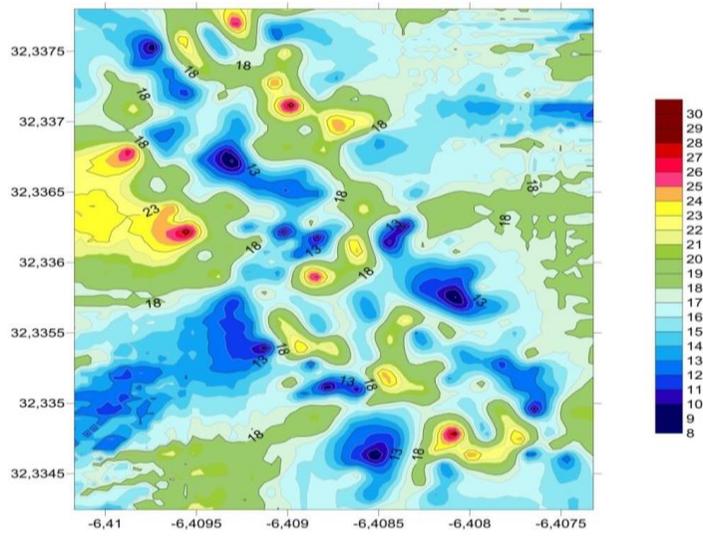


Figure 13. Carte de temps du géophone 2

Le tomographie électrique

A partir des données recueillies sur terrain (résistivités et distances entre les piquets à chaque mesure) et leur application dans le logiciel Res2dinv32. Nous avons obtenues les trois profils ci-dessous :

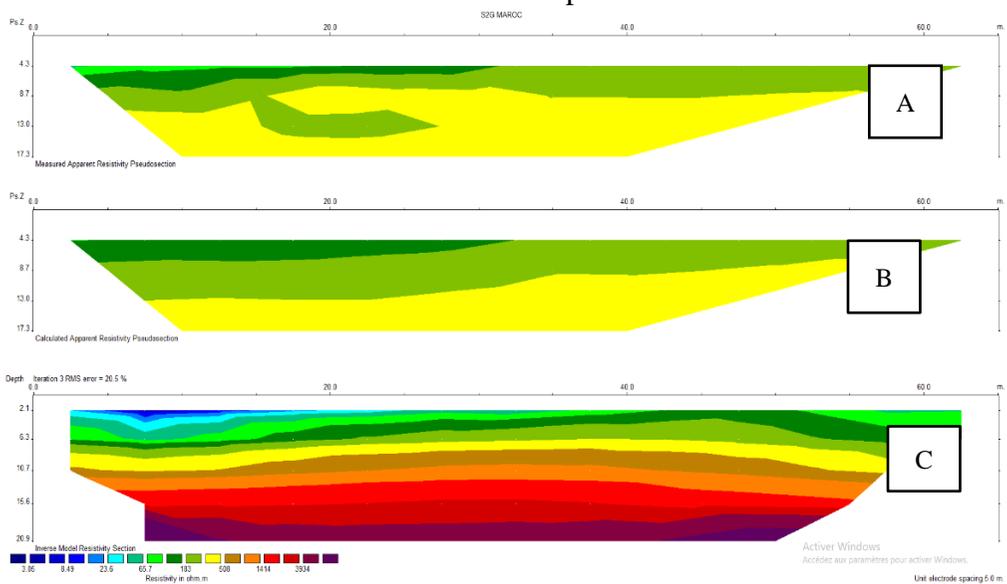


Figure 14. Sections de tomographie Est-West, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé.

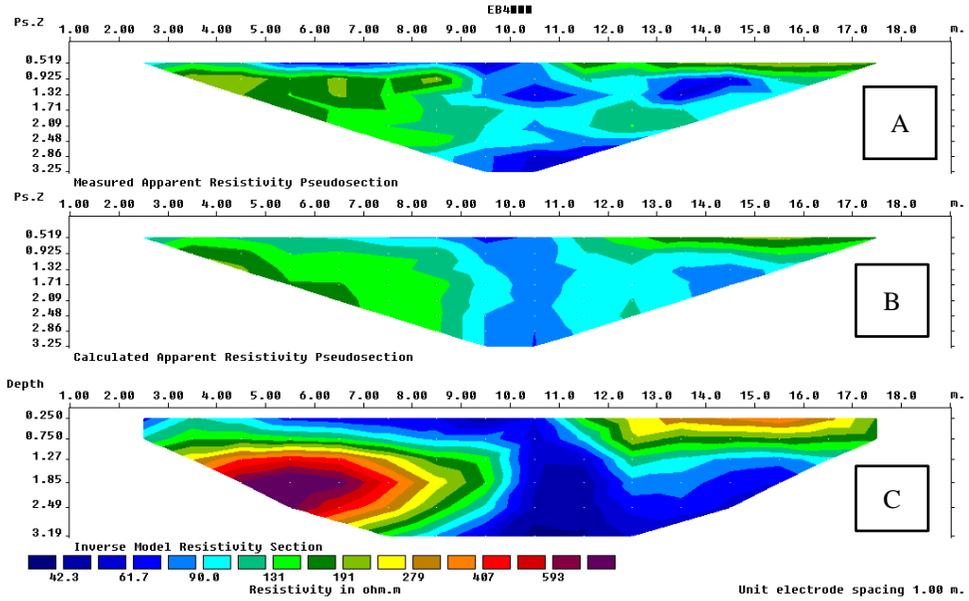


Figure. 15 : Sections de tomographie Sud-Est, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé

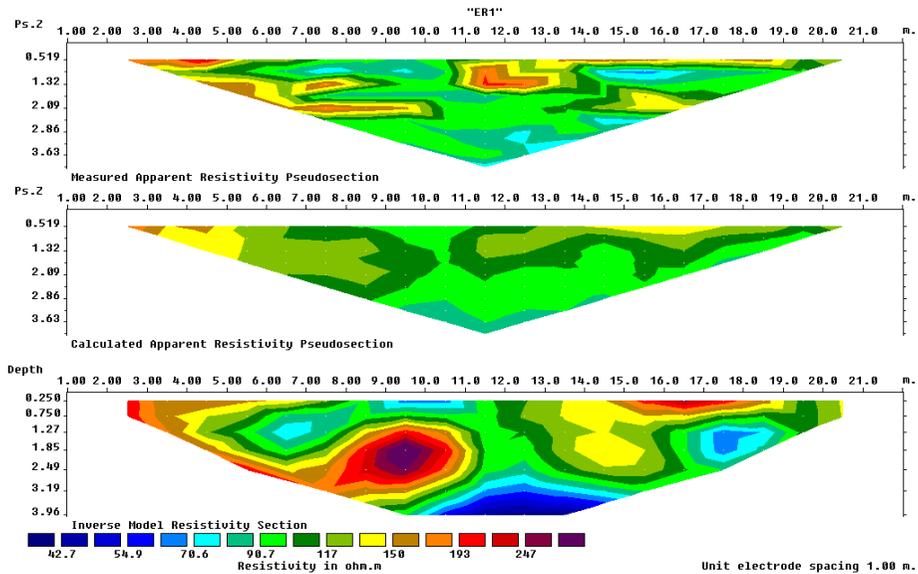


Fig. 16. Sections de tomographie Sud-West, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé.

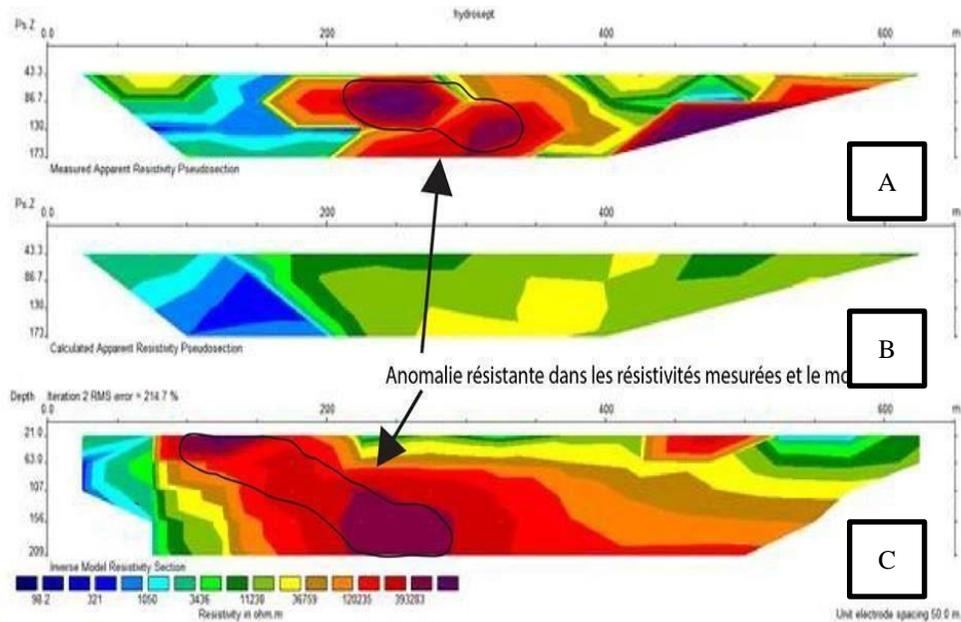


Figure 18. Sections de tomographie Sud, a : pseudo section mesuré, b : pseudo section calculé, c : section inversé

En revanche le troisième profil permet de distinguer une limite verticale avec des résistivités moyennes à fortes. Chaque profondeur exprime une résistivité de chaque partie de la section Quand c'est bleu c'est conducteur et si rouge c'est résistant. On regarde l'échelle des couleurs en bas des profils. Les profils montrent la présence d'une anomalie très résistante qui pourrait correspondre à une cavité ou un corps résistant.

Reconnaissance préliminaire et description des phénomènes et des mécanismes d'instabilité

Il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic de la structure sans risques de porter atteinte à son intégrité. La première investigation non destructive préliminaire qu'il faut considérer est le diagnostic visuel. C'est une opération in-situ qui permet de répertorier les différents défauts apparents que présente la structure. Les principaux désordres généralement constatés sont les suivants :

- Les fissures avec leur ouverture et leur longueur ;
- Les fractures avec leur ouverture, décalage ou rejet ;
- L'écrasement ou le bombement des façades ;
- Les zones d'altération superficielles et profondes ;
- Les zones humides ainsi que les zones de mousses ou de végétation ;
- Les zones de faïençage ;

- Les éclats de matériaux en formation ou profonds ;
- La dégradation des pierres de construction ;
- La présence d'aciers apparents dans les éléments en béton...

Cette première étape permet de définir la gravité des désordres mais aussi de classer les différents éléments à traiter selon leur priorité. L'ensemble des informations collectées par les différentes techniques d'investigation, ont été intégrées dans une base de données spéciale. Cette opération a nécessité des traitements informatiques permettant de mieux dépouiller et exploiter l'ensemble des données. L'interprétation finale s'est traduite par la réalisation d'une série de cartes de synthèse, associées à une base de données et d'informations géoréférencées (Figure 19 et 20). Ces cartes sont l'expression synthétique et informative des différentes données acquises sur l'ensemble du site.

Selon les résultats obtenus, aucun secteur de la Médina de Béni-Mellal n'est épargné, avec des concentrations parfois impressionnantes et des dimensions variables. Au total, on estime à environ 250 le nombre de cavités souterraines dans les terrains de fondation de cette médina (Najine et Jaffal, 2007). Plus d'une quinzaine d'entre elles a fait l'objet de visites et les autres ne sont connues que par la description issue de l'enquête et par l'interprétation des données géophysiques.

Certaines cavités sont totalement inoffensives alors que d'autres présentent un danger potentiel avec des risques d'affaissements, de fontis ou d'effondrements souvent spectaculaires et dangereux pour les vies comme pour les biens. Les écroulements survenus ces dernières années dans plusieurs endroits de l'ancienne Médina peu de temps après les périodes pluvieuses, nous rappellent que le danger est bien présent et qu'il engendre des coûts et des conséquences socio-économiques considérables.

Il convient également de signaler que ces cavités font partie du patrimoine de la Médina. Elles ne constituent pas seulement des nuisances passées, actuelles et potentielles. Après avoir été recensées, elles méritent d'être aménagées ou réaménagées, puis utilisées à des fins individuelles ou collectives. La valorisation de certaines d'entre elles, au titre d'anciennes exploitations de matériaux de construction peut être envisagée, du point de vue de leur valeur historique et muséographique et pourquoi pas, paradoxalement, d'un point de vue touristique !



Figure 19. Photo prise à l'intérieur d'une cavité à gauche ; photo d'une Huilerie abritée dans une cavité

Cependant, et malgré l'amélioration des techniques de reconnaissance et de diagnostic, la complexité des travaux souterrains et les difficultés liées à l'environnement du site laissent encore subsister de fortes incertitudes ou contraintes pour les « décideurs », non seulement techniques (qualité du diagnostic, évaluation des vides, opérabilité de la méthode, etc.), mais aussi administratives et financières. Ces contraintes peuvent rendre délicate la prise de décision nécessaire à une prévention du risque véritablement adaptée aux enjeux (Ikezouhene, 2017).

En effet, indépendamment des dispositions de sauvegarde à prendre en cas de péril imminent, lorsque l'existence d'un risque potentiel latent est avérée, le problème essentiel est celui de la prévention. Le choix de la méthode de mise en sécurité repose alors sur une alternative fondamentale à caractère technique et économique : **traiter, surveiller ou déplacer les enjeux.**

Maîtrise du risque

La solution des « constructions à risque » dans l'ancienne Médina de Béni-Mellal ne peut être ni miraculeuse, ni spectaculaire. L'inadéquation ou plutôt le gouffre entre l'ampleur du phénomène et les moyens financiers de la commune oblige à rechercher des solutions pragmatiques, imaginatives, consensuelles et enfin, adaptées aux populations de la Médina sans oublier l'efficacité et la rationalité nécessaire pour circonscrire les effets engendrés par la présence des vides souterrains sous les habitations.

Dans l'objectif de maîtriser l'aléa des menaces gravitaires et évaluer leur risque, il faut suivre une politique de traitement qui se base d'abord sur la localisation et la reconnaissance des cavités souterraines existantes, et ensuite de diagnostiquer leur stabilité pour évaluer cet aléa et ses potentiels risques en surface, notamment sur la population et les biens exposés (Ikezouhene, 2017).

Ce processus diffère selon notre connaissance de la cavité souterraine, sa localisation et même son accessibilité. L'effondrement d'une ancienne construction dans une ancienne médina est un phénomène dangereux déclenché aléatoirement, et risque des enjeux et des pertes humaines, matérielles, infrastructurelles, environnementales et culturelles. L'analyse du phénomène est basée sur les diverses observations historiques, couplées aux

reconnaissances et auscultations permettant le diagnostic de l'état du cadre bâti dans son environnement. Il est préconisé en particulier d'identifier la présence d'une cavité souterraine au droit de la construction menacée, de caractériser son origine, sa taille et ses dimensions moyennant des études géotechniques et géophysiques (Kharmouch et al., 2020). Il est préconisé également de caractériser l'édifice (vétusté, caractéristiques physicomécaniques des matériaux le constituant), de déceler les pathologies reflétant sa vulnérabilité, et d'identifier les facteurs aggravants pouvant favoriser le déclenchement de l'aléa (circulation des poids lourds et vibrations dues au trafic, déversement des eaux usées dans les cavités et manque de raccordement aux réseaux d'assainissement).

Dans le cadre de cette étude, une matrice d'évaluation du risque lié aux instabilités gravitaires a été prédéfinie à partir de l'identification des enjeux et de l'analyse de la vulnérabilité de chacun parmi eux :

Tableau 2. Échelle d'analyse des impacts.

IMPACT RELATIF	Impact humain	Impact matériel	Impact culturel / environnemental
Très important (5)	> 10 morts > 50 blessés graves	> 10 MDH	Très sérieux
Important (4)	≤ 10 morts ≤ 50 blessés graves	≤ 10 MDH	Sérieux
Moyen (3)	≤ 5 morts ≤ 10 blessés graves	≤ 5 MDH	Moyen
Léger (2)	1 mort ≤ 5 blessés graves	≤ 1 MDH	Mineur
Faible (1)	0 mort 0 blessé grave/léger	≤ 0,2 MDH	Faible

Tableau 3. Critères de vulnérabilité et échelle de probabilité d'occurrence de l'aléa

Facteur déclenchant	Probabilité faible (I)	Probabilité moyenne (II)	Probabilité élevée (III)	Probabilité très élevée (IV)
Vétusté	Construction moderne	Construction moderne / ancienne	Ancienne construction	Ancienne construction
Cavité souterraine	Aucune cavité souterraine	Cavité souterraine de petite taille	Cavité souterraine grande taille	Cavité souterraine de grande taille
Signes pathologiques	Pas de signe d'instabilité gravitaire	Signes faibles d'instabilité gravitaire	Signes d'instabilité gravitaire	Signes d'instabilité évolutifs
Facteurs aggravants	Aucun facteur aggravant	Aucun facteur aggravant	Aucun facteur aggravant	- Trafic automobile et poids lourds - Déversement des eaux usées dans les cavités souterraines

Tableau 4. Matrice d'évaluation du risque

Impact relatif	(5)							Très élevé
	(4)							Élevé
	(3)							Moyen
	(2)							Faible
	(1)							
		(I)	(II)	(III)	(IV)			
		Probabilité d'occurrence de l'aléa						

Les critères relatifs à l'état du bâtiment (tableau 2-4), ont permis d'établir cette carte de stabilité des bâtiments (Figure 20) (Rajji et al., 2022), en corrélation avec la carte des cavités établie à partir des données géophysiques (Figure 21), nous ont permis d'établir une carte préliminaire de vulnérabilité des cavités à l'effondrement (Figure 22).



Figure 20. Cartes de classification de la vulnérabilité relative aux critères état de bâtiment.

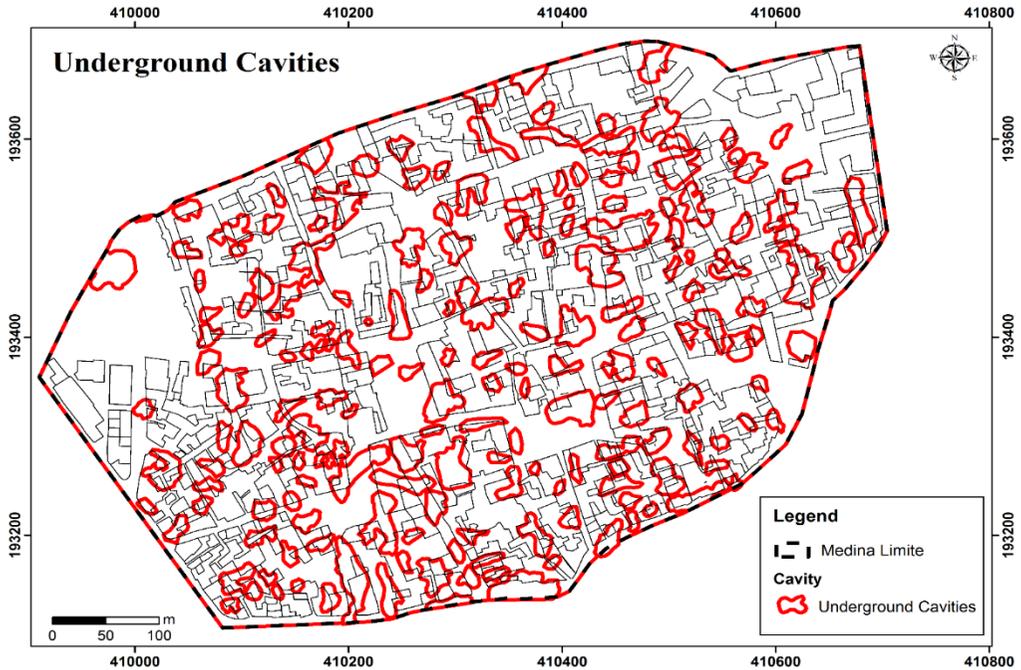


Figure 21. Carte de cavités selon les investigations géophysiques

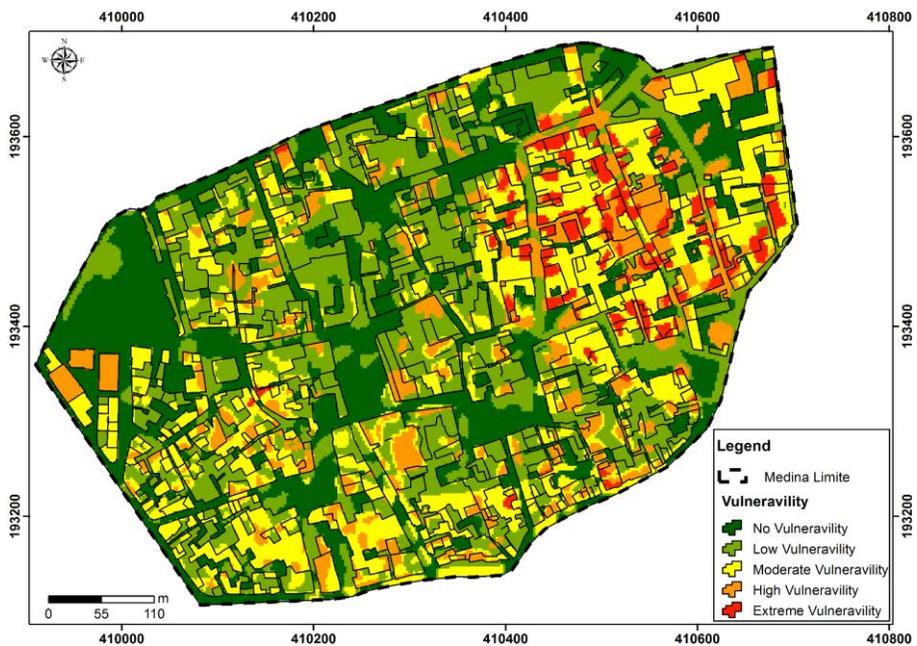


Figure 22. Carte thématique montrant les zones les plus vulnérables aux effondrements

Conclusion

D'après les résultats obtenus des méthodes utilisées, nous avons pu tirer les points suivants : La méthode électrique a favorisé l'identification du nombre de couches et leur lithologie à travers les valeurs de la résistivité et l'estimation de leurs épaisseurs. La méthode sismique (de réfraction) a permis de donner les temps d'arrivées des ondes servant à accorder une vitesse de propagation à ces ondes afin de déterminer la nature des terrains profonds. La tomographie électrique a servi pour attribuer une image récapitulative (échographie du sous-sol) sur les endroits où l'eau est présente à travers les résultats des résistivités apparentes. Finalement, les interprétations des résultats de chaque méthode ont favorisé la localisation des formations contenant de l'eau correspondant à des cavités et ou karsts contenant de l'eau (Finigue, 2017). Ces dernières correspondent généralement aux milieux poreux de la région. Dès lors, en croisant les diverses données récoltées relatives à l'évaluation des enjeux et leurs vulnérabilités, il serait possible de caractériser les méfaits et les impacts potentiels d'un éventuel effondrement gravitaire, et d'estimer par conséquent l'impact du phénomène à l'échelle préétablie des risques. L'évaluation du risque lié au phénomène étudié va permettre de se décider sur le niveau d'intervention à adopter. Il est préconisé à cet égard de programmer des études techniques complémentaires à l'amont de chaque intervention, démarrant d'un diagnostic pour définir les solutions possibles, pour produire une étude d'exécution arrêtant les modes opératoires pour l'intervention de traitement ou réhabilitation, sauf en cas d'une intervention d'urgence ou une intervention directe sur un site de travaux déjà entamés. En effet et dans certains cas, des constructions menacées, présentent des dangers et signes nécessitant d'intervenir en urgence pour appréhender l'évolution des instabilités et des dégradations, voire l'effondrement imminent de l'édifice. Dans ce cas il est préconisé de mener des études conjointement avec l'intervention pour maîtriser le risque, avant d'entamer les opérations de restauration ou réhabilitation. Ceci corrobore avec les travaux antérieurs (Rajji et al., 2022)

Conflit d'intérêts: Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données: Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article

Déclaration de financement: Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aitken, A. E. (2019). Natural Hazards: Explanation and Integration, Second Edition by Burrell E. Montz, Graham A. Tobin, and Ronald R. Hagelman III, ed., The Guilford Press, New York, 2017, 445 pp., paper \$78.00 (ISBN 978-1462529179). *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 63(3), 25–26. <https://doi.org/10.1111/cag.12566>
2. Barakat, A., Khellouk, R., et Touhami, F. (2021). Detection of urban LULC changes and its effect on soil organic carbon stocks: A case study of Béni Mellal City (Morocco). *Journal of Sedimentary Environments*, 6(2), 287–299. <https://doi.org/10.1007/s43217-020-00047-y>
3. Barker, R. D., et Loke, M. H. (1996). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44(3), 499–523.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mania, J., Michelot, J. M. J. L., et Michelt, J. M. J. L. (2014). Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride : cas de l ' Atlas de Béni Mellal (Maroc) Contribution of artificial and natural tracers to the knowledge of flow and recharge in. 8, 43–55.
5. Filahi, M. (2008). Contribution des méthodes géophysiques, en particulier du RADAR géologique, à la cartographie des cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal-MAROC. 1–204.
6. Finigue, A. (2017). Les ressources en eau dans le dir de l'atlas de Béni Mellal: problèmes de gestion et développement local. 140. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01708289%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01708289/document>
7. Kharmouch A., Najine, A., et Wafik, A. (2020). Geological And Geotechnical Characterization Of The Beni Moussa Perimeter In The Tadla Plain(Morocco). *European Scientific Journal ESJ*, 16(27), 204–216. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p204>
8. Lechat, M.F., 1991: «The international decade for natural disaster reduction: Background and objectives», *Disasters* , vol. 14.
9. Najine A. et Jaffal, M. (2007). *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 - April 24th and 25th , 2007. January 2018*.
10. Najine A., Jaffal M., Aïfa T., Filahi M., et Arioua A. (2006). 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*. 260. 83–89.

11. Najine A., Filahi M., Jaffal M., et Bahi L. (2010). Cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal, origine, typologie, caractérisation et techniques de restauration. NADIR PRINT Beni Mellal. ISBN / 2010:978-9954-30-090-9. 260. 83–89, 173p.
12. Rajji, A., Najine, A., Wafik, A., et Benmoussa, A. (2022). Building height estimation from high resolution satellite images. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 35(2), 268–281. <http://www.ijias.issr-journals.org/>
13. Ikezouhene, Y., (2017). Analyse numérique discrète de l'aléa fontis et du foisonnement associés aux cavités souterraines (2001). *Ph-D Université Paris-Est unpublished*. 252 p.