



HAL
open science

Contribution des méthodes géophysiques, en particulier du RADAR géologique, à la cartographie des cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal -MAROC

Mustapha Filahi

► **To cite this version:**

Mustapha Filahi. Contribution des méthodes géophysiques, en particulier du RADAR géologique, à la cartographie des cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal -MAROC. Géophysique [physics.geoph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008. Français. NNT : 2008PA066044 . tel-00812038

HAL Id: tel-00812038

<https://theses.hal.science/tel-00812038>

Submitted on 11 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS VI - PIERRE ET MARIE CURIE

THESE DE DOCTORAT

Spécialité

GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE

Présenté par

Mustapha FILAHI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Contribution des méthodes géophysiques,
en particulier du RADAR géologique,
à la cartographie des cavités souterraines
de la Médina de Béni-Mellal -MAROC

Soutenue le 11 juillet 2008

Devant le jury composé de :

M. Alain TABBAGH	Professeur, Paris VI	Directeur de thèse
M. Pierre ANDRIEUX	Professeur émérite	Codirecteur de thèse
M. Michel DIETRICH	Directeur de recherche, IFP	Rapporteur
M. Richard LAGABRIELLE	Directeur de recherche émérite	Rapporteur
M. Denis FABRE	Professeur - CNAM	Examineur
M. Cyrille FAUCHARD	Chargé de recherche, LRPC Rouen	Examineur

Je dédie cette thèse,

A mes parents :

Aucun mot ne saurait exprimer mon amour, mon respect et ma considération, pour vous, pour les sacrifices que vous avez consentis pour parfaire mon éducation, mon instruction et mon bien être.

Puisse Dieu², le tout puissant vous garder et vous procurer santé et longue vie.

A ma femme Naima :

En témoignage de mon profond respect et mon amour pour toi, l'aide et le soutien moral que tu as toujours su m'apporter m'ont été d'un grand réconfort.

A mes enfants : YAHYA et AHMED :

Vous êtes les fleurs de ma vie.

A mes frères et sœurs :

En témoignage de la tendresse et de l'amour que j'ai pour vous, je vous souhaite un avenir rayonnant et beaucoup de bonheur.

REMERCIEMENTS

Au terme, de ce travail de thèse, je voudrais remercier les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à son aboutissement.

Je tiens à remercier particulièrement :

Notre cher Professeur et co-directeur de thèse M. **Pierre Andrieux** pour la confiance qu'il m'a accordé en me donnant ce sujet de recherche et pour l'attention constante dont il a fait preuve dans son suivi, et qui est à l'origine de ma venue en France dans le cadre de l'action intégrée (MA/02/45) reliant l'université Cadi Ayyad et Mohamed Premier du côté marocain et l'université Pierre et Marie Curie - Paris 6, du côté français.

Vous m'avez fait un grand honneur en acceptant de diriger ce travail et de le mener à bien.

Nous vous prions d'accepter nos remerciements pour l'aide précieuse et bienveillante que vous nous avez apportée.

La chaleur de votre accueil, votre sympathie, vos qualités humaines, votre dynamisme et votre sérieux suscitent l'admiration.

Veillez croire cher Professeur, en notre sincère gratitude et notre grande estime.

Puisse Dieu, le tout puissant vous procurer bonheur santé et longue vie.

Je tiens à remercier le professeur **Alain Tabbagh** qui a bien voulu m'inscrire au laboratoire de l'UMR Sisyphe, pour sa disponibilité et pour l'honneur qu'il me fait de diriger les travaux de cette thèse.

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Grand Merci à l'équipe du Laboratoire Central et du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées et du CETE de Rouen, pour leur efficacité sur le terrain et leur grande disponibilité.

Grand Merci également à **M.Denis Montagne**, responsable des carrières souterraines de la ville de Laon et spéléologue, qui a mis en application la technique de cartographie des cavités à la boussole et au laser.

Que tous les membres du laboratoire de L'UMR Sisyphe trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères, particulièrement MM. **Roger Guérin, Philippe Cosenza et Fayçal Rèjiba.**

A mes collègues thésards du Laboratoire de l'UMR Sisyphe, pour leur aide dans la mise en forme de ce document. Ils ont ménagé ni leur temps ni leur peine pour ce faire. Je vous souhaite à tous bon courage et bonne réussite dans vos carrières de chercheurs.

Je terminerai en remerciant le **Wali de la région Tadla azilal Mohamed Dardouri**, le Doyen de la faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, **Professeur Abdelaziz Elbouadili** et mes amis enseignants chercheurs de la F.S.T Beni Mellal du laboratoire de Géophysique Appliquée, d'eau, et d'environnement qui ont tous contribué à ce travail, il m'est particulièrement agréable de citer M. **Najine Abdessamad** ainsi que M. **Arioua Abdelkrim, M. Benkabour Brahim** et M. **Boukdir Ahmed.**

Enfin je tiens à remercier les cadres de l'Agence Urbaine de Beni Mellal qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Abstract

This research aims at the contribution of geophysical methods in detecting and mapping underground cavities of the Medina of Beni-Mellal. It is considered as a part of the rehabilitation project of this Medina, It is comes to complete the initiative of the Urban Agency of Beni-Mellal and the local as well as the national authorities.

The methodology implemented is the one proposed in the technical guide proposed by Le Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées De Nantes (2004).

The first chapter raises the problems of cavities, called “Khefs” in relation with the history and geography of the Medina.

The second chapter deals with the preliminary stages of study that concern the application of the geophysics. A critical approach of the previous reports and the visits of the geological outcrops and caves have changed the claimed assumptions about the origin and the nature of the cavities. In contrast to what has often been assumed, there can't be any cavity naturally formed and linked to Karstification. In fact these cavities are the result of men digging detritic materials to extract soil needed for building the medina itself. As a result of this wrong exploitation they left behind cavities in forms of rooms and pillars. Besides, these cavities were subject to degradation due to the human activities.

The third chapter states the choice of the geophysical methods implemented, and presents the result of three of them. The seismic refraction is not recommended, while the electrical tomography and near-field electromagnetism are. Seven examples of 2D tomography profiles were presented and which clearly showed the presence of expected and resistant anomalies: Their roof is located between 0.50 m and 1.50 m deep and their lateral extension is less than 5 m. Five profiles and two electromagnetic maps demonstrate the ability to map geological variations of the surface and the sensitivity to the vertical contact located between the emptiness and the detritic material.

The fourth chapter presents the results obtained with the use of geological radar covering an experimental zone of the Medina. Some specific examples were taken out of 270 profiles that had been recorded with a 400 MHz antenna for all the profiles but 200 MHz antenna is used only for a few ones. To check the outcome, 17 holes were drilled and the result was satisfactory. Seven drillings reached emptiness as it was expected; other two got the hollow at a depth greater than that of the investigation. As it was expected, five holes highlighted geological reflectors whereas two encountered no reflectors. Finally, in only one case the destructive drilling didn't allow the identification of the awaited reflectors. The onset of a study covering the traces and the spectra specially the slippery spectra seems to open promising avenues for the interpretation of radar images with limited subsequent drillings.

The fifth chapter is a summary of results and also a response to questions raised by the project managers. A map of all the 200 holes detected in the whole area of Medina by all the techniques was presented. However the presence of such cavities shouldn't hinder any reconstruction or urban renewal of Medina. For each site a specific treatment is proposed and its cost remains lower than that of the construction itself. Proposals were also made for the networks in agreement with the basic principles proposed by competent professionals. Hence, the cavities in Medina move from a status of being an unpredictable threat to an element that could be tamed.

Keywords: cavities, quarries, urban development, geophysics, seismic, tomography electrical, electromagnetic field near slingram, geological radar.

Résumé

Ce mémoire traite de la contribution des méthodes géophysiques à la détection et à la cartographie des cavités souterraines de la Médina de Béni-Mellal. Il s'inscrit dans un projet de réhabilitation de la Médina, à l'initiative de l'Agence Urbaine de Béni-Mellal et des autorités municipale, régionale et nationale.

La méthodologie mise en œuvre est celle proposée dans le Guide technique élaboré par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes (2004).

Le premier chapitre pose le problème des cavités, dites «Khefs», en relation avec l'histoire et la géographie de la médina.

Le second chapitre traite des phases d'étude préliminaires à l'application de la géophysique. Une étude critique des documents et rapports antérieurs et des visites d'affleurements géologiques et de cavités, ont modifié profondément les hypothèses sur l'origine et la nature des cavités. Contrairement à ce qui a souvent été dit et écrit, il n'y a aucune cavité d'origine naturelle liée à la karstification. Il s'agit de cavités creusées par l'homme dans des matériaux détritiques et lacustres pour en extraire les matériaux de construction de la médina elle-même, sous la forme d'exploitation classique de type «chambres et piliers». La dégradation des cavités est également liée à l'activité anthropique.

Le troisième chapitre traite du choix des méthodes géophysiques mises en œuvre et présente les résultats de trois d'entre elles. La sismique réfraction n'est pas recommandée. La tomographie électrique et l'électromagnétisme en champ proche sont en revanche recommandés. Sept exemples de profils de tomographie 2D sont présentés, qui montrent clairement la présence d'anomalies résistantes attendues : leur toit est situé entre 0,50 m et 1,50 m de profondeur ; leur extension latérale est inférieure à 5m. Cinq profils et 2 cartes électromagnétiques démontrent la capacité à cartographier les variations de la géologie superficielle et la sensibilité aux contacts verticaux entre les vides et les matériaux détritiques en place.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus avec le radar géologique sur une zone expérimentale de la médina. Des exemples spécifiques sont extraits des 270 profils qui ont été enregistrés, avec une antenne de 400 MHz pour la totalité et une antenne de 200 MHz pour quelques uns. Les résultats ont été contrôlés par 17 forages. La confirmation est satisfaisante : 7 forages ont rencontré les vides tel que prévu, 2 les ont rencontrés à une profondeur supérieure à la profondeur d'investigation, 5 ont mis en évidence un réflecteur géologique comme prévu, 2 n'ont rencontré aucun réflecteur comme prévu et enfin pour 1 seul d'entre eux, le forage destructif n'a pas permis d'identifier le réflecteur attendu. Un début d'étude sur les traces et sur les spectres, en particulier les spectres glissants, semble ouvrir des voies prometteuses pour une interprétation des radargrammes, avec un nombre limité de forages ultérieurs.

Le cinquième chapitre présente une synthèse des résultats et répond notamment aux questions posées par les directeurs du projet. Une carte de toutes les cavités détectées par l'ensemble des techniques est présentée. Il y en a près de 200. Aucune zone de la Médina n'est épargnée. En revanche, cette présence n'interdit pratiquement aucun projet d'aménagement ou d'urbanisme. A chaque usage d'un lieu, un traitement spécifique est proposé, dont le coût devrait rester faible par comparaison avec celui de la construction elle-même. Des propositions sont également faites concernant les réseaux, en bon accord avec des solutions de principe proposées précédemment par des bureaux d'étude compétents. En bref, les cavités passent du statut de danger inéluctable et imprévisible, à celui d'éléments apprivoisés de la vie de la médina.

Mots clés : Cavités, carrières souterraines, aménagement urbain, géophysique, sismique, tomographie électrique, électromagnétisme en champ proche, slingram, radar géologique.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	3
Abstract	5
Résumé	6
TABLE DES MATIERES	7
TABLE DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	18
Préambule	19
Introduction	23
Chapitre 1	27
La Médina de Béni-Mellal	27
Histoire et Géographie	27
Les problèmes posés par les Khefs	27
1.1- Historique	27
1.2- Cadre géographique et géomorphologique	28
1.3- Situation administrative	30
1.4 - Données démographiques et conditions d'habitat dans la médina	30
1.5 - Equipement et infrastructures de la médina	30
1.6 - Etat du cadre bâti	33
1.7 - Problématique des cavités souterraines ou Kehfs	33

Chapitre 2	40
Cartographie des cavités – Méthodologie	40
Etudes préliminaires à la géophysique	40
2.1 - Etude bibliographique	40
2.2 -Méthodologie – Détection de cavités souterraines	41
2.3 - Les travaux antérieurs	43
2.4 -Géologie de la région de Béni-Mellal et de la Médina	48
2.4.1-Contexte géologique général	48
2.4.2 - Géologie de la Médina	53
2.5 –Climatologie	61
2.6 – Hydrologie	64
2.7 - Hydrogéologie	65
2.8 - Enquêtes – Visites	66
2.9 -Création d'un SIG	67
2.10 - Synthèse - Importance de l'activité anthropique	67
Chapitre 3	70
Application des méthodes géophysiques	70
Méthodologie	70
Trois méthodes d'investigation locale	70
Sismique – Tomographie électrique	70

Electromagnétisme en champ proche	70
3.1 – Méthodologie	70
3.1.1- Choix des techniques géophysiques	70
3.1.2- Le programme de mesures géophysiques	75
3.2 – Sismique : Etude des arrivées premières	76
3.2.1 - Rappel : Principe de la sismique réfraction	76
3.2.2 - Exemples de résultats	79
3.3 - Tomographie électrique	83
3.3.1- Rappel - Principe de la méthode	84
3.3.2 - Résultats dans la zone test	90
3.4 – Electromagnétisme en champ proche	104
3.4.1 - Rappel : Principe de l'électromagnétisme en champ proche	104
3.4.2 - Grandeurs mesurées	105
3.4.3 - Résultats attendus: détection de cavités par méthodes en champ proche	108
3.4.4 - Méthodologie	108
3.4.5- Etude de la zone expérimentale de la médina	111
Chapitre 4	121
Le Radar géologique	121
Corrélation entre les différentes méthodes	121
4.1 – Le radar géologique	121

4.1.1- Rappel – Principe	121
4.1.2- Grandeurs mesurées	123
4.1.3- Résultats attendus	124
4.1.4. Détermination des vitesses	124
4.1.5-Détermination des profondeurs et des épaisseurs	125
4.1.6-Traitements spécifiques	125
4.1.7- Détection de cavités par méthodes radar	126
4.2. Méthodologie	127
4.2.1- Domaines d'application	127
4.2.2-Déroulement d'une campagne de mesure	127
4.2.3- Caractéristiques générales des équipements de mesure	128
4.2.4-Généralités sur l'interprétation des mesures	130
4.2.5-Limites de la méthode	131
4.3 - Programme de mesures à Béni- Mellal	132
4.4 - Etude détaillée de la zone expérimentale de la médina	132
4.4.1 - Objectif – Programme	132
4.4.2 - Equipement – Paramètres d'enregistrement	134
4.4.2.1- Le radar impulsionnel	134
4.4.2.2- Les antennes	134
4.4.3 - Examen des radargrammes-Typologie des réflexions	137
4.4.3.1- Traitement des données :	137
4.4.3.2 - Typologie des réponses de l'environnement et des réflecteurs	138

4.4.4 - Interprétation quantitative de radargrammes spécifiques – Contrôle par des forages	145
4.4.4.1 – La ruelle dite de la Souscription :	
Profils 24 et 25 (400 MHz) et 59 (200 MHz)	145
4.4.4.2 - L’avenue Chouada : Profil 214	150
4.4.4.3- Cinq profils supplémentaires et six forages de contrôle	157
4.4.4.4-Synthèse	161
4.4.5 – Modélisation – Compléments de traitement	162
4.4.6 - Contribution à la cartographie des cavités sur l’ensemble de la Médina	167
4.5 – Corrélations entre les différentes techniques	169
4.5.1 - Tomographie électrique et Radar	169
4.5.2 - Electromagnétisme et Radar	173
Chapitre 5	177
Synthèse – Recommandations	177
5.1 – Application des méthodes géophysiques	177
5.1.1 - Le radar géologique	177
5.1.2 -L’électromagnétisme en champ proche	178
5.1.3 -La tomographie électrique	178
5.1.4 - La sismique	179
5.1.5 - La microgravimétrie	179

5.1.6 - Les forages de contrôle	180
5.1.7 - Diagraphies, imagerie et géophysique de forage	180
5.2-Cartographie des cavités de la Médina de Béni-Mellal	180
5.3 - Réponses aux questions posées par les responsables du projet – Conclusions partielles	183
5.3.1 -Conclusion générale	183
5.3.2 - Conclusions particulières	186
5.4 – Recommandations	187
5.4.1 - Recommandations générales	187
5.4.2 - Recommandations particulières	189
5.4.3 - Exemples de projets à court terme	191
5.4.3.1 - Sécurité	191
5.4.3.2 - Sauvegarde - Valorisation	192
5.4.3.3 -Assainissement – Eaux pluviales – Eau potable :	192
5.4.3.4 -Préparation de la validation du Projet d'Aménagement de la Médina - Tests géotechniques	194
5.4.3.5 - Opération phare	194
5.4.3.6 - Constitution de l'Equipe Technique Spécialisée (ETSM)	194
5.4.3.7 - Opération pilote de l'ETS, accompagnée d'une opération «Radar de puits et forages»	195
5.4.3.8 – Le Projet d'Aménagement de la Médina (PAM ?)	195

Conclusions	197
1 - L'apport dans le domaine géophysique :	197
2 - Apport à la cartographie des cavités de la Médina, en réponse à la demande de l'Agence Urbaine	199
3 - Des préconisations pour les travaux à entreprendre dans la Médina à la suite de cette étude	200

Bibliographie **201**

TABLE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : Carte de situation de la zone étudiée	29
Figure 1.2 : Visite d'une carrière souterraine	36
Figure 1.3 : Détail d'un pilier de carrière dégradé	36
Figure 1.4 : Activité artisanale – Huilerie	37
Figure 1.5 : Fuite du réseau d'eaux pluviales	38
Figure 1.6 : Résultat d'un effondrement	38

Chapitre 2

Figure 2.2.1 : Méthodologie générale pour la détection de cavités souterraines (Fauchard et Pothérat, 2004)	42
Figure 2.3.1 : Coupe interprétée du puits P2	45
Figure 2.3.2 : Coupe interprétée du Khaf Bata	46
Figure 2.3.3 : Coupe interprétée du puits PI	47

Figure 2.4.1 : Carte géologique simplifié de l'atlas de Beni-Mellal	49
Figure 2.4.2 : Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas de Béni-Mellal	50
Figure 2.4.3 : Carte géologique schématique de la région de Béni-Mellal.	54
Figure 2.4.4 : Carte des levés géologiques observés dans les environs de la Médina et dans les Kehfs accessibles	55
Figure 2.4.5 : Colonne stratigraphique réalisée dans la carrière de Bou Achouch	57
Figure 2.4.6 : Eléments détritiques et calcaire travertineux	58
Figure 2.4.7 : Calcaire gréseux dur à nodules	58

Chapitre 3

Figure 3.2.1: Onde réfléchiée et onde réfractée pour un modèle bicouche à interface horizontale	77
Figure 3. 2.2 : Hodochrones des ondes sismiques	77
Figure 3.2.3 : Localisation des profils sismiques	80
Figure 3.2.4 : Exemples de dromochroniques	82
Figure 3.3.1 : Schéma général d'une mesure de résistivité du sol utilisant un dispositif symétrique à 4 électrodes.	84
Figure 3.3.2 : Lignes de courant (rouge) et courbes équipotentiellles (noir)	85
Figure 3.3.3 : Instrumentation et séquence de mesure permettant l'obtention de la pseudo-section (ici en dispositif Wenner α) (Barker, 1979).	88
Figure 3.3.4 : Diagrammes de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sous-sol.	

(A et B représentent les électrodes de courant et M et N les électrodes de potentiel, d'après Dalhin & Zhou,2004).	90
Figure 3.3.5 : Localisation des profils de tomographie électrique	92
Figure 3.3.6 : Etude de la zone expérimentale de la médina	93
Figure 3.3.7 : Résultat de la tomographie – Profil E 3	95
Figure 3.3.8 : Résultat de la tomographie – Profil E 5	96
Figure 3.3.9 : Résultat de la tomographie – Profil EB 2	97
Figure 3.3.10 : Résultat de la tomographie – Profil EB 4	98
Figure 3.3.11 : Résultat de la tomographie – Profil EV 2	99
Figure 3.3.12 : Résultat de la tomographie – Profil EV4	100
Figure 3.3.13 : Résultat de la tomographie – Profil EV 5	101
Figure 3.3.14 : Résultat de la tomographie – Profil J 6	102
Figure 3.3.15 : Résultat de la tomographie – Profil J 11	103
Figure 3.4.1 : Principe des méthodes électromagnétiques en basses fréquences et en champ proche (d'après Chouteau, 2001)	105
Figure 3.4.2: a) Réponses des dispositifs verticaux et horizontaux à une couche conductrice située à une profondeur d en fonction de la profondeur normalisée $z=d/s$ avec s la distance entre bobines. b) L'intégration de ces réponses sur la profondeur z , $RH(z)$ et $Rv(z)$ donne la réponse cumulative de chaque tranche de terrain pour les deux types de dispositif. (Mc Neill,1980).	107
Figure 3.4.3 : Acquisition à l'EM31 avec un opérateur	111
Figure 3.4.4 : Localisation des profils EM 31	112

Figure 3.4.4 : Profil électromagnétique EBM1 (VD)	113
Figure 3.4.5 : Profil électromagnétique EBM 3 (VD)	113
Figure 3.4.6 : Profil électromagnétique EBM 4 (VD)	114
Figure 3.4.7 : Profil électromagnétique EBM 5H (HD)	114
Figure 3.4.8 : Profil électromagnétique EBM 5V (VD)	115
Figure 3.4.9 : Profil électromagnétique EBM 7 (VD)	115
Figure 3.4.10 : EBM 3 (HD) – Répétitivité (conductivité)	116
Figure 3.4.11 : EBM 3 (HD) – Répétitivité (phase)	116
Figure 3.4.12 Cartographie de la place Bir Azaram	119

Chapitre 4

Figure 4.1.1.1 : Principe de la méthode radar	122
Figure 4.1.2.1 : a) Signal radar et b) exemple de radargramme interprété, fc=200 MHz (Doc. LRPC Saint Brieuç)	123
Figure 4.2.3.1: a) Antenne dipôle bitriangle (GSSI fréquence centrale de 1.5 GHz), b) la forme générale du diagramme de rayonnement dans le sol, c) impulsion émise à la sortie de l'antenne et amplitude spectrale (fréquence centrale mesurée de 1.6 GHz)	130
Figure 4.4.1.1 : Localisation des profils radar expérimentaux	133
Figure 4.4.2.1 : Poussette et Antenne de 400 MHz et roue codeuse	134
Figure 4.4.2.2 : Acquisition radar sur le terrain, antenne 400 MHz	136
Figure 4.4.3.1 : Radargramme 200 MHz - Profil 212	138
Figure 4.4.3.2 : Radargramme 200 MHz – profil 214	139
Figure 4.4.3.3 : Radargramme 200 MHz. Profil 77, intérieur de la mosquée	139

Figure 4.4.3.4 : Deux radargrammes dans une villa (400 MHz)	140
Figure 4.4.3.5 : Hyperboles proches de la surface (Type I)	141
Figure 4.4.3.6 : Hyperboles à moyennes et grandes profondeurs (Type II)	141
Figure 4.4.3.7 : Hyperboles non individualisées réflecteurs d'extension latérale limitée (Type III)	142
Figure 4.4.3.8 : Réflecteurs quasi continus (Type IV)	143
Figure 4.4.3.9 : Réponses exemplaires de vides adjacents (Type V)	144
Figure 4.4.4.1 : Radargramme 24	146
Figure 4.4.4.2 : Radargramme 25	146
Figure 4.4.4.3 : Radargramme 59 - Position des futurs forages de contrôle	147
Figure 4.4.4.4 : Traces extraites du radargramme 59	148
Figure 4.4.4.5 : « Logs » géologiques résultant du suivi des forages	149
Figure 4.4.4.6 : Radargramme 214 et position des forages – Partie 1	151
Figure 4.4.4.7 : Traces S11, S1, S2 et S3 extraites du radargramme	152
Figure 4.4.4.8 : Radargramme 214 et position des forages– Partie 2	153
Figure 4.4.4.9 : Traces S 4 et S 5 extraites du radargramme	154
Figure 4.4.4.10 : Radargramme 214 et position du forage S 6 – Partie 3	154
Figure 4.4.4.11 : Trace S 6 extraite du radargramme	154
Figure 4.4.4.12 : « Logs » géologiques résultant du suivi des forages	155
Figure 4.4.4.13 : Radargrammes 5 et 7 et position des forages de contrôle	157
Figure 4.4.4.14 : «Logs» géologiques résultant du suivi des forages	158
Figure 4.4.4.15 – Radargrammes 211, 212 et 215 et position des forages	159
Figure 4.4.4.16 : «Logs» des forages S 7 à S 10	160
Figure 4.4.5.1 : Trace Radar synthétique	163

Figure 4.4.5.2 : Les spectres des 4 traces – Forages «Souscription»	164
Figure 4.4.5.3 : Les spectres des 7 traces - Forages de l'avenue Chouada	165
Figure 4.4.5.4 : Diagramme temps / fréquence obtenue sur la trace S 13	166
Figure 4.4.6.1: Analyse détaillée de profils parallèles sur l'avenue Chouada	168
Figure 4.5.1 : Tomographie EB 4 – Radar 13	170
Figure 4.5.2 : Tomographie EV2 – Radar 166	171
Figure 4.5.3 : Tomographie E3 – Radar 122	172
Figure 4.5.4 : Tomographie E5 – Radar 135	173
Figure 4.5.5 : Electromagnétisme EBM 5V – Radar 59	174
Figure 4.5.6 : Electromagnétisme EBM 3 – Radar 22	175

Chapitre 5

Figure 5.2.1 : Carte des cavités, remise à l'issue du projet	182
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle moyenne calculée à la station de Béni Mellal (Période : 1960-2001).	62
Tableau 2.2 : Climat de Béni Mellal	63
Tableau 2.3 : Débits mensuels moyens de la source d'Aïn Asserdoune (Période 1976-2000)	65

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Valeur des permittivités relatives réelles et des conductivités de quelques matériaux	126
--	-----

Préambule

La ville de Béni-Mellal est située au centre du Maroc à 200 km environ au sud-est de Casablanca. Irriguée par la belle source de Ain Asserdoune, Béni-Mellal forme une large tâche de verdure au pied du Haut-Atlas. Elle constitue un pôle d'attraction régional, sans pour autant empêcher l'émergence et le développement d'autres centres.

La médina de Béni-Mellal représente par son histoire l'espace de référence de ce pôle régional, par sa situation géographique au cœur de la ville et par son rôle déterminant sur le plan social, économique et culturel. Elle fut édiflée vers la fin du 16^{ème} siècle sous le règne du sultan alaouite Moulay Ismail pour maintenir l'ordre et protéger le circuit commercial entre les grandes villes de Meknès et Fès au Nord et Marrakech au Sud.

Le tissu urbain de la médina de Béni-Mellal garde une typologie similaire à celle des autres médinas du royaume par son caractère cellulaire et dense formé d'îlots irréguliers et multiformes irrigués par un système de trames piétonnes de largeurs réduites et variables.

La préservation et la sauvegarde des anciennes constructions de la médina de Béni-Mellal constituent pour les pouvoirs publics une priorité en matière de valorisation du patrimoine, eu égard à leur valeur architecturale et historique. Elles le sont également, pour leur rôle économique et social. Toutefois, si les situations de vétusté et de précarité sont similaires pour toutes les médinas marocaines, celle de Béni-Mellal se distingue par une particularité marquée par deux éléments : un sous-sol affecté de cavités souterraines et une ouverture à la circulation automobile.

En effet, en plus de l'ancienneté des constructions, et des signes pathologiques qui lui sont liés, le sous-sol de cette médina est formé d'un réseau dense de cavités souterraines de tailles variables et vraisemblablement de formes irrégulières. Ce véritable gruyère constitue un danger permanent pour la population et il est, dans la plupart des cas, à l'origine des effondrements des constructions.

Il est à noter que selon des indications connues, aucun secteur de la médina n'est épargné. Plusieurs cavités "communiqueraient" entre elles, disent certains, mais nous ne l'avons pas vérifié nous-mêmes, sous forme de réseau de galeries ramifiées. Il n'est pas sûr que les limites de ces grottes respectent le plan parcellaire du terrain en surface du sol. Ainsi, une cavité "exploitée" par le propriétaire d'un logement déterminé, pourrait occuper des sous-sols relevant des propriétés voisines.

Les mesures préventives prises jusqu'à présent, 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 solides s'écroulent par effondrement 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.

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. La géophysique apparaît comme un outil incontournable à tester puis à généraliser, pour localiser ces cavités, puis pour déterminer leur envergure et éventuellement leur état. De plus, cette étude géophysique est urgente, compte tenu du danger permanent que ces cavités constituent et du fait qu'elles ne peuvent éternellement supporter à la fois les charges des bâtiments et les effets induits par la circulation des véhicules. La cartographie aussi exhaustive que possible de ces vides constitue 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 sont conscients de cette problématique. Ils se sont engagés dans une politique concertée pour mettre fin aux effets engendrés par la présence des cavités. Ils ont deux objectifs particuliers, (1) la protection des biens et des personnes et (2) le tracé des grands axes en vue d'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 Béni-Mellal et porte sur l'application des méthodes géophysiques pour la détection et la cartographie des cavités présentes dans les terrains de fondation de l'ancienne Médina. Les résultats de cette étude contribueront à la définition des dispositions d'ordre technique, opérationnel et financier susceptibles d'apporter la meilleure réponse possible aux problèmes posés par ces cavités.

Ce projet constitue une des originalités de ce programme en collaboration avec un réseau de partenaires issus du milieu universitaire et industriel. Il s'agissait d'associer les connaissances scientifiques, les outils, l'expérience, le savoir-faire et l'expertise nécessaire pour atteindre les objectifs fixés. Cette implication multiforme est indispensable, compte tenu des enjeux et des moyens à mettre en œuvre.

C'est ainsi qu'est née cette thèse, à la fois à l'origine, au centre, puis comme résultat de ce projet.

Introduction

C'est dans le cadre du projet de sauvegarde et d'aménagement de la médina, à l'initiative de l'Agence urbaine de Béni-Mellal et avec le support des autorités municipales, de la Willaya et du Royaume, que s'inscrit cette thèse.

Deux objectifs étaient fixés au projet :

- 1 – Cartographier de manière aussi complète que possible toutes les cavités sous la médina, de façon à pouvoir programmer les opérations de mise en sécurité, puis de sauvegarde et d'aménagement. La situation était considérée comme bloquée, en l'absence d'une telle carte.
- 2 - Spécifier les contraintes imposées aux futures opérations de sauvegarde et d'aménagement, du fait de la meilleure connaissance de la géométrie, de la nature et de l'état des cavités.

La géophysique appliquée est apparue comme l'outil permettant de débloquer la situation et notre équipe du Laboratoire de géophysique de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal a accepté de prendre cette responsabilité. C'est dans le cadre d'une Action Intégrée, qui réunissait 3 universités marocaines et l'Université Pierre et Marie Curie, qu'il a été décidé d'entreprendre cette thèse.

Les deux objectifs du projet devenaient les objectifs de la thèse : cartographie des cavités et préconisations. A ceux-ci, s'ajoutait une approche méthodologique : (1) intégration de la géophysique dans la méthodologie générale

de recherche des cavités et (2) choix, tests, mise en œuvre et contrôle de l'application des méthodes géophysiques les plus adaptées.

Ce travail de thèse a bénéficié de la collaboration de nombreuses équipes nationales et internationales. Citons à l'international : l'UMR Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie dans le cadre de l'Action Intégrée, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes et le Laboratoire Régional ainsi que le Centre d'Etudes Techniques de Rouen et enfin l'Université de Barcelone. Toutes les données acquises n'ont pas encore été exploitées et la médina reste un lieu d'expérimentation disponible pour les équipes de chercheurs.

Ce travail a dû faire face à de nombreuses difficultés également :

- l'environnement urbain très dense, mais c'était précisément une partie du problème à résoudre ;
- les problèmes logistiques, du fait de la multiplicité des acteurs locaux ;
- la difficulté de coordination entre des équipes successives, dont les emplois du temps et la disponibilité des équipements étaient généralement guidés par d'autres contraintes.

La géophysique seule n'a pas la capacité à résoudre, le problème de la médina de Béni-Mellal. En revanche, elle a su s'intégrer dans une approche globale de type géoscientifique, comme cela est proposé aujourd'hui dans le cadre de l'Année Internationale de la Planète Terre.

Ce mémoire est à l'image de cette situation multiforme. Il comporte cinq chapitres :

- les deux premiers chapitres posent le problème du point de vue de l'histoire, de la géographie et des géosciences ; ils présentent une étude critique des travaux antérieurs et tentent d'établir sur des bases solides, le problème à résoudre du point de vue du géophysicien ;

- les deux chapitres suivants traitent exclusivement de géophysique appliquée ;

- le dernier chapitre intitulé « Synthèse et Recommandations » répond en partie à l'aspect méthodologique en géophysique, mais il présente surtout en détail, les conclusions et les recommandations qui ont été faites dans le rapport de synthèse du projet, qui résultent assurément des investigations que nous avons menées au cours des phases préliminaires et lors des campagnes géophysiques.

Chapitre 1

La Médina de Béni-Mellal

Histoire et Géographie

Les problèmes posés par les Khefs

La ville de Béni-Mellal (fig. 1.1) est située au pied du flanc nord du Haut Atlas central sur la route nationale qui relie les villes de Marrakech et de Fès, à 200 Km environ au nord-est de Marrakech. Elle est également à 200 Km environ, au sud-est de Casablanca.

1.1- Historique

A l'aube des temps historiques, la plaine de Tadla était le pays des "Berbères Masmouda" : agriculteurs sédentaires et bâtisseurs de cités. La première de ces cités construite est la ville dite "Médina Day" qui rentre dans l'histoire vers le IX^{ème} siècle. Elle était située à peu près à l'emplacement actuel de la médina de Béni-Mellal. La cité a suscité un intérêt grandissant pour différentes dynasties depuis les Almoravides.

Vers la fin du XVI^{ème} siècle et sous le règne du Sultan Alaouite Moulay Ismail, la médina de Béni-Mellal fut réédifiée pour maintenir l'ordre et protéger le circuit commercial entre les grandes villes de Meknès et Fès au nord et

Marrakech au sud. Elle constituait donc une zone de confluence importante entre le nord et le sud du Maroc. Ses potentialités naturelles (eau et agriculture) et sa situation géographique lui conféraient une place distinguée pour toutes les dynasties.

Aujourd'hui encore, ses atouts sont réels et elle doit réussir à s'imposer comme une métropole régionale tournée vers l'avenir, sans renier son passé riche.

1.2- Cadre géographique et géomorphologique

La ville de Béni-Mellal, chef-lieu de la région économique de Tadla-Azilal, est considérée comme un pôle économique régional, par son emplacement géographique qui en fait un lieu d'échange, par son héritage historique et par la richesse de son agriculture irriguée.

Par son emplacement entre le Haut-Atlas et la plaine du Tadla, la zone urbaine se caractérise 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.(Colline Dir).

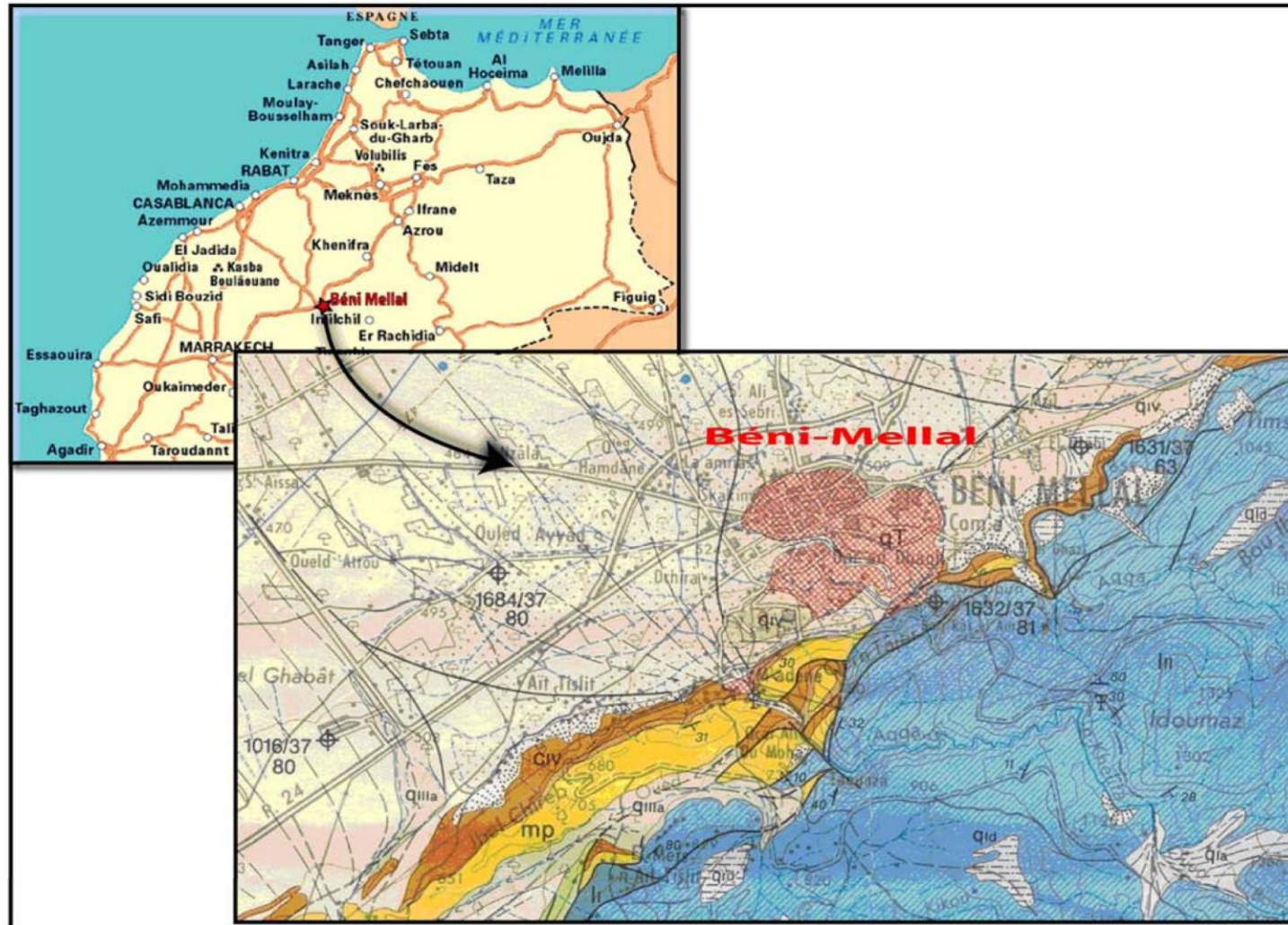


Figure 1.1 : Carte de situation de la zone étudiée

1.3- Situation administrative

La ville de Béni Mellal, chef lieu de la région et de la province Tadla Azilal se décompose administrativement en : 7 Pachaliks, 5 Cercles, 7 communes urbaines et 10 communes rurales.

Les quatre communes rurales qui la bordent sont : au nord, Sidi Jaber ; au sud, Foum Oudi ; à l'est, Foum Laancer et Ouled Ayichet et à l'ouest, Ouled M'Barek.

1.4 - Données démographiques et conditions d'habitat dans la médina

La médina s'étend sur une superficie de 35 hectares et compte actuellement environ 8900 habitants, soit une densité de 254 habitants à l'hectare environ.

La population de la médina est représentée par une moyenne de 1561 ménages occupant 1300 logements, soit 1.2 ménage par logement et 5.7 personnes par ménage.

La superficie moyenne des logements est de l'ordre de 90 m² ce qui donne un rapport d'occupation de 13.15m² / personne.

Le nombre de logements est estimé à 1200, répartis par type, comme suit :

- 56% des constructions sont uniquement à R.D.C ;
- 41,50% sont à R+1 ;
- 2,5% supérieures à R+1.

Le nombre de pièces par logement, est compris entre 2 et 3.

Les investigations sur le statut d'occupation révèlent que 47% des constructions sont occupées par leurs propriétaires.

1.5 – Equipement et infrastructures de la médina

A - Assainissement

En matière d'assainissement, un fort pourcentage des habitations reste non raccordé au réseau existant, il est de l'ordre de 60%.

Cela laisse à supposer que les eaux pluviales, usées et ménagères des zones non desservies par le réseau d'assainissement et quelquefois les déchets solides, sont directement déversés dans les khefs formant le sous-sol de la Médina.

B - Eau potable

Selon les indications recueillies, 15% des logements de la médina, ne sont pas encore directement branchés au réseau A.E.P. Ainsi la population concernée s'approvisionne à des bornes fontaines dont l'écoulement est souvent anarchique.

La vétusté du réseau d'eau inter-médina laisse penser que des fuites et des déperditions seraient possibles et peut être importantes. Cette idée est confirmée, par l'effondrement de Khefs, dû parfois à des ruptures de conduites d'eau.

C - Electrification

Le taux de branchement au réseau électrique est important puisqu'il dépasse 97%. Néanmoins, des mesures de sécurité devront être prises afin d'éviter des risques éventuels.

L'éclairage public est satisfaisant dans l'ensemble. Toutefois, il serait souhaitable de remplacer le réseau aérien en fils de cuivre, par des câbles torsadés afin d'atténuer l'aspect en toiles d'araignées du réseau existant ; ce qui améliorerait davantage la sécurité et l'esthétique dans la médina.

D - Voirie et circulation

Bien que relativement entretenues assez larges, les voies carrossables de la Médina connaissent des embouteillages fréquents compte tenu du volume des véhicules qui y circulent et particulièrement lors des heures de pointe.

Cette situation est tributaire de l'effet polarisateur de la médina, où afflue quotidiennement une population importante.

En plus des effets pervers de la circulation sur l'environnement (pollution générée par le bruit et le dégagement de gaz carbonique entre autres), celle-ci porte aussi atteinte à la stabilité des constructions car les charges roulantes et les vibrations qu'elles produisent amenuisent la rigidité des couches couvrant les khefs, notamment ceux se trouvant sous les voies de communication.

Quant aux voies non carrossables, elles se caractérisent par leurs emprises très réduites et leur tracés sinueux, la circulation piétonne dans ces ruelles est, dans certains tronçons très dense, voire même difficile en raison de l'exploitation irrégulière et incommode du domaine public par les commerçants (fixes et ambulants) qui y étalent et exposent leurs marchandises.

Les locaux destinés aux activités commerciales sont en progression continue en considération du changement de vocation des logements au niveau des R.D.C en locaux commerciaux qui ne cessent de s'affirmer. Ceci dénote de l'effet centralisateur de la médina en matière d'activités commerciales.

L'étroitesse des rues est encore plus accentuée par l'usage parfois abusif des auvents et stores sur les devantures des boutiques. Dépendant de la seule initiative des commerçants, ces auvents participent également à la laideur du paysage urbain.

En plus des problèmes de circulation liés au flux important des véhicules qui empruntent les rues de la médina, les usagers trouvent d'énormes difficultés pour le stationnement. Les aires réservées à cet effet, sont très insuffisantes. Les camions ou autres véhicules ou même les charrettes qui approvisionnent les locaux commerciaux, dont le nombre dépasse les 700 unités, se garent en stationnement défectueux faute de places adéquates. Les stationnements anarchiques, gênant excessivement la fluidité de la circulation, entraînent la formation de goulots d'étranglement.

1.6 - Etat du cadre bâti

A - Etat physique

Constituant la principale composante de l'espace urbain de l'ancienne Médina de la ville de Béni Mellal, le cadre bâti affecté aux besoins du logement et des activités annexes, souffre actuellement de plusieurs problèmes dus, les uns à l'âge avancé des constructions, les autres à la mauvaise portance du sol et à l'état du sous-sol. En effet, sur l'ensemble du parc existant, 85% des bâtiments, laissent apparaître des signes de vétusté, plus au moins avancés et qui, dans certains cas, menacent la stabilité des constructions et la sécurité des citoyens.

B- Matériaux utilisés

Concernant les matériaux de construction utilisés, il y a lieu de noter que :

- pour l'habitat traditionnel qui représente 54% du parc des constructions, **la terre battue** constitue, seule ou associée aux moellons ordinaires, le matériau de construction prépondérant ;
- 38% de ce parc sont construits en terre consolidée avec des matériaux plus résistants ;
- les 8% restants sont édifiés en matériaux modernes ou récents couramment utilisés (Agglos en béton, structure en béton armé...).

Il faut signaler dès maintenant que la terre utilisée dans les constructions, a été extraite directement des carrières souterraines, qui ne sont autres que les sous-sols de ces mêmes constructions.

1.7 - Problématique des cavités souterraines ou Kehfs

Le sous-sol de la Médina de Béni-Mellal recèle donc un nombre très important de cavités et «grottes» souterraines. Ces vides sont situés à de faibles profondeurs et présentent des formes et des tailles variables. La plupart des cavités recensées

est située sous les constructions et débordent parfois sous les voies et les endroits publics.

Ces «grottes» et cavités font partie de l'histoire et de la légende de Béni-Mellal. Que n'a-t-on inventé sur leur formation, leur origine, leur distribution, leur utilisation et le danger qu'elles représentent ! La géologie en particulier a été malmenée ; on a parlé de karstification, en raison de la présence du Lias dans l'Atlas tout proche sans doute, alors que le sous-sol de la médina date du quaternaire et qu'il est essentiellement détritique.

Il n'en reste pas moins que ces cavités ont été une préoccupation constante pour les autorités locales, en raison d'accidents, mortels quelquefois, et des problèmes réels posés pour toute nouvelle construction et tout aménagement. Plusieurs études ont ainsi été lancées au cours des cinquante dernières années, qui souvent ne couvraient qu'un aspect du problème et qui la plupart du temps répétaient les mêmes explications et les mêmes scénarios, fantaisistes bien souvent, faute d'un travail de terrain sérieux et faute sans doute de la présence de géologues et plus généralement de «géoscientifiques» dans les équipes au travail. Certains rapports sont allés jusqu'à proposer le déplacement de toute la population de la médina dans la périphérie de Béni-Mellal.

Quels sont les faits reconnus et acceptés aujourd'hui ?

Il existe des caves ou cavités, sous la très grande majorité des habitations et sous la voirie. Un certain nombre peuvent être visitées ; d'autres sont connues par la population et désormais inaccessibles. Elles ont répondu et répondent encore à différents besoins (fig. 1.2 à 1.4) :

- sources de matériaux de construction, à l'origine ;
- lieux de refuges contre les ennemis et les intempéries, dit-on ;
- dépôts d'approvisionnements ;
- lieux d'activités artisanales ;
- décharges sauvages ;

- puisards pour les eaux usées et les eaux pluviales.

Pour ces deux dernières raisons, il est clair que l'état des ces cavités souterraines ne cessent de se dégrader avec le temps (fig. 1.5 et 1.6) et que des accidents sont à redouter chaque année.

Les autorités locales, régionales et nationales sont en attente d'un diagnostic aussi précis que possible et de recommandations, pour prendre des décisions. La géophysique et plus généralement les géosciences sont appelées à jouer un rôle majeur.

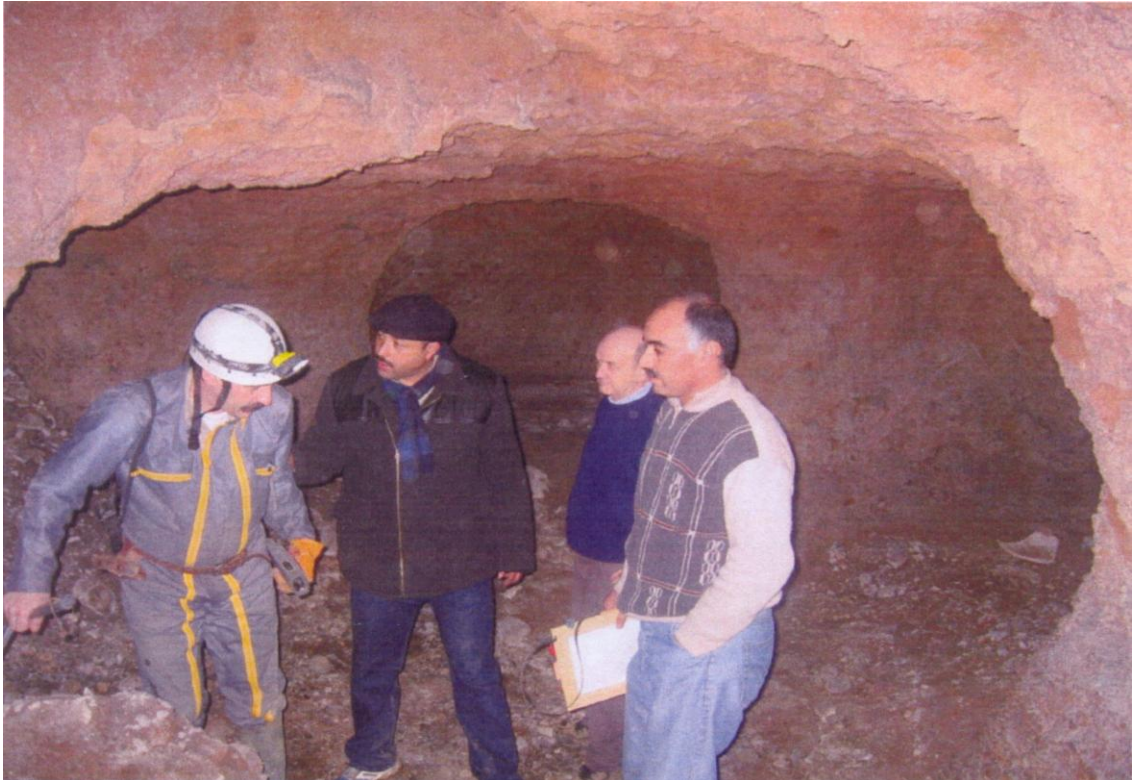


Figure 1.2 – Visite d’une carrière souterraine



Figure 1.3 – Détail d’un pilier de carrière dégradé

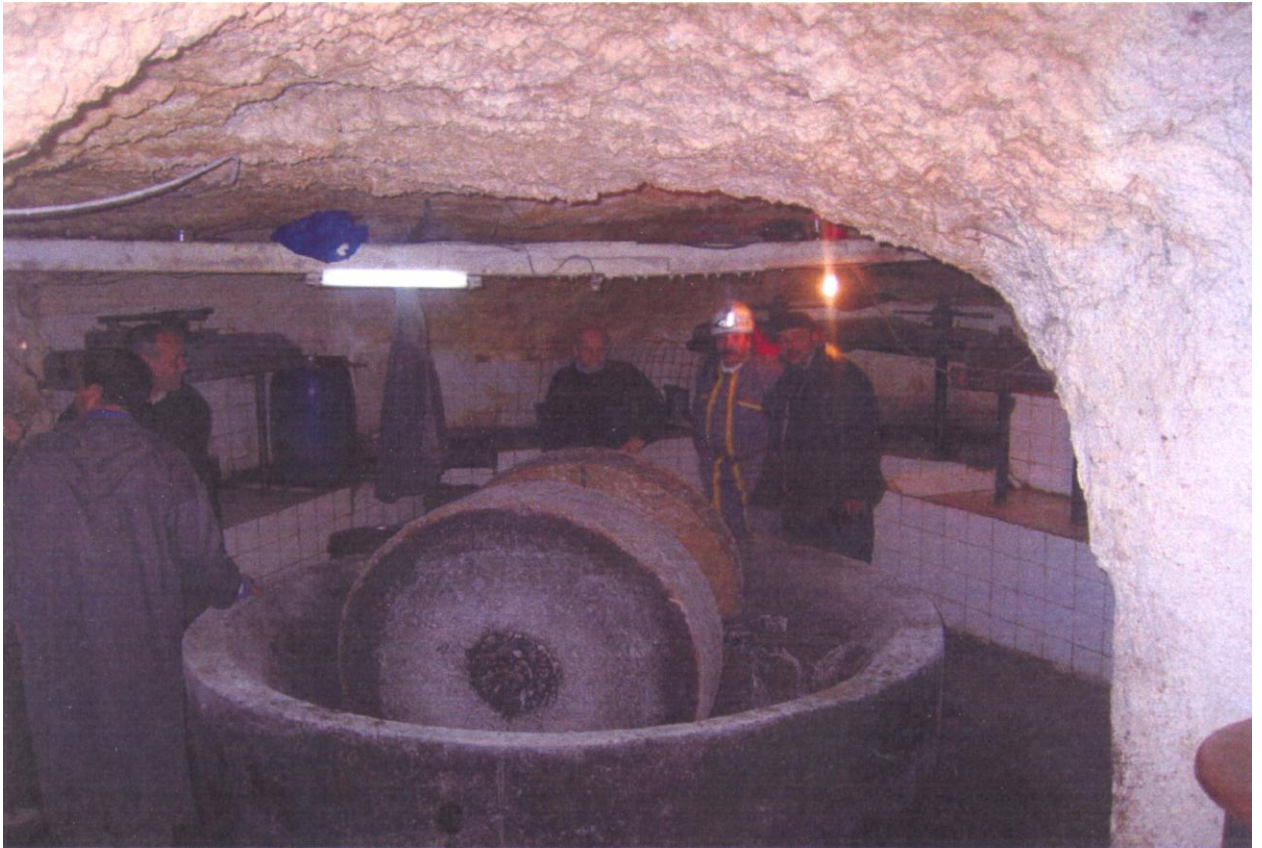


Figure 1.4 – Activité artisanale - Huilerie



Figure 1.5 – Fuite du réseau d’eaux pluviales



Figure 1.6 – Résultat d’un effondrement

Chapitre 2

Cartographie des cavités - Méthodologie

Etudes préliminaires à la géophysique

2.1 - Etude bibliographique

L'étude des cavités souterraines et en particulier leur cartographie sont devenues des chapitres importants de la géotechnique et de la géophysique, aussi bien en France qu'à l'étranger, en raison des risques qu'elles représentent.

En France, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (Fauchard et Pothérat, 2004) a édité un guide technique intitulé «Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques», dans le cadre du Projet National CriTerre. Ce fut notre ouvrage de référence tout au long de ce travail. Une collaboration directe avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen a été par ailleurs, fort précieuse.

Après un chapitre d'introduction présentant la problématique générale de la détection des cavités souterraines et les phases préliminaires à l'application des techniques géophysiques, sept chapitres de ce guide technique sont consacrés à la géophysique elle-même. Chaque chapitre est accompagné d'une bibliographie. Seuls les ouvrages et articles consultés au cours de notre travail sont repris dans notre propre bibliographie.

En complément de l'apport de cet ouvrage de base, qui nous a permis d'étudier tous les travaux similaires réalisés en France et en Europe jusqu'à l'année 2004, nous avons pu bénéficier de deux collaborations étroites et directes

avec l'équipe de géophysique appliquée de l'UMR Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie d'une part et avec le spécialiste des cavités souterraines de la ville de Laon (Aisne), d'autre part. Ces collaborations ont conduit à des échanges d'expériences tout aussi précieux que le précédent, à partir de rapports internes et d'articles scientifiques (Guérin *et al*, 2002 ; Watelet *et al*, 2002) et de visites réciproques des cavités souterraines.

A l'international, les travaux auxquels nous nous sommes référés sont ceux réalisés aux Etats-Unis et en Australie (Daniels, 1988 ; Abdul Nasser et Lee, 1999).

2.2 – Méthodologie – Détection de cavités souterraines

Le guide technique édité par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées mentionné ci-dessus (Fauchard et Pothérat, 2004) définit une méthodologie générale pour la recherche des cavités ; elle est résumée dans la figure 2.1 ci-dessous. Elle distingue 5 étapes regroupées en 3 phases : (1) Les reconnaissances préliminaires, (2) la détection et (3) l'interprétation et les recommandations.

C'est cette méthodologie qui a été appliquée dans la mesure du possible, dans le cadre du projet de Béni-Mellal.

L'étude de la géologie, les recherches dans les archives et les rapports et enfin les enquêtes orales ont tenu une place importante dès le début des travaux.

Les visites de terrain ont été un complément indispensable. Elles ont permis de faire le tri parmi les informations écrites précédentes et finalement de poser le problème à résoudre de manière simple et cohérente.

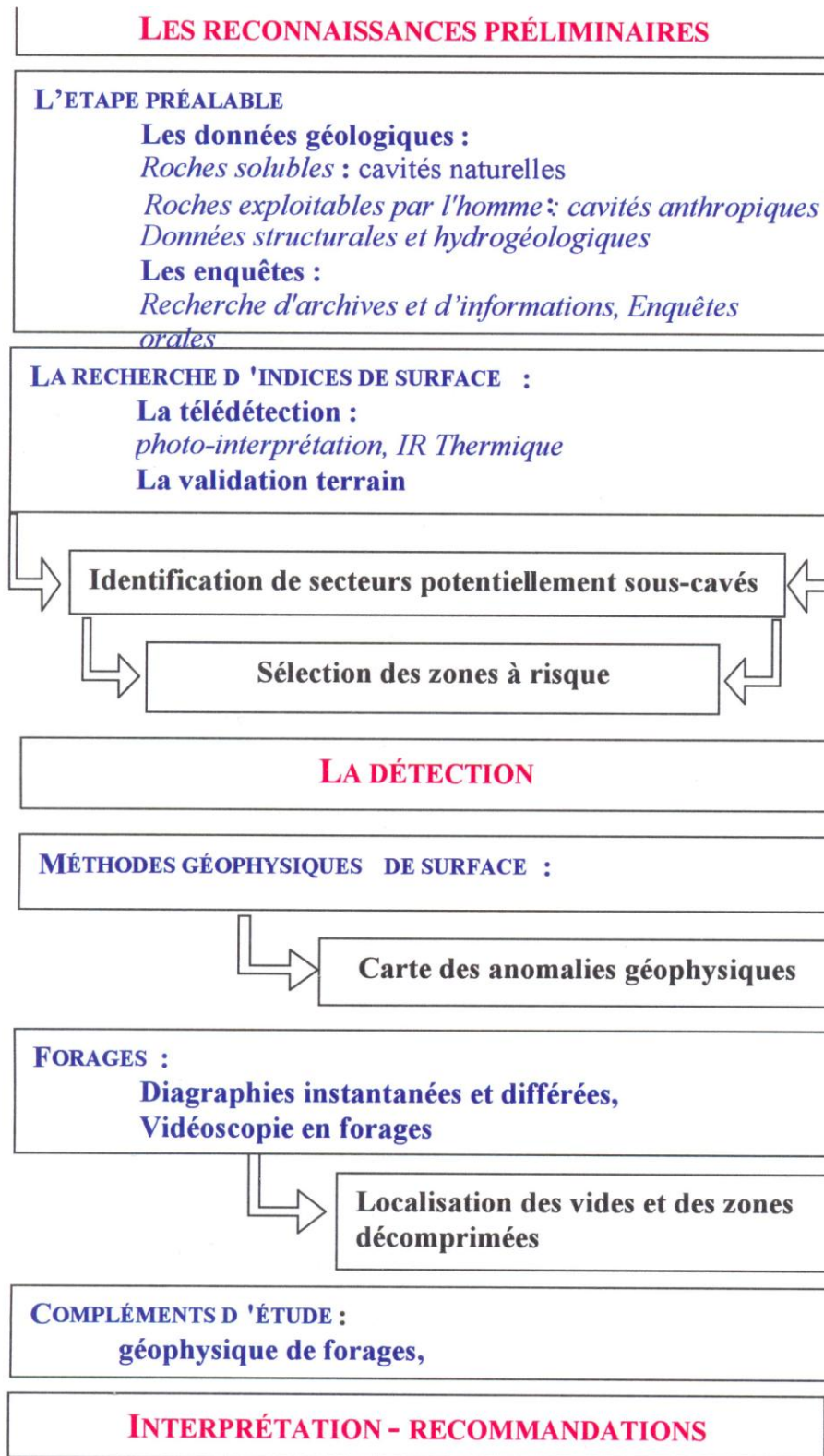


Figure 2.2.1 : Méthodologie générale pour la détection de cavités souterraines (Fauchard et Pothérat, 2004)

Les méthodes géophysiques ont ainsi été choisies pour résoudre un problème bien posé, mais aussi en fonction de nombreuses contraintes.

Une campagne de forages de contrôle a pu être menée, comme complément indispensable à la géophysique.

Enfin un Système d'Information Géographique (SIG) a été créé, afin d'archiver toutes les informations obtenues sous une forme permettant leur exploitation ultérieure optimale.

2.3 – Les travaux antérieurs

Le problème des Khefs se pose aux autorités de Béni- Mellal depuis plusieurs dizaines d'années.

Un projet spécial a été lancé dès 1978 qui a été confié à un bureau d'étude géotechnique allemand. Le rapport est de très grande qualité sur le plan des observations. En revanche certaines hypothèses sur la formation des cavités et les solutions proposées pour la remédiation sont plus que discutables.

Par ailleurs tous les travaux d'infrastructures réalisés pour la ville de Béni-Mellal et en particulier pour la Médina, ont dû prendre en compte l'existence des cavités, si bien que plusieurs chapitres des rapports techniques rédigés traitent des cavités.

Une liste non exhaustive de ces rapports est fournie ci-dessous :

- Documentation interne de l'Agence Urbaine
- Rapports techniques de la municipalité
- Articles et publications universitaires
- Thèses et mémoires de fin d'études
- Schémas directeurs d'aménagement réalisés en 1978
- Rapports techniques du Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes
- Rapports du Régie Autonome de Distribution de l'Eau et de l'Electricité de la région Tadla-Azilal (RADEET).

- Monographies de l'Agence du Bassin Hydraulique et du Ministère de l'énergie et des mines

Pour la plupart, les rapports d'ingénieurs sont ceux de spécialistes dans leur domaine et non en géologie ou en géotechnique. Le plus souvent, les informations géologiques et les hypothèses sur la formation des cavités ont été «copiées» d'un rapport à l'autre. Il est clair qu'elles ne reposent sur aucune visite, ni sur aucun travail de terrain. Elles ne peuvent pas être considérées comme des sources fiables. La solution la plus sage est de les ignorer, sous peine de graves erreurs de compréhension et d'interprétation.

Nous présentons trois coupes extraites du rapport de 1978, sur une cavité et sur deux puits qui ne peuvent plus être visités aujourd'hui. Ces coupes sont en excellent accord avec celles que nous avons relevées ultérieurement, au cours de nos propres visites sur d'autres sites (fig. 2.3.1 à 2.3.3).

On note une grande variabilité dans la couche sommitale, à la fois dans son épaisseur et dans sa nature entre deux stations voisines : le puits P II (fig. 2.3.1) et le Khaf BATA (fig. 2.3.2). On note également une différence dans la nature des formations détritiques : graviers et sables et limons dans le Puits II, contre marnes sableuses dans le Puits I (fig. 2.3.3), avec inter stratification de calcaires plissés correspondant à des dépôts de source dans les trois cas.

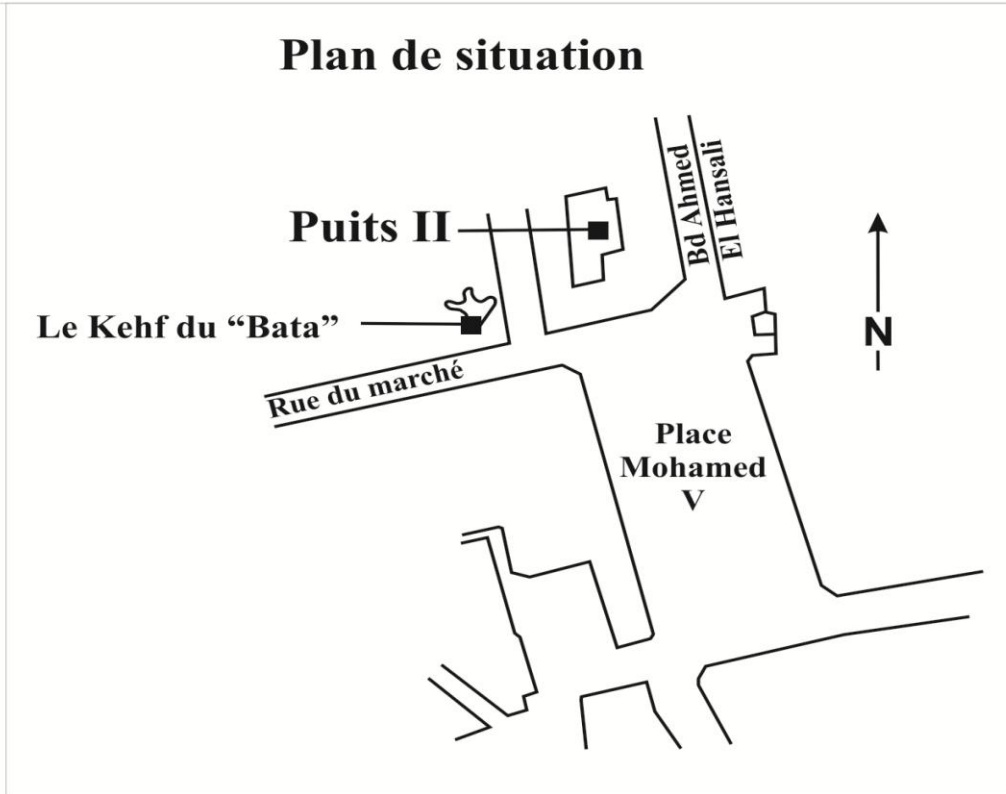
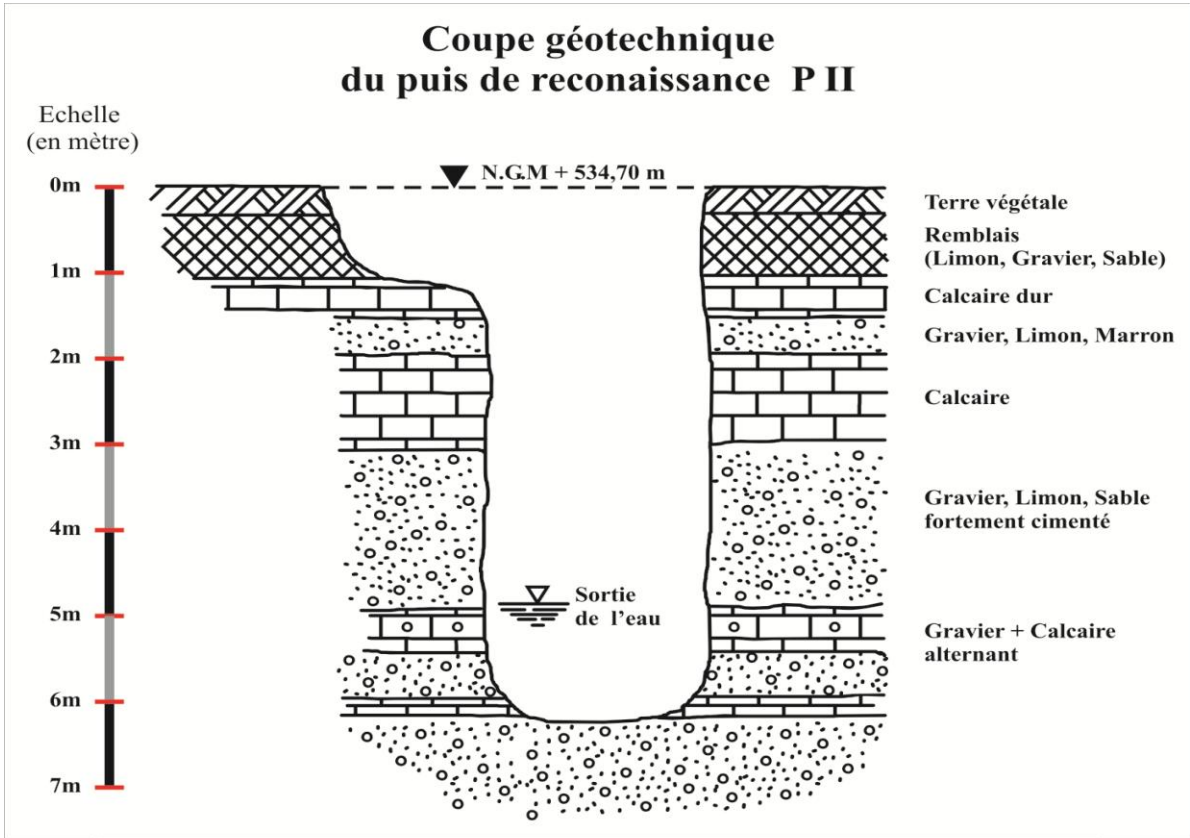


Figure 2.3.1 : Coupe interprétée du puits P2

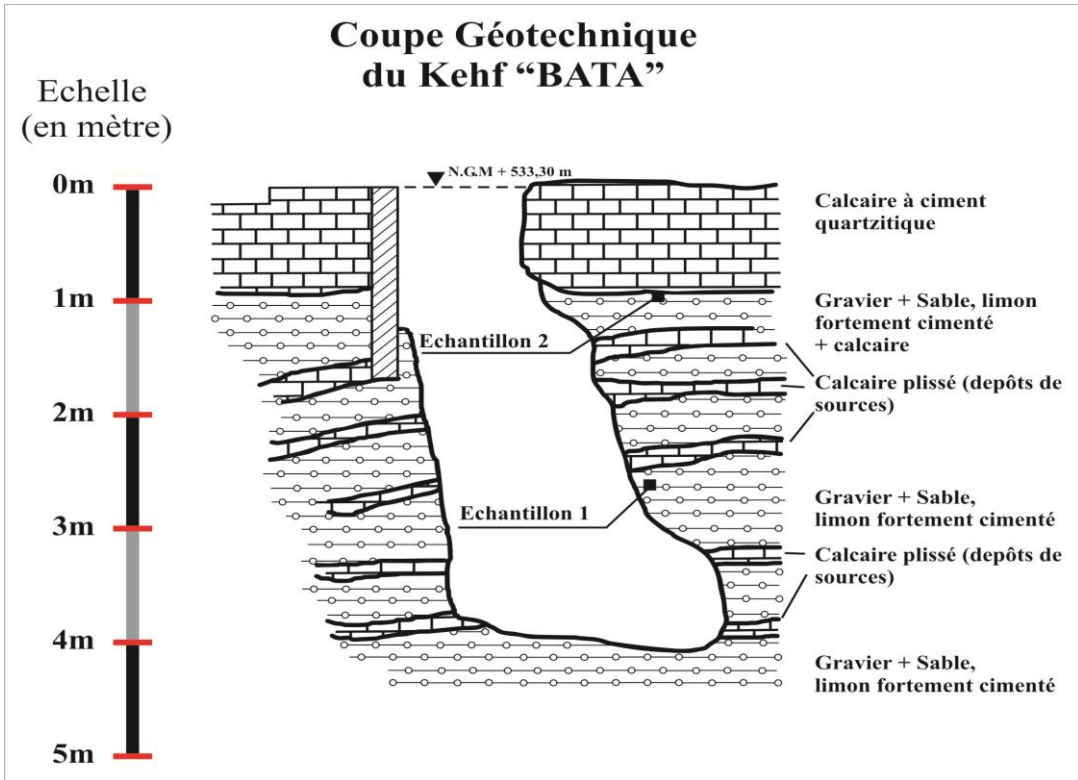


Figure 2.3.2 : Coupe interprétée du Khef Bata

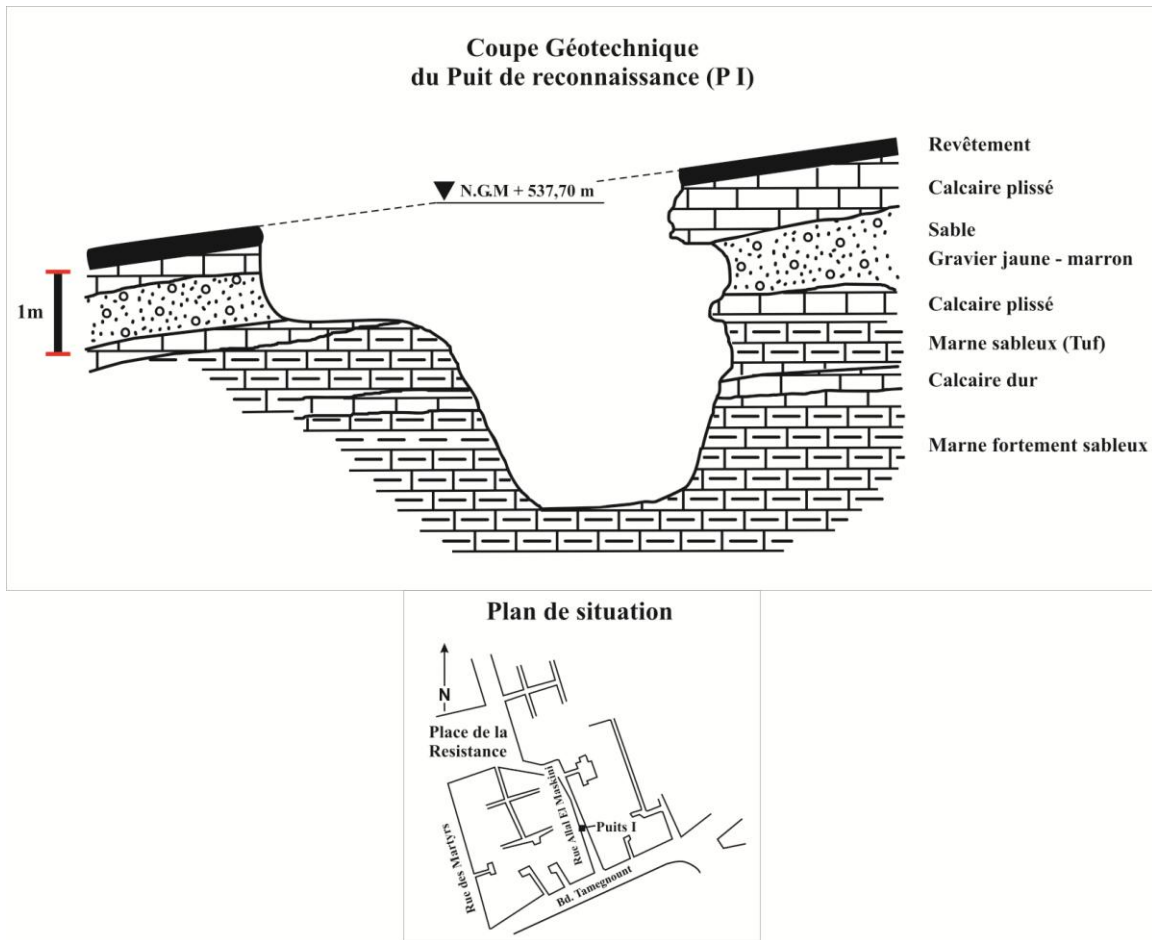


Figure 2.3.3 Coupe interprétée du puits PI

2.4 – Géologie de la région de Béni-Mellal et de la Médina

2.4.1 Contexte géologique général :

L'aire du projet se situe dans une zone charnière entre la bordure nord - atlasique et la plaine de Tadla. Celle-ci correspond à une vaste cuvette synclinale asymétrique dont l'axe est situé soit en bordure, soit franchement sous les recouvrements atlasiques.

La géologie du Haut-Atlas (fig. 2.4.1) est présentée de manière succincte de façon à mieux comprendre les conditions de genèse des principales formations de la série stratigraphique sur laquelle repose la Médina de Béni-Mellal. Les données rassemblées résultent d'une synthèse de différentes études stratigraphiques, géomorphologiques, sédimentologiques et structurales (Martin, 1973 et 1981 ; Feddan, 1977 ; Feddan *et al.*, 1989 ; Combe, 1977 ; du Dresnay, 1971, 1972 et 1976 ; Charrière, 1990 et 1992).

La série stratigraphique synthétique est représentée à sa base par un socle paléozoïque sur lequel repose en discordance, une série sédimentaire allant du Trias supérieur jusqu'au Quaternaire (fig. 2.4.2)

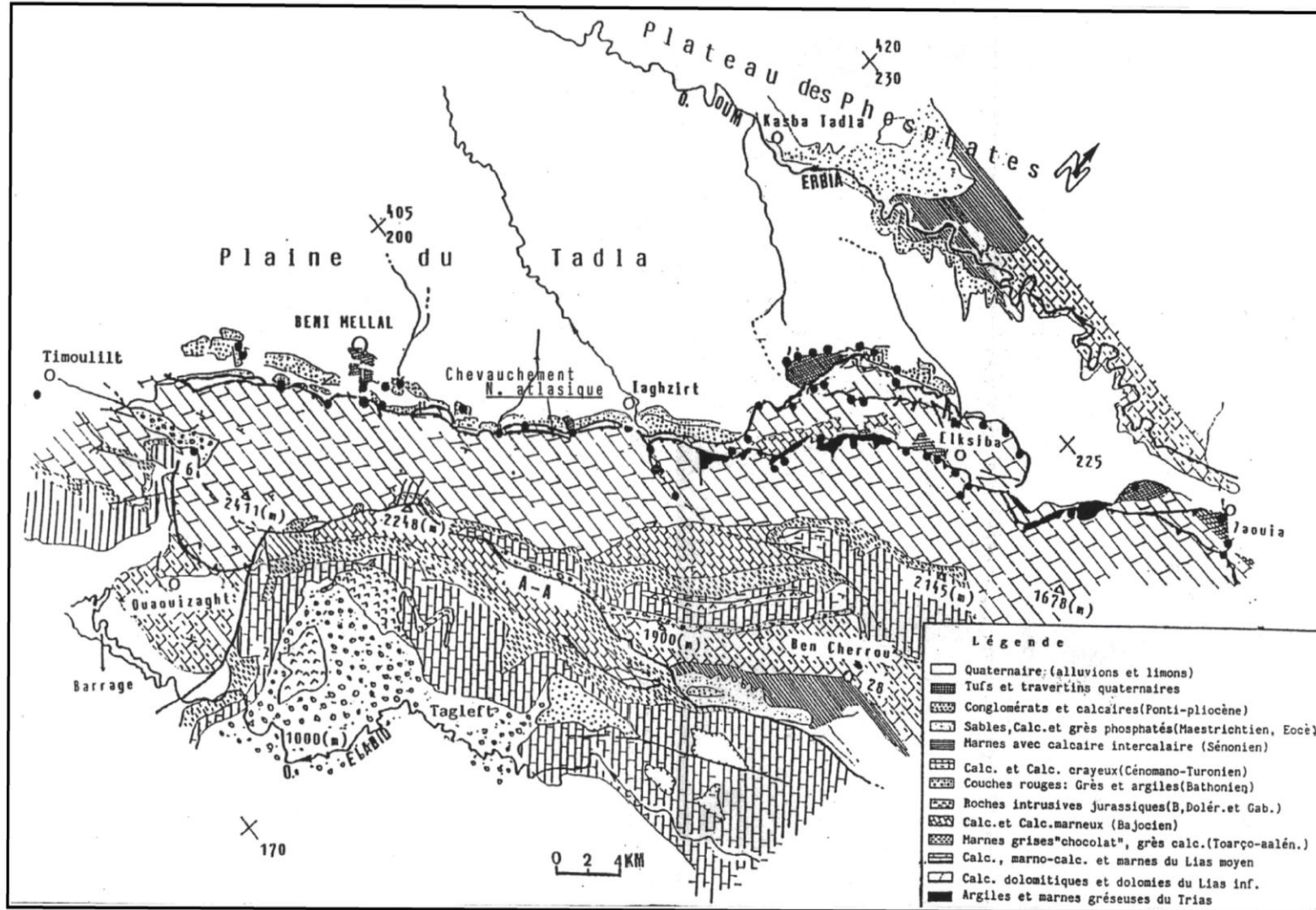


Figure 2.4.1 Carte géologique simplifiée de l'Atlas de Béni-Mellal

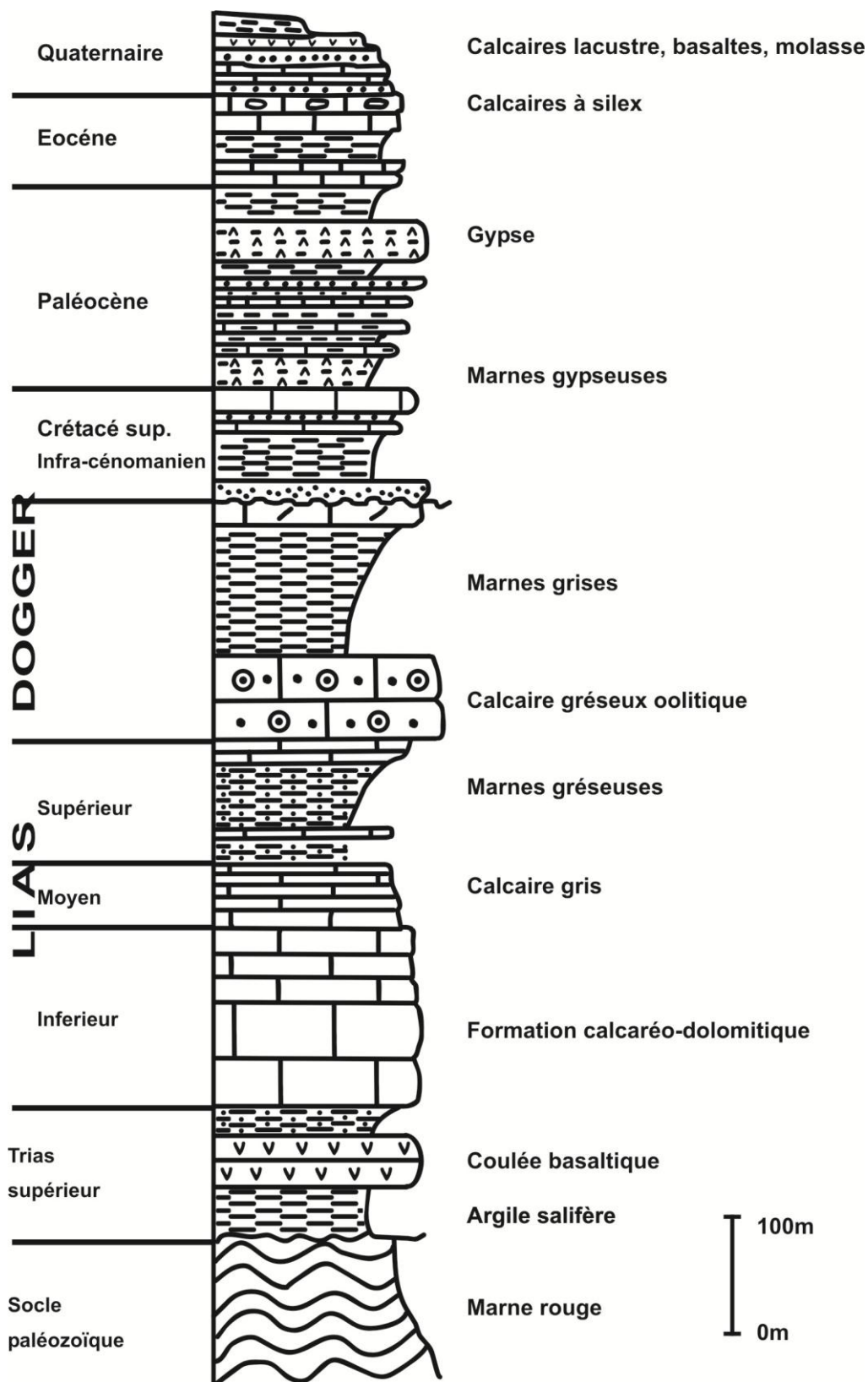


Figure 2.4.2 : Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas de Béni-Mellal

A - Paléozoïque

Selon du Dresnay (1988), les formations carbonifères sont surmontées en discordance, par des conglomérats, des grés et des argiles de l'Autunien, produits de démantèlement de la chaîne hercynienne.

B - Trias.

Les premiers terrains reposant en discordance sur les formations paléozoïques, sont des argiles rouges ou ocres renfermant plusieurs lentilles de sel ou de gypse. Cette formation argileuse à évaporites atteint des épaisseurs de 400 m à 800 m (Charroud *et al.* , 1996).

Au-dessus des argiles, des coulées de basaltes doléritiques affleurent justifiant une mise en place des basaltes sous forme de filons en empruntant les fractures préexistantes.

La série se termine par des dépôts continentaux à dominance argileuse avec des passées localement gréseuses rouges.

Ces terrains triasiques jouent un rôle de lubrifiant permettant le décollement de la série liasique sus-jacente.

C - Jurassique

Le début du Jurassique consiste en une alternance de dolomies et d'argiles rouges d'environ 100 m d'épaisseur d'âge liasique, marquant le passage d'un milieu de sédimentation purement continentale vers un milieu marin.

Le Lias inférieur, après cette sédimentation de transition, se termine par des dépôts franchement marins de nature calcaréo-dolomitique en gros bancs massifs à la base qui deviennent lités au sommet. La série peut atteindre, par endroit 800 m. Ces couches calcaires plus au moins dolomitisées se retrouvent broyées au voisinage des accidents tectoniques pour prendre une forme de matériel bréchi que très exploité en carrières.

Au cours du Lias moyen, on change radicalement de sédimentation pour passer à une série à dominance marneuse et marno-gréseuse. Cette série sédimentaire se trouve coiffée à son sommet par une alternance de petits niveaux calcaires marquant le passage à une grande barre carbonatée gréseuse et oolithique de la base du Dogger (Aalénien-Bajocien). Elle se présente à l’affleurement sous forme de puissantes barres de calcaires francs et massifs « calcaires corniches » recouvertes par une puissante assise de marnes grises et carbonatées (Bajocien moyen et supérieur).

Après cette phase de sédimentation l’Atlas de Béni-Mellal connaît un arrêt de sédimentation allant du Bathonien jusqu’à l’Infra-cénomanién.

D - Crétacé

Les affleurements Crétacés dans l’Atlas de Béni-Mellal sont reconnus surtout au cœur des structures synclinales. La sédimentation est caractérisée pendant cette période par des dépôts argileux avec des alternances calcaires surmontées par une épaisse barre calcaire néritique d’âge Cénomano-Turonien, témoignant de la première transgression atlantique.

E - Tertiaire

La sédimentation au cours du Tertiaire commence par des dépôts marno-gypsifères avec des intercalations de calcaires marneux, attribuées au Paléocène, sur lesquels repose une succession de calcaires et de marnes puis des calcaires à silex rattachés à l’Eocène.

L’Eocène inférieur est formé de calcaires et grès phosphatés. La série peut atteindre 300 m d’épaisseur dans le synclinal de Tadla et 100 m dans le piémont.

L’Eocène supérieur repose en discordance sur l’Eocène inférieur par le biais d’une série rouge continentale.

F - Quaternaire

Le Quaternaire est représenté par des dépôts molassiques produits de démantèlement de la chaîne atlasique et par des dépôts lacustres.

Le Pliocène est surtout représenté par des dépôts à travertins que l'on trouve à l'émergence des grandes sources du Lias. Ces formations sont généralement localisées au niveau du piémont (Dir). Ces formations qui peuvent atteindre 60 m d'épaisseur ont probablement pour origine les anciennes exurgences jalonnant les contacts anormaux du Dir. A ces dépôts s'ajoutent des formations détritiques surtout au niveau de la plaine et des petites dépressions de la chaîne.

C'est sur ces formations quaternaires récentes qu'a été édifiée la Médina de Béni-Mellal.

2.4.2 - Géologie de la Médina

Pour mémoire, rappelons que la première étude géologique de la région de Béni-Mellal a été réalisée par J.Bourcart (1942).

La ville de Béni-Mellal (fig. 2.4..3) fait partie de la zone des collines. Ce chaînon bordier de l'Atlas présente un substratum formé principalement par des matériaux Maestrichtien-Eocène et des brèches attribuées à l'Eocène supérieur continental. La puissance de la série continentale de Béni-Mellal est de l'ordre d'une centaine de mètres. 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 derniers apparaissent d'une part à la partie inférieure, et d'autre part au sommet de la série (G.Choubert et A.Faure Muret, 1964).

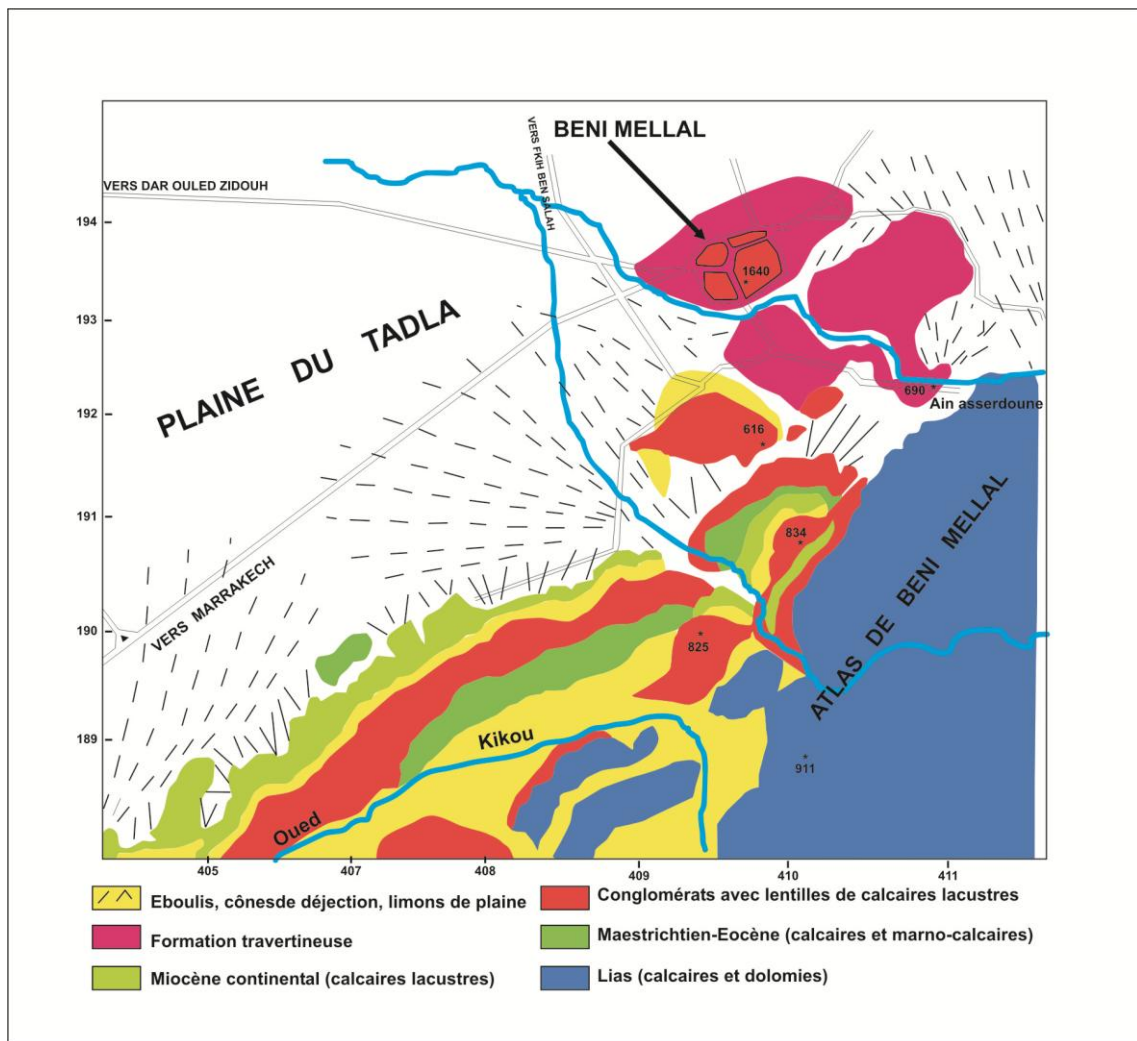


Figure 2.4.3 : Carte géologique schématique de la région de Béni-Mellal.

A – Le sondage 1640

Ce sondage réalisé au sud-ouest de la Médina montre des calcaires travertineux au-dessus d'un substratum de sable et de grès calcaire. Ces calcaires se trouvent en bancs épais de 2 à 3 mètres, cimentés à leur partie supérieure et pulvérulents à leur base. Ce sont des formations sursaturées en calcium et à très fort pourcentage en magnésium. Ils sont interstratifiés dans la série conglomératique. Ils se sont déposés par des eaux courantes sans doute à proximité des sources au cours d'une accalmie dans l'apport du matériel grossier. Ils se présentent sous forme ondulée.

Quant aux conglomérats, ils sont relativement grossiers, à éléments atteignant 10 à 20 cm. Les galets, généralement bien roulés, sont surtout formés de calcaire ou de dolomie liasique, mais on y trouve aussi les calcaires blancs de l'Eocène sous-jacent. Il semble hors de doute, que ces conglomérats représentent une formation de piémont d'origine fluviale, voire torrentielle. Ils traduisent la proximité des reliefs calcaires et dolomitiques importants et résultent de leur démantèlement. En particulier, le matériel anguleux de certains niveaux est dû à la proximité immédiate de l'Atlas.

B – Affleurements – La Carrière de Bou Achouch

De nombreux affleurements ont été étudiés, à l'extérieur de la Médina, à l'Est et au Nord (fig.2.4.4).

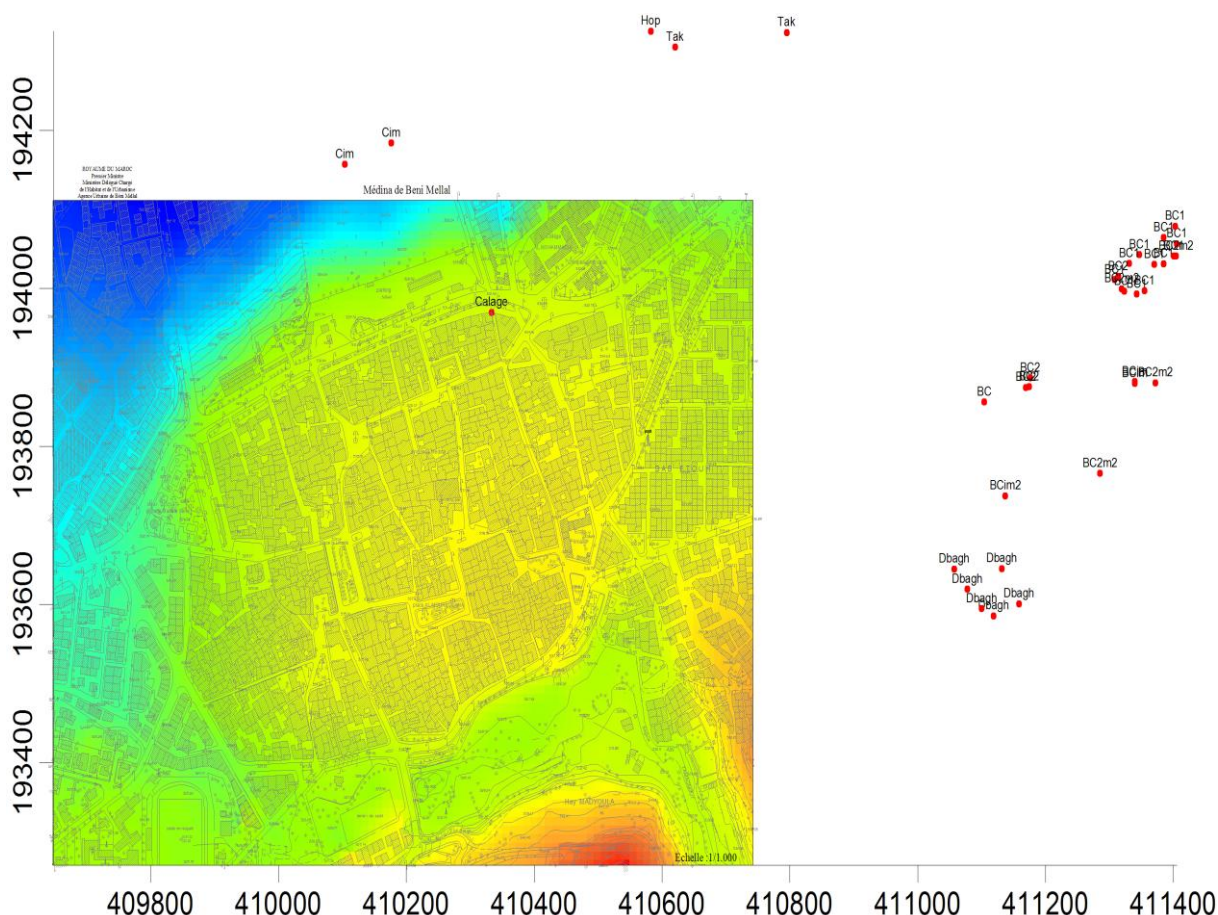


Figure 2.4.4 : Carte des levés géologiques observés dans les environs de la Médina et dans les Kehfs accessibles

Le plus représentatif est celui de la carrière de Bou Achouch. Les falaises dégagées montrent une superposition de plusieurs niveaux. On note, de bas en haut (fig. 2.4.5).

- Argiles rouges traversées par des concrétions calcaires travertineuses sous forme cylindrique, en boules ou en bancs calcaires discontinus lités de taille décimétrique à millimétrique.
- Calcaires travertineux de forme et de taille variables (2 m)
- Alternance de marnes jaunes ocres décimétriques avec des passées conglomératiques (3 à 5 cm) traversées par des chenaux où l'on rencontre des concrétions calcaires en boules (pseudo galets centimétriques) (fig.2.4.6)
- Calcaires durs dits quartzitiques noduleux sur une épaisseur de 40 à 50 cm (fig. 2.4.7)
- Terre végétale.

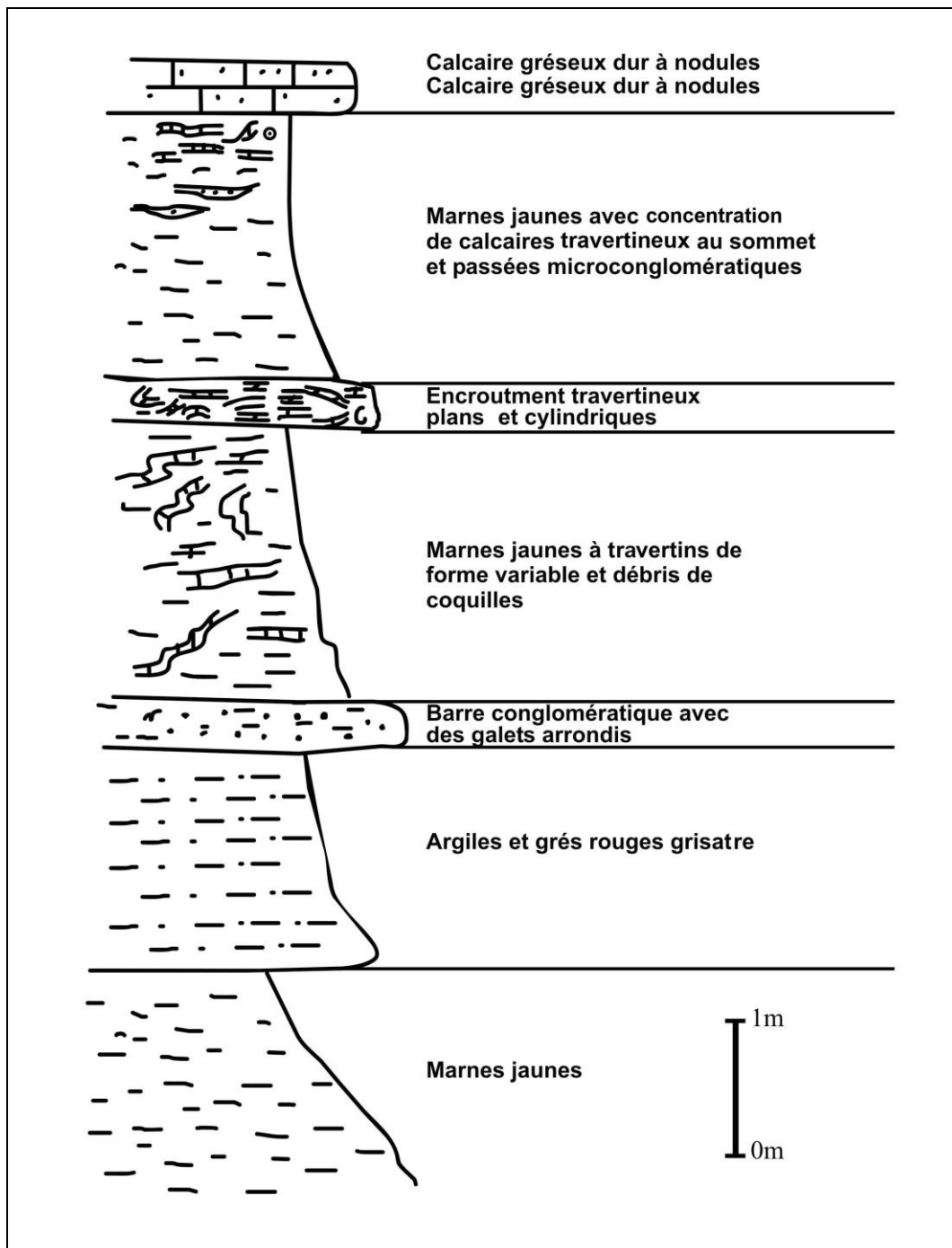


Figure 2.4.5 : Colonne stratigraphique réalisée dans la carrière de Bou Achouch



Figure 2.4.6 – Éléments détritiques et calcaire travertineux



Figure 2.4.7 – Calcaire gréseux dur à nodules

C – Les piliers des khefs

L'examen de plusieurs piliers accessibles, confirme les coupes fournies dans le rapport de 1978 et les coupes relevées sur les affleurements. Deux coupes types sont présentées, qui se différencient par la nature plus ou moins argileuse des éléments détritiques.

C1 - Khef Ben Addi Hamza

De bas en haut, la succession est la suivante :

- Couche **argilo-sableuse** rouge brique à jaunâtre friable.
- **Travertins calcaires** lités et cylindriques.
- **Couche argileuse** humide dans laquelle on observe des poches métriques où apparaissent des passées conglomératiques dont les galets sont des boules calcaires.
- Dalle calcaire à nodules durs et quartzitiques.

C 2 - Khef du cimetière

Dans le cimetière situé au dessous de l'ancienne gare routière, on rencontre des fosses ouvertes menant à des khefs parfois aménagés sur 2 à 3 étages. La profondeur totale exposée peut atteindre 5 à 6 m. On note de bas en haut, les formations suivantes :

- **Sables jaune ocre**, avec des concrétions travertineuses calcaires de formes variables. Dans cette formation on observe, par endroit, des passées conglomératiques marquant un litage horizontal visible. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 4 m. La densité et la taille des concrétions travertineuses deviennent de plus en plus importantes en allant vers le haut. Des poches de diamètre dépassant parfois 1,5 m rencontrées dans cette formation sont remplies par des grès et des argiles rouges grisâtres avec des passages conglomératiques organisés en chenaux. Ces poches sont souvent délimitées par des calcaires travertineux lités moulant leur limite.

- **Marnes jaunâtres** friables avec parfois des débris de coquilles dont l'épaisseur peut atteindre 1 m.
- **Grès argileux** par endroit grossier se trouvant traversé par des concrétions travertineuses de taille variant du centimètre au décimètre. Ce sont généralement des concrétions globuleuses dont la taille des « galets » arrondis augmente en remontant dans la série. Parfois ces concrétions calcaires deviennent aplaties sous forme de galettes fossilisées dans la masse argilo-gréseuse.
- **Concrétions travertineuses calcaires** de différentes formes (bancs lités, cylindres, massives...) dont la taille devient de plus en plus grande en remontant dans la série. L'épaisseur de cette formation peut atteindre par endroit 2 m. Dans cette formation on trouve des poches ouvertes de 30 à 50 cm de diamètre.
- Dalle calcaire quartzitique à nodules, qui coiffe la série. Le calcaire est de couleur gris sombre sur cassure fraîche. L'épaisseur de cette dalle ne dépasse pas 50 cm.

E – Conclusions – Synthèse :

Il y a une bonne cohérence entre tous les éléments de géologie rassemblés concernant les 5 à 10 premiers mètres du sous-sol, qui seuls sont intéressants pour l'étude des cavités.

La première conclusion importante est qu'il faut «oublier» la géologie du Haut-Atlas, avec ses épaisses formations calcaires et dolomitiques du secondaire et du tertiaire, sujettes aux phénomènes de dissolution et de karstification. Ces deux phénomènes n'interviennent nullement dans l'instabilité du sous-sol de la Médina.

Nous sommes dans un environnement détritique quaternaire avec un mélange de dépôts de type «cône de déjection» et de dépôts de source.

Les deux traits qui caractérisent les premiers mètres du sous-sol de la Médina sont :

(1) La présence d'une couche indurée au sommet. Il s'agit quelquefois d'un calcaire franc à ciment quartzitique dont l'épaisseur varie de 40 cm à 1,50 m. Il s'agit aussi parfois de calcaire travertineux, dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres.

(2) Sous cette couverture indurée, on trouve une interstratification d'éléments détritiques et de calcaires travertineux.

La nature des éléments détritiques varie spatialement, depuis des éléments très fins – argiles, marnes -, jusqu'à des conglomérats avec des éléments décimétriques, en passant par des limons ; sables et graviers. Des coquilles et autres débris de travertins sont souvent mélangés à ces dépôts détritiques.

Les bancs de calcaire travertineux quant à eux, ont une épaisseur de quelques dizaines de centimètres à 1 ou 2 m. Leur nature et morphologie varient spatialement, ce qui atteste de conditions de dépôt différentes. Ils sont constitués, d'encroûtements plans, cylindriques ou «en boules» avec une faible continuité latérale.

Pour conclure, on peut constater que ce sous-sol constituait effectivement un matériau de choix pour la construction des maisons, à condition que les règles de l'art de l'exploitation de ces carrières souterraines soient respectées et prennent en compte la nature déritique peu consolidée des matériaux. Mais on comprend aussi qu'il constitue un facteur d'instabilité dans le temps, du fait des dégradations inévitables d'origine anthropique et naturelle.

2.5 – Climatologie

L'effet des précipitations sur la stabilité du sous-sol est important et ceci est confirmé par les effondrements des maisons qui ont toujours lieu à la saison des pluies.

Le climat de Béni Mellal est de type continental semi-aride ; chaud en été et froid en hiver. L'effet de l'altitude est très marqué et la variabilité spatiale des

précipitations est nettement perceptible. Le gradient des précipitations est décroissant du sud vers le Nord du piémont de l'Atlas vers la plaine de Tadla.

A- Pluviométrie

La période pluvieuse s'étale d'Octobre à Mai, pour une période sèche comprise entre Juin et Septembre (Tableau 2.1). Les précipitations sont sous forme de fortes averses, concentrées durant quelques jours par mois, et totalisent en moyenne 490 mm/an pour la période 1960-2001, enregistrées au niveau de la station météorologique de Béni-Mellal. Cependant, des formations orageuses se développent quelquefois en Août sur l'Atlas et atteignent, de temps à autre, la plaine.

L'examen de l'évolution interannuelle des précipitations pour la période précitée révèle une très grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre. Elle se caractérise par une succession d'années sèches entrecoupées par des phases pluvieuses plus courtes.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	juillet	Août	Total
Pluie (mm)	12	38	66	65	59	64	75	65	33	10	1.6	4.1	491

**Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle moyenne
calculée à la station de Béni Mellal (Période : 1960-2001).**

(Rapport définitif de la sous-mission A1 du schéma directeur d'assainissement liquide de Béni-Mellal Décembre 2004)

B- Températures

Les températures présentent de très importantes variations saisonnières. Les températures maximales estivales sont souvent de l'ordre de 38°C alors que les

températures minimales d’hiver sont de 0 à 5°C, et les amplitudes journalières sont généralement de 10 à 20°C, voire plus.

En revanche, les températures sont peu variables d’une année à l’autre.

C- Vent

Les vents sont généralement faibles, inférieurs à 2m/s, et sont orientés Nord-Ouest à Sud-Ouest. La vitesse, en moyenne, diminue graduellement à partir de septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de décembre. Dès le mois de mars, elle s’élève progressivement pour enregistrer ses valeurs maximales en été. Les vents, de direction NE-SW, sont parfois violents et peuvent atteindre des vitesses de 10 à 30 m/s (soit 36 à 108km/h), mais sont d’une durée limitée. Ils soufflent souvent en fin d’après midi et sont dus à la rupture de l’équilibre thermique entre la montagne et la plaine. Ces vents desséchants engendrent l’accroissement de la température et de l’évaporation.

Mois	Période	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	AN
Températ. max en °C	1976 à 1986	17.5	20	26.4	26.4	28.6	36.2	40.2	39.8	34.5	30.2	25.9	14.2	28.5
Températ. min en °C	1976 à 1986	4.7	4.9	10.7	10.7	12.6	18.2	20.7	20.5	17.4	13.5	9.4	5.5	12.2
Températ. moy en °C	1976 à 1986	11.1	12.4	18.5	18.5	20.6	27.2	30.4	30.2	25.9	21.8	17.6	12.3	20.4
Vitesse vent (m/s)	1970 à 1986	1.1	1.5	2	2	1.7	1.9	1.7	1.8	1.7	1.7	1.1	1.4	1.6

Tableau 2.2 : Climat de Béni Mellal

(Rapport définitif de la sous-mission A1 du schéma directeur d’assainissement liquide de Béni-Mellal Décembre 2004)

2.6 - Hydrologie

La ville de Béni Mellal est parcourue par plusieurs oueds et «chaâbas». Elle est également alimentée par plusieurs sources, dont la plus connue, l'Aïn Asserdoune, constitue la principale ressource en eau potable de la ville.

La Médina, compte tenu de sa situation topographique, n'est en rien affectée par ce système hydrographique. Il n'est donc présenté ici que succinctement.

A - Oueds

Cinq oueds principaux contournent ou traversent le périmètre urbain : (1) **Kikou**, à l'ouest, (2) **Handek** qui traverse la ville du sud vers le nord pour déboucher dans l'oued Day, (3) **Aïn el Ghazi**, à l'est, (4) **Day** au nord-est ; sa source est actuellement asséchée, mais il collecte les eaux des deux précédents, ainsi que celui du suivant, (5) **Sabek**.

B – Chaâbas

Il s'agit de «thalwegs» qui ne sont alimentés que lors de pluies torrentielles. Ils ne posent pas de problèmes lorsqu'ils se déversent dans des zones inhabitées. En revanche, le franchissement des rues est souvent problématique car il y a inondation et arrêt de la circulation à cause des apports de matériaux lors des crues. Les quatre chaâbas principales sont : El Louz, Aïn Asserdoune, COS et un ensemble au Sud-Est de la ville.

C - Sources

Plusieurs sources karstiques jaillissent à partir des formations calcaires du Dir de Béni Mellal dont principalement la source de Aïn Asserdoune qui constitue la principale ressource en eau potable de la ville. Les autres sources de moindre intérêt, telles Aïn Tamegnounte, Aïn El Ghazi, Aïn Sidi Bouyacoub, Aïn Ourbia, El Harboulia, et Oum Dhar, alimentent les séguias et les oueds qui sillonnent le périmètre urbain.

Ces sources, avec une trentaine d'autres, jalonnent les formations calcaires atlasiques au NE de Béni Mellal sur une bande de 30 km environ. Le complexe sourcier du Dir dont les eaux sont destinées à l'irrigation des Béni Moussa et du Dir présente un débit variable à l'échelle mensuelle et annuelle. L'examen de l'évolution intra-annuelle des débits de la source d'Aïn Asserdoune mesurés pour la période 1976-2000 montre que ceux-ci oscillent entre 709 et 1109 l/s et la source voit augmenter son débit dès Novembre –Décembre, jusqu'à Mai pour chuter ensuite (Tableau 2.3). Ces débits sont tributaires des charges hydrauliques des eaux souterraines et évoluent en fonction des précipitations sur l'Atlas, avec un temps de réponse de 1 à 2 mois.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	juillet	Août	Q _{moy}
Débit (l/s)	12	37.5	65.7	65	58.6	63.6	74.7	65.1	33.2	9.9	1.6	4.1	491

**Tableau 2.3 : Débits mensuels moyens de la source d'Aïn Asserdoune
(Période 1976-2000)**

(Rapport définitif de la sous-mission A1 du schéma directeur d'assainissement liquide de Béni-Mellal Décembre 2004)

2.7 - Hydrogéologie

La médina n'est pas concernée par le système hydrogéologique régional, du fait de sa situation topographique. Aucun puit n'a été creusé pour atteindre la nappe. L'alimentation en eau potable se fait exclusivement à partir du système de distribution urbain, soit par des fontaines soit par raccordement direct.

Pour mémoire, rappelons qu'à l'échelle régionale, les nappes importantes sont celles du Haut-Atlas, celle du Dir, puis celles de la plaine du Tadla. Au total, grâce à l'enneigement et aux précipitations importantes sur le Haut-Atlas, la plaine du Tadla bénéficie de ressources en eau importantes qui lui permettent d'être une région agricole de premier plan, grâce à l'irrigation.

Les deux grands ensembles aquifères du Haut-Atlas sont : (1) le réseau aquifère du Lias inférieur, formant un système relativement continu et (2) le réseau et les nappes de la série Aalénien-Dogger, fragmentés en bassins séparés dans chaque cuvette synclinale. Ces deux ensembles sont séparés par le niveau imperméable du Toarcien-Aalénien inférieur. La source Ain Asserdoune est l'exemple le plus démonstratif de la qualité de l'aquifère karstique du Lias.

La nappe du Dir est intermédiaire entre celles de l'Atlas et de la plaine du Tadla. Elle est alimentée à la fois par les apports latéraux des nappes atlasiques, par les eaux des sources et par les retours d'eau d'irrigation et les pertes des séguias alimentant la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH). Elle est très mal connue à Béni-Mellal parce qu'il y a peu de puits.

2.8 – Enquêtes -- Visites

L'enquête auprès des populations est souvent la source d'information la plus riche pour ce qui est de localiser les cavités, notre premier objectif, et aussi pour l'évaluation des risques à court et moyen terme, à condition que des relations de confiance soient établies entre la population et les enquêteurs.

Plusieurs enquêtes ont été conduites sous la direction de notre laboratoire, avec un réel succès, grâce à la coopération des autorités locales et de la population. Plus de 100 cavités ont pu ainsi être confirmées ou découvertes grâce à ces enquêtes. Une première carte de risques a pu être établie à partir de ces résultats, avant la campagne géophysique.

La dernière étape de validation des informations rassemblées est la visite sur le terrain de cavités sélectionnées. Deux visites particulières ont été réalisées, en plus de celles programmées pour le relevé de la géologie :

- du 24 au 27 mars 2005, en présence d'un représentant de la Direction des Sciences de l'Ingénieur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) installée à Nantes. C'est à la suite de cette visite que toute référence à la karstification a été abandonnée, comme hypothèse quant à la formation des cavités

sous la Médina. Toutes les cavités visitées, sans exceptions, correspondent à des carrières souterraines exploitées selon la technique des chambres et piliers.

- au printemps 2006, en présence du responsable des carrières souterraines de la ville de Laon et spéléologue. Cette visite a permis de mettre au point la technique de cartographie des cavités à la boussole et au laser et d'envisager des techniques plus modernes, à partir de dispositifs électromagnétiques, tels que ceux utilisés par les spéléologues suisses.

Les résultats de ces deux visites ont été décisifs, dans la programmation des investigations géophysiques. En effet lorsque la logique de l'implantation des cavités est connue – carrières souterraines pour la construction des bâtiments sus-jacents ; c'est le cas à Laon avec du calcaire, comme c'est le cas à Béni-Mellal avec des matériaux détritiques – le programme d'investigation est plus facile à bâtir et le programme de remédiation également.

2.9 – Création d'un SIG

L'objectif final de ce projet étant la remédiation, éventuellement la valorisation des cavités, mais aussi et surtout l'aménagement ultérieur et la rénovation de la Médina, il était indispensable de créer un Système d'Information Géographique dans le cadre de nos investigations. C'est aussi bien sûr, le meilleur moyen d'archiver les informations qualitatives et quantitatives relatives à la géologie, la géophysique, la géotechnique et aux enquêtes. Il a été réalisé dans notre laboratoire, dans le cadre de ce projet. Ce travail est incorporé dans une thèse qui sera soutenue très prochainement à l'université de Oujda (K. ElKhamarri, 2008).

2.10 – Synthèse - Importance de l'activité anthropique

A la suite de ces travaux préliminaires, le problème à résoudre est désormais mieux posé.

On peut dire que l'activité anthropique est à l'origine du problème, puisque ces cavités ont été creusées par l'homme, pour les besoins de la construction de son habitat. Il est confirmé qu'il s'agit de carrières souterraines dont l'exploitation fut de type «chambres et piliers».

L'activité anthropique est également à l'origine de la dégradation de la situation, par manque de transmission de l'information, donc oubli de la «situation à risques». Ceci a conduit (1) à autoriser, la circulation des voitures et des camions, (2) à autoriser des constructions inadaptées, (3) à autoriser la mise en place de piliers de béton qui ne constituent que des renforts ponctuels et enfin (4) à installer les réseaux d'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées insuffisants ou inadaptés, qui ont contribué à la fragilisation des cavités, puis à des effondrements.

En revanche, chaque fois qu'une cavité a été reconnue et traitée par des moyens de soutènement artisanaux – murs de pierres en complément des piliers - ou mieux lorsqu'elle a été exploitée pour des activités artisanales ou commerciales, la situation est parfaitement saine.

La contribution de la géophysique à la cartographie des cavités a donc pour but ultime, la reconnaissance des cavités, puis leur traitement au cas par cas dans le cadre de la réhabilitation de l'ensemble de la Médina.

Chapitre 3

Application des méthodes géophysiques

Méthodologie

Trois méthodes d'investigation locale

Sismique – Tomographie électrique

Electromagnétisme en champ proche

3.1 – Méthodologie

3.1.1 Choix des techniques géophysiques

Les méthodes géophysiques utilisées pour le diagnostic du sous-sol doivent répondre au moins aux quatre impératifs suivants :

- ausculter de grands linéaires,

- détecter les variations spatiales des tous premiers mètres du sous-sol avec une résolution latérale d'ordre métrique et dans la mesure du possible, détecter les cavités,

- rendre compte des variations éventuelles de la nature des tous premiers mètres avec une résolution spatiale d'ordre décamétrique ou de la cinquantaine de mètres.

- pouvoir être mises en œuvre dans un environnement urbain extrêmement dense.

Les méthodes prioritairement déployées doivent donc être des méthodes à grand rendement et à profondeur de pénétration optimale.

Il y a deux méthodes classiques qui répondent à ces critères :

(1) le radar géologique, ou «Ground Penetrating Radar» (GPR),

(2) l'électromagnétisme à faibles nombres d'induction de type Slingram, mis en oeuvre par exemple avec l'équipement Geonics EM 31.

On sait par ailleurs que ces deux techniques sont complémentaires et qu'une interprétation combinée le long d'un même profil est très riche.

D'autres méthodes complémentaires peuvent être déployées pour des investigations plus détaillées. Elles sont alors appliquées sur des secteurs choisis en fonction des informations fournies par les méthodes à grand rendement. Ces techniques locales sont utiles pour obtenir une image aussi précise que possible du sous-sol, en particulier fournir les caractéristiques géométriques des cavités, dans la mesure du possible. Trois méthodes ont été retenues à priori :

(1) la microgravimétrie,

(2) la sismique réfraction,

(3) la tomographie électrique.

Trois contraintes supplémentaires ont dû être prises en compte, dont les deux premières sont incontournables :

- (1) compatibilité avec la géologie des cinq à dix premiers mètres,
- (2) compatibilité avec l'environnement et le bâti urbain de la Médina,
- (3) disponibilité des équipements et des équipes dans les fenêtres de temps affectées au projet.

Chacune des techniques retenues rencontrera des difficultés spécifiques liées à ces contraintes.

Le radar géologique, basé sur la propagation d'ondes électromagnétiques de très hautes fréquences (de 10MHz à 3GHz), est fortement influencé par la conductivité électrique du sous-sol, qui provoque l'atténuation du signal et limite la profondeur d'investigation.

La présence de la dalle calcaire au sommet n'est pas un obstacle. En revanche, le contenu en argile des éléments détritiques influera sur la profondeur d'investigation. Il se pourrait également que des bancs continus de calcaires travertineux constituent des réflecteurs, à l'intérieur de la formation, sans relation directe avec la présence de cavités.

Les investigations dans les ruelles dont la largeur est de l'ordre du mètre et a fortiori, les mesures dans des pièces exigues, à l'intérieur des habitations, imposent des antennes blindées, voire focalisées, afin d'éviter les réflexions latérales.

L'électromagnétisme en champ proche de type Slingram EM 31 est contraint par son encombrement – longueur minimale imposée voisine de 4 m, ce qui ne sera pas un problème dans les ruelles, mais interdira pratiquement toute mesure à l'intérieur des habitations.

Son extrême sensibilité à la présence d'objets métalliques et de manière générale à tout «conducteur» anthropique – voitures, portes métalliques,

canalisations métalliques, regards...- imposera des précautions particulières de mise en œuvre, notamment un pas d'échantillonnage spatial très fin, permettant l'application de filtres spatiaux adaptés. Les expériences menées à Alexandrie en Egypte ont montré que de telles campagnes de mesures en environnement urbain étaient possibles et efficaces.

La microgravimétrie devrait pouvoir être mise en œuvre sans difficultés sur les espaces dégagés (rues, places, parkings).

En revanche, à l'intérieur des habitations, des corrections prenant en compte l'effet des bâtiments s'imposeraient vraisemblablement, ce qui obligerait à disposer des données complètes concernant leur géométrie et d'un programme de modélisation 3D industriel et convivial.

Les dimensions des cavités vides attendues étant largement supérieures à la profondeur de leur toit, des anomalies résiduelles négatives d'amplitude supérieure à 10 μgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$) devraient être enregistrées et extraites des bruits de mesures si celles-ci sont effectuées la nuit !

Malgré tous les efforts déployés, il n'a pas été possible de disposer d'un microgravimètre de qualité et en bon état de marche pendant le projet. Il est souhaité qu'au cours des mois qui viennent, des campagnes expérimentales puissent être menées sur des sites tests maintenant bien connus, dans les zones dégagées et au sein d'habitations facilement accessibles.

La sismique réfraction pourra être testée dans des zones spécialement aménagées de l'ancienne Médina puis généralisée, si elle s'avère efficace, en parallèle avec les mesures de tomographie électrique, dans les endroits anomaliques prédéfinis par les méthodes électromagnétiques de reconnaissance

Elle consiste à étudier la propagation des ondes de vibrations pour cartographier les interfaces entre les formations géologiques, tout spécialement le toit des couches «rapides» dans la partie superficielle du sous-sol. C'est une méthode indirecte pour la détection des cavités souterraines, qui se présentent sous la forme

d'anomalies du temps de propagation et éventuellement de nature du signal sismique, dues aux zones de très faible vitesse sismique, liées à des vides ou à des zones décomprimées.

La présence d'une dalle continue de calcaire sain en surface est a priori très défavorable puisque la vitesse de propagation des ondes y sera supérieure à celle des dépôts détritiques sous-jacents. Il se pourrait qu'aucune onde réfractée ne soit enregistrée. On peut espérer malgré tout que des perturbations des temps et des signaux soient générées par les zones décomprimées et par les vides.

La qualité du couplage des géophones avec le sol peut être aussi une difficulté dans les rues et les ruelles pavées.

La tomographie électrique est une méthode très efficace pour une auscultation locale, dans les zones anomaliques prédéfinies par les méthodes de reconnaissance. C'est une méthode de résistivité qui utilise un dispositif multi-électrode permettant d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes.

Le sondage électrique classique ne peut pas, bien entendu, être utilisé, puisque la cible n'est pas tabulaire. L'intérêt de la tomographie 2D et 3D est qu'elle permet une interprétation quantitative. Elle permet d'obtenir un modèle 2D ou 3D de distribution de résistivités «vraies» ou mieux «interprétées», dont la réponse est comparable aux données enregistrées (Loke et Barker, 1996). Certes, ce modèle n'est pas unique, mais l'apport à la détection, la localisation et la connaissance de la géométrie des cavités devrait être décisif.

C'est la tomographie 2D, et non 3D, qui sera mise en œuvre pour des raisons d'accessibilité et de disponibilité des équipements et des logiciels. Le couplage entre les électrodes et le sol posera un problème dans les rues et les ruelles pavées, qu'il faudra résoudre.

3.1.2 Le programme de mesures géophysiques

C'est la nature du site - zone urbaine à forte densité d'habitation - qui représente une contrainte quasi rédhibitoire pour l'application des méthodes géophysiques.

Nous avons subdivisé le secteur d'étude en trois zones de nature homogène et de degré de priorité spécifique: Ce zonage et les degrés de priorité ont été établis à partir :

- des résultats des enquêtes et de la demande des autorités,
- des résultats des tests effectués,
- des contraintes de mise en œuvre des méthodes géophysiques.

Ainsi, les zones suivantes ont été définies :

Zones A : les zones non construites de grandes dimensions : places, parcs, grandes avenues et rues, grandes cours...

Zones B : les zones non construites de faibles dimensions : ruelles, petites cours, petites places etc.

Zones C : les zones construites avec une grande densité d'habitations dont les pièces sont de dimensions suffisantes pour la mise en œuvre des méthodes d'investigation.

Au total, les travaux géophysiques se sont déroulés en 4 phases :

1 - Phase continue, tout au long du projet : Mise en oeuvre des équipements du laboratoire de géophysique de la Faculté des Sciences et Techniques, par les enseignants et les étudiants. Ceci concerne toutes les opérations de topographie et de repérage des profils de mesure et les méthodes sismiques et électriques.

2 – Première campagne expérimentale avec le radar géologique : C'est une équipe de l'UPMC avec son radar «Pulse Echo» qui est intervenue.

3 – Seconde campagne expérimentale de radar géologique : C'est une équipe du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées et du CETE de Rouen qui est

intervenue, avec son radar, SIR 3000. Cette mission a été suivie d'une campagne de forage dirigée par Raphaël Bénot du CETE de Rouen.

4 – Campagne systématique de radar et de tomographie électrique : C'est une équipe de l'université de Barcelone qui est intervenue.

Les travaux présentés dans ce mémoire sont essentiellement ceux de la troisième phase, plus quelques uns de la première phase.

3.2 – Sismique : Etude des arrivées premières

La sismique réfraction est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités de grande taille, pour des profondeurs allant jusqu'à une quinzaine de mètres.

L'existence d'un vide dans le sous-sol proche se manifeste par un retard sur le temps de parcours dans le terrain, et accessoirement par des phénomènes particuliers tels que diffraction et/ou amortissement des amplitudes des ondes sismiques. Ce retard sera d'autant plus grand que la cavité sera entourée d'un anneau de terrain décomprimé. Il devra être significatif devant l'erreur de mesure sur les temps de trajet, c'est-à-dire supérieure à environ 3% du temps total d'enregistrement.

3.2.1 : Rappel : Principe de la sismique réfraction

La sismique réfraction, est une technique très utilisée pour explorer les structures superficielles du sous-sol en Génie civil et en Géotechnique.

C'est une méthode directe pour cartographier le toit des formations «rapides», c'est-à-dire à vitesse élevée, sous un recouvrement pour lequel la vitesse de propagation est plus faible.

La figure 3.2.1 montre la transmission des ondes classiques dans les méthodes sismiques - l'onde directe, l'onde réfléchie, et l'onde réfractée - dans le cas d'un

modèle avec une interface plane horizontale qui sépare deux milieux de différentes vitesses. Si la vitesse du second milieu, V_2 , est supérieure à la vitesse V_1 , du premier milieu, il se produit une réfraction totale, à l'angle critique i_c , qui est défini par la relation :

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

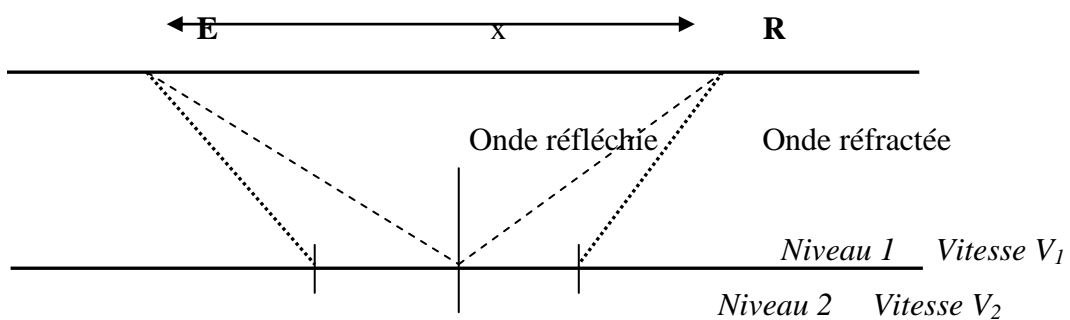


Figure 3.2.1: Onde réfléchie et onde réfractée pour un modèle bicouche à interface horizontale

Si l'on représente les hodochrones ou dromochroniques de ces ondes, c'est-à-dire le graphique des temps d'arrivée t en fonction de la distance x entre la source et le récepteur, on obtient le schéma de la figure 3.2.2.

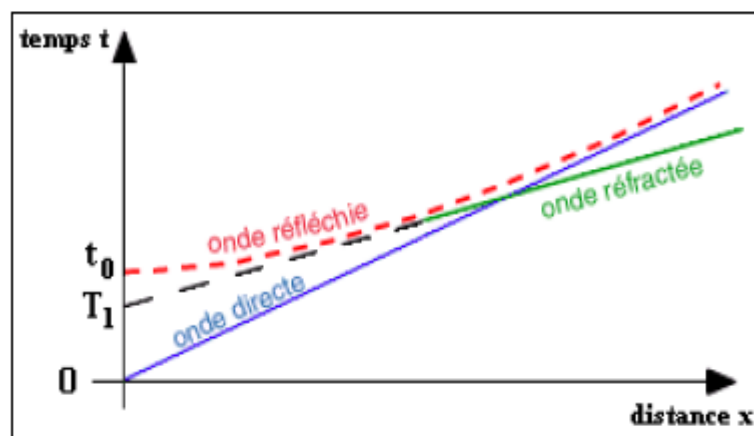


Figure 3. 2.2 : Hodochrones des ondes sismiques.

On constate que les arrivées premières sont celles de l'onde directe pour les premiers géophones, puis celles de l'onde réfractée qui se propage à la vitesse $V_2 > V_1$ à l'interface entre les deux milieux, pour les géophones éloignés. C'est la rupture de pente qui met en évidence le phénomène de réfraction.

On peut calculer la vitesse de propagation des ondes dans chacun des deux milieux, en mesurant l'inverse des pentes de ces deux segments de droite. En effet, les équations des droites sont :

Pour l'onde directe :

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Pour l'onde réfractée :

$$t = \frac{x}{V_2} + T_1 \quad ; \quad T_1 = \frac{2H}{V_1} \cos i_c$$

où T_1 est l'ordonnée à l'origine appelée Intercept et H est l'épaisseur de la première couche.

Pour mémoire, rappelons que l'onde réfléchie a pour hodochrone une hyperbole d'équation:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_1^2} \quad ; \quad t_0 = \frac{2H}{V_1}$$

La sismique réfraction est une méthode indirecte pour la détection des cavités vides. En effet, la vitesse de propagation des ondes sismiques dans l'air (340 m/s) est inférieure à la vitesse dans toute formation géologique, sauf pour les couches superficielles très aérées. Par conséquent, les ondes directes et/ou les ondes réfractées seront affectées d'un retard mesurable si une partie significative de leur trajet se fait à l'intérieur d'un vide, ou d'une zone décompressée autour d'un vide, dans laquelle la vitesse est inférieure à celle de la formation saine.

3.2.2 – Exemples de résultats

A – Programme de mesures - Acquisition des données :

Notre laboratoire disposant temporairement d'un système d'acquisition de type Geometrics, des essais ont été réalisés dès le début du projet, à titre pédagogique avec les étudiants de la FST, sur plusieurs profils et en particulier sur une zone spécialement préparée pour obtenir un bon couplage avec les géophones.

Le plan de position des profils réalisés est représenté sur la figure 3.2.3 : il s'agit de 19 profils individuels et d'un ensemble de profils parallèles situés dans la zone étudiée en détail.

Les caractéristiques du dispositif utilisé sont résumées ci-après :

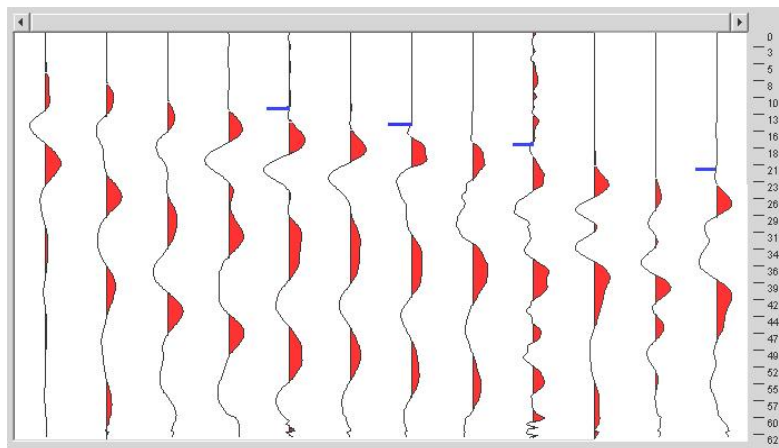
- ✓ Déport Source - récepteur : de 2 à 13 m
- ✓ Nombre de géophones : 12
- ✓ Distance entre géophones : 1m.
- ✓ Fréquence centrale des géophones : 10 Hz
- ✓ Source : Marteau de 5 kg.



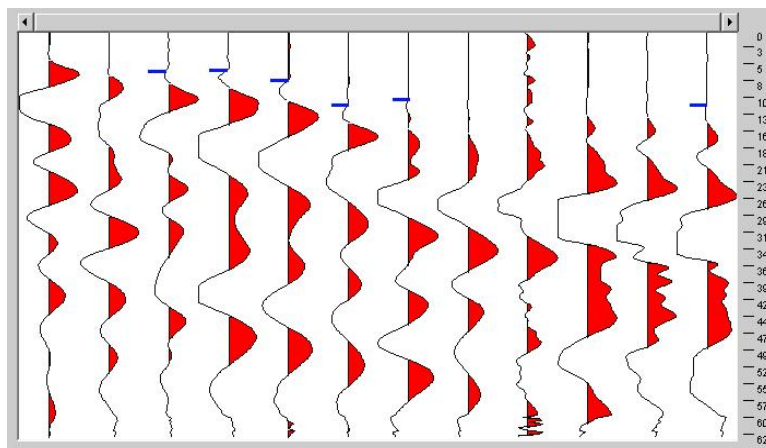
Figure 3.2.3 : Localisation des profils sismiques

B – Exemples de dromochroniques :

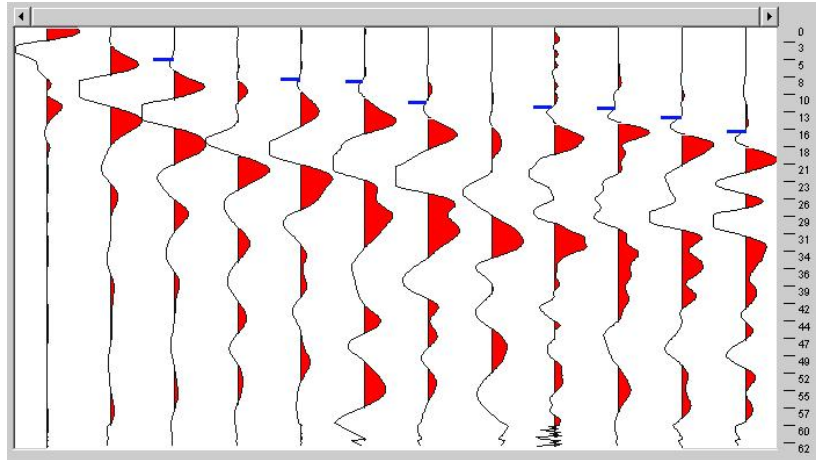
Quatre exemples sont fournis d'enregistrements obtenus dans la zone étudiée en détail.



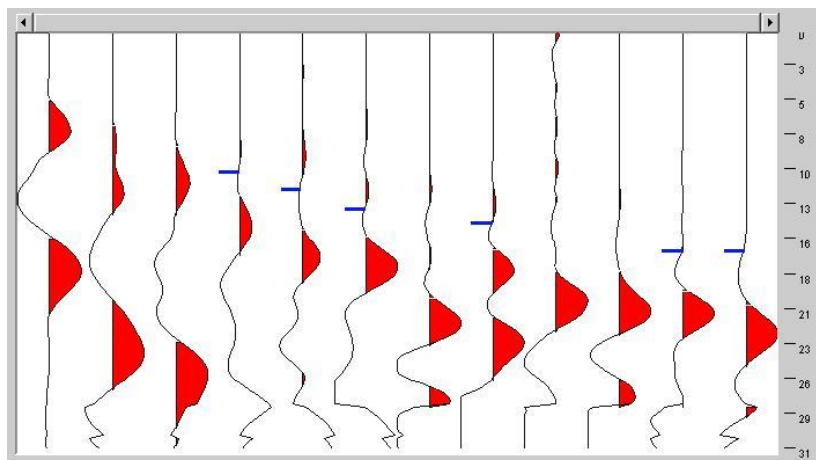
Profil D2



Profil D7



Profil D 10



Profil D 13

Figure 3.2.4 : Exemples de dromochroniques

C – Commentaires :

Les signaux qui ont été soulignés en rouge automatiquement ne correspondent pas aux arrivées premières. Ils correspondent vraisemblablement

aux ondes de surface qui présentent des amplitudes maximales, parce que les gains ont été choisis de façon telle, que ce sont elles qui ont été privilégiées, au détriment des arrivées premières, qui les précèdent, mais qui n'apparaissent que très faiblement sur les enregistrements bruts présentés.

Un «pointé» manuel a été tenté chaque fois qu'il était possible, sur quelques traces de qualité suffisante. Les vitesses calculées à partir de ces nouveaux pointés seraient de l'ordre de 1 000 m/s ou inférieures ; elles ne peuvent donc pas correspondre aux vitesses des ondes longitudinales directes dans la formation calcaire indurée de surface.

Sur le premier exemple (D2) une dromochronique linéaire sans anomalie pourrait être tracée, qui pourrait correspondre à un milieu homogène non perturbé, en surface. Sur les trois derniers exemples (D 7, D 10 et D 13), en revanche, on note des anomalies de temps de parcours. Peut-on pour autant parler de « retards » ? Si tel était le cas, ce serait vraisemblablement des anomalies qui affecteraient les ondes de surface, qui pourraient être malgré tout liés à la présence des cavités, soit directement, soit de manière indirecte du fait de la zone décomprimée très proche de la surface, au-dessus desdites cavités.

Pour résumer, comme annoncé ci-dessus, en raison de la géologie, qui malgré tout a tendance à placer une formation plus dense en surface, donc à vitesse de propagation plus élevée, la sismique réfraction ne s'applique pas. Par conséquent, ce n'est pas l'un des outils à recommander pour la médina de Béni-Mellal. Il était cependant raisonnable de tester cette technique, donc de la mettre en œuvre sur des sites appropriés sélectionnés, pour découvrir, qu'elle n'est pas à privilégier, en général.

3.3 – Tomographie électrique

La méthode d'imagerie électrique a été mise en œuvre dans la médina, d'une manière locale dans les zones où des cavités étaient connues et dans des zones anomaliques définies par la couverture radar. Elle permet d'affiner et de

compléter le modèle géologique et géophysique du terrain et de lever certaines indéterminations liées à l'interprétation des autres données géophysiques.

Les images électriques établies sont riches en informations physiques et permettent de localiser des vides peu profonds, typiquement, tant que la profondeur du toit d'une cavité est de l'ordre de grandeur de son rayon. Toutefois, le rendement de cette méthode est faible car sa mise en place est longue. Elle utilise un dispositif multi-électrodes permettant d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant à différents espacements d'électrodes. L'interprétation à partir des mesures brutes est exclue. Elle se fait nécessairement en terme de résistivités «vraies» ou «interprétées» sur les coupes obtenues après «inversion».

3.3.1 Rappel - Principe de la méthode

A - Mesure de la résistivité électrique d'un demi-espace homogène

La résistivité électrique d'un demi-espace homogène est mesurée à partir de la distribution du potentiel créé par l'injection dans le sol d'un courant, au moyen d'électrodes plantées en surface. Les mesures sont généralement réalisées en courant continu, éventuellement à basse fréquence (quelques Hz) (Telford *et al.*, 1990). Le dispositif de base est un quadripole : deux électrodes, dites de courant (C1, C2) et deux électrodes dites de potentiel (P1, P2).

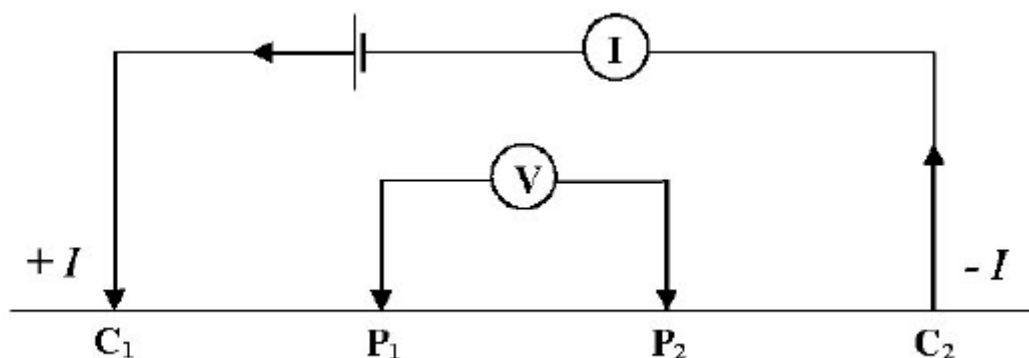


Figure 3.3.1 : Schéma général d'une mesure de résistivité du sol utilisant un dispositif symétrique à 4 électrodes.

La distribution du courant continu et du potentiel dans un demi-espace homogène infini de résistivité est représentée sur la figure 3.3.2.

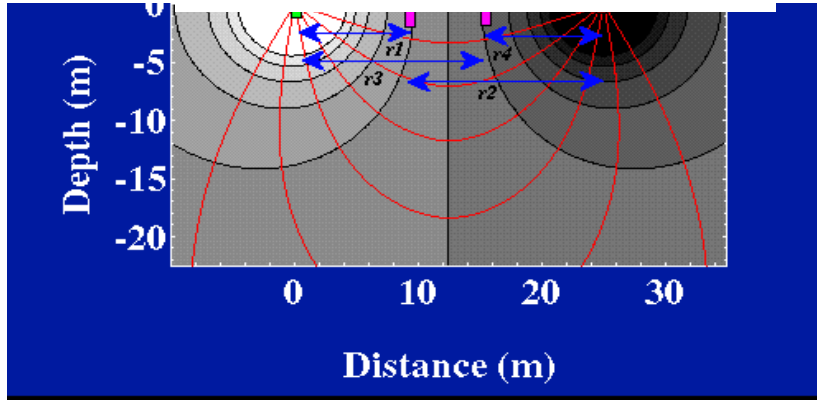


Figure 3.3.2 : Lignes de courant (rouge) et courbes équipotentielles (noir)

Au niveau des points P1 et P2, le potentiel s'exprime selon :

$$V_{(P1)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P_1 C_1} - \frac{1}{P_1 C_2} \right)$$

$$V_{(P2)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P_2 C_1} - \frac{1}{P_2 C_2} \right)$$

La différence de potentiel entre P1 et P2 s'écrit alors :

$$\Delta V_{P_1 P_2} = V_{(P1)} - V_{(P2)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P_1 C_1} - \frac{1}{P_1 C_2} - \frac{1}{P_2 C_1} + \frac{1}{P_2 C_2} \right)$$

et la résistivité du demi-espace homogène vaut :

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V_{P_1 P_2}}{I} \left(\frac{1}{P_1 C_1} - \frac{1}{P_1 C_2} - \frac{1}{P_2 C_1} + \frac{1}{P_2 C_2} \right)^{-1}$$

Lorsque le sous-sol n'est ni homogène, ni isotrope, ni infini, la résistivité mesurée avec le même dispositif conduit à des valeurs de résistivité dite «apparente» (ρ_a).

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

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.

B - Le sondage électrique et le profilage électrique

Le sondage électrique (SE) est une technique toujours très utilisée pour l'étude des structures tabulaires ou sub-tabulaires.

Les quadripôles symétriques tels que ceux présentés ci-dessus sont très adaptés. Deux d'entre eux sont bien connus :

le dispositif Wenner- α , où $C_1 P_1 = P_1 P_2 = P_2 C_2 = a$

le dispositif Schlumberger, où $P_1 P_2 \ll C_1 C_2$.

La profondeur d'investigation de tels dispositifs est fonction de ses dimensions. On réalise donc un « sondage » en faisant croître ces dimensions ; tout en restant centré au même point.

L'interprétation quantitative d'un sondage résulte d'un processus d'inversion des données mesurées, à partir d'un modèle tabulaire. On détermine ainsi les épaisseurs et les résistivités «interprétées» de chacune des couches horizontales. La solution du problème inverse n'est pas unique, il faut en général des forages de contrôle pour étalonner les SE dans une zone d'étude donnée.

Le sondage électrique est inutilisable pour l'étude des structures non tabulaires, donc pour la recherche de cavités souterraines.

Le profilage électrique en revanche permet l'étude qualitative des structures non tabulaires. Il consiste à mesurer les résistivités apparentes avec un dispositif de dimensions fixes, donc de profondeur d'investigation approximativement constante, déplacé le long d'un profil.

Si cette technique permet de mettre en évidence des anomalies, elle ne permet pas une interprétation quantitative, en raison de l'insuffisance de données

mesurées, puisqu'on ne dispose que d'une seule valeur pour chaque station de mesure.

C - La tomographie électrique

C'est ainsi qu'est née la tomographie électrique qui permet d'obtenir un grand nombre de mesures indépendantes pour caractériser un volume de terrain donné. A partir de modèles très fins de ce volume, constitués de volumes élémentaires 2D (prismes horizontaux infiniment allongés perpendiculairement à la direction des dispositifs de mesure) ou 3D (cubes ou parallélépipèdes horizontaux), un procédé d'inversion permet de proposer des structures 2D ou 3D, dont les réponses calculées sont aussi proches que possible des réponses mesurées expérimentalement.

C'est grâce au développement des équipements de mesure multicanaux et des logiciels de modélisation et d'inversion 2D et 3D, que la tomographie s'est imposée.

C 1 - Mise en œuvre sur le terrain

La première étape de cette méthode d'investigation consiste à réaliser une série de mesures individuelles grâce à des électrodes métalliques enfoncées dans le sol, généralement le long d'un profil (2D). Ces mesures sont réalisées selon une séquence prédéfinie. Les valeurs de résistivités apparentes ρ_a obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées dans un plan vertical appelé pseudo-coupe (fig.3.3.3). Dans cette représentation synthétique, le positionnement des valeurs de résistivité apparente obéit à une convention (dans le cas de mesures en dispositif Wenner α , par exemple, l'abscisse représente généralement le centre du quadripôle et la pseudo-profondeur est choisie égale à la moitié de l'espace inter-électrodes a).

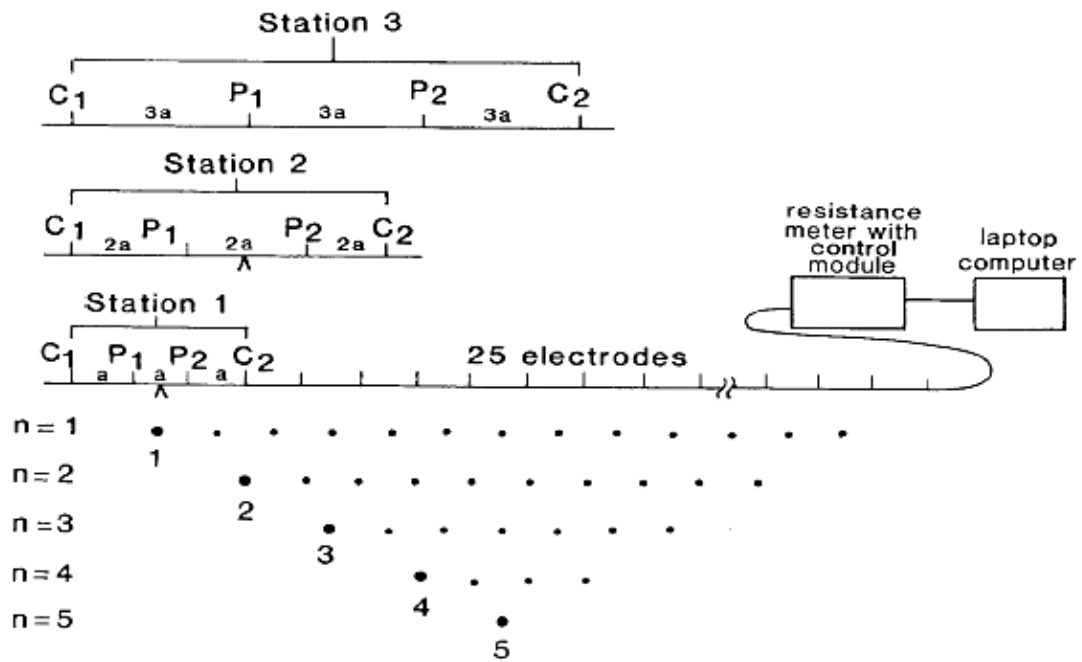


Figure 3.3.3 : Instrumentation et séquence de mesure permettant l'obtention de la pseudo-section (ici en dispositif Wenner α) (Barker, 1979).

C 2 - Inversion

Afin de «calculer» la résistivité «vraie» ou «interprétée» du sous-sol en chaque point de la coupe verticale, les valeurs de résistivité apparente doivent être «inversées» (Reynolds, 1997). Le principe de l'inversion consiste à déterminer les valeurs des résistivités vraies de chaque maille du modèle du sous-sol, telles que la réponse calculée dudit modèle pour chacun des dispositifs de mesure soit aussi proche que possible de la réponse effectivement mesurée et reportée sur la pseudo – coupe.

Mathématiquement, l'objectif de l'inversion est de minimiser l'écart entre les valeurs de la pseudo-coupe calculée pour le modèle de sol et celles de la pseudo - coupe mesurée. Celui-ci s'exprime par la fonction RMS (Root Mean Square) selon la formule suivante :

$$RMS (\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

où x_i représente l'écart entre la résistivité apparente mesurée et la résistivité calculée en chaque point de la pseudo - coupe. La fonction d'erreur (RMS) décrite par l'équation précédente correspond à la norme L2 ($\sim x_i^2$). La minimisation de cette fonction au cours du processus d'inversion a tendance à atténuer les contrastes, relativement à l'utilisation d'une fonction d'erreur de type norme L1 ($\sim x_i$). Divers algorithmes existent pour minimiser la fonction d'erreur (Loke et Barker, 1996 ; Loke et Dahlin, 2002) et tendre ainsi vers un modèle de sol permettant d'expliquer au mieux les mesures. Le modèle de sol obtenu au terme de l'inversion constitue une solution qui n'est pas unique quant aux valeurs des résistivités «vraies» ou «interprétées» du sous-sol (Oldenburg et Li, 1994), mais dans le cas de la recherche de cavités de grandes dimensions, cette limite a peu d'importance.

C 3 - Influence du dispositif de mesure

Le choix du dispositif de mesure dépend des objets géologiques étudiés et des objectifs recherchés (résolution spatiale, sensibilité au bruit,...). Chaque dispositif présente en effet des avantages et des inconvénients qui lui sont propres (Reynolds, 1997). Ils peuvent être illustrés par son «diagramme de sensibilité», également appelé «section de contribution au signal» (Barker, 1979).

Le diagramme de sensibilité d'un dispositif de mesure, expression graphique de sa matrice de sensibilité représente, dans le cas d'un milieu homogène, la contribution de chaque élément de volume du sous – sol, à la différence de potentiel totale mesurée ΔV_{P1P2} . La figure 3.3.4 présente les diagrammes de sensibilité pour 3 dispositifs de mesure en 2D (Dahlin et Zhou 2004).

Par des simulations numériques de mesures électriques effectuées selon 10 dispositifs et sur 5 cas synthétiques différents, Dahlin et Zhou (2004) ont montré que les dispositifs Wenner α et Wenner β se caractérisent par une bonne stabilité, tandis que les dispositifs Dipôle-Dipôle, Pôle-Dipôle et Gradient permettent d'obtenir une très bonne résolution spatiale.

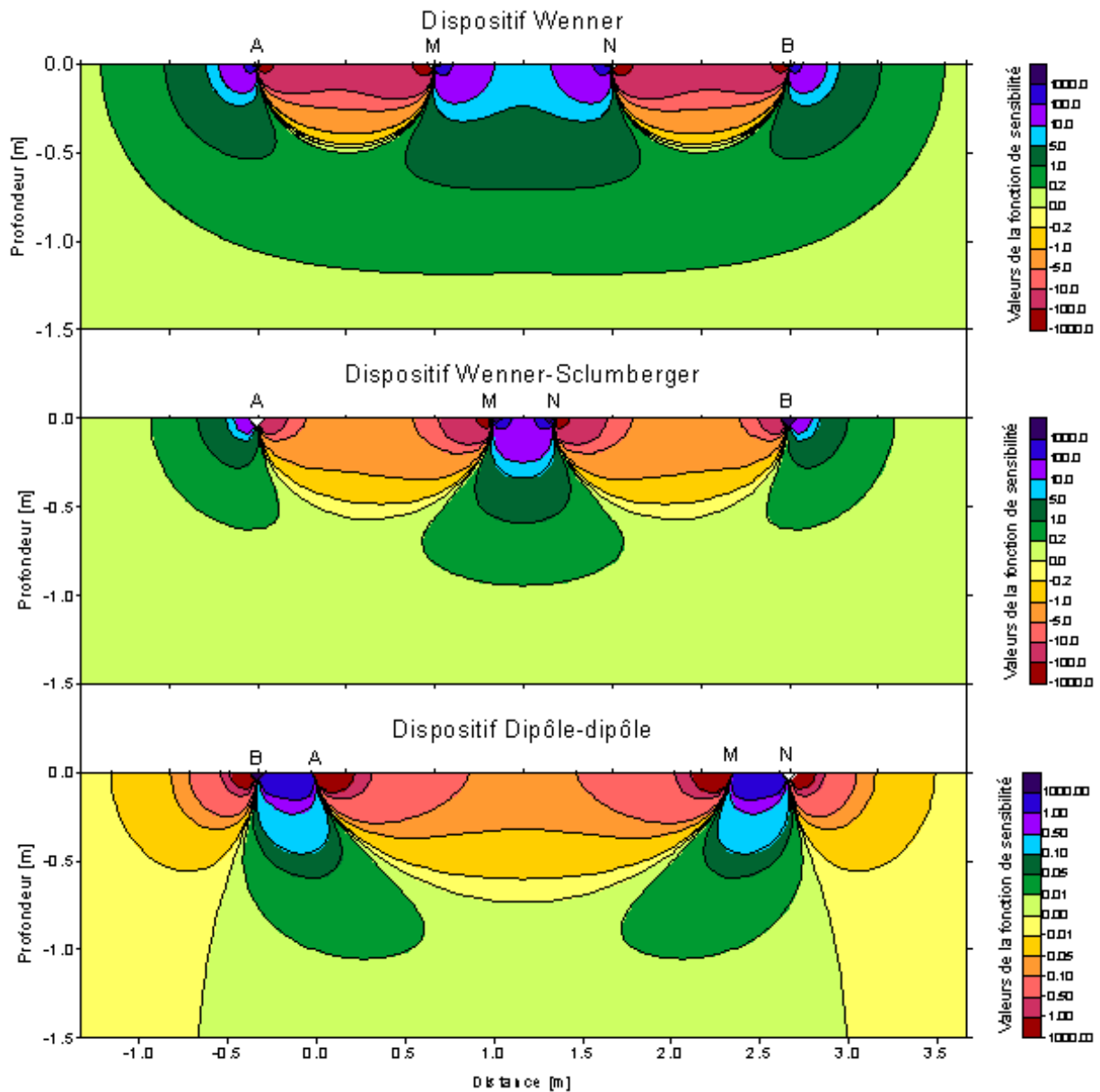


Figure 3.3.4 : Diagrammes de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sous-sol.

(A et B représentent les électrodes de courant et M et N les électrodes de potentiel, d'après Dalhin et Zhou,2004).

3.3.2 – Résultats dans la zone test

A – Programme, acquisition, traitement et inversion des données

La campagne d'imagerie électrique réalisée dans la médina comprenait plusieurs profils implantés le long de certaines artères. Le choix de l'emplacement de ces profils a été conditionné par deux éléments importants :

- possibilité de mise en oeuvre et d'installation du dispositif de mesure ;
- confirmation et vérification de certaines anomalies connues ou détectées par le radar géologique.

Le matériel utilisé est constitué d'un agencement de 24 électrodes espacées de 1 m, connecté à un résistivimètre de type Syscal R1 + de la société Iris Instruments. Ce dispositif multiélectrode permet, comme il a été dit ci-dessus, d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes. Dans la présente étude la configuration Wenner - Schlumberger a été adoptée pour garantir une meilleure résolution latérale et verticale.

Plusieurs profils, appelés quelquefois «panneaux électriques», ont été réalisés dans la médina, au cours des phases 1 et 4 des travaux (fig. 3.3.5 et 3.3.6). Faute d'équipements adéquats, les premiers profils ont été réalisés, sans dispositif électronique de commutation, c'est-à-dire que les changements de connexion aux électrodes étaient assurés physiquement, manuellement, par un opérateur. Au cours de la phase 4, un équipement de commutation automatique de l'université de Barcelone a été mis en oeuvre.

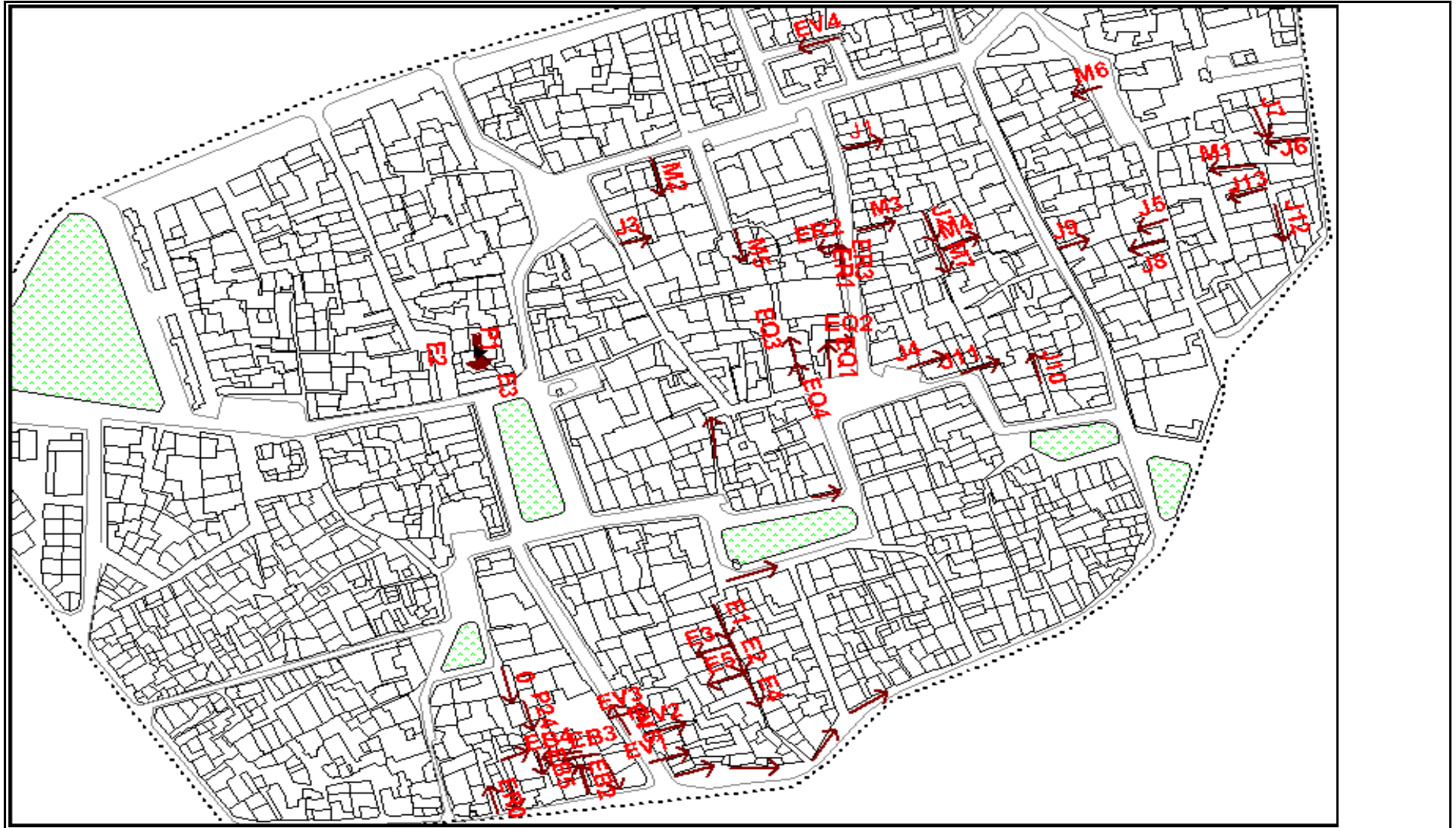


Figure 3.3.5 : Localisation des profils de tomographie électrique



Figure 3.3.6 : Etude de la zone expérimentale de la médina

Le traitement et l'inversion des données ont été réalisés à l'aide du logiciel spécialisé développé par Loke et Barker (1996).

C – Exemples de résultats – Sélection des profils représentés

Neuf profils ont été sélectionnés pour illustrer l'efficacité et les limites de la méthode, situés en majorité dans la zone expérimentale étudiée en détail.

Sur chaque planche, sont représentées :

- (1) les pseudo – coupes des résistivités apparentes mesurées, après interpolation selon les techniques du logiciel spécialisé,
- (2) les pseudo – coupes des résistivités apparentes calculées, à partir du modèle obtenu, à la fin du processus itératif,

- (3) les coupes des résistivités «vraies» ou «interprétées» tracées avec le même programme d'interpolation que les pseudo-coupes, appliqué aux valeurs discrètes correspondant à chaque élément de volume.

Le nombre maximal d'itérations imposé par la version du logiciel de démonstration dont nous disposons est égal à 3. L'erreur RMS à l'issue des itérations dans ce logiciel n'apparaît pas sur les documents graphiques. Par ailleurs, la même échelle de couleurs est utilisée pour les résistivités apparentes et les résistivités « vraies », après inversion. Fort heureusement, la taille des cibles recherchées et le contraste des résistivités étaient suffisamment importants, pour que ces trois contraintes pèsent peu sur la qualité des résultats.

Pour les neuf exemples présentés, l'examen des seules pseudo-coupes de résistivité apparente mesurées permet, avant toute inversion, de répondre à la question posée de la présence ou non de cavités. C'est une situation exceptionnellement favorable.

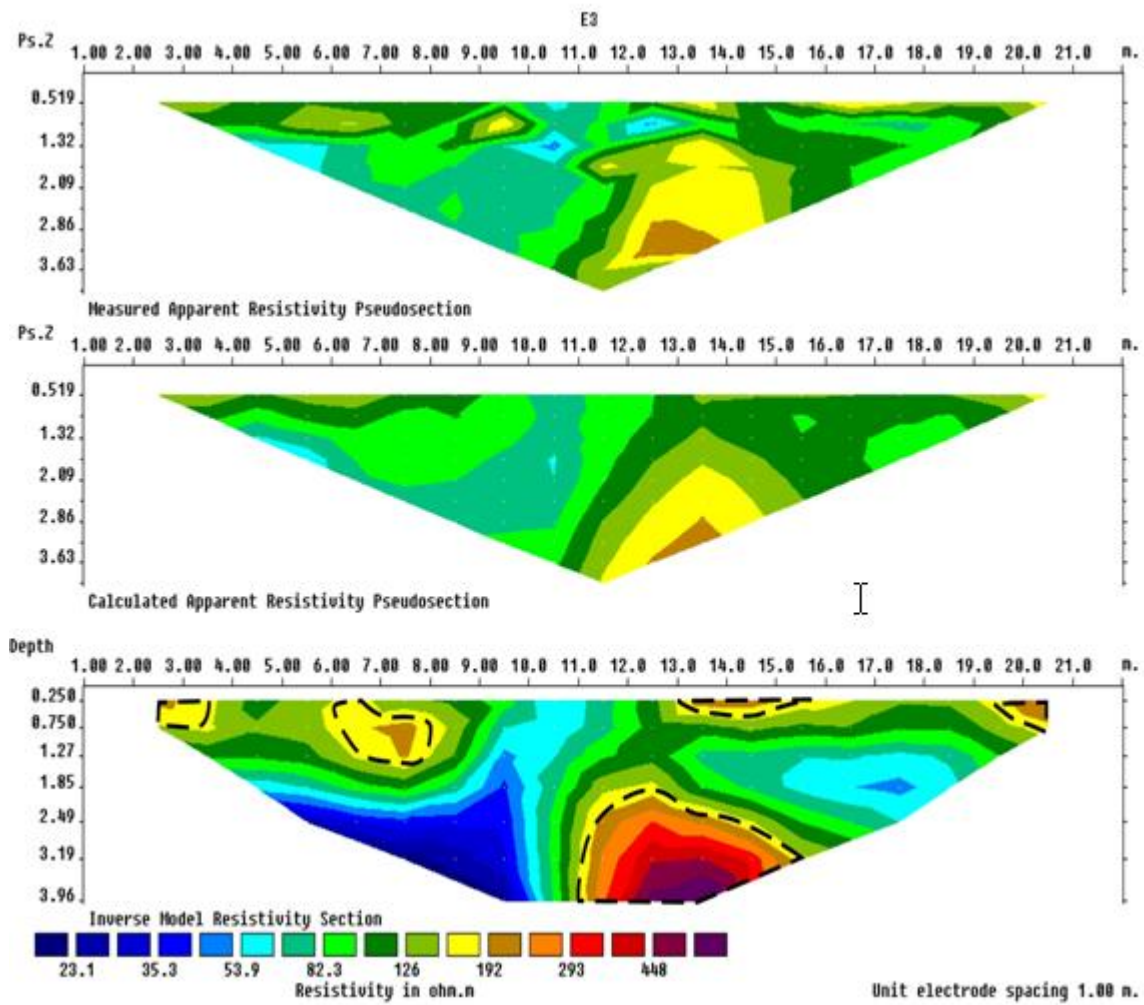


Figure 3.3.7 : Résultat de la tomographie – Profil E 3

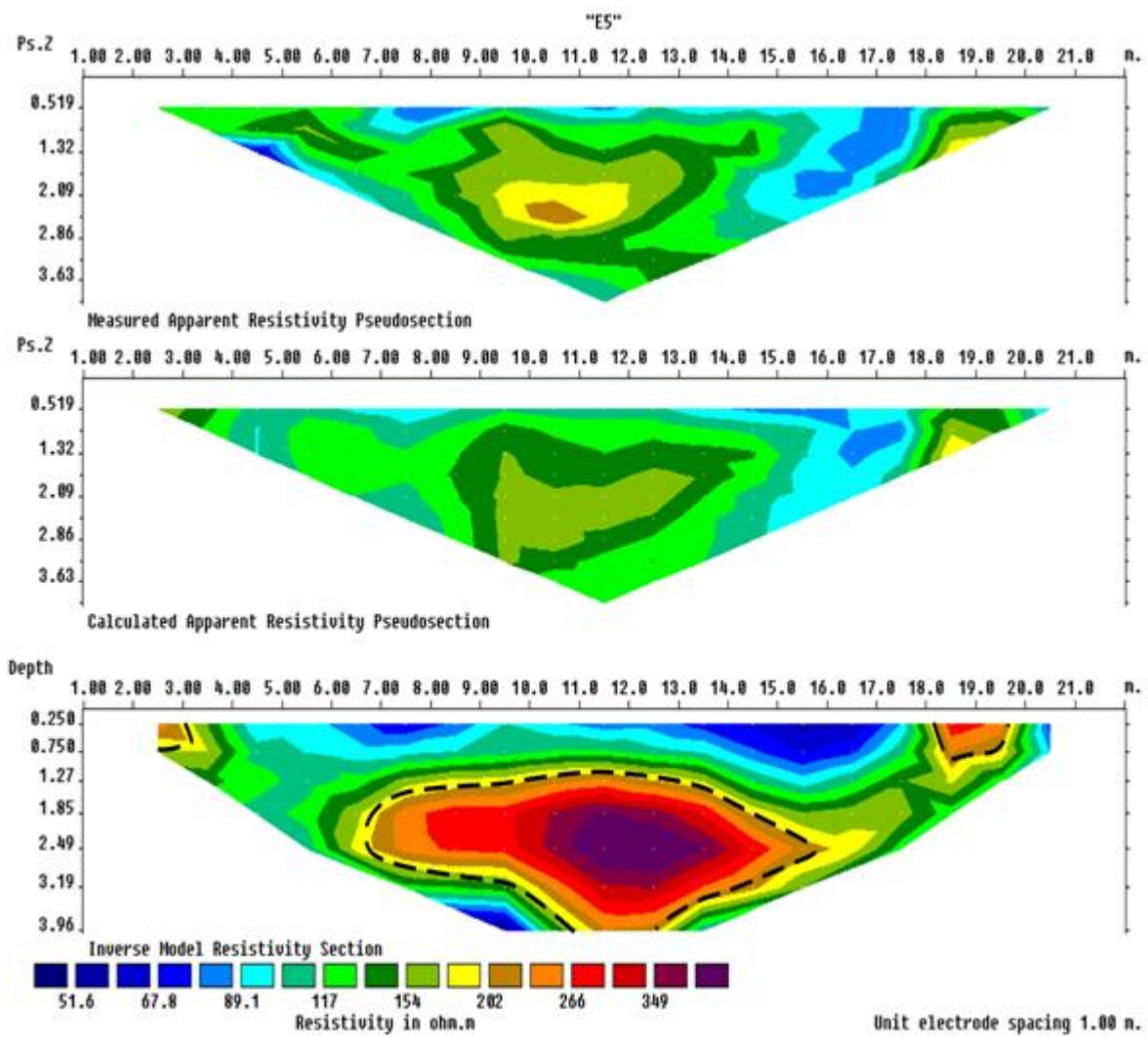


Figure 3.3.8 : Résultat de la tomographie – Profil E 5

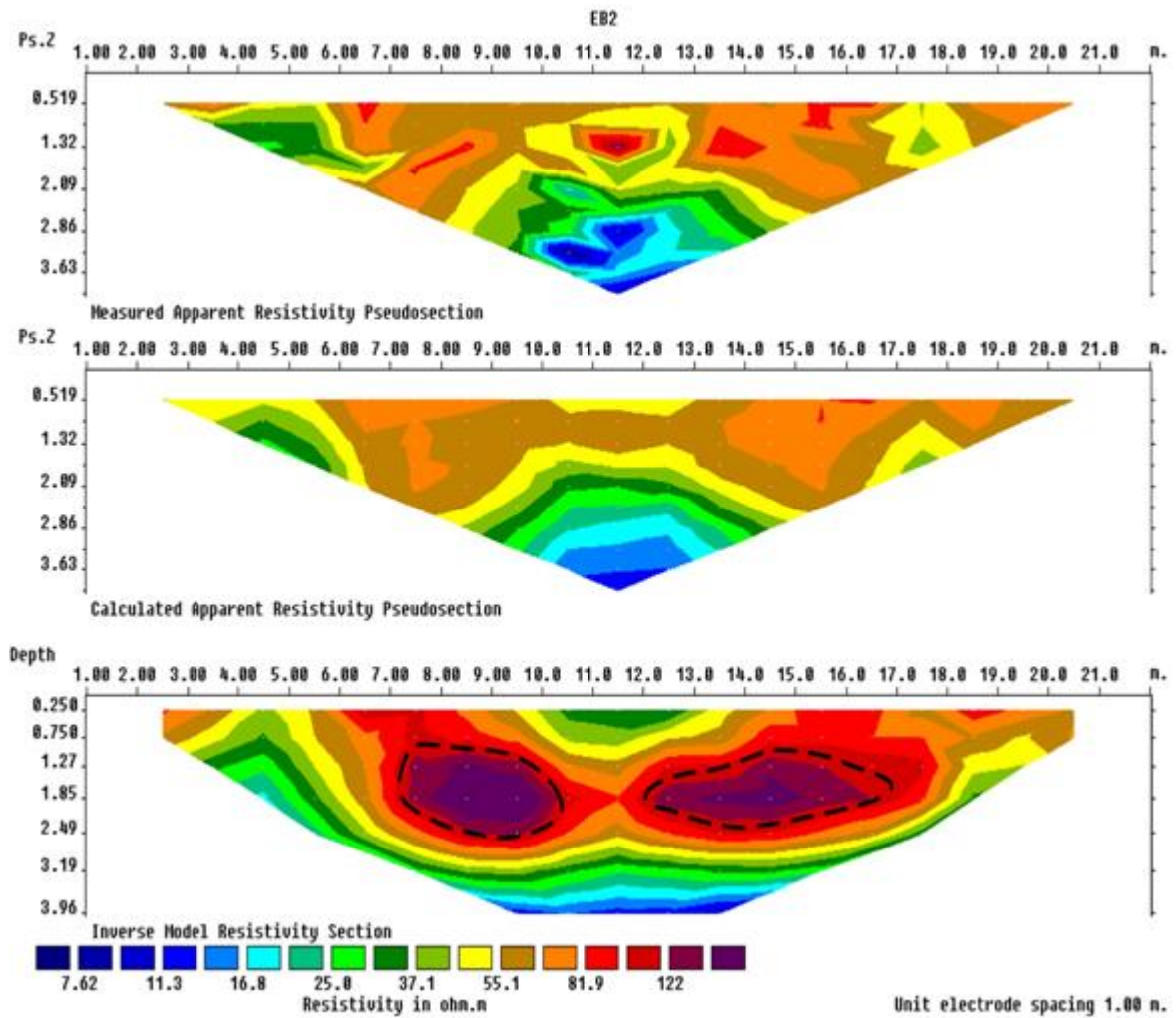


Figure 3.3.9 : Résultat de la tomographie – Profil EB 2

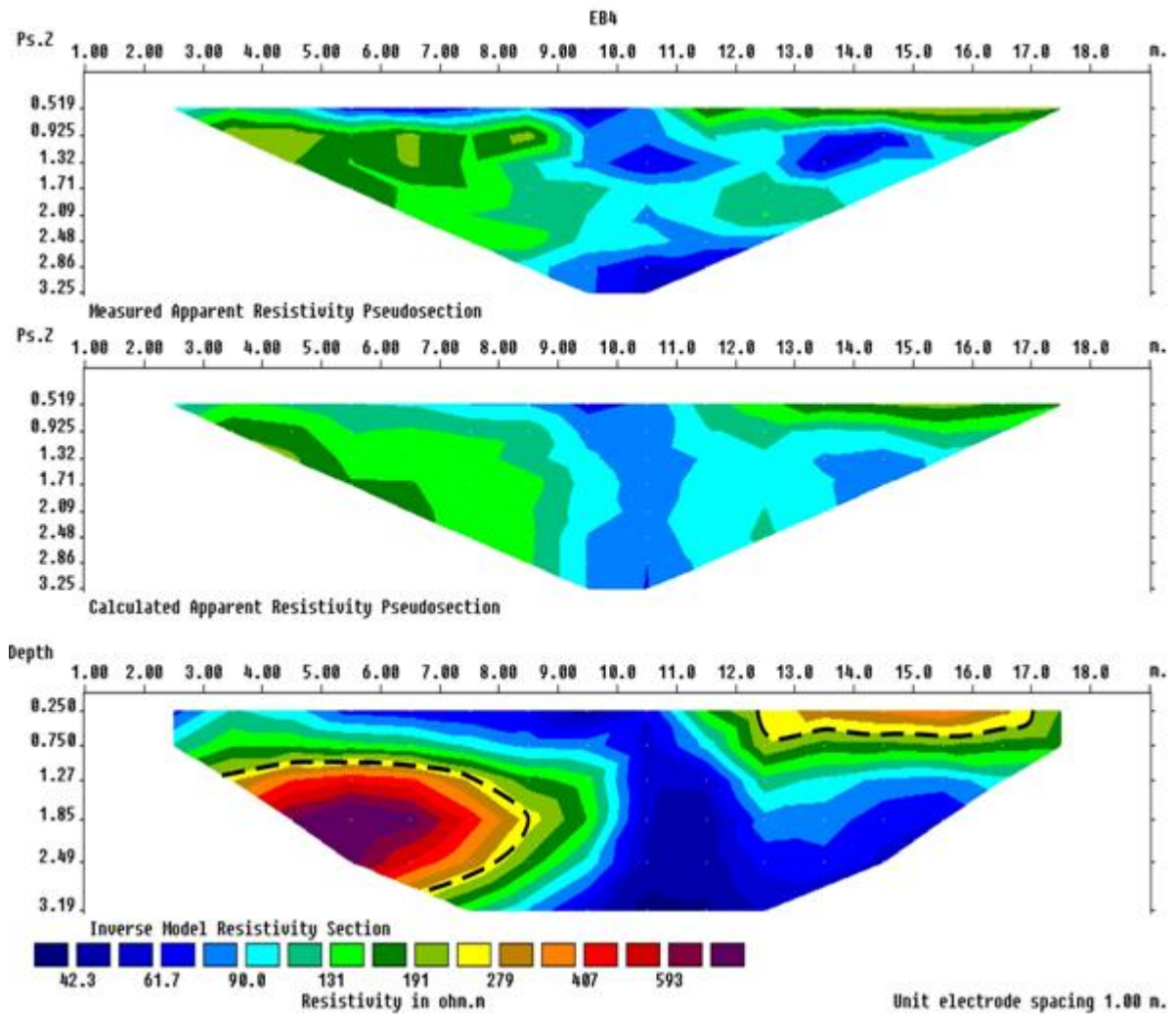


Figure 3.3.10 : Résultat de la tomographie – Profil EB 4

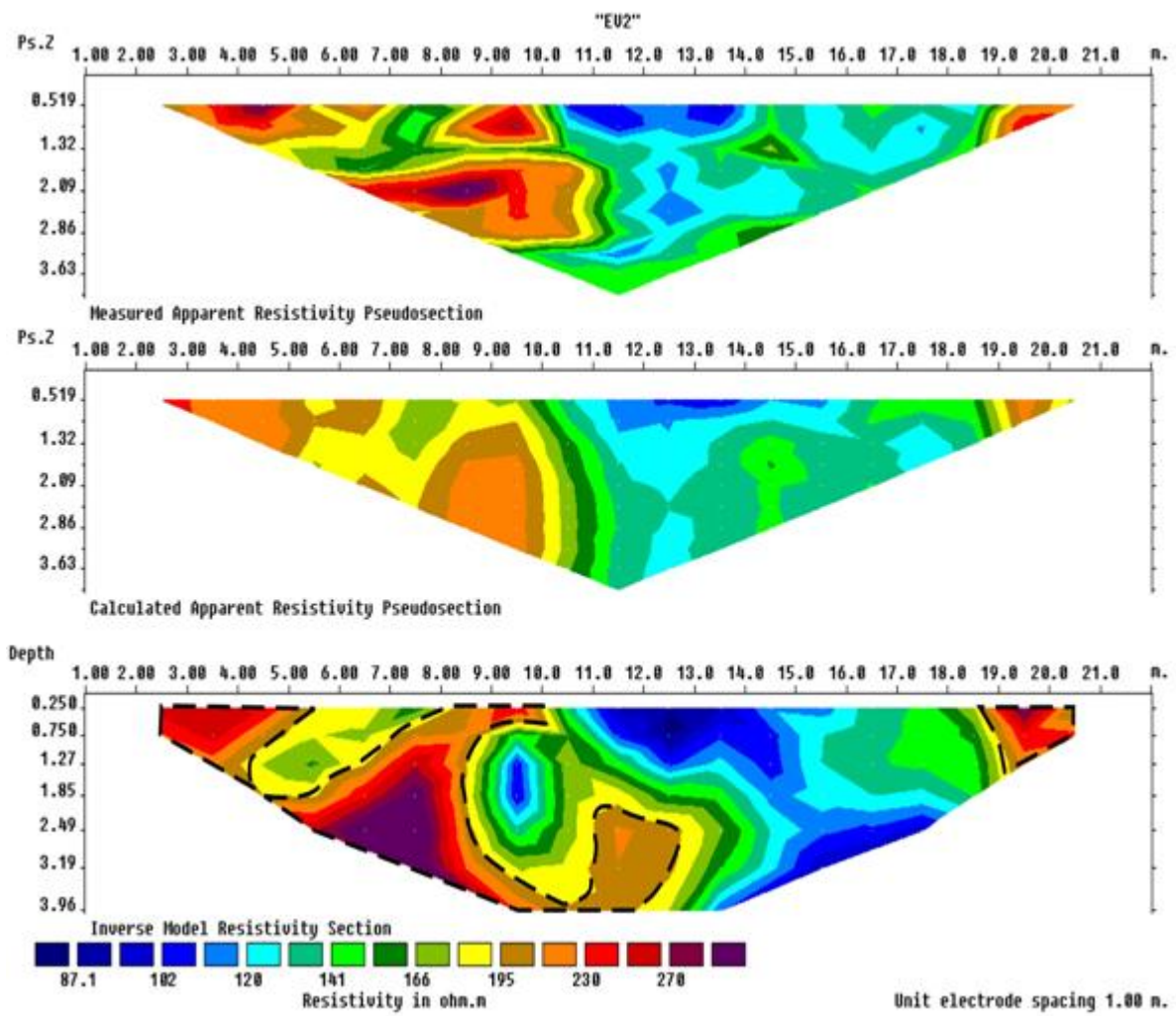


Figure 3.3.11 : Résultat de la tomographie – Profil EV 2

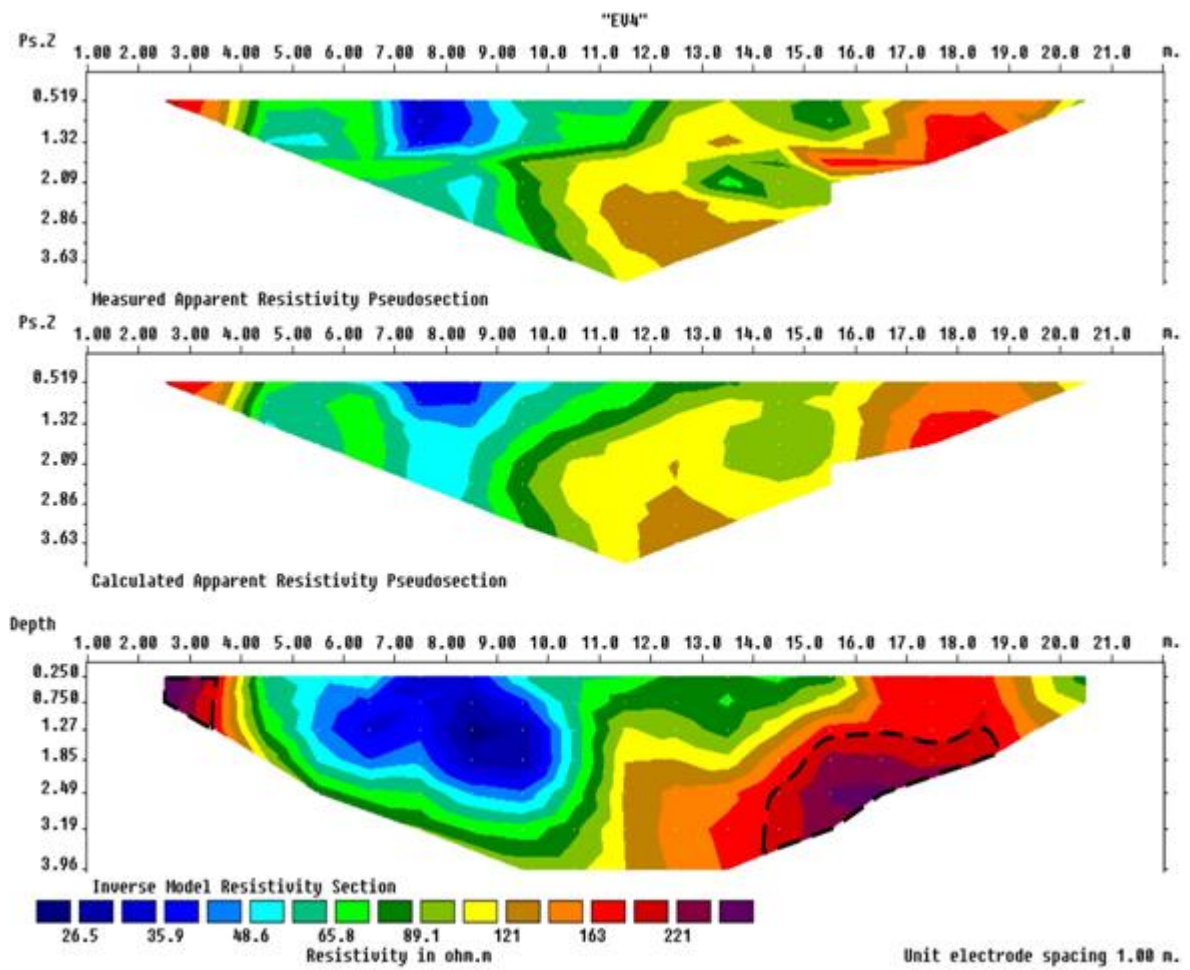


Figure 3.3.12 : Résultat de la tomographie – Profil EV4

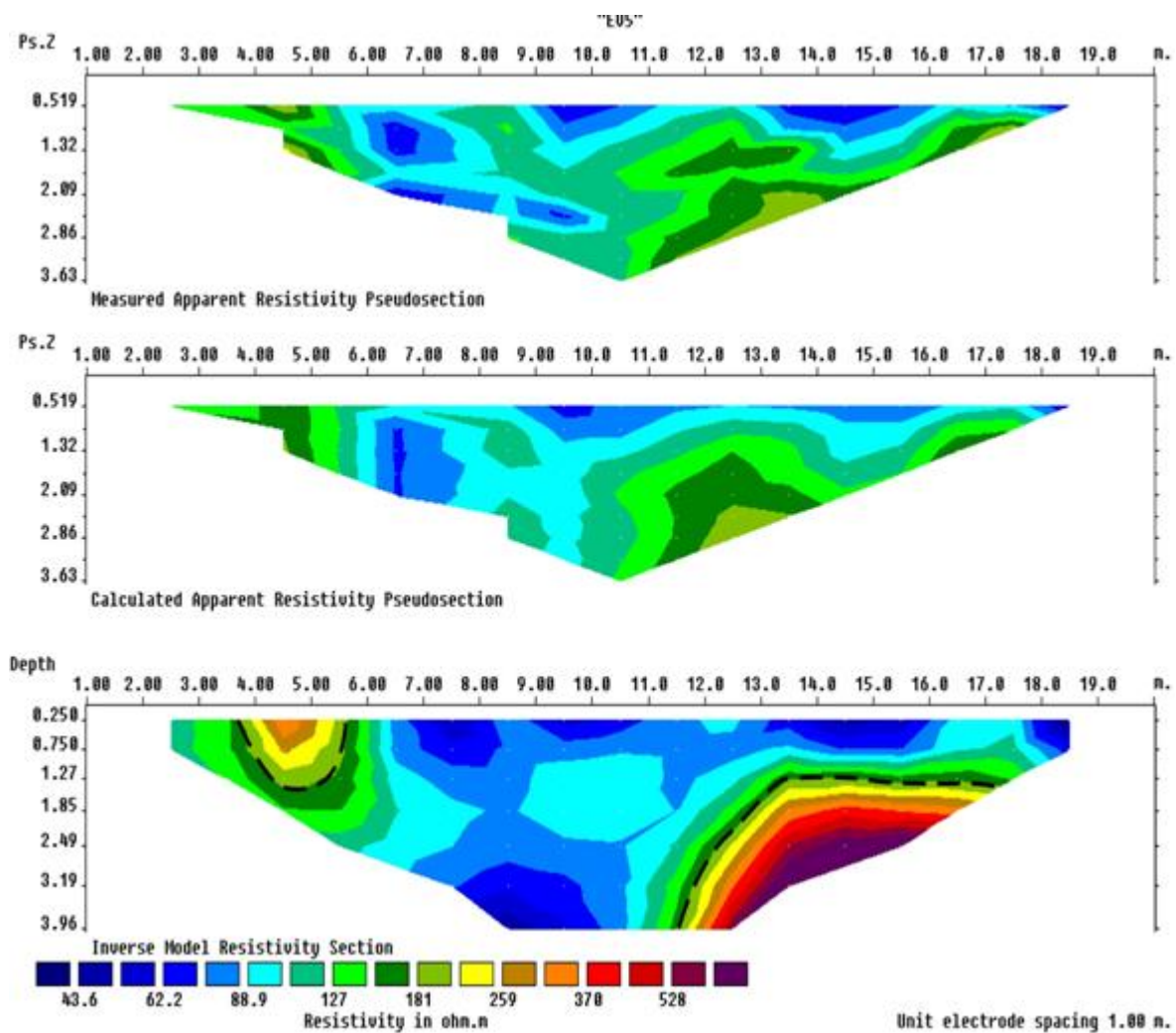


Figure 3.3.13 : Résultat de la tomographie – Profil EV 5

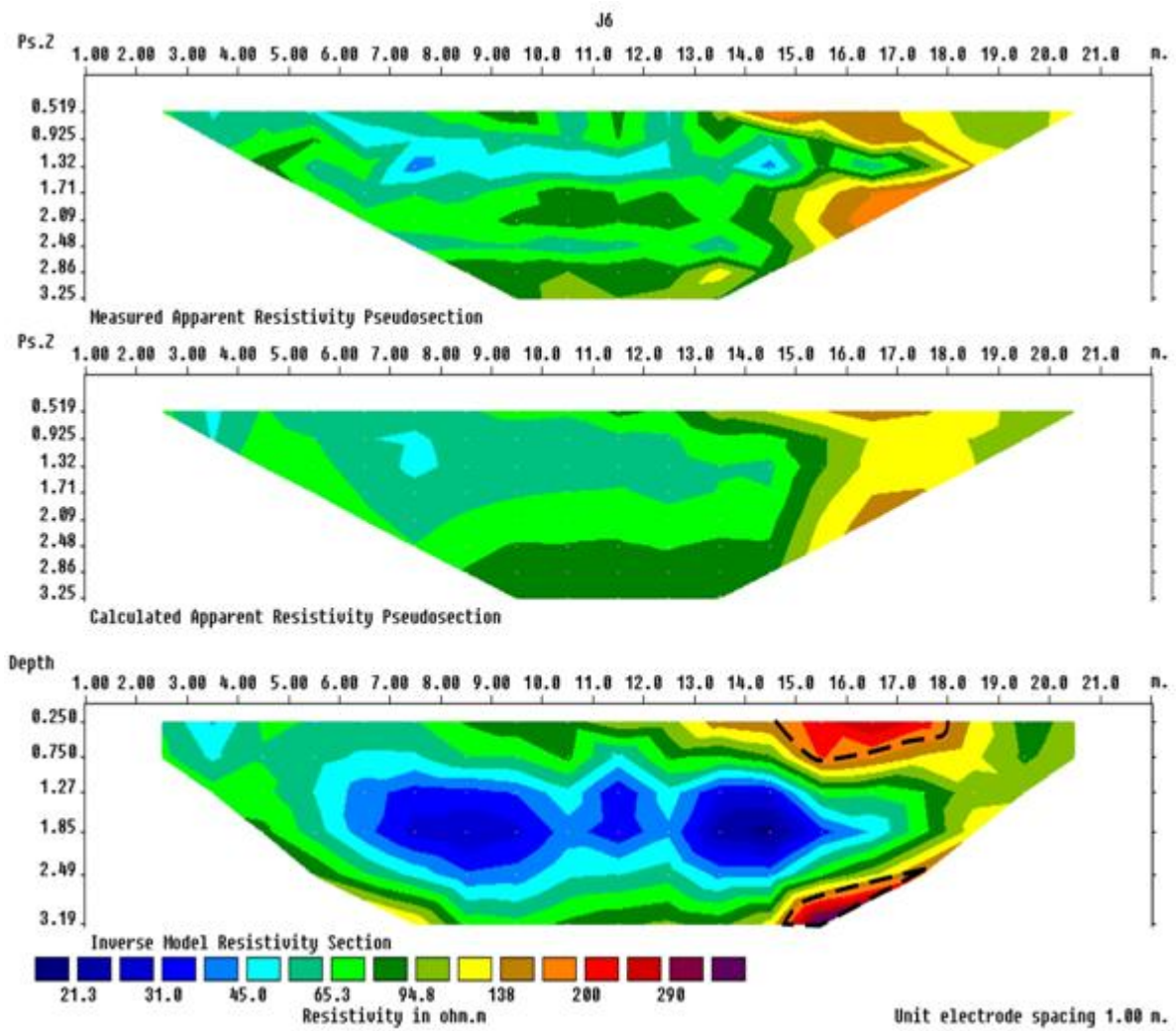


Figure 3.3.14 : Résultat de la tomographie – Profil J 6

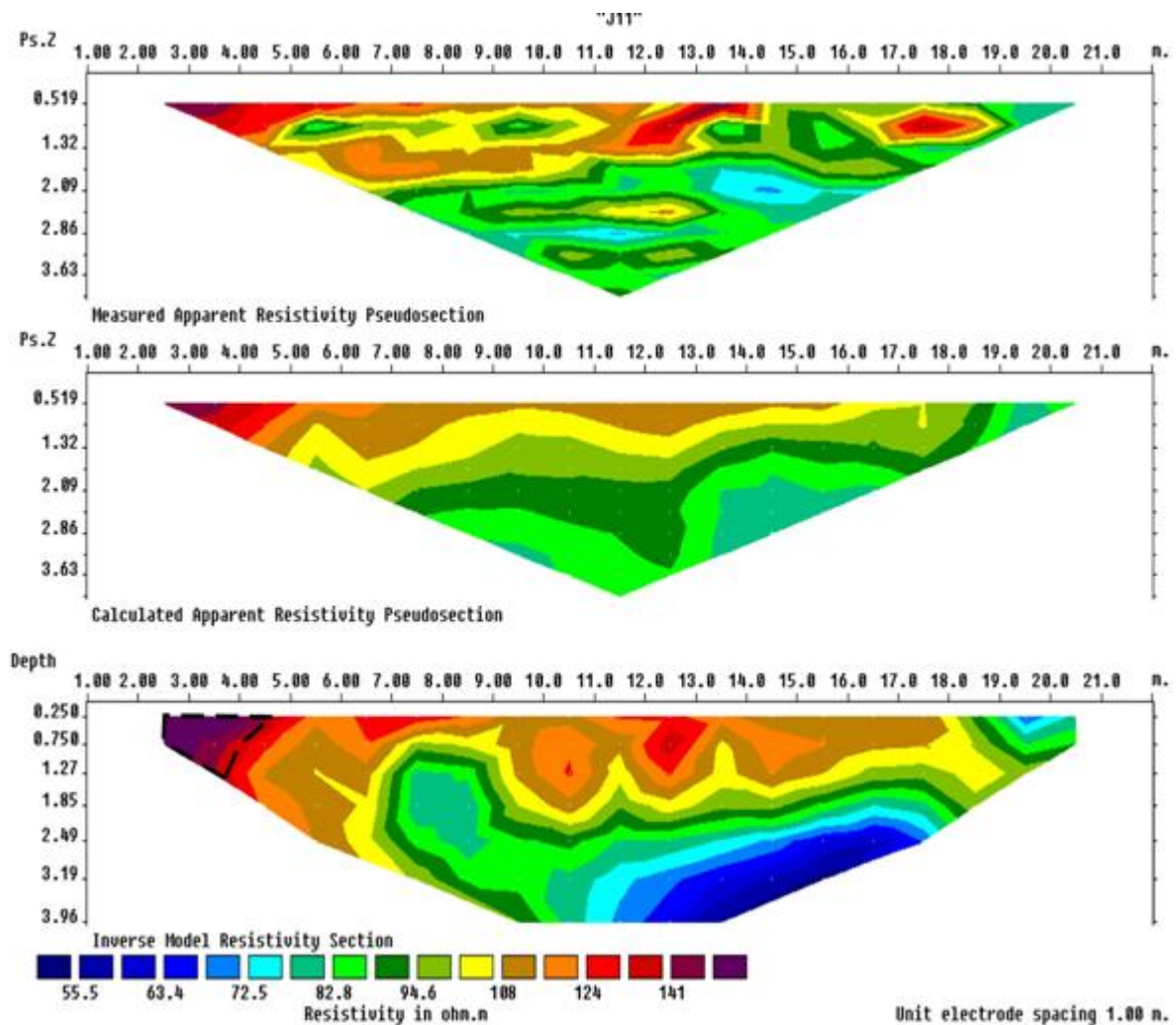


Figure 3.3.15 : Résultat de la tomographie – Profil J 11

D – Synthèse des résultats

Les résultats obtenus sont remarquables de netteté et de précision. Sur les sept premiers profils représentés, la limite verticale entre l'anomalie résistante qui représente la cavité vide et l'environnement plus conducteur, est nette.

Sur les deux derniers au contraire, le comportement est sub-tabulaire et la résistivité est moyenne à faible, en profondeur.

La tomographie électrique apparaît comme une technique particulièrement efficace de détection et de cartographie des cavités vides. La seule vraie difficulté rencontrée est celle de la mise en œuvre ; il peut être en effet difficile d'enfoncer les électrodes dans le revêtement des ruelles et des rues, avec la géométrie souhaitée.

3.4 – Electromagnétisme en champ proche

3.4.1 - Rappel : Principe de l'électromagnétisme en champ proche

Les méthodes électromagnétiques en basses fréquences et en champ proche décrites ici, sont des méthodes utilisant comme émetteur et récepteur des dipôles magnétiques (boucles) verticaux ou horizontaux par rapport au sol. Elles portent le nom courant de méthodes Slingram, qui décrit le dispositif et aussi le nom de méthodes électromagnétiques à faibles nombres d'induction, par opposition aux méthodes à champ lointain, dites à grand nombre d'induction.

La source, c'est-à-dire le dipôle émetteur génère un champ magnétique primaire H_p à une fréquence donnée f , via une bobine d'induction reliée à une source oscillante (Mc Neill, 1980a; 1980b). Le champ magnétique primaire variable dans le temps – sinusoïdal- induit dans le sous-sol conducteur, un courant primaire, dont l'intensité est proportionnelle à la conductivité du milieu. Ce courant primaire crée un champ magnétique secondaire, qui est mesuré par le dipôle magnétique de réception.

Le schéma ci-dessous (fig.3.4.1), extrait d'un manuel de prospection minière (Chouteau, 2001) illustre la détection d'un filon minéralisé conducteur vertical. Il met en évidence les lignes de force des champs magnétiques, primaire et secondaire et le mode de représentation des résultats.

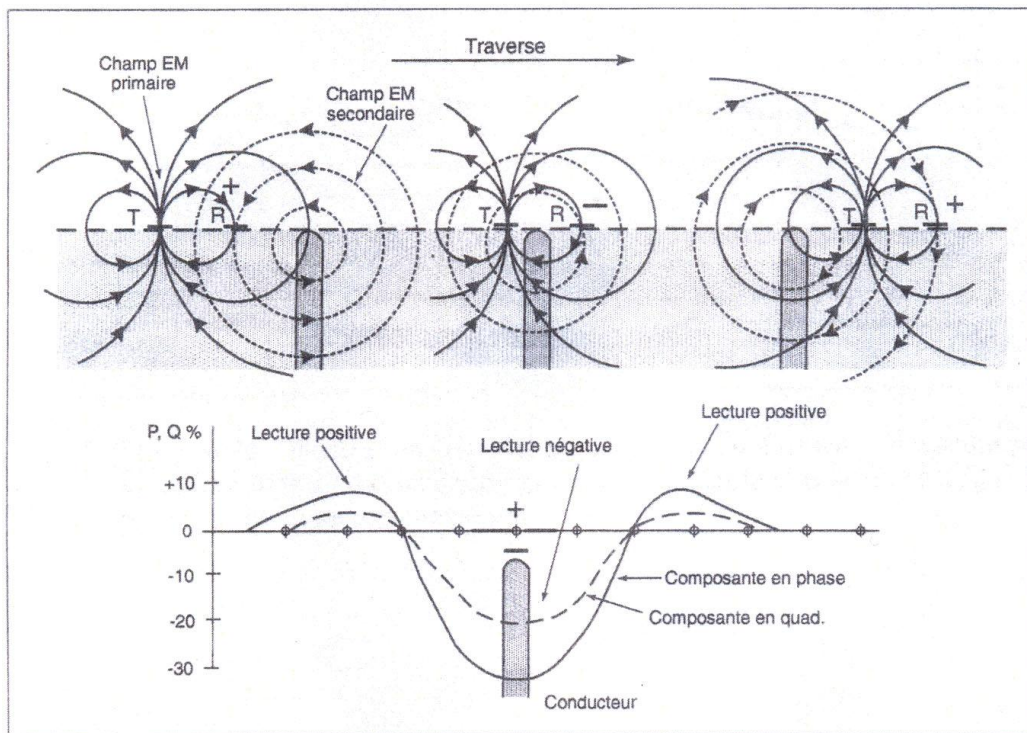


Figure 3.4.1 : Principe des méthodes électromagnétiques en basses fréquences et en champ proche (d'après Chouteau, 2001)

3.4.2 - Grandeurs mesurées

Classiquement, on mesure le rapport de la composante du champ secondaire en quadrature au champ primaire qui va permettre de décrire la distribution des formations conductrices dans le sous-sol en terme de conductivité apparente (inverse de la résistivité apparente).

On peut mesurer également l'anomalie de la composante en phase par rapport à sa valeur dans le vide, exprimée en %.

Dans le type de dispositif de la figure ci-dessus - cas de dipôles magnétiques verticaux, DMV ou VD, ou bobines horizontales HCP - la composante en quadrature est directement proportionnelle au champ secondaire : à une distance s séparant l'émetteur du récepteur très inférieure à une longueur d'onde dans le sol.

Le champ secondaire présente un déphasage de 90° par rapport au champ primaire. Le rapport des champs magnétiques primaire et secondaire en

quadrature, est alors directement proportionnel à la conductivité vraie d'un demi espace homogène.

Dans le cas d'un sous-sol hétérogène, on « mesure » une conductivité apparente du terrain:

$$\frac{|H_s|}{|H_p|} = \frac{NI^2}{2} = \frac{\pi f \mu_0 \sigma_a s^2}{2} \quad \text{et} \quad \sigma_a = \frac{|H_s|}{|H_p|} \frac{2}{\pi f \mu_0 s^2} = \frac{1}{\rho_a} \quad (\text{S/m})$$

Ces méthodes sont dites à faible nombre d'induction. Ce paramètre caractéristique est noté NI et est défini pour ces méthodes par :

$$NI = s/\delta \quad \text{et} \quad \text{ici} \quad NI \ll 1$$

Où δ est l'épaisseur de peau définie classiquement et s la distance émetteur-récepteur.

Remarque: la profondeur d'investigation n'est pas celle définie pour la propagation en champ lointain. Elle est ramenée à la notion de profondeur pour laquelle le dispositif est sensible en champ secondaire lié à la présence d'une cible conductrice.

Ce type d'appareil fonctionne généralement avec des fréquences de l'ordre de quelques kHz. Les distances entre bobines (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) sont telles que la réponse au champ émis, dans la gamme de résistivité apparente des terrains les plus fréquemment rencontrés, se fait en champ proche (le nombre d'induction NI est tel que $NI \ll 1$). Dans ces conditions, seules la distance s entre bobines et leur orientation par rapport à la surface influent sur la profondeur d'investigation.

Ainsi, pour un dispositif à dipôles magnétiques verticaux (DMV ou mode VD ou configuration HCP), la réponse du système $\Phi_v(z)$ à la présence d'une couche conductrice située à une profondeur d est maximale pour une profondeur de l'ordre

de 0,5 fois la distance s ($z=d/S$). Elle est significative jusqu'à **1,5 s** : **c'est la profondeur d'investigation théorique en mode HCP (VD)**.

Pour un dispositif à dipôles magnétiques horizontaux (DMH ou mode HD ou configuration VCP), les couches superficielles contribuent majoritairement à la réponse du système $\Phi_H(z)$. Elle est significative jusqu'à **0,5 s** : **c'est la profondeur d'investigation théorique, en mode VCP (HD)**.

Ainsi, une mesure en mode HCP ou mode VD rend compte de la répartition des conductivités apparentes plus en profondeur qu'en mode VCP ou mode HD, dans l'étude de structures sub-tabulaires.

L'intégration des fonctions Φ en fonction de la profondeur normalisée z donne la réponse cumulative du terrain. Ces courbes permettent d'interpréter les mesures au-dessus de milieux tabulaires lorsque le nombre de couches est connu (Mc Neill, 1980a et 1980b).

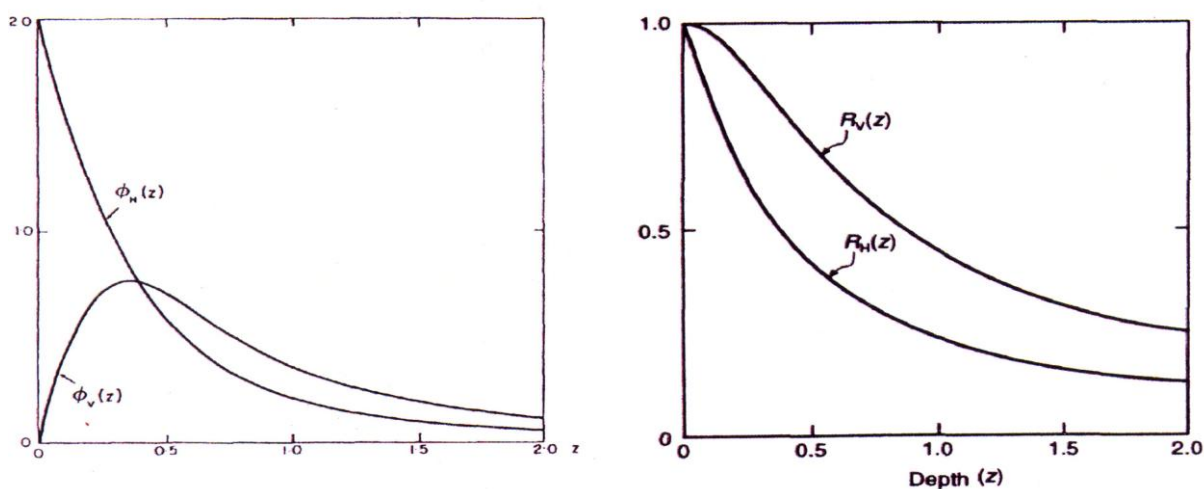


Figure 3.4.2: a) Réponses des dispositifs verticaux et horizontaux à une couche conductrice située à une profondeur d en fonction de la profondeur normalisée $z=d/s$ avec s la distance entre bobines.

b) L'intégration de ces réponses sur la profondeur z , $R_H(z)$ et $R_V(z)$ donne la réponse cumulative de chaque tranche de terrain pour les deux types de dispositif. (Mc Neill,1980).

3.4.3 - Résultats attendus: détection de cavités par méthodes en champ proche

Les résultats attendus sont des profils de conductivité apparente (S/m ou mS/m), qui peuvent être transformés en profils de résistivité apparente (Ωm). La représentation de plusieurs profils parallèles conduit à une carte d'iso valeurs graduées en conductivité ou en résistivité apparente. Les coordonnées horizontales et verticales délimitent la surface prospectée (en m).

A - Détection de cavités conductrices

Ce type de méthode est bien indiqué pour des cavités profondes situées à quelques mètres de profondeur, dans de bonnes conditions de mesures, remplies de matériaux conducteurs ou pour des structures karstiques, et plus particulièrement celles présentant des remontées verticales vers la surface. Des exemples sont reportés par Vogelsang (1987).

B - Détection de cavités vides

Ces méthodes ne sont généralement pas préconisées. Une galerie (1 m x 2 m située à 2.5 m de profondeur) a été testée en méthode Slingram mais n'a pas été détectée directement (Ogilvy and Lee, 1991). C'est le drainage induit par la galerie au niveau de son toit (et donc une anomalie conductrice) qui a permis de la mettre en évidence.

En revanche, pour les vides peu profonds, il existe de nombreux exemples positifs (Reynolds, 2000) lorsque la cavité est plus large que sa profondeur et que le milieu hôte est très conducteur. Ainsi, lorsque la profondeur des cavités est connue et lorsque les dimensions du dispositif sont adaptées (distance entre bobine et orientation des dipôles), les méthodes en champ proche peuvent servir à un premier zonage pour localiser les zones résistantes.

3.4.4 - Méthodologie

A - Domaine d'application

Ces méthodes sont préconisées de manière classique pour la cartographie en milieu peu urbanisé, en particulier pour la recherche de cavités remplies d'un matériau conducteur.

Dans le cas de Béni-Mellal, milieu fortement urbanisé, où les cavités attendues sont vides, donc résistantes, le succès n'était pas garanti. On sait cependant que les cavités sont de grandes dimensions et à faibles profondeurs.

B - Déroulement d'une campagne de mesure

Comme pour toute méthode, sur une carte géo référencée, on définit un ou plusieurs profils au-dessus de la zone de prospection. Le choix de la distance entre boucles permet de cibler une profondeur d'investigation particulière. Elle est indicative et dépend des propriétés du sous-sol que l'on cherche à déterminer.

Pour les dispositifs portables par un seul opérateur, les profondeurs visées sont alors inférieures à 6 à 8 m et le parallélisme entre les deux boucles est continuellement assuré ; c'est le cas de l'EM 31 de Geonics, utilisé à Béni-Mellal. Pour les dispositifs à un opérateur par boucle, les profondeurs visées atteignent 50 m. C'est le cas de l'EM 34 de Geonics, non utilisé à Béni-Mellal ; les dispositions des boucles l'une par rapport à l'autre, et par rapport au sol sont alors nombreuses.

La maille adoptée est couramment de l'ordre de 5 m suivant le niveau de détail souhaité. Le rendement de ces méthodes peut être très grand (2 ha/jour) suivant une maille carrée de 5*5 m sur un terrain dégagé, en acquisition point par point, pour des dispositifs portables par un seul opérateur, maintenus à une hauteur constante au-dessus du sol (Guérin et al., 2002).

C - Interprétation des résultats

L'interprétation des mesures en champ proche reste essentiellement qualitative, sauf pour les milieux tabulaires à 2 voire 3 couches horizontales (Borne, 1990).

La présence d'une anomalie conductrice se traduit par l'augmentation de la conductivité apparente mesurée (donc inversement d'une diminution de la résistivité apparente mesurée). Par ailleurs l'anomalie conductrice se traduit, par

une diminution locale du rapport d'amplitude du champ vertical sur le champ horizontal, en phase et en quadrature.

Pour réaliser une interprétation quantitative, on a recours à d'autres méthodes géophysiques comme les méthodes électriques (Guérin et al., 2002), ou à l'implantation de sondages mécaniques. L'analyse de ces sondages en terme de type de matériau et de profondeur permet d'extrapoler ces propriétés à l'ensemble des profils et apporte une première information quantitative sur l'extension et la profondeur de l'anomalie. Des méthodes de modélisation et d'inversion comme celles décrites dans Ogilvy and Lee (1991) permettent d'affiner l'analyse des résultats dans le cas de structures simples.

D - Limites de la méthode

Les éléments conducteurs environnants (tuyaux, lignes électriques, câbles métalliques...) ont une influence majeure sur les mesures. Dans le cadre des mesures réalisées à Beni Mellal, la méthode est limitée car de nombreux objets métalliques (porte, réseau, câble, poteaux...) étaient présents le long des profils, d'autant plus qu'ils n'ont pas fait l'objet de report précis sur cartes.

E - Equipement Slingram utilisé - réglages

Le matériel utilisé est l'EM31 de la société Geonics (fig. 3.4.3). L'ensemble des mesures est enregistré sur un ordinateur intégré directement relié à l'appareil, et permettant de gérer l'acquisition des données.

Dans le cadre de cette étude, l'EM31 a été utilisé en mode VD pour tous les profils, et en mode HD pour quelques uns seulement, soit pour des profondeurs d'investigation théoriques respectives de 0 à 6 m et de 0 à 3 m. Toutes les mesures ont été réalisées avec le dispositif «porté», soit en moyenne à 1 m au-dessus de la surface du sol.

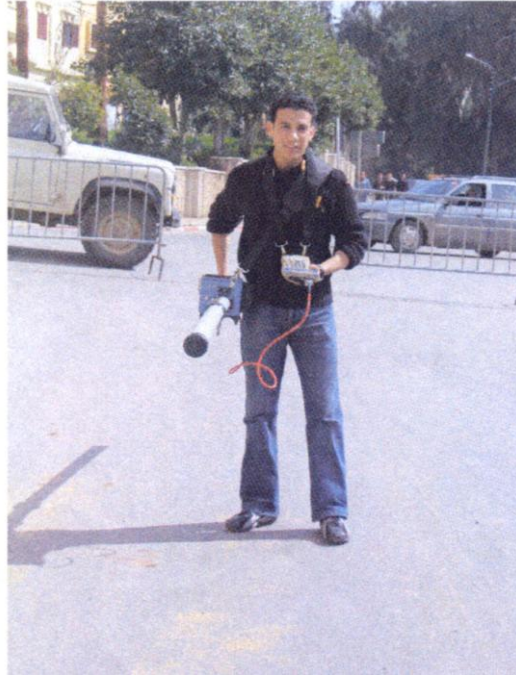


Figure 3.4.3 : Acquisition à l'EM31 avec un opérateur

3.4.5 Etude de la zone expérimentale de la médina

A – Programme de mesure

Plusieurs profils ont été réalisés dans les ruelles et dans les rues, le long des profils radar notamment (fig. 3.4.4).

Une cartographie de la place An Anzaram a également été réalisée.

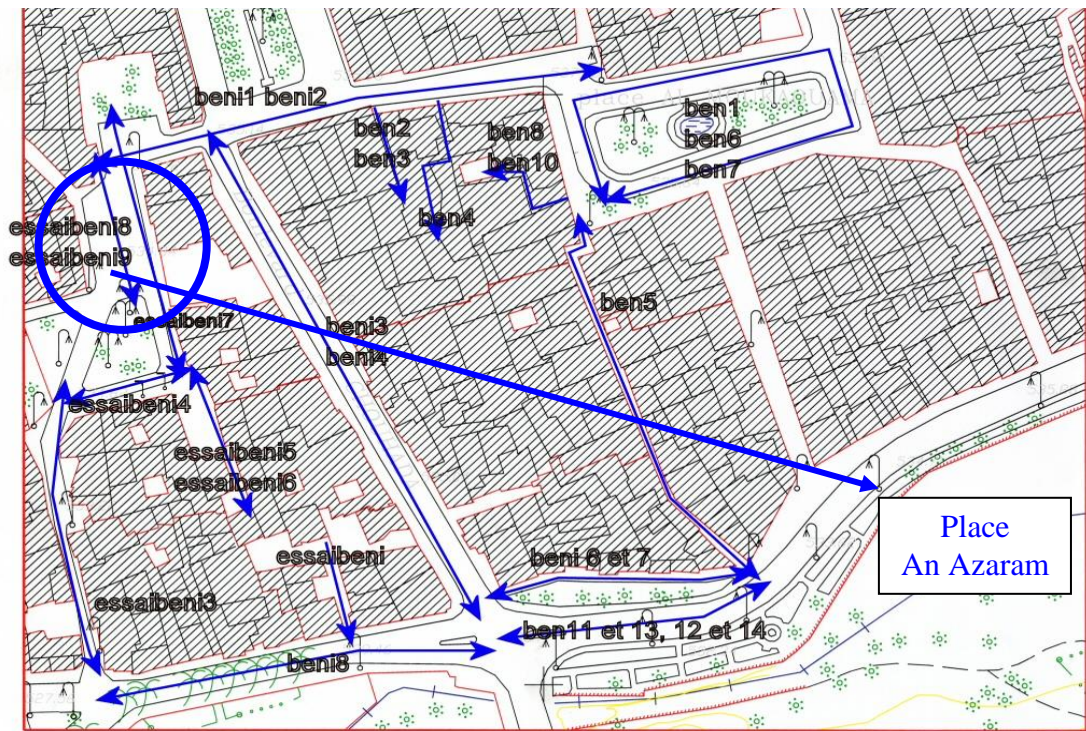


Figure 3.4.4 : Localisation des profils EM 31

B – Résultats le long des profils

Les résultats sont représentés avec une échelle logarithmique pour la conductivité apparente (axe situé à gauche, sur les figures) et avec une échelle linéaire pour les anomalies de la composante en phase, exprimée en % (axe situé à droite). Pour ces deux grandeurs, les valeurs sont croissantes vers le bas, de façon à ce que les anomalies résistantes apparaissent comme des « bosses », comme il est de coutume dans les techniques à courant continu.

L'axe des abscisses représente les distances le long des profils, exprimées en mètres.

Cinq profils types sont représentés, à titre d'illustration de l'efficacité et des limites de la méthode. Sur le plan de position (fig.3.4.4), ce sont les profils nommés «essaibeni 1» à «essaibeni 7» ; sur les figures ce sont les profils «EBM 1» à «EBM 7». Un seul a été enregistré dans les deux modes (EBM 5H et EBM 5 V) (fig. 3.4.7 et 3.4.8).

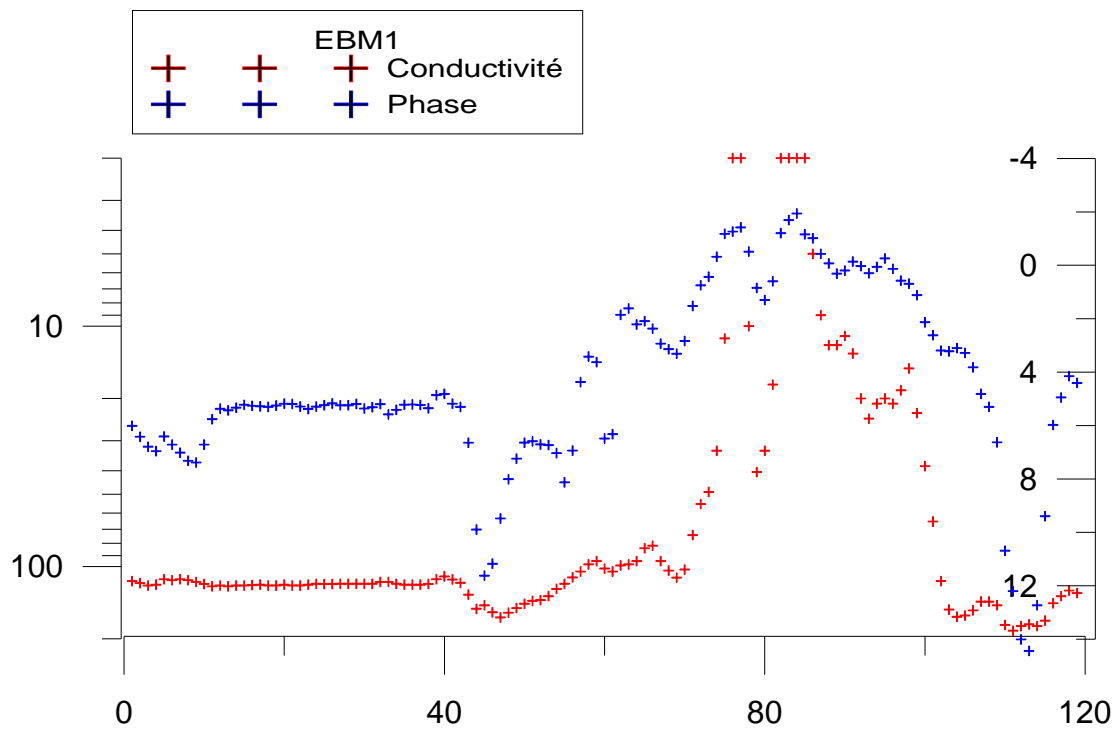


Figure 3.4.4 : Profil électromagnétique EBM1 (VD)

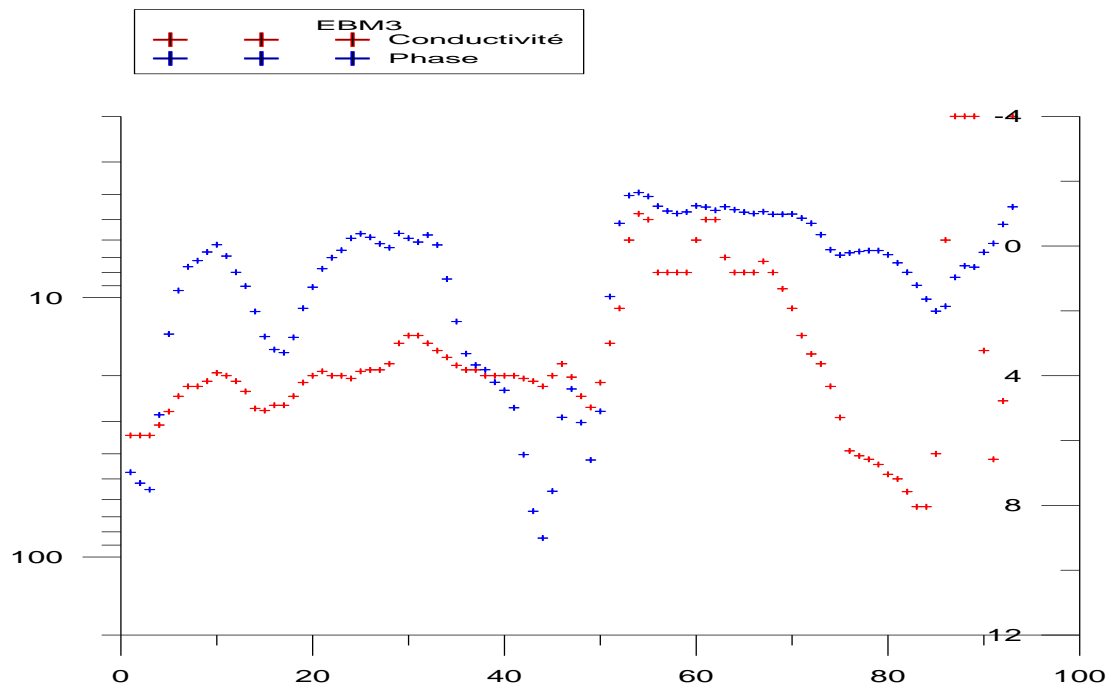


Figure 3.4.5 : Profil électromagnétique EBM 3 (VD)

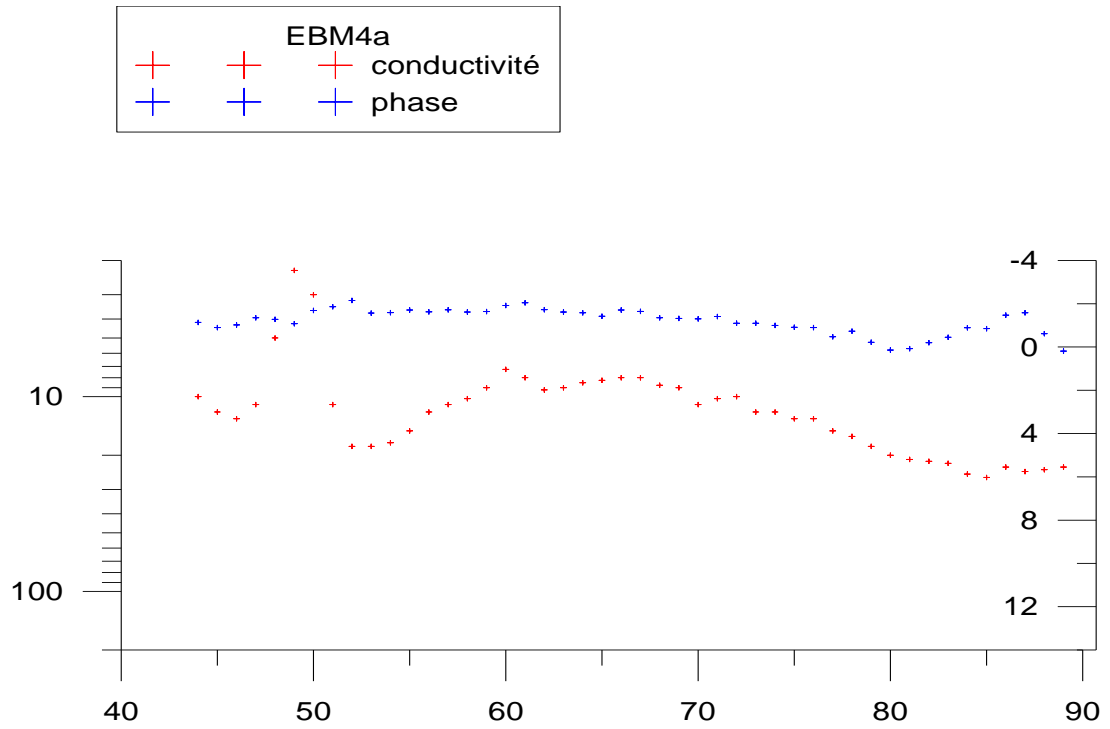


Figure 3.4.6 : Profil électromagnétique EBM 4 (VD)

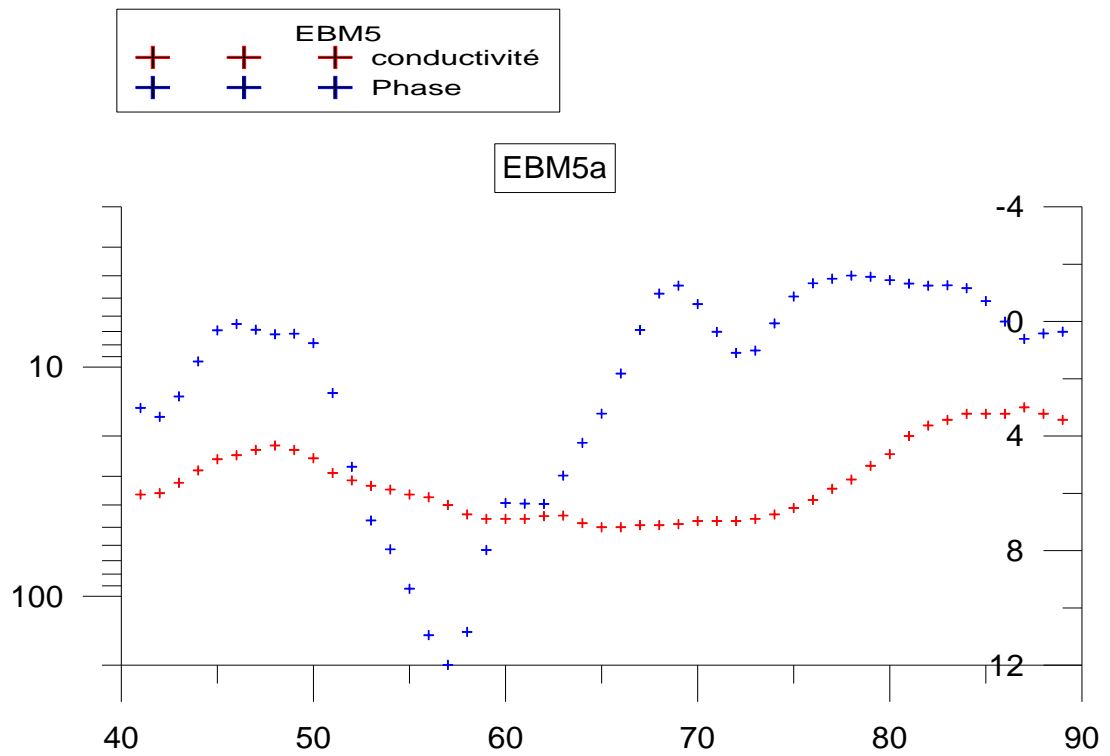


Figure 3.4.7 : Profil électromagnétique EBM 5H (HD)

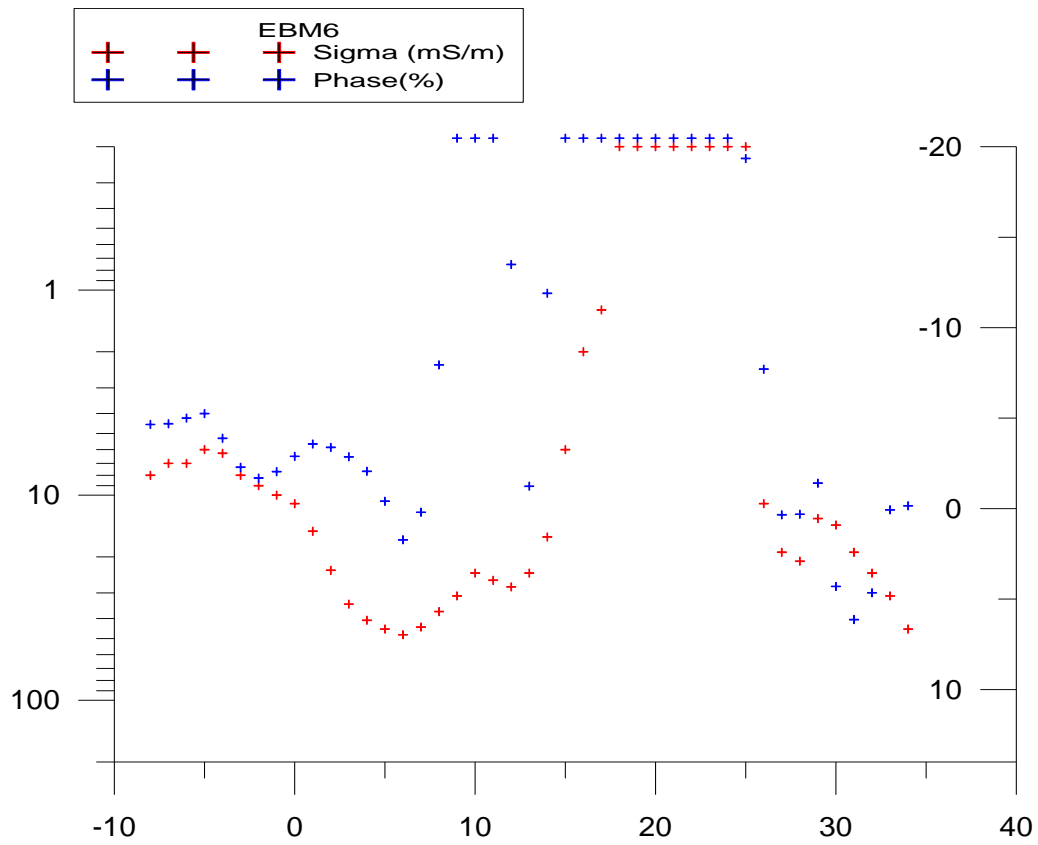


Figure 3.4.8 : Profil électromagnétique EBM 5V (VD)

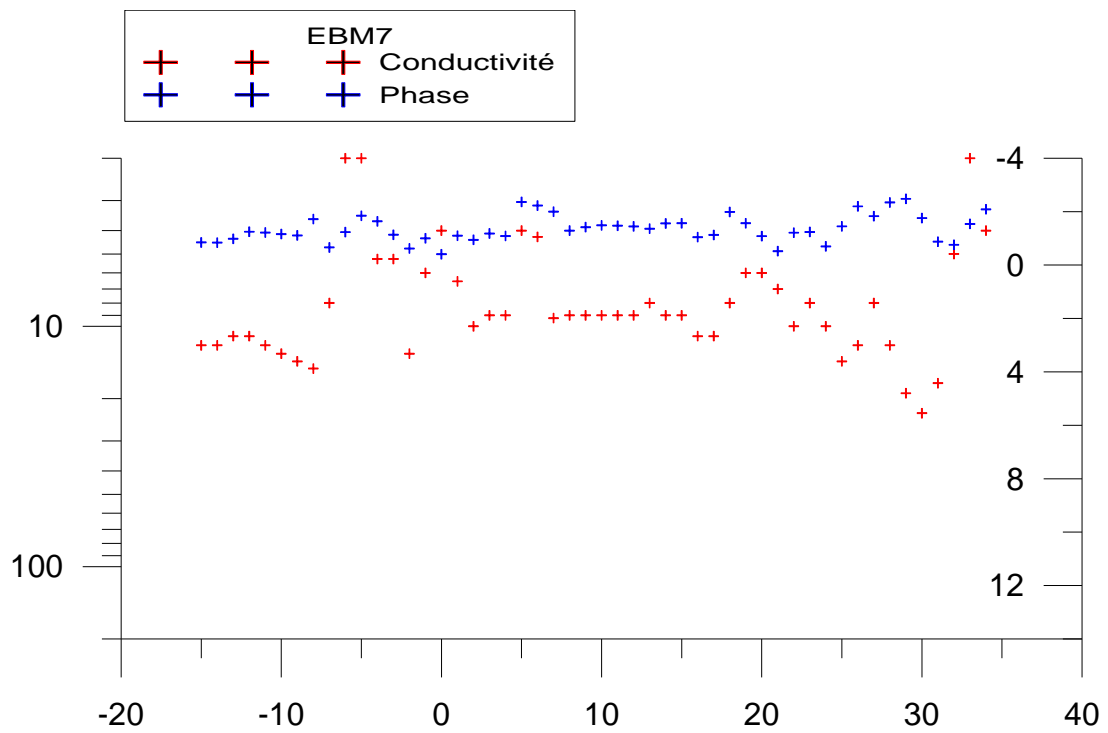


Figure 3.4.9 : Profil électromagnétique EBM 7 (VD)

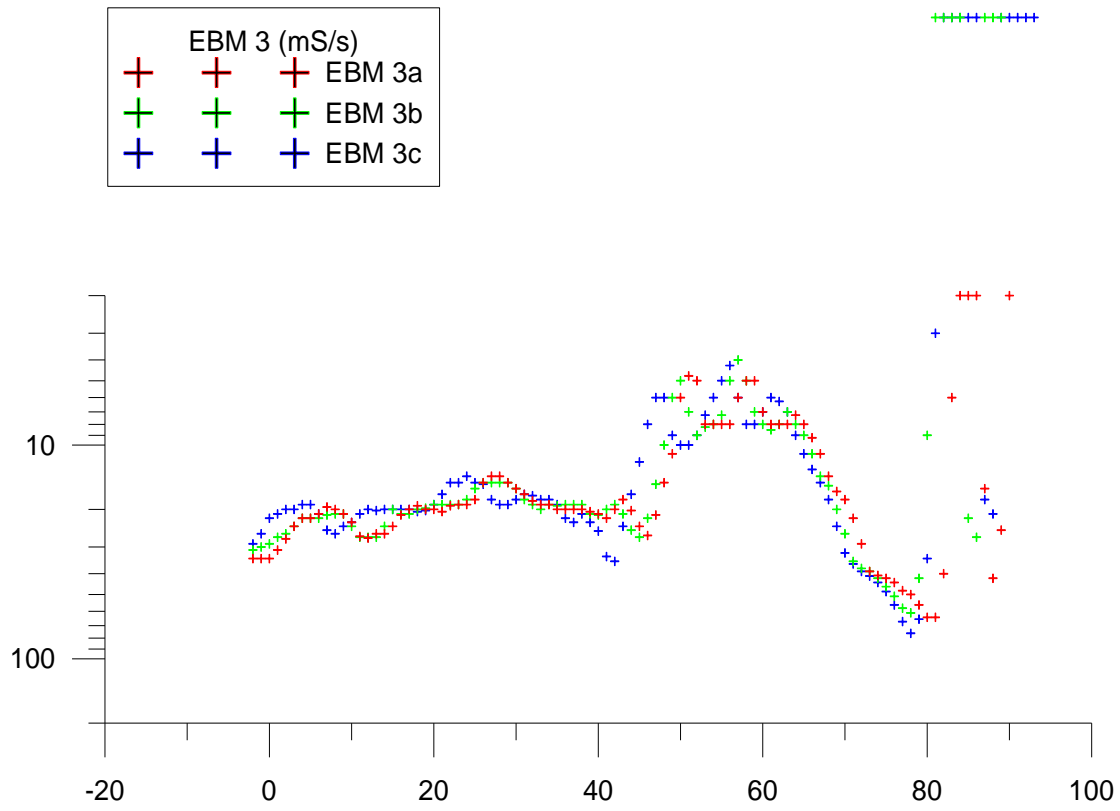


Figure 3.4.10 : EBM 3 (VD) – Répétitivité (conductivité)

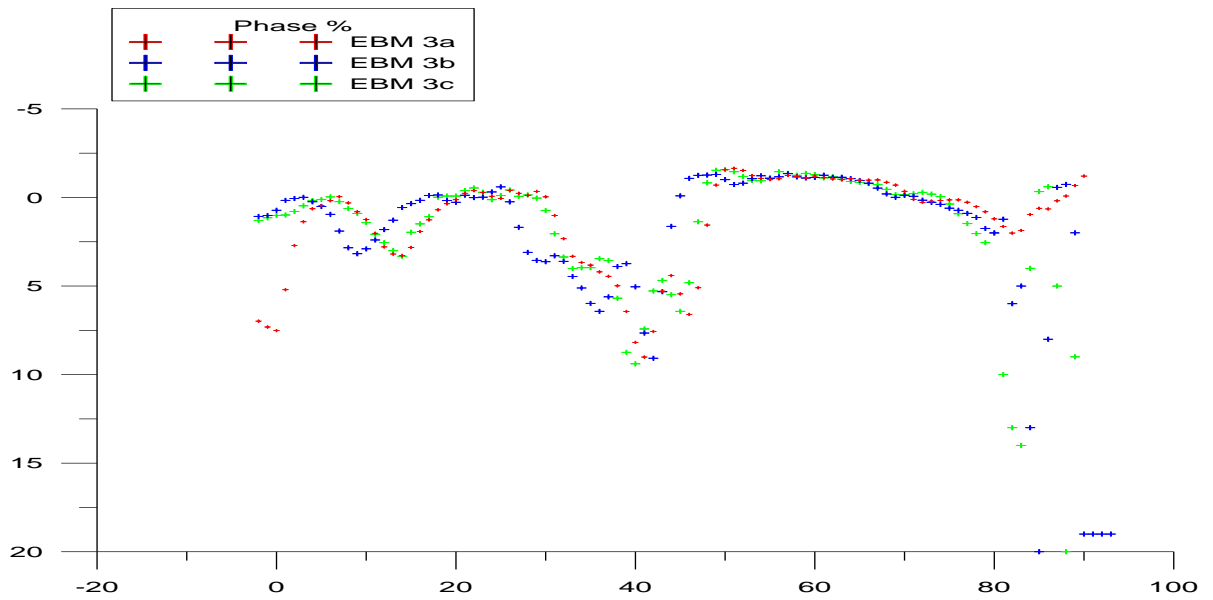


Figure 3.4.11 : EBM 3 (VD) – Répétitivité (phase)

En mode VD, où l'on s'intéresse aux composantes verticales du champ magnétique, la sensibilité aux contacts verticaux est maximale. Pour trois profils (fig. 3.4.4, 3.4.5 et 3.4.8), on note des valeurs anormales très faibles de la conductivité, atteignant 1 mS/m. (*En réalité on enregistre des valeurs négatives de conductivité apparente, ce qui est équivalent à un déphasage de 180°, mais ces valeurs négatives, en raison du choix de l'échelle logarithmique ont été remplacées par une valeur seuil positive égale à 0,2 mS/m, ce qui correspondrait à une valeur de résistivité de 5 000 ohm.m*).

Avec les conventions choisies pour les échelles respectives, pour le mode VD toujours, on note une bonne similarité entre la courbe de conductivité et celle de la composante en phase, avec peut-être une sensibilité accrue aux effets de bord semble-t-il, pour cette dernière.

Pour le profil EBM 5, la différence de comportement de la conductivité apparente entre les deux modes est confirmée et correspond aux résultats connus des modélisations 3D (fig.3.4.7 et 3.4.8).

Enfin, les résultats des essais de répétitivité sont très satisfaisants (fig. 3.4.10 et 3.4.11), sachant que les mesures ont été prises à des intervalles de temps réguliers et non à des distances régulières.

Certes, il faut toujours se méfier des effets des conducteurs anthropiques, (portes métalliques, regards...) car un conducteur infiniment étroit conduit à une anomalie de largeur égale à la distance émetteur / récepteur, soit 3,69 m pour l'EM 31. Les anomalies de grande amplitude et de largeur de l'ordre de 10 à 20 m sont, en revanche, très vraisemblablement significatives.

En résumé, l'EM 31 en mode VD semble confirmé comme un bon détecteur de contacts verticaux entre un conducteur très moyen – de 30 à 100 ohm.m. - et le vide.

C – Cartographie

À titre expérimental, la cartographie en mode HD et VD de la place Bir Anzaran a été réalisée, au moyen de 4 profils longitudinaux et 8 profils transversaux. Le pas de mesure sur chaque profil était légèrement inférieur à 1m.

Les deux cartes obtenues sont cohérentes. Elles montrent une structure générale sub-tabulaire, avec un môle légèrement résistant dans l'axe longitudinal, qui devient plus conducteur en profondeur. Les anomalies ponctuelles qui se superposent sont d'extension inférieure à 5m; elles sont interprétées a priori comme des bruits.

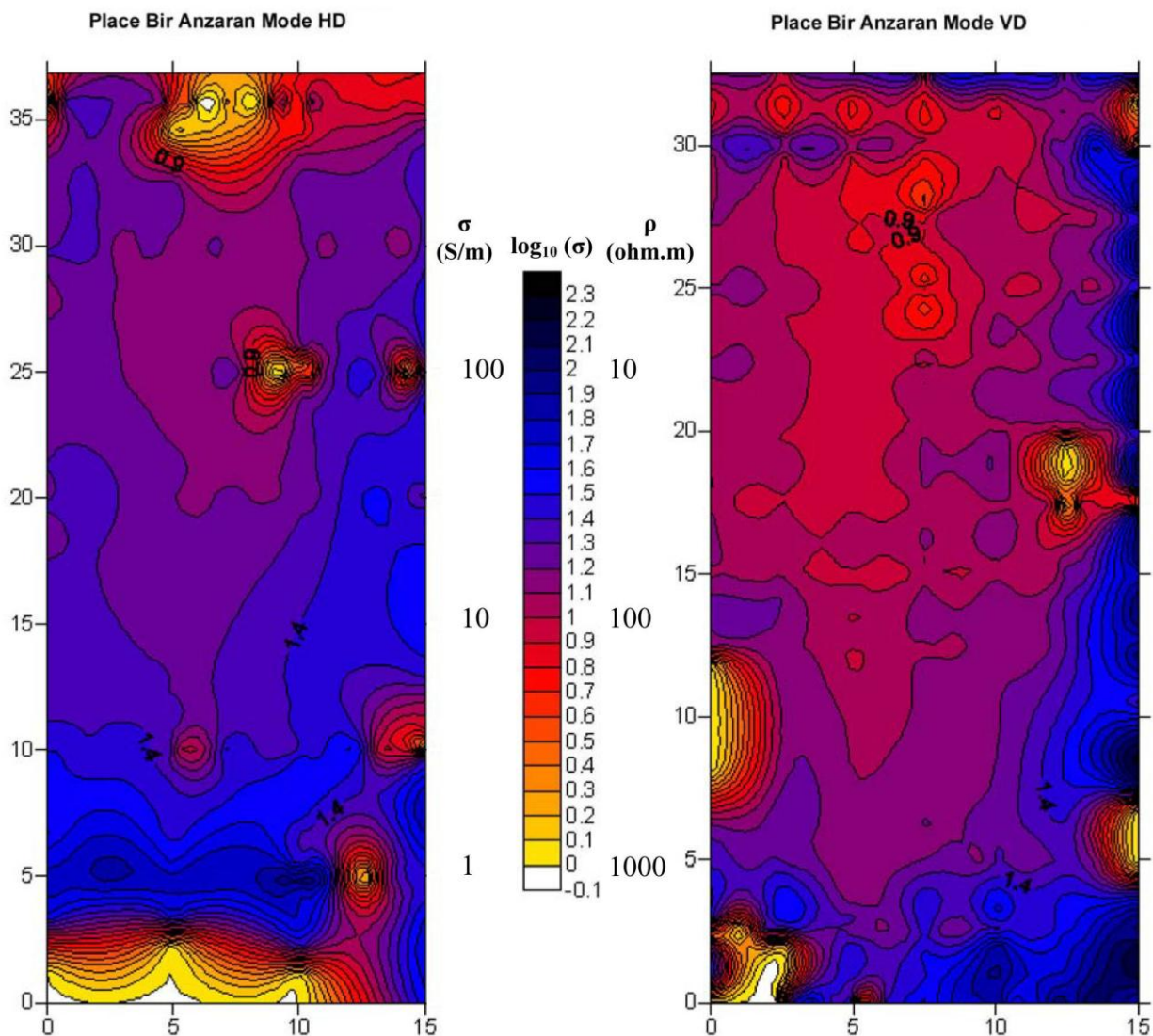


Figure 3.4.12 Cartographie de la place Bir Azaram

D – Synthèse des résultats

L'EM 31 confirme ses qualités d'outil de reconnaissance rapide pour la cartographie de structures subtabulaires des 5 premiers mètres du sous-sol, mais aussi et surtout ses qualités de détecteur de contacts verticaux entre des formations relativement résistantes, pourvu que la résistivité de l'une d'elles soit inférieure à 100 ohm.m, ce qui permet de faire circuler un courant d'intensité telle, que son champ magnétique soit mesurable.

Chapitre 4

Le Radar géologique

Corrélation entre les différentes méthodes

4.1 – Le radar géologique

4.1.1 Rappel – Principe

Les méthodes de reconnaissance radar en géophysique sont basées sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol dans un domaine de fréquences variant de quelques dizaines de MHz (pour les applications de sub-surface) à quelques GHz (pour les applications du génie civil).

Ces ondes sont émises sous forme d'impulsions temporelles de très courte durée, en un point de la surface par une antenne émettrice. Elles interagissent avec le milieu en créant des phénomènes de conduction et de polarisation qui dépendent de la permittivité complexe effective ϵ^*_c des matériaux rencontrés.

$$\epsilon^*_c = \left(\epsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - j \left(\epsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right)$$

où ϵ' et ϵ'' sont les parties réelle et imaginaire de la permittivité, σ' et σ'' les parties réelle et imaginaire de la conductivité et ω la pulsation de l'onde.

Dans la plupart des matériaux rencontrés dans le génie civil, les termes σ'' et ε'' sont négligés. Aux fréquences radar, dans des milieux faiblement conducteurs comme le calcaire par exemple, ces termes sont faibles, seule ε' influence notablement sur la propagation des ondes: les phénomènes de polarisation dominant. C'est le cas des sols rencontrés dans la médina de Béni Mellal. Dans les milieux plus conducteurs, les phénomènes de conduction (σ') dominant, les ondes sont rapidement atténuées dans le milieu et la méthode radar n'est plus préconisée.

Lorsque les ondes rencontrent une surface séparant deux milieux de constante diélectrique différente, elles se réfléchissent partiellement (selon la loi de Snell-Descartes) L'étude des ondes réfléchies qui atteignent la surface du sol où elles sont captées par une antenne, puis enregistrées et analysées permet de caractériser les propriétés du sous-sol (fig. 4.1.1.1).

En mode monostatique, la même antenne fait office d'émetteur et de récepteur. En mode bistatique, il y a une antenne émettrice et une antenne réceptrice distinctes. Des dispositifs avec un plus grand nombre d'antennes sont aussi utilisés.

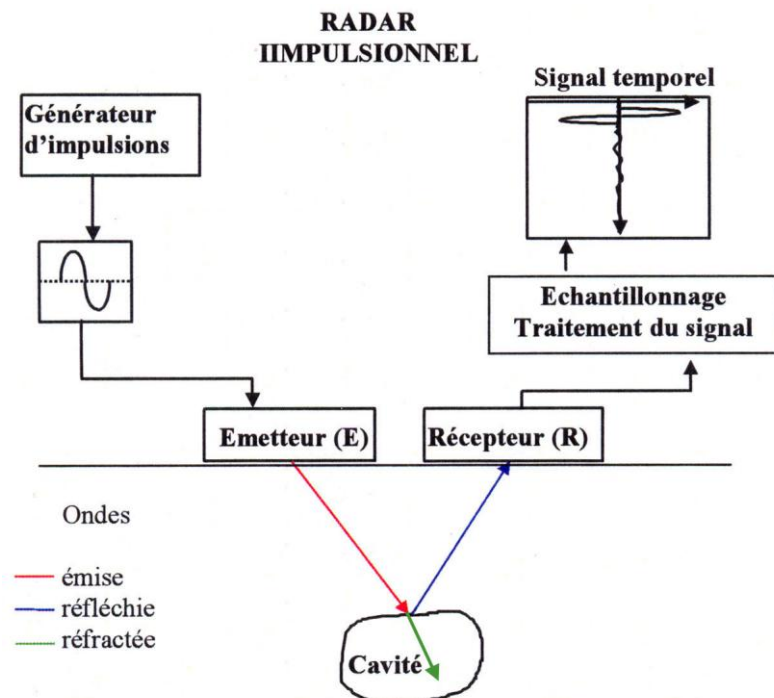


Figure 4.1.1.1 : Principe de la méthode radar

La propagation des ondes électromagnétiques dans le sous-sol est régie par les équations de Maxwell (Chew, 1990), (Daniels *et al.*, 1988), (Daniels, 1996) et (Davis et Annan, 1989).

Les ondes électromagnétiques sont fortement influencées par le milieu dans lequel elles se propagent. Leurs caractéristiques varient suivant les propriétés diélectriques et spatiales des hétérogénéités rencontrées dans le sol (Hollender, 1999). En génie civil, les sols rencontrés ont des propriétés physiques et en particulier diélectriques, très différentes, suivant leur nature et leur composition (Gueguen et Palciauskas, 1992).

4.1.2. Grandeurs mesurées

On mesure les variations d'amplitude du champ électrique issu des réflexions et des diffractions sur les contrastes diélectriques du milieu en fonction du temps de propagation des ondes dans le milieu mesuré en nanosecondes (fig. 4.1.2.1).

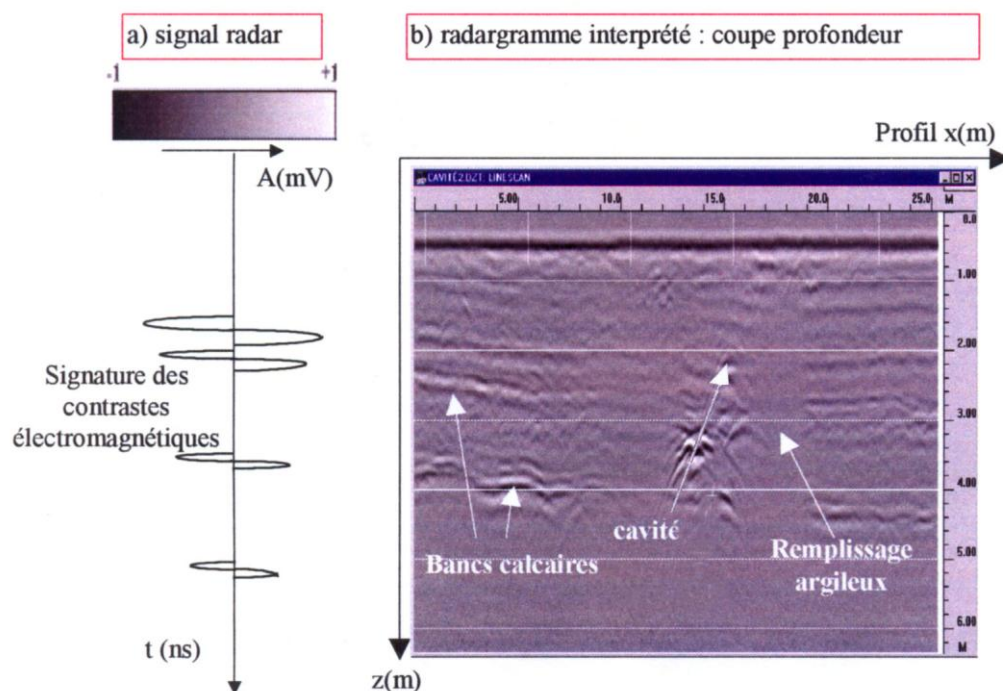


Figure 4.1.2.1 : a) Signal radar et b) exemple de radargramme interprété, $f_c=200$ MHz (Doc. LRPC Saint Briec)

4.1.3. Résultats attendus

Le premier résultat obtenu est un «radargramme brut», appelé aussi «coupe temps». Il est similaire aux représentations obtenues en sismique réflexion: l'amplitude de chaque signal, graduée en niveau de couleur, est donnée en fonction du temps de propagation (ns) et les signaux sont juxtaposés en fonction de la position en surface.

Le deuxième résultat obtenu est le «radargramme interprété» appelé aussi «coupe profondeur» : la connaissance, ou des hypothèses sur les vitesses dans le milieu, permettent de transformer l'échelle des temps (ns), en échelle de profondeurs (m).

La réalisation de plusieurs profils voisins permet de visualiser les mesures en trois dimensions (surface auscultée en coordonnées horizontales et profondeur en coordonnées verticales), par des coupes horizontales à une profondeur donnée et des coupes verticales selon un profil donné, ou mieux encore, par un bloc diagramme à trois dimensions.

4.1.4. Détermination des vitesses

Pour connaître les vitesses dans le milieu, il faut évaluer ou connaître la permittivité et la conductivité des matériaux considérés généralement à faibles pertes. La grandeur traduisant ces pertes est notée $\tan \delta$. Elle est définie par :

$$\tan \delta = \frac{\sigma'}{\omega \varepsilon'_r}$$

(si $\varepsilon'' = \sigma'' = 0$)

Aux fréquences utilisées pour le radar géologique, les milieux à faibles pertes sont tels que:

$$\tan \delta \ll 1$$

«L'épaisseur de peau» dans ce cas est définie par :

$$d = \frac{2}{\sigma'} \sqrt{\varepsilon'_r \mu_0} \quad (\text{m})$$

La vitesse des ondes électromagnétiques est alors approchée par la formule suivante:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$$

où ϵ'_r est la permittivité relative réelle liée aux phénomènes de polarisation des charges liées. Cette grandeur est une caractéristique du matériau, dont les valeurs ont pu être mesurées par des méthodes directes ou indirectes, au laboratoire ou in situ, pour différentes fréquences.

4.1.5. Détermination des profondeurs et des épaisseurs

Les profondeurs des réflecteurs, donc les épaisseurs des différentes couches sont généralement et simplement déduites à partir de la vitesse estimée dans le milieu et du pointé des temps de trajet associée aux hétérogénéités (interfaces entre deux couches, toit d'une cavité. . .) sur le radargramme.

Les épaisseurs peuvent théoriquement également être déduites, soit à partir du rapport entre les amplitudes réfléchies et les amplitudes incidentes (cas des milieux tabulaires), soit par des analyses de vitesse, ou par des inversions de temps de trajet lorsque les mesures sont réalisées en mode bistatique, en écartant symétriquement les antennes par rapport à un point milieu commun (CMP) (Fauchard, 2001).

4.1.6 Traitements spécifiques

D'autres traitements spécifiques sont utilisés pour l'interprétation des mesures. Ainsi la **déconvolution** permet d'affiner les échos associés aux contrastes. Elle est d'autant plus efficace si le signal émis et certaines propriétés du sous-sol sont connus. **La migration** des signaux permet d'éliminer les branches d'hyperboles, gênantes pour l'interprétation, tout en localisant les amplitudes sur la position des anomalies. **Des filtrages** permettent de sélectionner les fréquences les plus porteuses d'information, de minimiser le bruit enregistré, d'éliminer les réflexions multiples (Daniels *et al.*, 1988) ; (Leparoux, 1997).

4.1.7. Détection de cavités par méthodes radar

La signature d'une cavité apparaît comme un contraste d'amplitude plus ou moins prononcé sur le radargramme brut. Il est lié au rapport entre les permittivités effectives de l'encaissant et de la cavité, et il est fonction de l'atténuation intrinsèque de l'encaissant.

Ce contraste est relativement élevé pour une cavité vide (fig. 4.1.2), puisque la permittivité relative de l'air est de 1 et celle de la plupart des matériaux géologiques est au moins égale à 4 (Tableau 4.1). Le signal associé à la présence d'une cavité présente souvent des hyperboles de diffraction issues des réflexions sur les bords de la cavité.

Le contraste serait encore plus élevé si la cavité était ennoyée puisque la permittivité relative de l'eau est égale à 81, mais ce n'est pas le cas à Béni-Mellal.

En revanche, le signal est fortement atténué lorsque les ondes traversent un milieu rempli de matériaux conducteurs comme les argiles (fig. 4.1.2).

Roches	Conductivité (S/m)	Résistivité ($\Omega \cdot m$)	Permittivité (relative réelle)
Argiles	10^{-3} -2	0,5-1000	8-12
Basaltes	10^{-4} - 10^{-3}	10^3 - 10^4	5-7
Calcaire sec	10^{-4} - 10^{-3}	10^3 - 10^4	6-8
Granite	$7 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-3}	10^3 - $1,5 \cdot 10^4$	5-6.5
Grès	$3 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-3}$	500- $3 \cdot 10^3$	4-5
Quartzites	10^{-4} - 10^{-3}	10^3 - 10^3	4-5
Sables secs	10^{-7} - 10^{-3}	10^3 - 10^7	4-6
Sables saturés d'eau douce	10^{-4} - 10^{-1}	10 - 10^4	30
Sel	10^{-6} - 10^{-5}	10^5 - 10^6	5-6
Glace	10^{-6} - $3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^4$ - 10^6	3.2
Eau douce	10^{-6} - 10^{-4}	10^4 - 10^6	81
Eau salée (salinité 32‰)	3	0,3	77
Air	0	∞	1

Tableau 4.1 : Valeur des permittivités relatives réelles et des conductivités de quelques matériaux

4.2. Méthodologie

4.2.1. Domaines d'application

La méthode radar est préconisée pour la recherche de vides et de conducteurs en milieu résistant, comme l'environnement calcaire et détritique relativement grossier et sec de la médina de Béni Mellal, dans les dix à vingt premiers mètres. L'expérience montre que la profondeur d'investigation n'est que de quelques mètres dans les milieux géologiques couramment rencontrés, y compris pour les radars géologiques aux fréquences les plus basses..

Les profondeurs d'investigation peuvent être notablement plus grandes dans des milieux particuliers, tels que les glaciers et inlandsis par exemple.

Les conditions de détection imposent donc un encaissant résistant à faible perte par conduction ($\rho > 100 \Omega.m$ et $\tan \delta \ll 1$). La méthode est donc conseillée par exemple dans les calcaires secs et déconseillée dans les milieux conducteurs comme les limons et les argiles saturés en eau.

4.2.2. Déroulement d'une campagne de mesure

Sur une carte géo-référencée, les mesures sont réalisées en continu suivant un ou plusieurs profils parallèles, distants de 2 à 5 m, ou plus ou moins , suivant les applications visées et la taille de la zone de prospection. Selon le matériel et les conditions, le dispositif est porté par l'opérateur ou traîné par un véhicule. Dans le cas de Beni Mellal, où l'on veut ausculter de grands linéaires, l'ensemble des mesures est réalisé à l'aide d'un chariot.

Le choix de la fréquence centrale d'auscultation est important. Elle est définie par la bande passante de l'antenne. Il faut que les longueurs d'ondes utilisées soient de l'ordre de la dimension de la cible et que la bande passante soit large pour avoir une bonne résolution temporelle.

Le temps d'enregistrement des signaux est fixé en fonction des informations recueillies lors de la recherche d'indices. Si l'on connaît approximativement la vitesse des ondes dans le sol (que l'on peut toujours estimée à partir du Tableau 4.1) et la profondeur des cavités recherchées, on déduit le temps de propagation

des ondes jusqu'à la cible. Le temps d'enregistrement est le temps double, correspondant au trajet aller-retour des ondes.

Ensuite, l'utilisateur doit ajuster un pas d'enregistrement spatial des signaux. Il peut le régler suivant une roue codeuse, qui déclenchera une acquisition à un pas de distance donné. L'acquisition peut aussi se faire en continu. Dans ce cas, l'utilisateur doit marcher à vitesse constante, et signaler régulièrement le long du profil des points dont les coordonnées sont connues.

D'autres paramètres peuvent être réglés:

- le sommation («stacking» en anglais) : c'est un paramètre qui permet de sommer plusieurs signaux pour un même point du profil, afin d'améliorer le rapport signal sur bruit.
- le gain: les radars commerciaux proposent généralement la possibilité d'appliquer des gains permettant d'amplifier le signal en fonction du temps d'écoute. Si un gain est appliqué pendant les mesures, les traitements qui peuvent être faits sur les amplitudes des signaux doivent en tenir compte.
- les filtres : des filtres passe-bande sont généralement appliqués dès l'acquisition. Il faut bien connaître leurs caractéristiques et les prendre en compte dans les traitements après l'acquisition.

Enfin, comme pour toutes les méthodes, un relevé de la topographie, lorsque les mesures sont faites directement sur la surface du sol, est nécessaire pour recalculer les signaux par rapport à l'origine en surface. A Béni Mellal, le milieu urbain n'impose pas de relevé topographique précis.

Les structures environnantes, comme les lignes haute tension, les bâtiments contenant des parois métalliques, les câbles enterrés, les émetteurs radio proches génèrent des réflexions ou des signaux parasites qui peuvent mener à des erreurs d'interprétation. Un blindage de qualité des antennes utilisées permet généralement de s'affranchir de ces bruits électromagnétiques ambiants.

4.2.3. Caractéristiques générales des équipements de mesure

Le radar impulsif est un appareil qui émet, reçoit et enregistre des signaux électromagnétiques - en fait l'amplitude du champ électrique -. Les signaux émis

sont des signaux temporels (impulsions) d'une période de l'ordre de la nanoseconde (application type chaussées ou recherche d'acier dans les bétons) à quelques dizaines ou centaines de nanosecondes (applications géologiques). La fréquence de répétition des signaux peut atteindre plusieurs centaines de kHz. Les signaux réfléchis sont enregistrés sur une fenêtre temporelle (le temps d'écoute). Les radars récents enregistrent plusieurs centaines de signaux par seconde, avec une résolution temporelle de l'ordre de 5 picosecondes. La dynamique des radars est de l'ordre de 110 dB. Ce matériel traite en temps réels les signaux reçus (filtres passe bande et sommation des signaux). Il se présente physiquement sous la forme d'un boîtier comportant l'unité d'acquisition et un système de pilotage et d'enregistrement type PC.

Les antennes d'émission et de réception des radars géologiques sont très diverses. Leurs caractéristiques, leur fonctionnement et leur diagramme de rayonnement électromagnétique sont des données importantes (Combes, 1996) ; (Eyraud *et al.*, 1973). Les antennes sont généralement des dipôles cylindriques pour les applications basse fréquence, des dipôles bitriangle (antennes "papillon") pour les applications intermédiaires et certaines applications haute fréquence, et des cornets pour des applications type chaussées. A l'exception des antennes cornets, les antennes utilisées en radar fonctionnent au contact du sol, ou à quelques centimètres du sol, ce qui par ailleurs pose des problèmes en ce qui concerne la connaissance de leur diagramme de rayonnement dans des terrains que l'on cherche à caractériser. Elles possèdent le plus souvent un blindage afin de se protéger des bruits électromagnétiques provenant d'au-dessus du sol.

Elles sont caractérisées par (fig. 4.2.3.1) :

- une fréquence centrale de rayonnement, c'est-à-dire, la fréquence pour laquelle l'énergie émise est maximale,

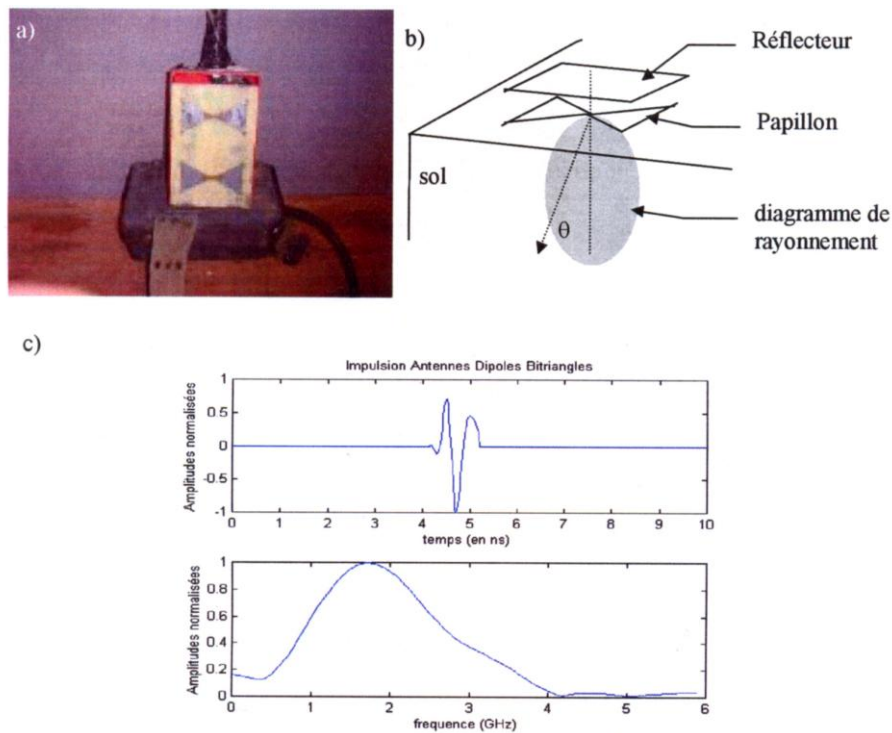


Figure 4.2.3.1: a) Antenne dipôle bitriangle (GSSI fréquence centrale de 1.5 GHz), b) la forme générale du diagramme de rayonnement dans le sol, c) impulsion émise à la sortie de l'antenne et amplitude spectrale (fréquence centrale mesurée de 1.6 GHz)

- Une bande passante qui est la plage de fréquence exploitable autour de la fréquence centrale,
- Un diagramme de rayonnement qui représente la répartition de l'énergie rayonnée autour de la direction principale de rayonnement,
- Une ouverture à mi-puissance (-3dB) qui est l'angle dans l'un des plans (plan E ou H) de polarisation autour de la direction principale, et qui définit la zone où la puissance émise est la moitié de la puissance maximale.

4.2.4. Généralités sur l'interprétation des mesures

Les mesures brutes apportent une première information qualitative qui permet de localiser directement les anomalies dans le sol par la visualisation d'un contraste ou d'une atténuation dans le signal enregistré. Lorsque les vitesses ne

sont pas connues, des sondages mécaniques permettent de caractériser la structure du sol en terme de profondeur.

Si les vitesses dans le sol sont connues, une interprétation quantitative des radargrammes est faite en terme de profondeur.

La dimension minimale des cavités qui peuvent être détectées peut être approchée en calculant le pouvoir de résolution vertical et horizontal.

La résolution verticale est estimée égale au quart de la longueur d'onde correspondant à la fréquence centrale dans le matériau:

$$r_v = \lambda/4 = \frac{1}{4} \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}} \frac{1}{f_c} \text{ (m)}$$

La résolution horizontale est définie pour une profondeur z , par le rayon de la première zone de Fresnel :

$$r_h \approx \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda z}{2}} \text{ (m)}.$$

Quel que soit le résultat d'une interprétation quantitative, il est recommandé de faire une campagne de sondages mécaniques au droit des anomalies.

4.2.5. Limites de la méthode

La méthode n'est pas adaptée en milieu conducteur, car les ondes y sont atténuées.

Plus les fréquences des ondes électromagnétiques seront élevées, meilleure sera la résolution, mais moins grande sera la profondeur de pénétration des ondes. A l'opposé, plus basses seront les fréquences utilisées, plus grande sera la profondeur de pénétration mais moins bonne sera la résolution.

Le blindage des antennes est parfois de mauvaise qualité et les perturbations de réseaux radio ou de structures métalliques environnantes sont source d'artéfacts.

4.3 Programme de mesures à Béni- Mellal

L'application du radar dans la Médina, s'est déroulée en 3 phases successives :

A – Premiers tests :

C'est une équipe de l'UMR Sisyphe de l'UPMC, qui est intervenue, avec son équipement «Pulse Echo».

Il s'agissait de confirmer la faisabilité de l'application du radar et de définir les paramètres et la logistique pour une investigation systématique ultérieure.

Deux profils ont été étudiés le long de deux rues, ainsi que deux places de taille moyenne. Les résultats ont fait l'objet d'une présentation à un congrès GEOFCAN, (2005), et d'une publication dans le Bulletin des Ponts et Chaussées.

B - Investigations détaillées au sud-ouest de la Médina, y compris le contrôle par des forages :

C'est une équipe du Centre d'Etudes Techniques (CETE) de Rouen qui est intervenue, avec son équipement GSSI – SIR-3000.

Il s'agissait de répondre au mieux au problème posé dans les 3 zones A, B et C. Des enregistrements systématiques répétés ont été réalisés dans des zones connues et inconnues.

C – Investigations complémentaires de la zone C : C'est une équipe de l'université de Barcelone (Espagne) qui est intervenue avec son équipement, particulièrement adapté aux investigations dans les ruelles et les habitations.

4.4 Etude détaillée de la zone expérimentale de la médina

4.4.1 Objectif – Programme

Les investigations ont porté sur une partie de l'ancienne médina située au sud-ouest (fig. 4.4.1.1).

Au total, si l'on prend en compte les essais de répétitivité, **273 profils** ont été enregistrés.

Tous les profils ont été exploités pour la cartographie des cavités. Des profils représentatifs ont été sélectionnés et ont permis de définir une typologie des réponses. Parmi ceux-ci, sept, ont été sélectionnés pour leur intérêt stratégique et ont fait l'objet d'une interprétation quantitative détaillée et/ou d'un contrôle par sondages.

Les profils retenus réalisés dans les ruelles, les rues et les boulevards sont représentés sur la figure 4.4.1.1. Deux autres séries de profils sont discutées ; l'une a été enregistrée à l'intérieur de la mosquée ; l'autre à l'intérieur d'une villa.

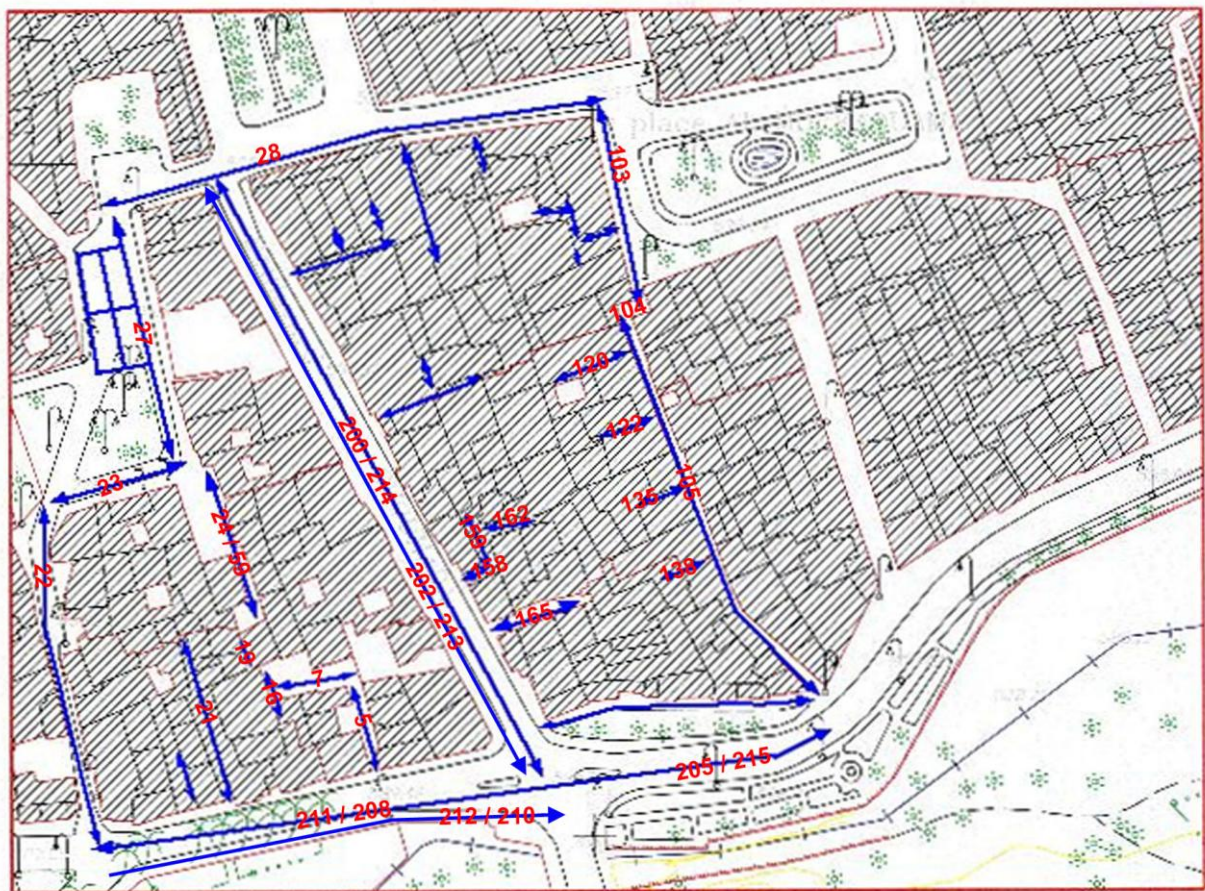


Figure 4.4.1.1 : Localisation des profils radar expérimentaux

4.4.2 Equipement – Paramètres d'enregistrement

4.4.2.1. Le radar impulsif

Le radar impulsif utilisé est un matériel de la société Geophysical Survey System, Inc (GSSI), le SIR-3000. C'est un radar de dimensions équivalentes à celle d'un ordinateur portable, léger, convivial et suffisant pour la majorité des études de terrain. Une seule antenne peut être connectée à ce radar, c'est-à-dire, que seule la configuration mono statique est possible.

Cet appareil est livré avec des logiciels d'acquisition et de traitement. Les codeurs de distance ainsi que les chariots adaptés sont utilisés.

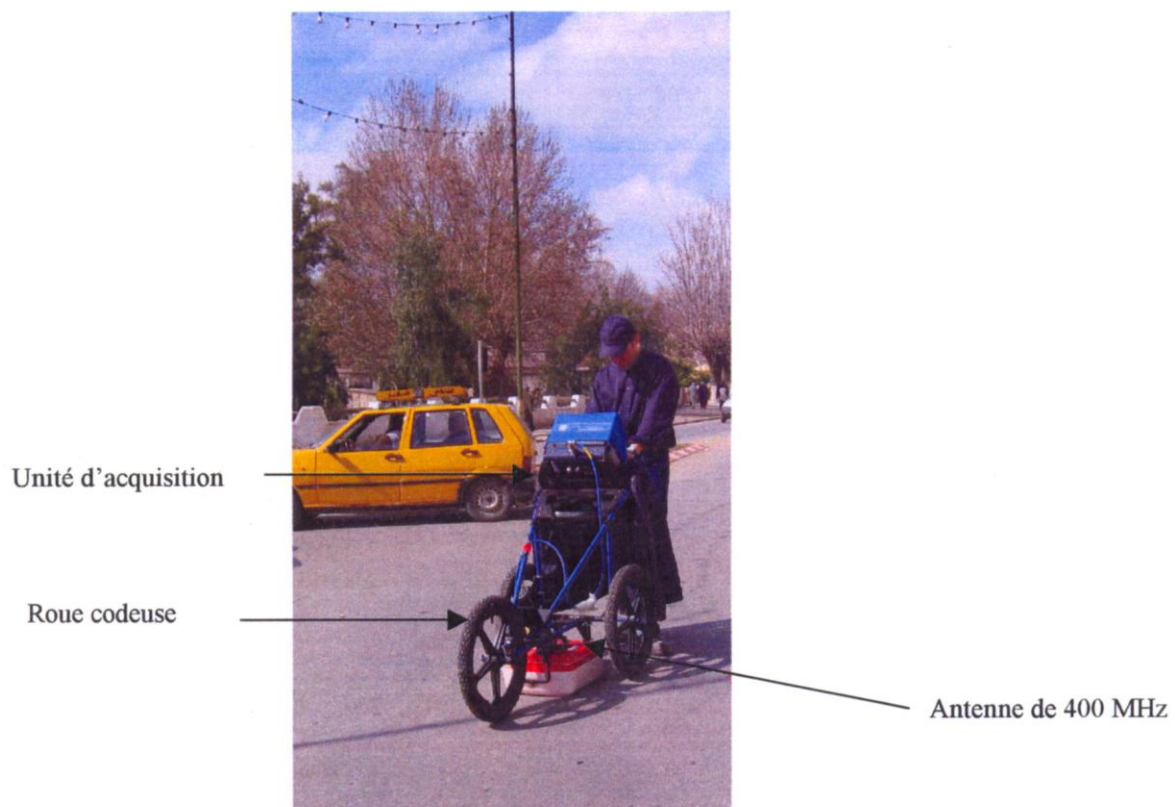


Figure 4.4.2.1 : Poussette et Antenne de 400 MHz et roue codeuse

4.4.2.2. Les antennes

Les antennes utilisées sont de type dipôles bi-triangles, ou antennes «papillons». Elles fonctionnent au contact du sol et sont traînées le long de profils

définis par l'utilisateur. Elles permettent l'émission et la réception d'impulsions électromagnétiques dans un domaine spectral donné: elle rayonne leur maximum d'énergie autour d'une fréquence, dite fréquence centrale, qui est donnée dans l'air par le constructeur, et à laquelle on peut associer la profondeur de pénétration et la résolution des ondes électromagnétiques dans le matériau ausculté. Plus les fréquences utilisées sont hautes, meilleure est la résolution mais moins grande est la profondeur de pénétration. A l'inverse, plus les fréquences sont basses, moins bonne est la résolution et plus grande est la profondeur de pénétration.

A Béni Mellal, les antennes suivantes ont été utilisées:

- une antenne papillon de 400 MHz : cette antenne offre une très bonne qualité de signal, et permet d'imager le sous sol dans les premiers mètres;
- une antenne papillon de 200 MHz : de même cette antenne offre une bonne qualité de signal, et permet de pénétrer plus en profondeur mais avec une moins bonne résolution.

❖ Les réglages pour les antennes de 200 MHz sont les suivants:

- Traces (scans) par mètre : 20
- Temps d'écoute (temps double) : 65 ns
- Échantillonnage : 512 points par trace, 16 bits.
- Fenêtre de filtrage: 50 à 600 MHz



Figure 4.4.2.2 : Acquisition radar sur le terrain, antenne 400 MHz

- ❖ Les réglages pour les antennes de 400 MHz sont les suivants :
 - Traces (scans) par mètre : 40 ;
 - Temps d'écoute (temps double) : 70 ns ;
 - Échantillonnage : 512 points par trace, 16 bits ;
 - Fenêtre de filtrage : 100 à 800 MHz.

Ces réglages ont été conservés pour l'ensemble des mesures.

L'utilisation combinée de ces deux antennes permet d'imager le milieu sur une épaisseur qu'il reste à définir. Expérimentalement, le radar permet des

investigations de l'ordre d'une dizaine de mètres, dans des milieux résistants. Mais cette profondeur d'investigation (considérée généralement comme étant égale à la moitié de la profondeur de pénétration des ondes) est très variable suivant les sols : elle dépend d'une part des fréquences utilisées, d'autre part de la conductivité et de la permittivité effective du milieu (relative au courant de conduction et de polarisation).

4.4.3 - Examen des radargrammes – Typologie des réflexions –

4.4.3.1- Traitement des données :

Le même traitement a été appliqué à tous les profils et tous les radargrammes ont été ainsi visualisés :

- application d'un filtre «rejecteur» (background removal), afin de supprimer les réflecteurs plans de grande taille ;
- application de gains croissants avec le temps, sous la forme de paliers imposés, lors de la visualisation brute des radargrammes ;
- application de gains croissants avec le temps selon une loi exponentielle lorsque qu'un traitement quantitatif est appliqué :

la loi de croissance avec le temps est de la forme générale suivante :

$$G(t) = G_0 (1 + e^{-a v t}) \text{ où } v = c / (\epsilon)^{1/2}$$

et où a est un coefficient d'ajustement, fonction de l'atténuation. Dans notre cas, il est voisin de 1 ;

(pour un temps double de 60 ns, le gain est multiplié par 40, par rapport à la surface).

- transformation automatique des temps doubles en profondeurs, avec l'hypothèse d'une valeur de a égale à 11.5, lors de la visualisation brute des radargrammes, Cette valeur a été choisie, en considérant une teneur

moyenne relativement élevée pour les matériaux situés au-dessus des cavités.

4.4.3.2 - Typologie des réponses de l'environnement et des réflecteurs

A – L'environnement :

On note des variations latérales importantes dans le caractère des radargrammes sur la plupart des profils longs. Deux exemples sont fournis pour les antennes de 200 MHz.

Le profil 212, le long du boulevard sud-ouest : il peut être divisé en 3 zones dont le caractère des réponses en profondeur est nettement différent, ce qui est vraisemblablement lié à des différences de nature des matériaux en profondeur, plutôt qu'à des conditions de surface différentes.

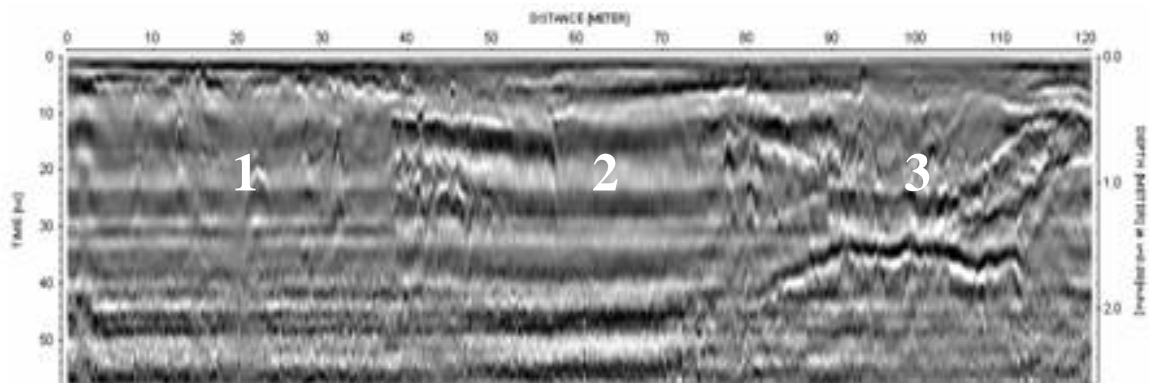


Figure 4.4.3.1 : Radargramme 200 MHz - Profil 212

Le profil 214, le long de l'avenue Chouada : il montre également deux types de zones : l'une avec des réflexions énergiques à toutes les profondeurs et la seconde pratiquement sans réflexions. Cette fois-ci, on note des conditions de surface assez différentes entre ces deux types de zone : au-dessus des zones sans réflexion, on note des interfaces superficielles sur lesquelles une très grande partie de l'énergie est réfléchie.

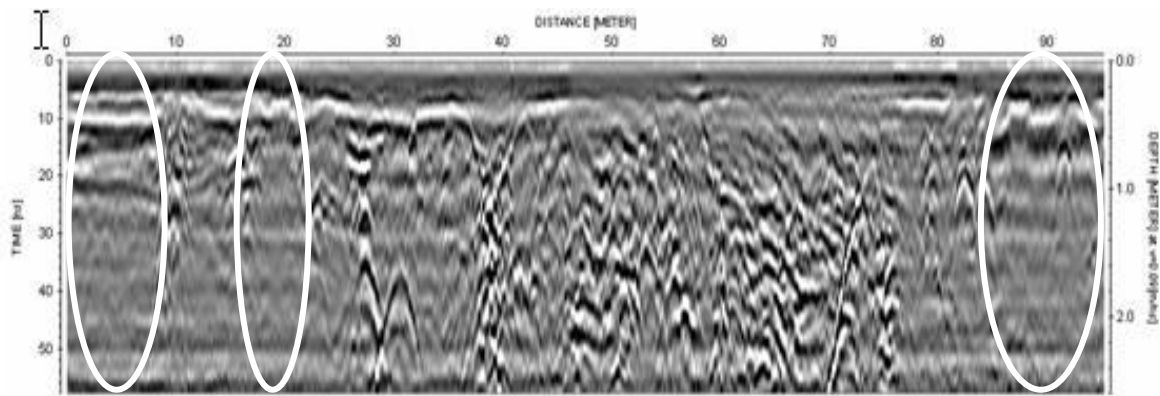


Figure 4.4.3.2 : Radargramme 200 MHz – profil 214

Le profil 77 à l'intérieur de la mosquée, montre également, une variation latérale brusque du caractère des réponses. Est-elle liée exclusivement au changement des conditions de surface, ou y a – t - il également 'un changement de la nature du milieu, ce qui ne serait pas étonnant pour un milieu anthropique ?

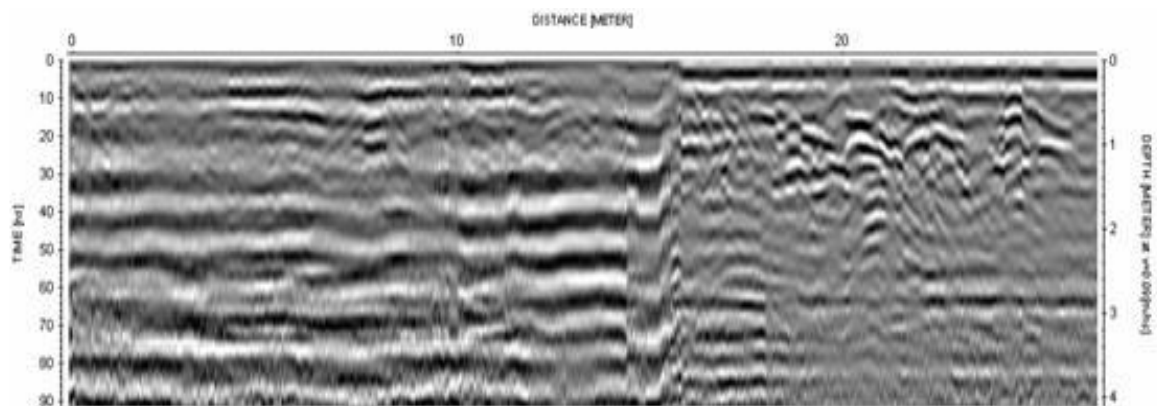
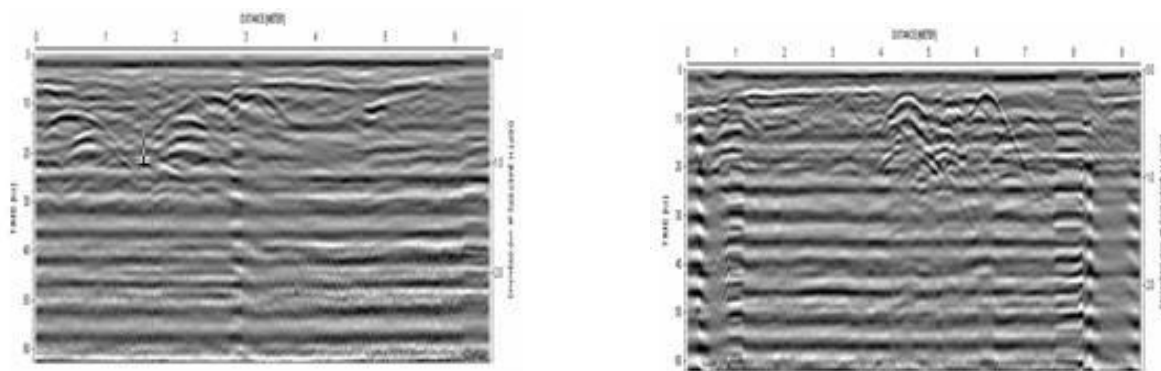


Figure 4.4.3.3 : Radargramme 200 MHz. Profil 77, intérieur de la mosquée

Les profils 30 et 35 à l'intérieur d'une villa en revanche, montre une relative homogénéité latérale, mais des hyperboles de diffraction de deux natures différentes, entre l'un et l'autre des deux profils.



Profil 35

Profil 30

Figure 4.4.3.4 : Deux radargrammes dans une villa (400 MHz)

B – Typologie des réflexions :

La réflexion à la surface du sol apparaît toujours comme deux lignes continues successives, la première est blanche; elle est suivie d'une noire.

Un second réflecteur quasi continu apparaît ensuite, qui correspond à la base du revêtement des routes ou du pavage des ruelles, ou des dallages de la mosquée ou de la villa.

Au-dessous de ces réflecteurs quasi continus proches de la surface, si l'on analyse les 275 profils enregistrés, on peut distinguer 5 types de réflecteurs isolés.

B I :Type I - Des hyperboles isolées proches de la surface ($t < 10$ ns), qui se «propagent» plus ou moins en profondeur :

A priori, ce sont les canalisations, regards métalliques et autres objets anthropiques situés près de la surface du sol ou dans le premier mètre qui donnent lieu à ces réflexions bien individualisées. Deux exemples sont présentés, le long de trottoirs et de rues de moyenne importance (fig.4.4.3.5).

Ces réflecteurs sont considérés comme des « bruits »

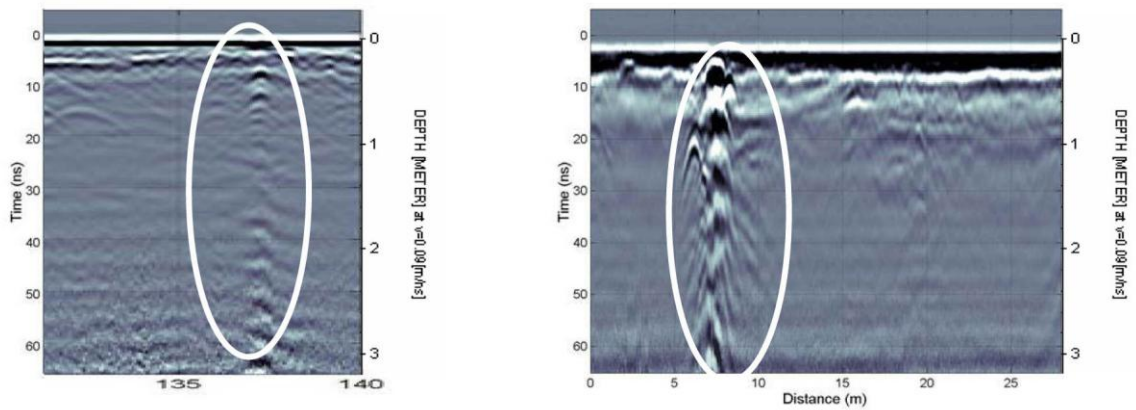
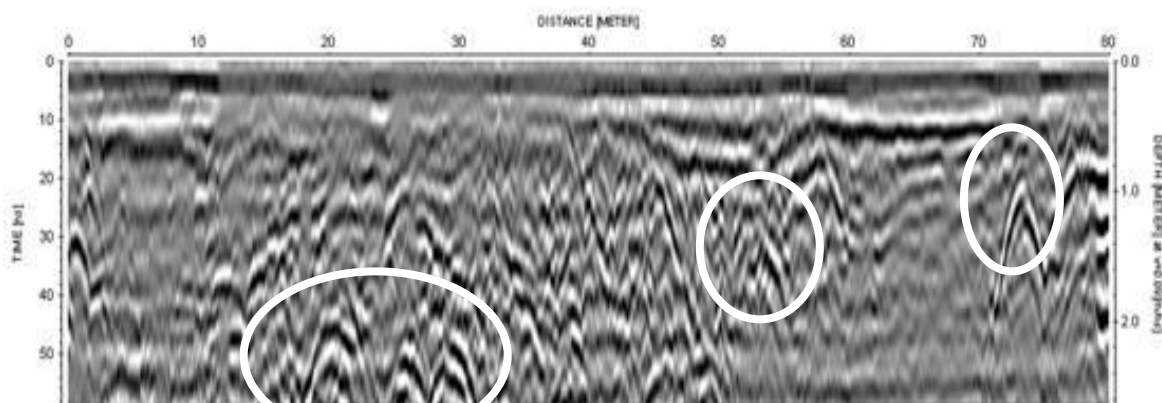


Figure 4.4.3.5 : Hyperboles proches de la surface (Type I)

B II : Type II – Des hyperboles isolées à moyennes et grandes profondeurs ($t > 15$ ns). Le profil 214 (200 MHz) est riche en réflecteurs de ce type. (fig. 4.4.3.6). Ils correspondent aux signaux réfléchis attendus sur le toit de cavités vides. Ils seront répertoriés et analysés sur tous les profils enregistrés et, pour certains, ils seront contrôlés par forage.



**Figure 4.4.3.6 : Hyperboles à moyennes et grandes profondeurs
(Type II)**

B III : Type III – Des réflecteurs d’extension latérale limitée à moyennes et grandes profondeurs. Les hyperboles ne sont pas individualisées.

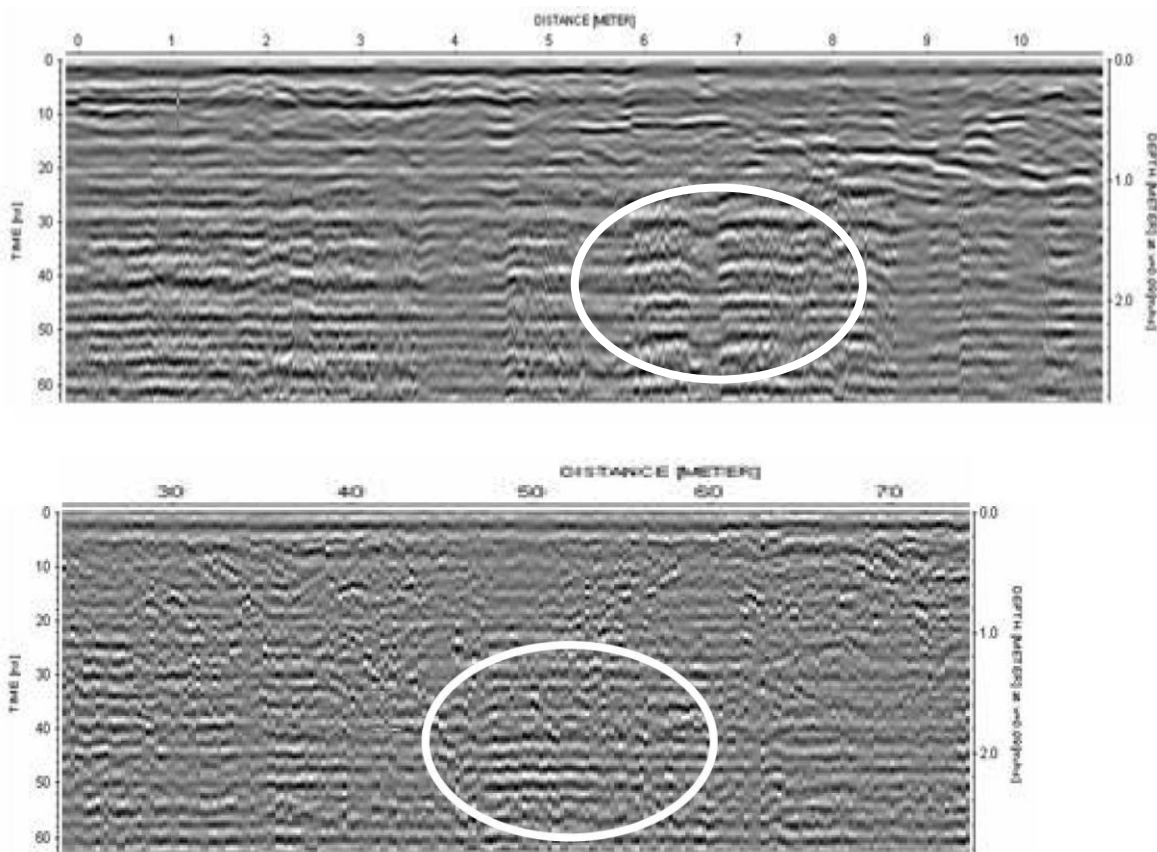


Figure 4.4.3.7 : Hyperboles non individualisées

Réflecteurs d'extension latérale limitée

(Type III)

Il est difficile de dire s'il s'agit de signal ou de bruit. Dans la mesure où ils ne pourront pas être testés par forages, par mesure de précautions, ils seront considérés comme le signe de cavités possibles.

B 1V : Type 1V – Des réflecteurs continus à moyennes profondeurs, avec ou sans pendage. Ces réflecteurs correspondent vraisemblablement à des interfaces continues qui séparent deux formations de nature différente : base d'un remblai par exemple, ou toit d'un banc calcaire. Les exemples sont nombreux. Deux sont présentés, de nature différente (fig. 4.4.3.7).

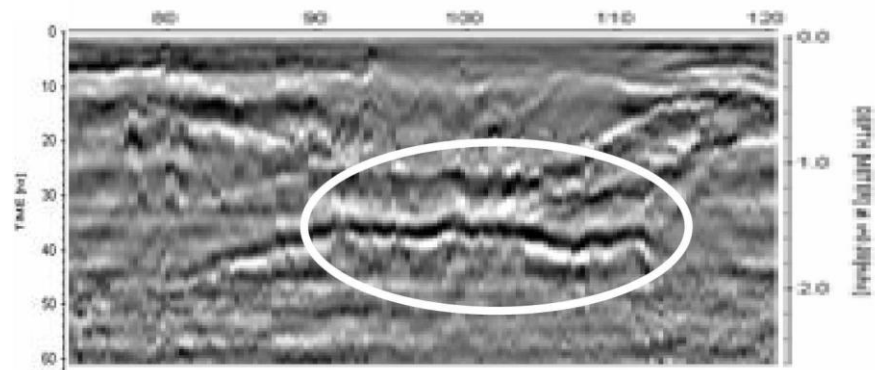
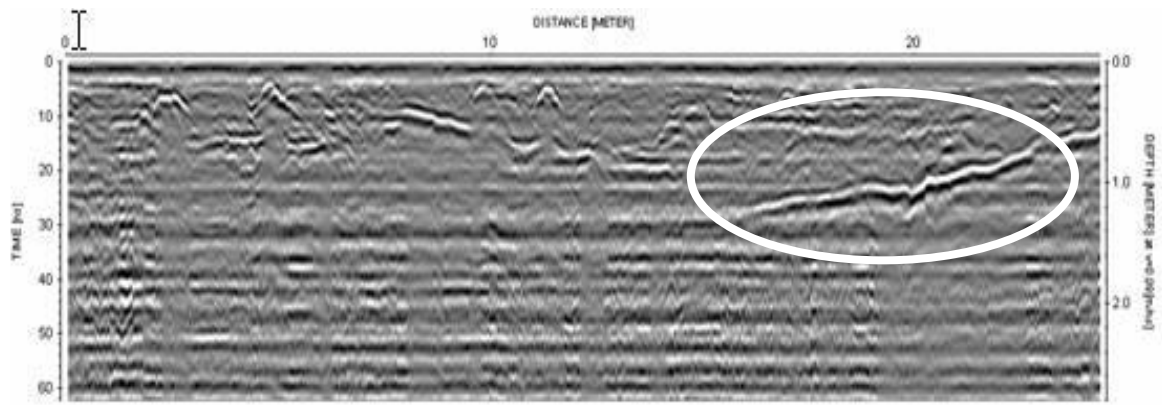
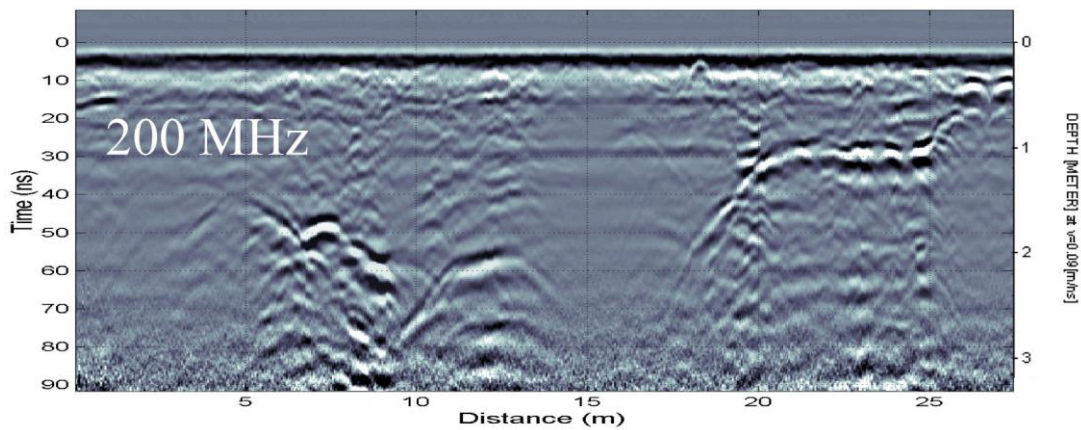
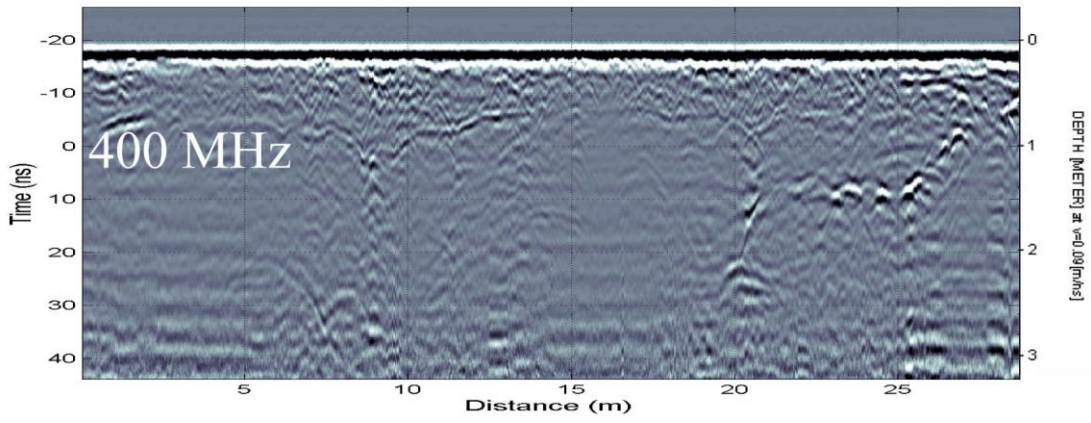


Figure 4.4.3.8 : Réflecteurs quasi continus (Type IV)

B V : Type V – Une réponse exemplaire de cavités souterraines.





**Figure 4.4.3.9 : Réponses exemplaires de vides adjacents
(Type V)**

4.4.4 - Interprétation quantitative de radargrammes spécifiques – Contrôle par des forages

Les radargrammes enregistrés sur la ruelle de la Souscription et sur l'avenue Chouada, du fait de l'exemplarité des réponses et du fait de leur intérêt stratégique, ont fait l'objet de traitements particuliers et de contrôle par des forages. Six forages supplémentaires ont été réalisés sur d'autres profils, à titre de contre exemples ou pour tenter d'explicitier la nature de certaines réponses.

Cette série de 17 forages était indispensable. En effet toute investigation géophysique dans une zone peu ou pas connue, doit être suivie d'une campagne de forages de contrôle. On doit considérer qu'ils font partie de la campagne géophysique.

Ils permettent (1) d'identifier la nature des formations cartographiées et (2) de confirmer, ou le plus souvent même de déterminer les profondeurs des horizons, donc d'étalonner ou de calibrer les techniques géophysiques mises en œuvre. Ils permettront également dans ce cas particulier, la valorisation scientifique ultérieure des données radar.

Deux types de foreuses ont été utilisées, relativement surdimensionnées pour les profondeurs à atteindre. Pour réduire les coûts, l'outil était «un marteau fond de trou», **ce qui a rendu le suivi géologique particulièrement difficile : difficulté d'identification des formations, mais aussi difficulté d'assurer l'existence même des interfaces, puis de les localiser avec quelque précision.**

4.4.4.1 – La ruelle dite de la Souscription : Profils 24 et 25 (400 MHz) et 59 (200 MHz) :

A - Les radargrammes 24 et 25 (400 MHz) :

Les radargrammes bruts, sans modification de l'origine des temps et avec une fonction de gain par paliers sont représentés (fig. 4.4.4.1 et 4.4.4.2).

Quelques uns des réflecteurs principaux sont soulignés par une flèche.

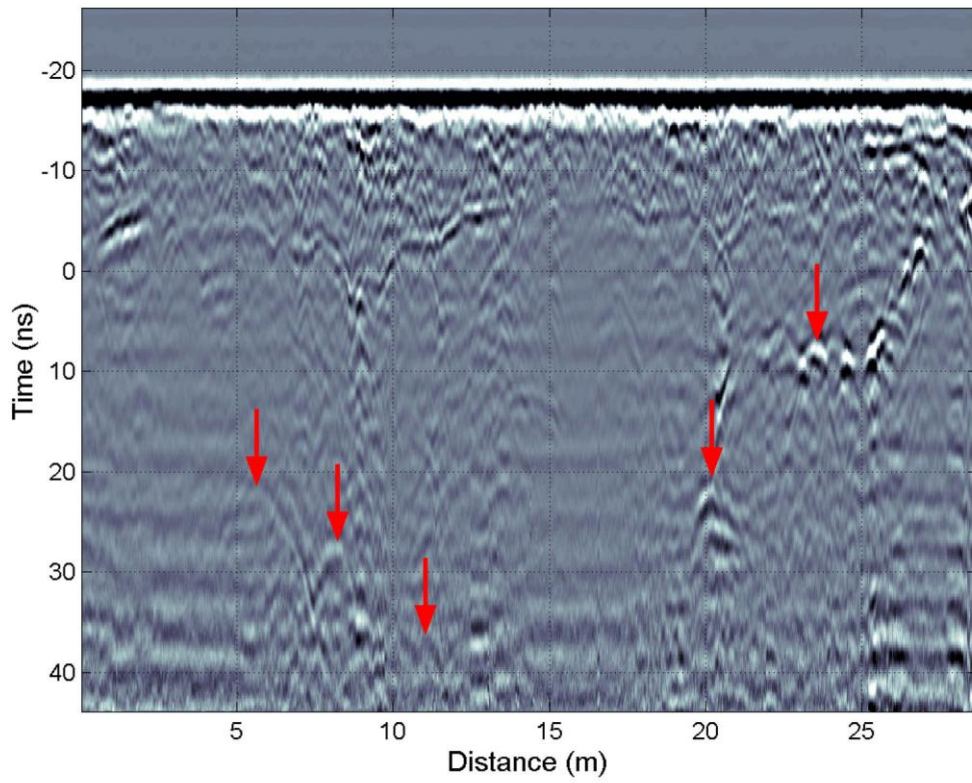


Figure 4.4.4.1 : Radrogramme 24

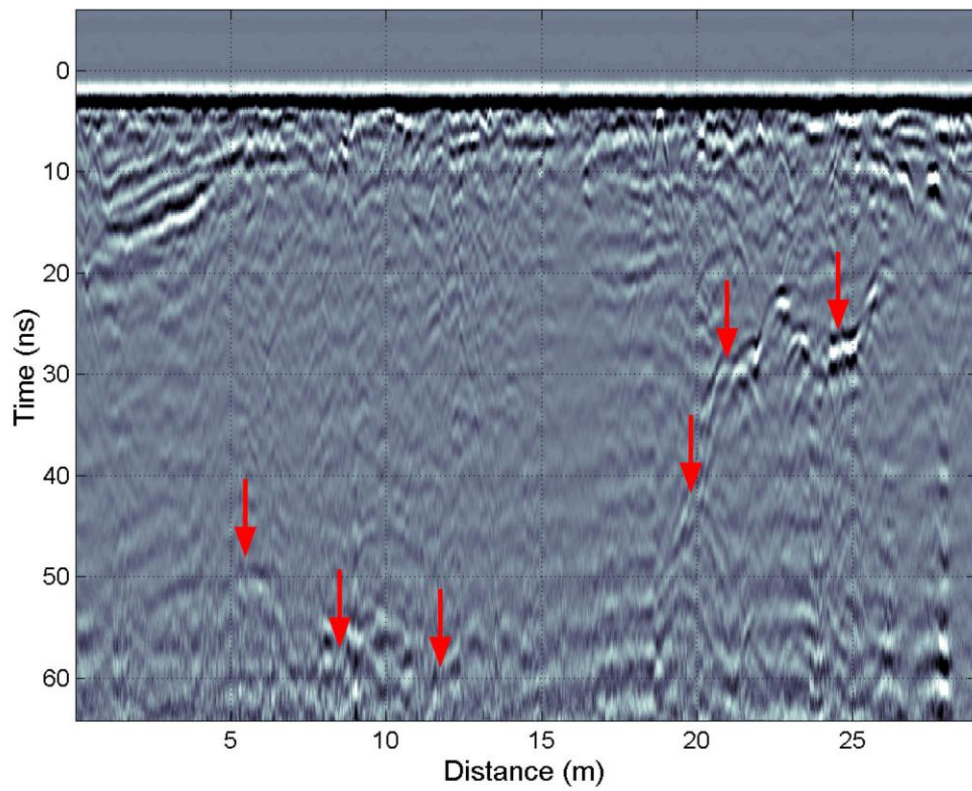


Figure 4.4.4.2 : Radargramme 25

B – Le radargramme 59 (200 Mhz)

Il a été retraité avec une fonction de gain progressive (fig. 4.4.4.3). Les principales réflexions sont soulignées. La position des forages de contrôle est indiquée par un trait vertical.

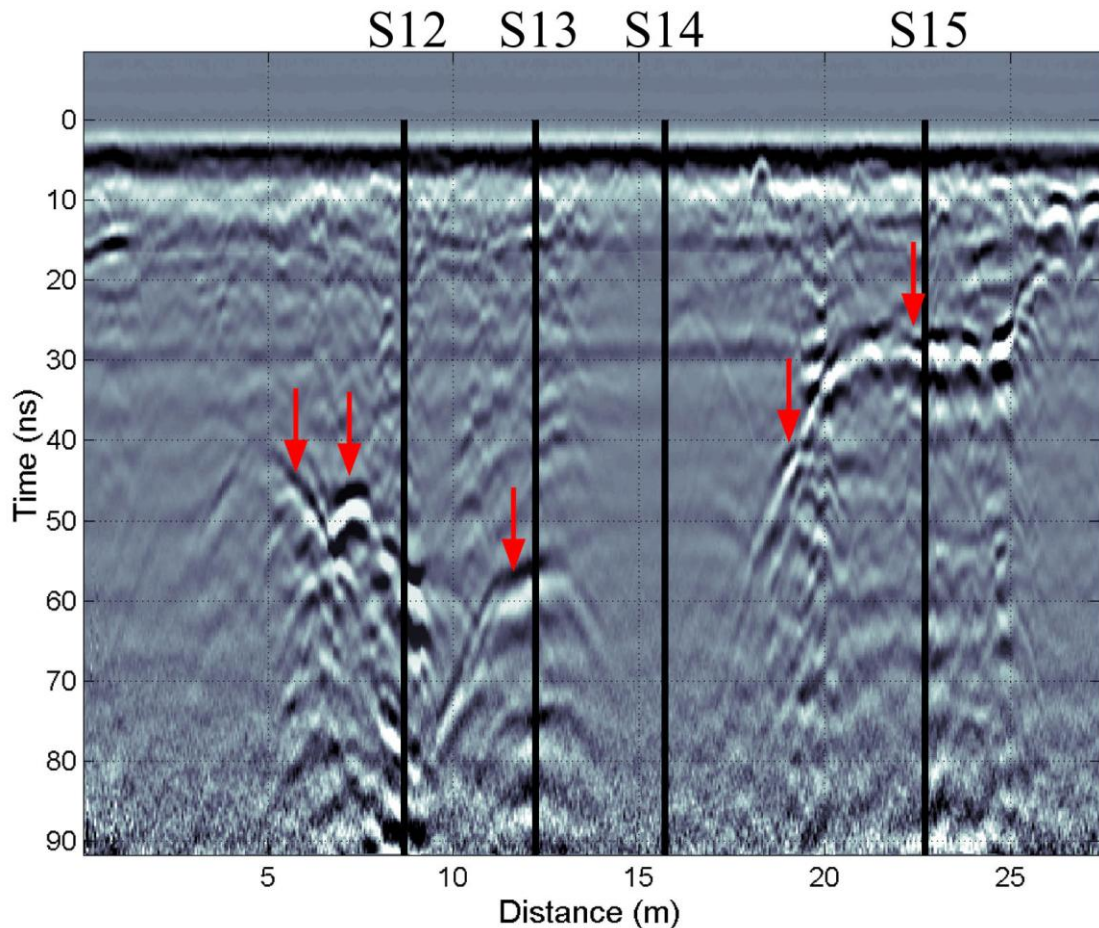


Figure 4.4.4.3 : Radargramme 59 - Position des futurs forages de contrôle

C – Quatre forages de contrôle ont été implantés.

La grande variabilité latérale du radargramme et les difficultés d'accès ont fait que l'implantation du forage S 12 n'a pas été optimale. En revanche, c'est volontairement que le forage S 14 a été implanté dans la zone «aveugle», pour contr

Les traces correspondant aux 4 forages ont été extraites des radargrammes et sont représentées sur la figure 4.4.4.4.

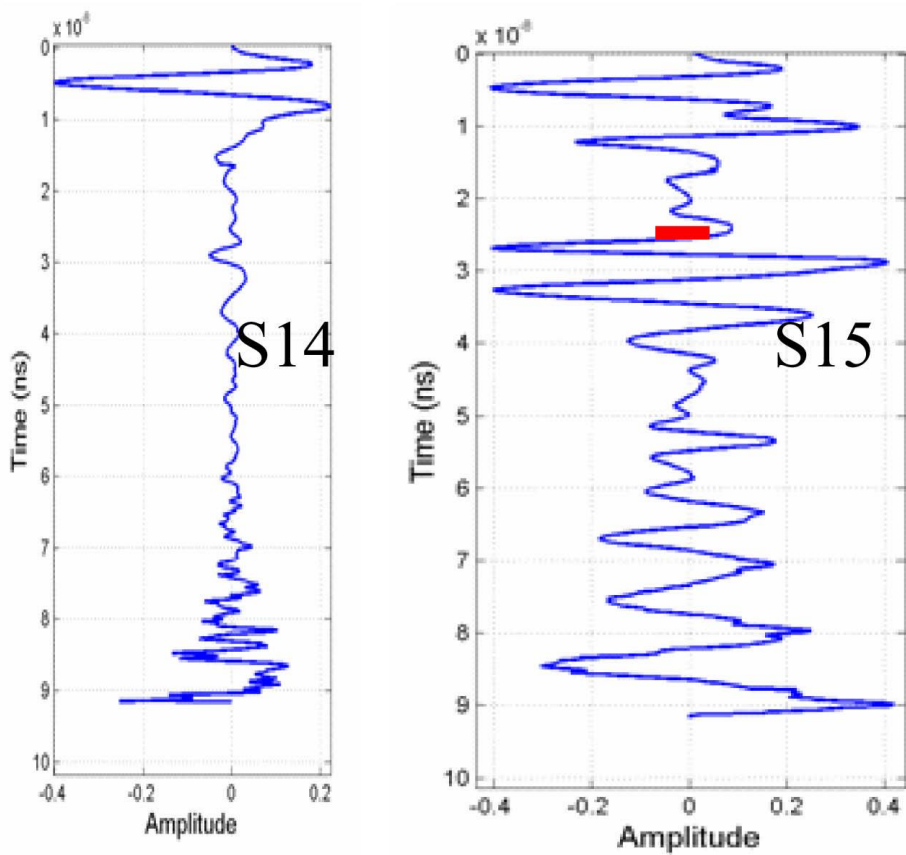
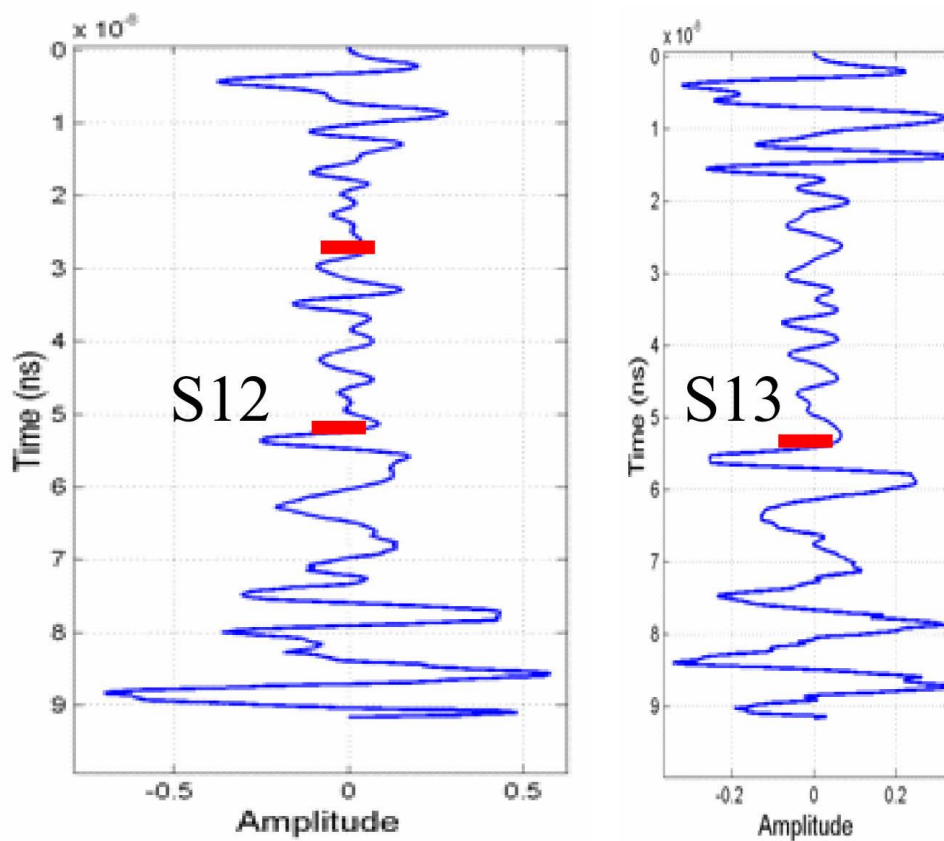


Figure 4.4.4.4 : Traces extraites du radargramme 59

Le «pointé» de la première onde réfléchié d'intérêt potentiel est simple et clair pour les traces S 13 et S 15. Il est plus difficile pour la trace S 12, comme cela été prévisible à partir du radargramme ; il est impossible pour la trace S 14.

Le relevé des « logs » géologiques des 4 forages est représenté sur la figure 4.4.4.5.

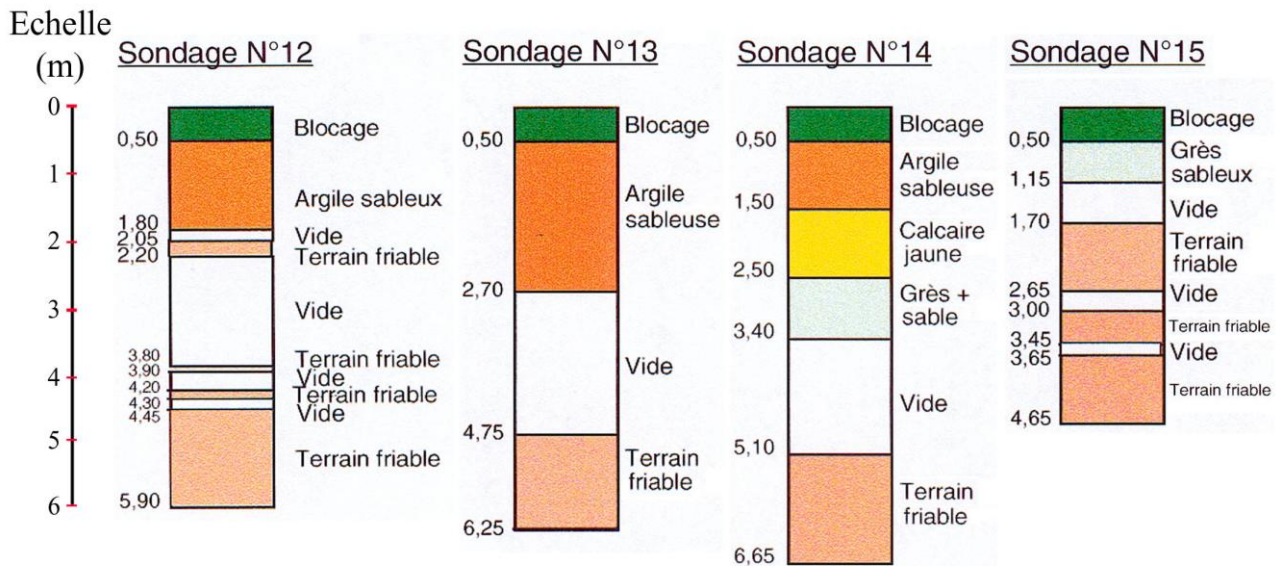


Figure 4.4.4.5 : « Logs » géologiques résultant du suivi des forages

D – L'adéquation entre les résultats des forages et du radar est très satisfaisante :

Trois cavités attendues ont été détectées. La quatrième a été rencontrée au-delà de la profondeur d'investigation du radar utilisé.

L'ordre de grandeur des profondeurs estimées a priori est correct.

La limite de la profondeur d'investigation dans le cas du forage S 14 se révèle être de l'ordre de 3 m.

En dépit de l'imprécision sur la détermination des profondeurs obtenues avec la sondeuse au marteau fond de trou, un ordre de grandeur de la permittivité relative peut être calculé pour les sondages S 13 et S 15.

Forage	Temps double t (ns)	Profondeur du toit : z (m)	$\epsilon_r = (c \cdot t / 2 \cdot z)^2$ c = 0,3 m / ns
S 13	53	2,70	8,7
S 15	24	1,15	9.8

Ces valeurs sont légèrement inférieures à celle choisie par défaut ($\epsilon_r = 11$), mais du même ordre de grandeur. Elles tendent à prouver que le matériau situé au-dessus des cavités est pour ces deux forages, légèrement moins argileux qu'attendu.

4.4.4.2 – L'avenue Chouada : Profil 214

Une procédure similaire a été utilisée pour l'avenue Chouada.

Le radargramme est représenté sous la forme de 3 parties successives (fig. 4.4.4.6, 4.4.4.8 et 4.4.4.10)

Les principaux réflecteurs à moyennes profondeurs sont indiqués par des flèches rouges sur le radargramme et l'emplacement des forages de contrôle est indiqué par un trait vertical noir.

Les traces extraites du radargramme, correspondant aux forages sont représentées (fig. 4.4.4.7, 4.4.4.9 et 4.4.4.11).

Et enfin, les «logs» géologiques résultant du suivi des forages sont également représentés (fig. 4.4.4.12).

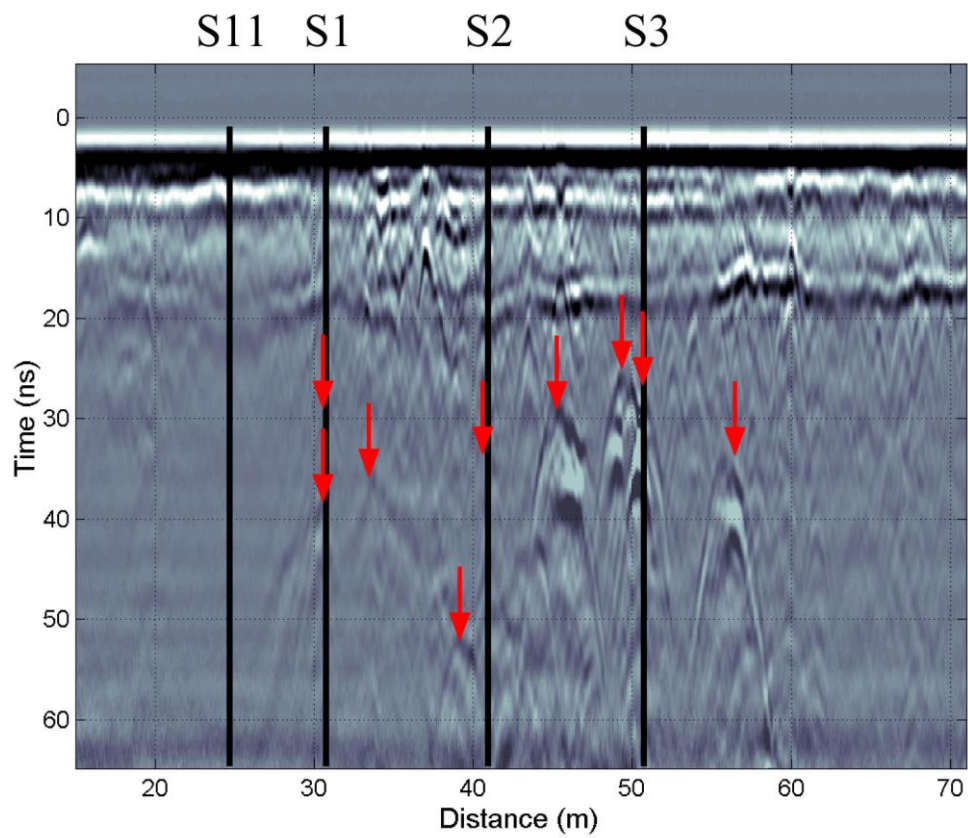


Figure 4.4.4.6 : Radargramme 214 et position des forages – Partie 1

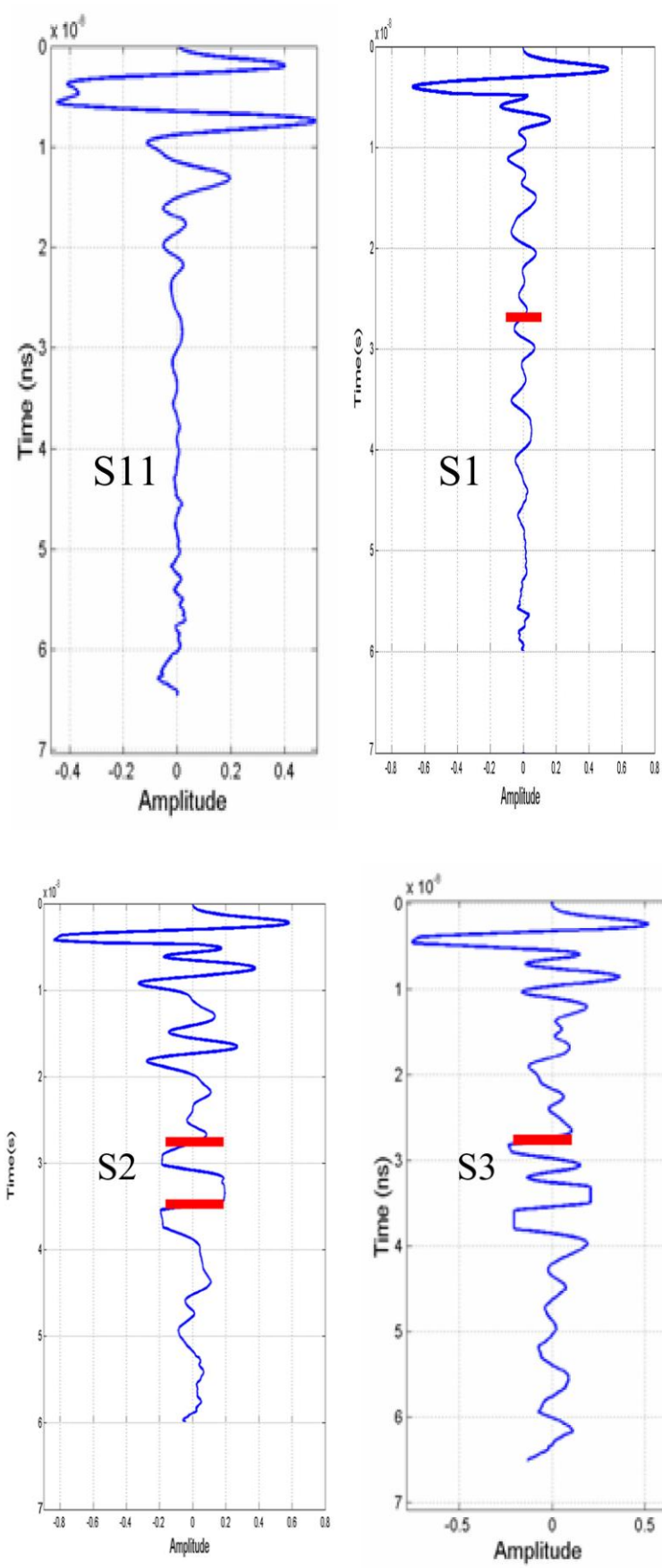


Figure 4.4.4.7 : Traces S11, S1, S2 et S3 extraites du radargramme

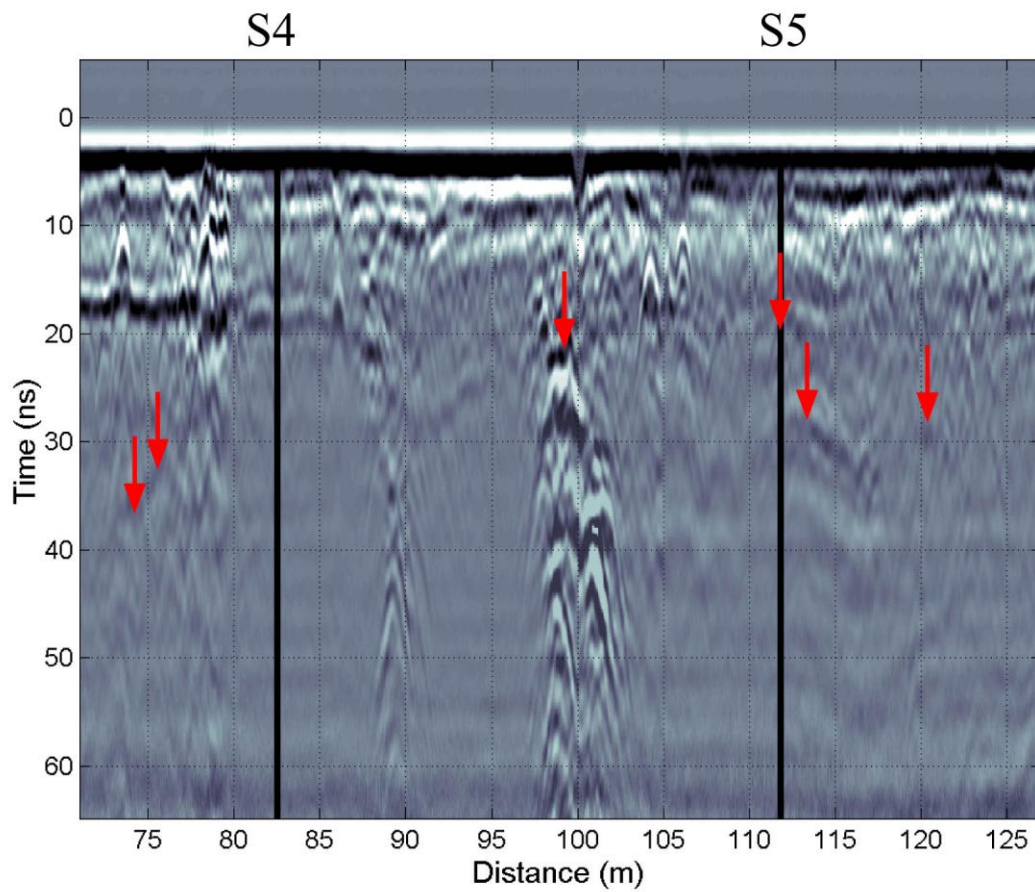


Figure 4.4.4.8 : Radargramme 214 et position des forages– Partie 2

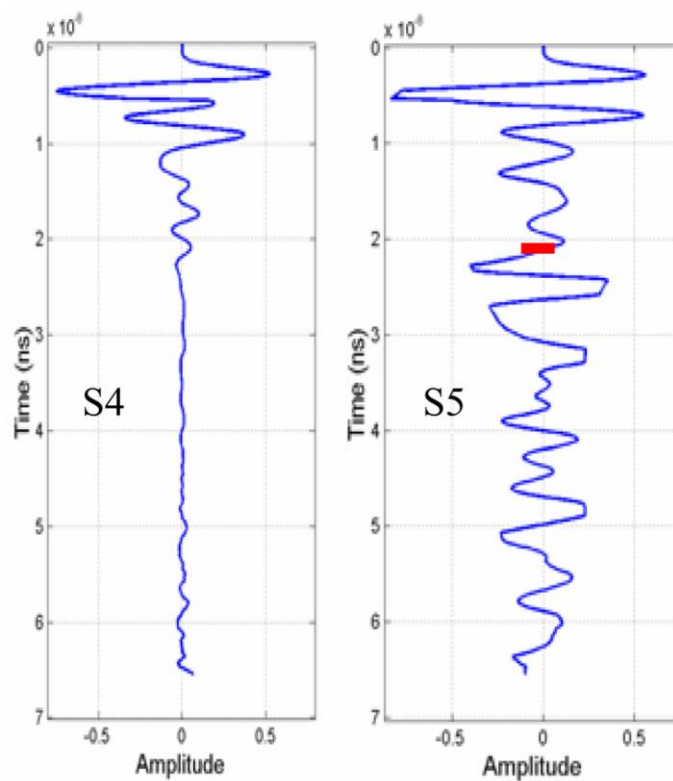


Figure 4.4.4.9 : Traces S 4 et S 5 extraites du radargramme

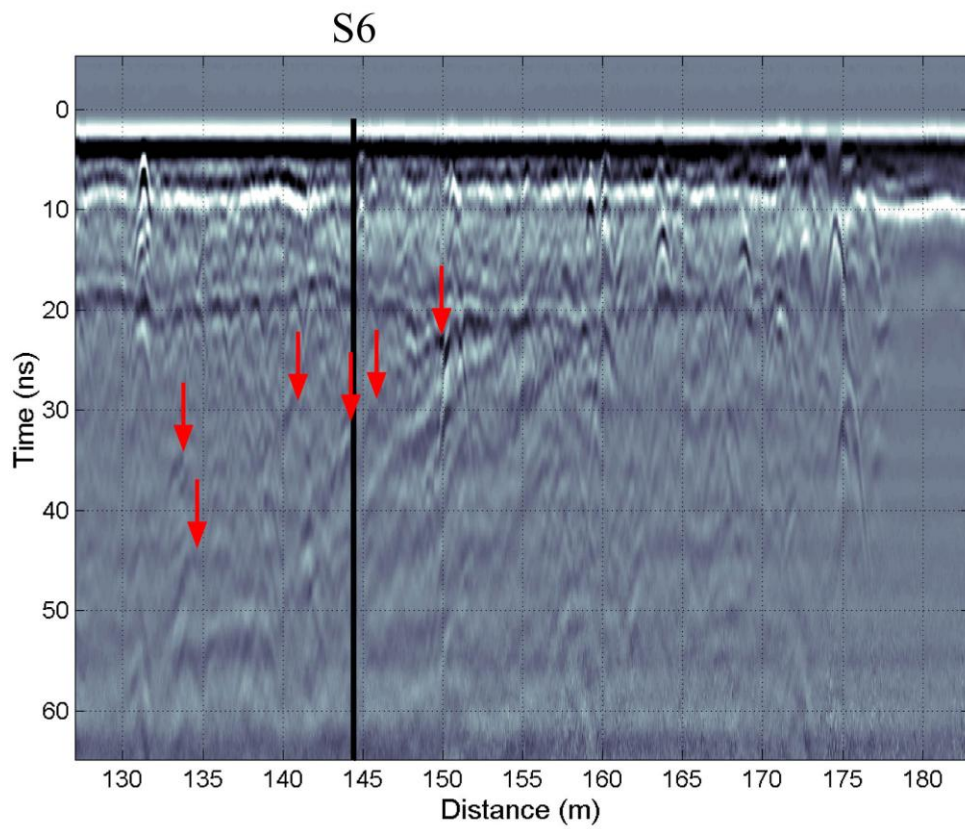


Figure 4.4.4.10 : Radargramme 214 et position du forage S 6 – Partie 3

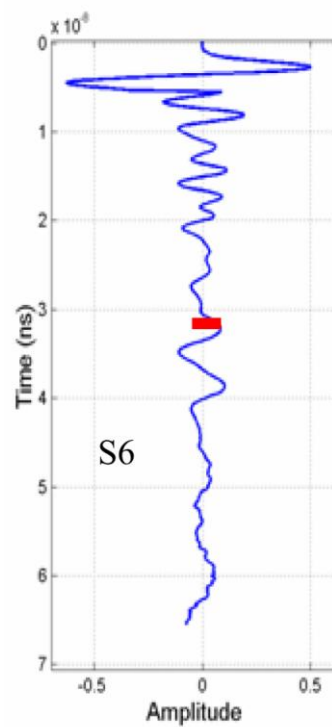
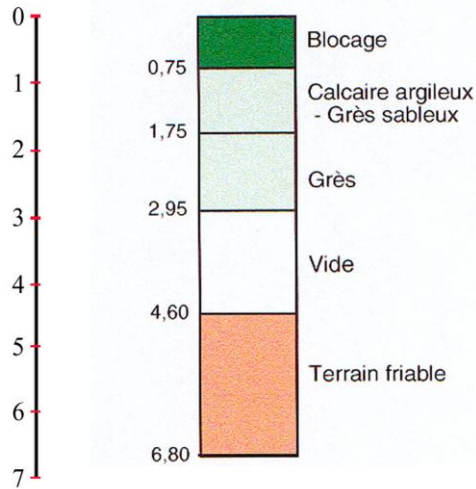


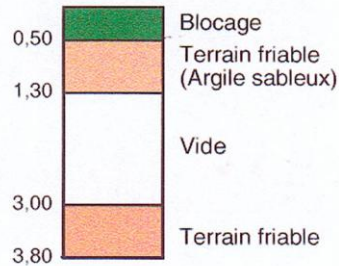
Figure 4.4.4.11 : Trace S 6 extraite du radargramme

Echelle Sondage N°11

(m)

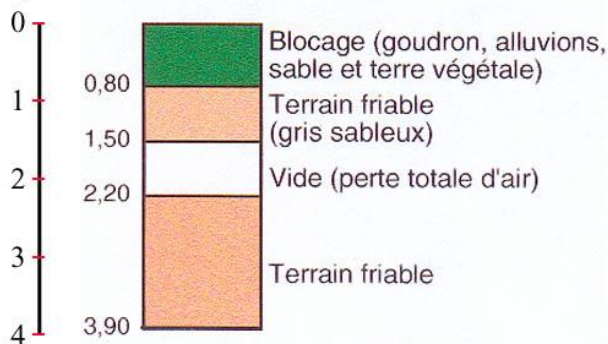


Sondage N°1

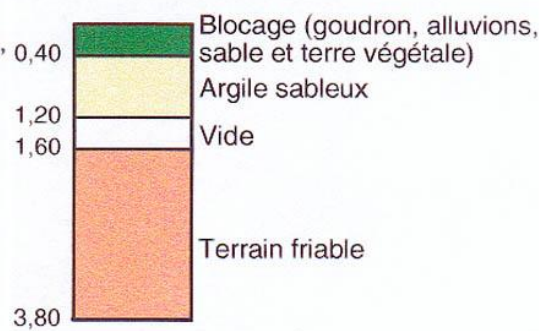


Echelle Sondage N°2

(m)

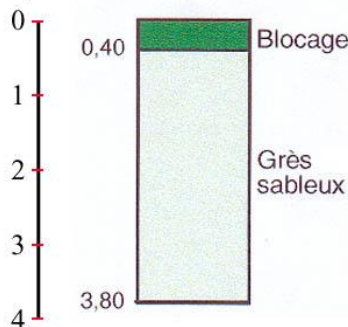


Sondage N°3

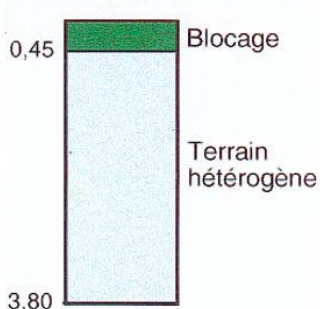


Echelle Sondage N°4

(m)



Sondage N°5



Sondage N°6

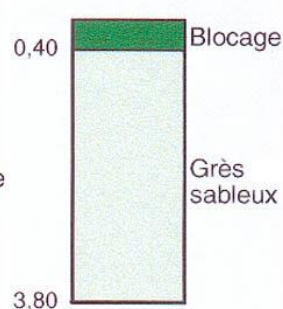


Figure 4.4.12 : « Logs » géologiques résultant du suivi des forages

Pour ce profil, l'adéquation entre les résultats des forages et ceux du radar sont relativement satisfaisants, malgré quelques surprises.

Trois cavités ont été rencontrées conformément aux prévisions ; une quatrième l'a été au-delà de la profondeur d'investigation du radar utilisé.

L'ordre de grandeur des profondeurs du toit des cavités est correct. En revanche, la hauteur des cavités est nettement plus faible qu'attendu pour les sondages S 2 et S3. Le terrain sous-jacent est dit «friable», ce qui tend à prouver qu'il y a eu effondrement et/ou remplissage partiel.

La limite de la profondeur d'investigation pour le forage S 11 est de l'ordre de 3 m, comme dans la ruelle de la Souscription.

Pour le forage S 4, aucune cavité n'a été rencontrée et le terrain traversé est relativement homogène, ce qui est en bon accord avec le radargramme.

Pour les forages S 5 et S 6 en revanche, aucune cavité n'a été rencontrée, alors que des réflecteurs apparaissent relativement clairement sur les radargrammes. C'est la difficulté du suivi et de l'interprétation des forages avec un marteau fond de trou qu'il faut invoquer : un milieu hétérogène a bien été identifié dans le forage S 5, ce qui peut justifier les réflexions, mais ce n'est pas le cas pour le forage S6.

Une tentative d'interprétation quantitative, à partir des 3 cavités détectées en accord avec les radargrammes, conduit aux résultats suivants :

Forage	Temps double t (ns)	Profondeur du toit : z (m)	$\epsilon_r = (c \cdot t / 2 \cdot z)^2$ c = 0,3 m / ns
S 1	26	1,30	9
S 2	27 / 35	1,50	7,3 / 12,2
S 3	27	1,20	11,4

Les valeurs obtenues pour la permittivité relative sont voisines de celles de la ruelle de la Souscription et de celle utilisée par défaut dans la transformation automatique temps/profondeur, ce qui est satisfaisant.

Pour le forage S 11, le toit de la cavité à 2,95 m conduirait à un temps double de 62 s pour une permittivité relative moyenne égale à 10, ce qui correspond à la limite du radargramme présenté.

4.4.4.3 – Cinq profils supplémentaires et six forages de contrôle :

Le long du boulevard Tamgnaut bordant la Médina au Sud, 4 forages de contrôle ont été réalisés pour vérifier localement les résultats des enquêtes et/ou pour tenter d'expliquer des réflecteurs apparaissant nettement sur les radargrammes.

A – Profils 5 et 7 – Forages S 17 et S 16

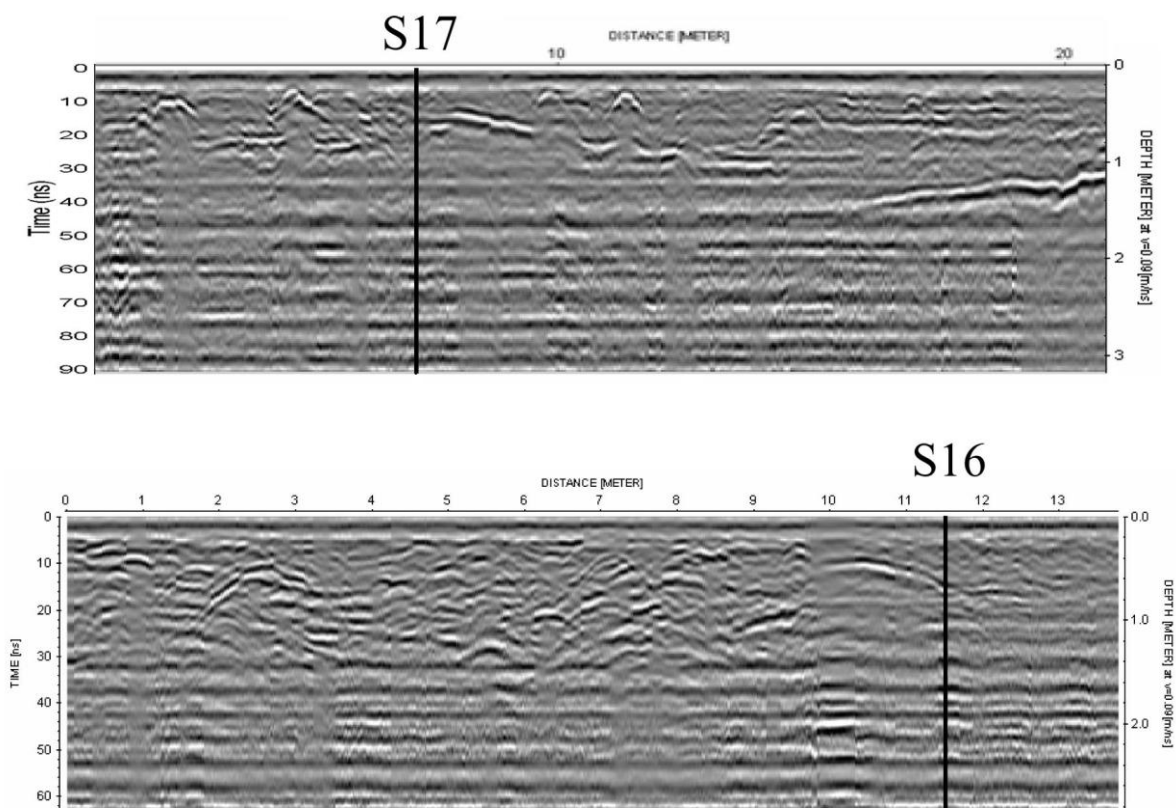


Figure 4.4.4.13 : Radargrammes 5 et 7 et position des forages de contrôle

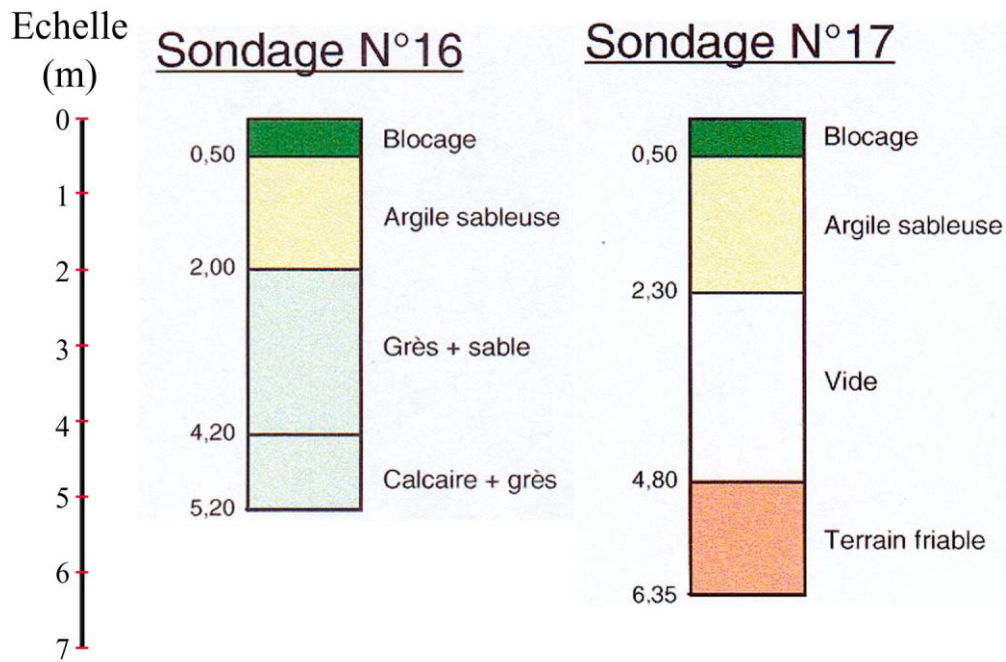


Figure 4.4.14 : «Logs» géologiques résultant du suivi des forages

La cavité rencontrée à 2,30 m dans le forage S 17 n'apparaît pas clairement sur le radargramme qui est quasi uniformément «bruité» pour des temps doubles supérieurs à 45 ns.

La situation est la même pour le forage S 16. Le caractère du radargramme 7 est proche de celui du profil 5 pour les temps doubles supérieurs à 40 ns, si bien que l'interface entre l'argile et le grès, située vers 2 m de profondeur, est peu visible.

B – Profils 211, 212 et 205 – Forages S 7 à S 10

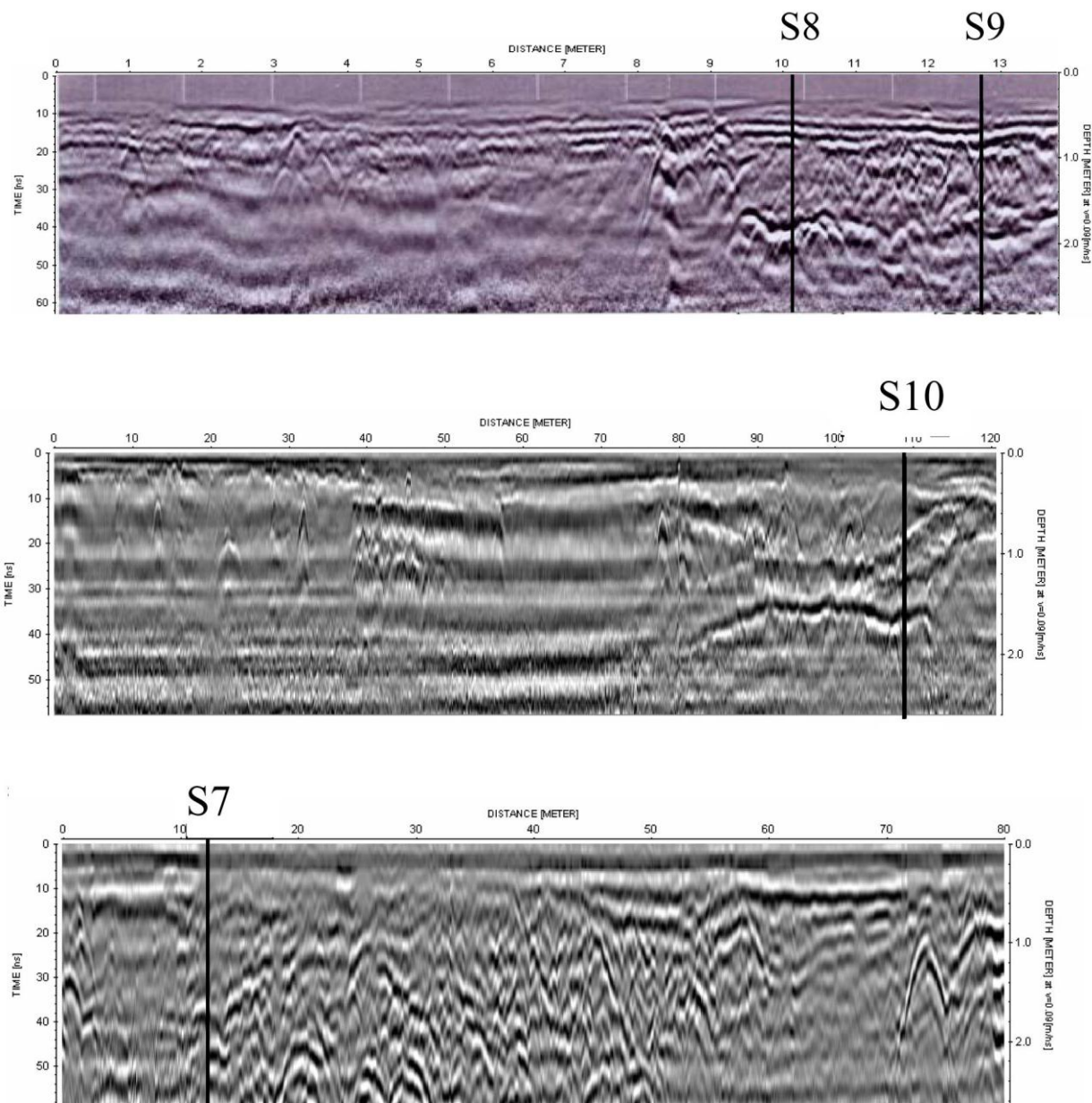


Figure 4.4.4.15 – Radargrammes 211, 212 et 215 et position des forages

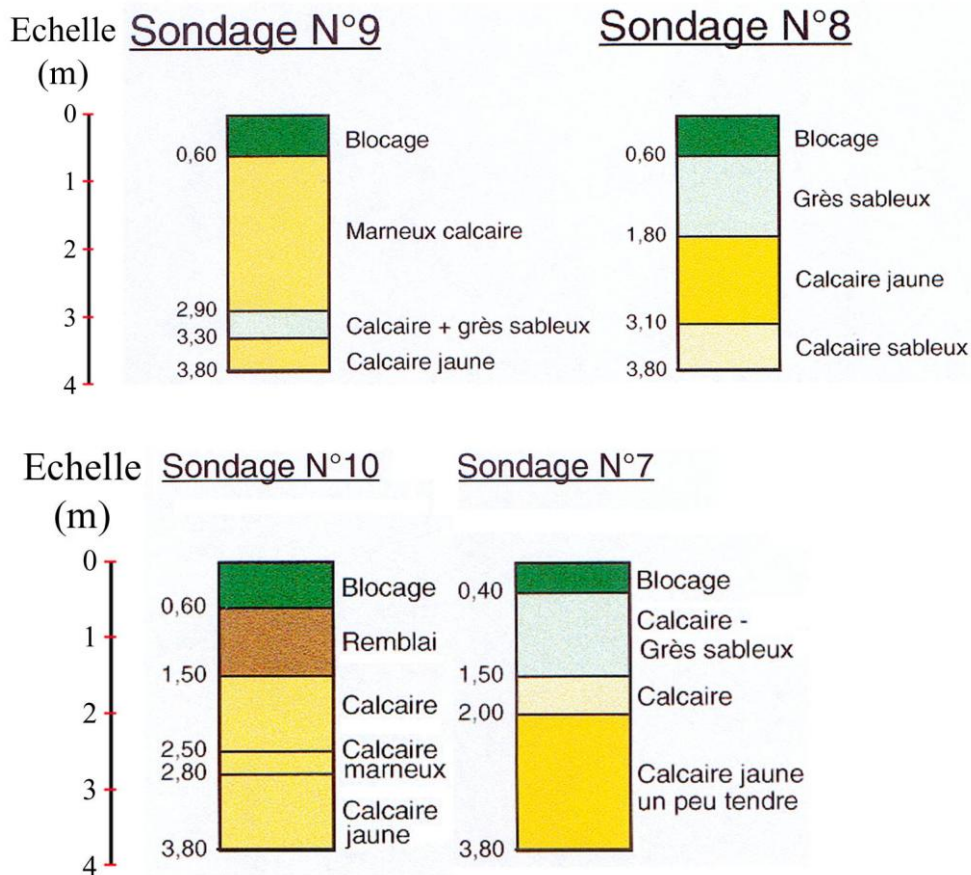


Figure 4.4.4.16 : «Logs» des forages S 7 à S 10

Parmi ces 4 forages, seul S 17 a rencontré une cavité, qui était connue d'après les enquêtes. La qualité du radargramme est malheureusement insuffisante et ne permet pas de conclure.

Les 3 autres forages n'ont rencontré que des interfaces «géologiques». Le toit des calcaires pour S 8 et S9 et la base des remblais pour S 7 et S10 correspondent vraisemblablement aux réflecteurs bien marqués sur les radargrammes, sous la forme d'horizons continus, plutôt que d'hyperboles individualisées.

4.4.4.4 – Synthèse

Sur les 17 forages réalisés dans la zone expérimentale :

- 6 ont rencontré des cavités, conformément aux prévisions (S 1, S 2 S 3, S 12, S 13 et S 15) ;
- 2 ont rencontré des cavités au-delà de 3 m de profondeur, soit au-delà de la limite d'investigation du radar utilisé (S 11 et S 14) ;
- 4 ont rencontré des horizons géologiques bien identifiés sur les radargrammes (S 7, S 8, S 9, et S 10) ;
- 3 n'ont pas réussi à différencier des horizons de nature différente en accord avec le radar pour l'un d'entre eux (S 4), mais en désaccord avec le radar, pour les deux autres (S 5 et S 6)

Pour 2 d'entre eux, la qualité des radargrammes n'a pas permis de conclure quant à l'adéquation des résultats des forages et des radargrammes. L'un d'eux a rencontré une cavité à 2,30 m de profondeur (S 17) et l'autre a rencontré le toit d'un horizon calcaire à 2 m de profondeur (S 16).

4.4.5 – Modélisation – Compléments de traitement

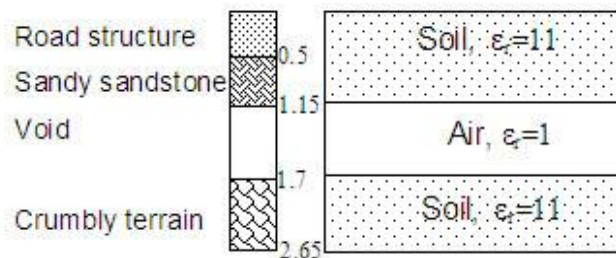
Une exploitation scientifique élaborée des données est en cours au LRPC / CETE de Rouen (Fauchard *et al*, en cours)

A – Modèle synthétique 1 D :

Un modèle 1D a été construit, à partir des résultats du forage S 3; l'épaisseur du vide n'est que de 55 cm, ce qui permet de mettre en évidence les réflexions multiples. Aucune fonction de gain n'est appliquée.

On note :

- la réflexion sur l'interface air/sol - polarité positive - ;
- la réflexion sur le toit de la cavité, notée S/V (sol / vide) - polarité négative - ;
- la réflexion au mur de la cavité, notée V/S – polarité positive, comme à la surface du sol ;
- 3 réflexions multiples : la première à l'intérieur de la cavité - polarité négative - et les deux dernières entre la surface du sol et le toit de la cavité - polarité négative -.



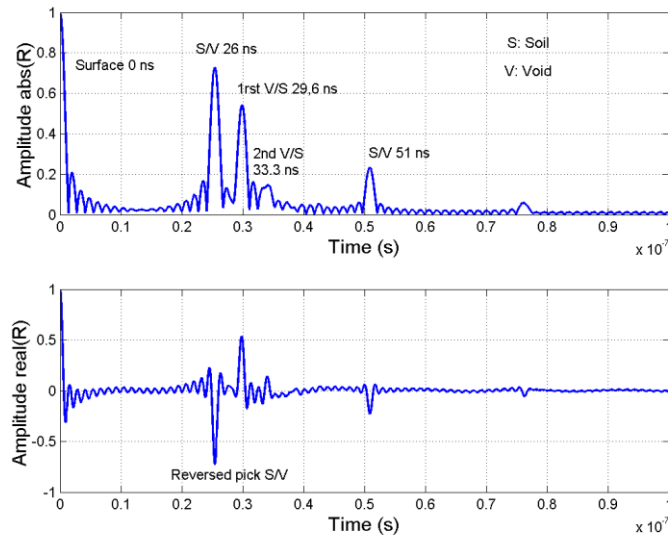


Figure 4.4.5.1 : Trace Radar synthétique

B – Etude des spectres – Estimation du contraste des permittivités

Comment peut-on tenter d'estimer le contraste des permittivités aux interfaces et notamment essayer de différencier une réflexion sur le vide, d'une réflexion sur un horizon géologique ?

L'étude de la polarité et de l'amplitude des ondes réfléchies est le premier pas de l'approche quantitative. C'est ainsi que les traces correspondant aux forages de contrôle ont été extraites des radargrammes.

Une seconde tentative est esquissée à partir de l'étude des spectres de ces mêmes traces.

B1 – Les spectres des traces de la ruelle de la «Souscription»

Les spectres sont calculés sur toute la durée du signal (fig.4.4.5.3). Les spectres S 13 et S 15 ont une grande similarité de comportement. Le spectre S 12 est le plus riche parmi les quatre, en hautes fréquences. Celui de S 14, qui ne montre aucune réflexion est bien entendu le moins énergétique et le plus homogène.

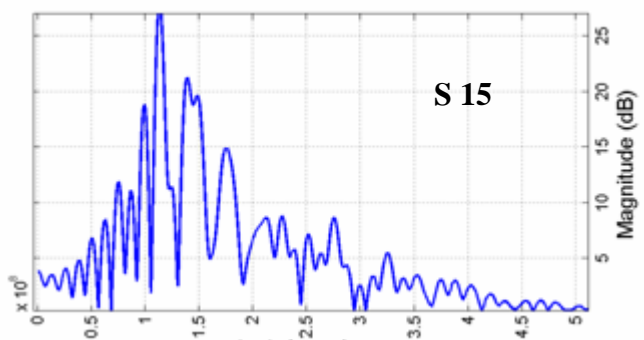
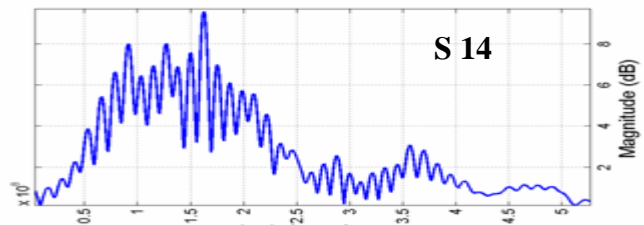
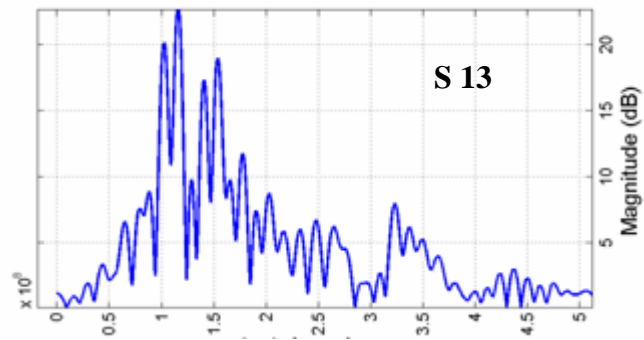
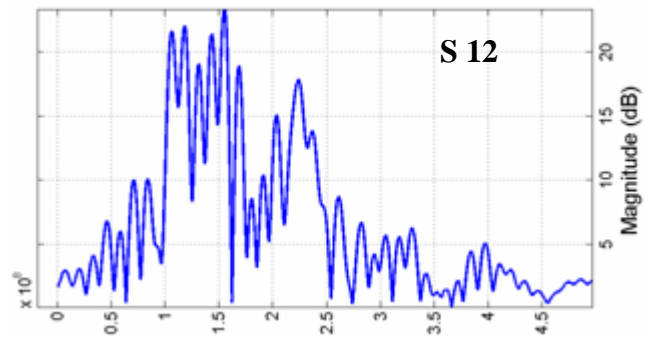


Figure 4.4.5.2 : Les spectres des 4 traces – Forages «Souscription»

B2 – Les spectres des traces de l'avenue Chouada

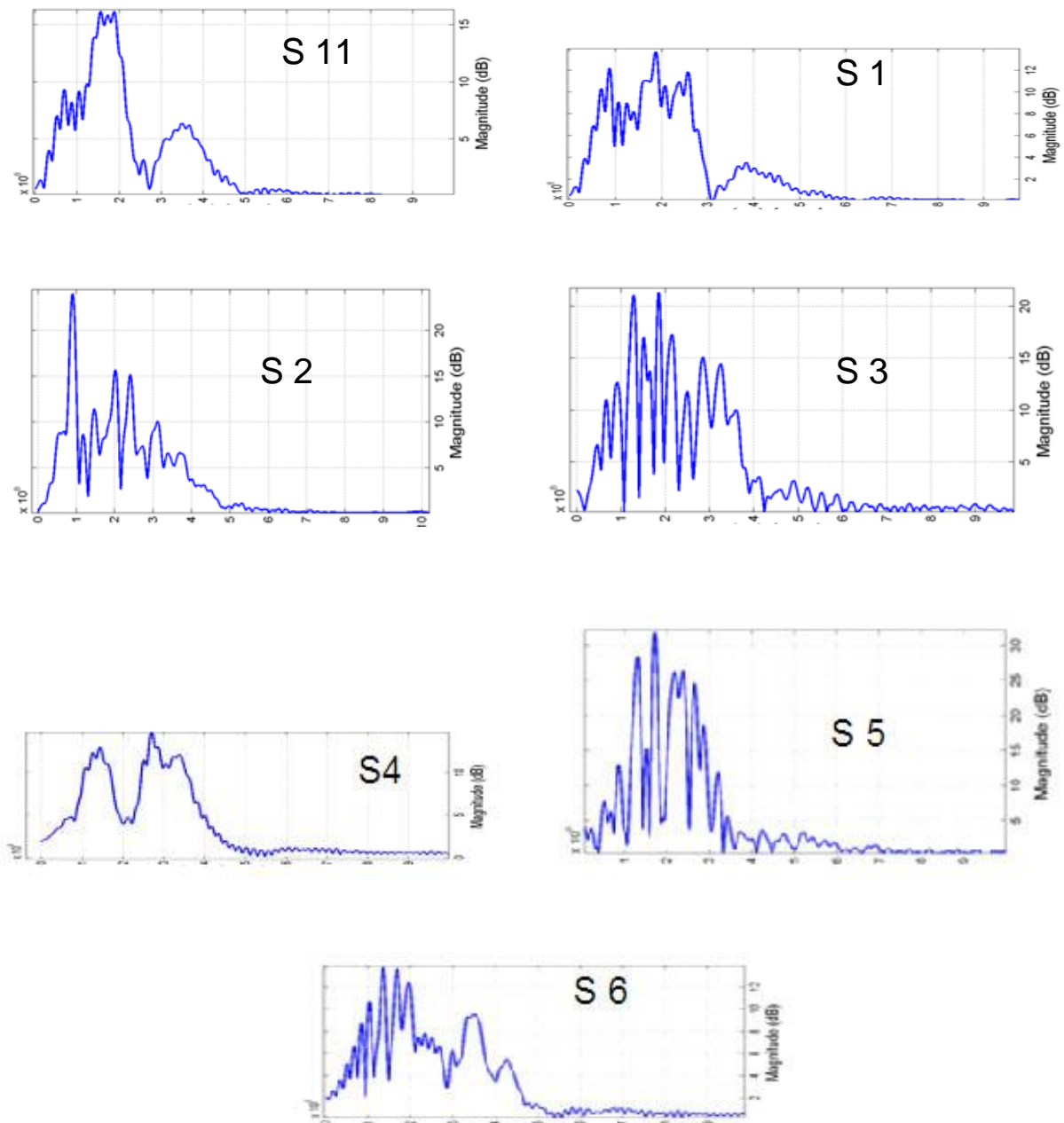


Figure 4.4.5.3 : Les spectres des 7 traces - Forages de l'avenue Chouada

Le spectre de S11, dont la trace ne montre aucune réflexion, est formé de 2 pics centrés vers 180 MHz et vers l'harmonique 2, au voisinage de 360 MHz, avec un minimum d'amplitude clair entre ces deux maxima.

De même pour S4, dont la trace ne montrait aucune réflexion, on note un «trou» dans le spectre entre 140 et 280 MHz.

B 3 – Spectre glissant

Une autre tentative, consiste à calculer un spectre glissant le long d'une trace, de façon à étudier le changement de contenu fréquentiel au passage d'une interface (Irving, 2003), (Bradford, 2006).

On note sur l'exemple ci-dessous (fig. 4.4.5.4) que la fréquence maximale à l'interface située vers 50 ns (5×10^{-8} s) est supérieure à celle de la réflexion de surface vers 5 ns ($0,5 \times 10^{-8}$ s) Ceci se justifie puisqu'en surface, la réflexion se fait sur le toit d'une formation détritique, dont la valeur de la permittivité relative est de l'ordre de 9, alors qu'en profondeur, elle se fait sur le vide, de perméabilité relative égale à 1.

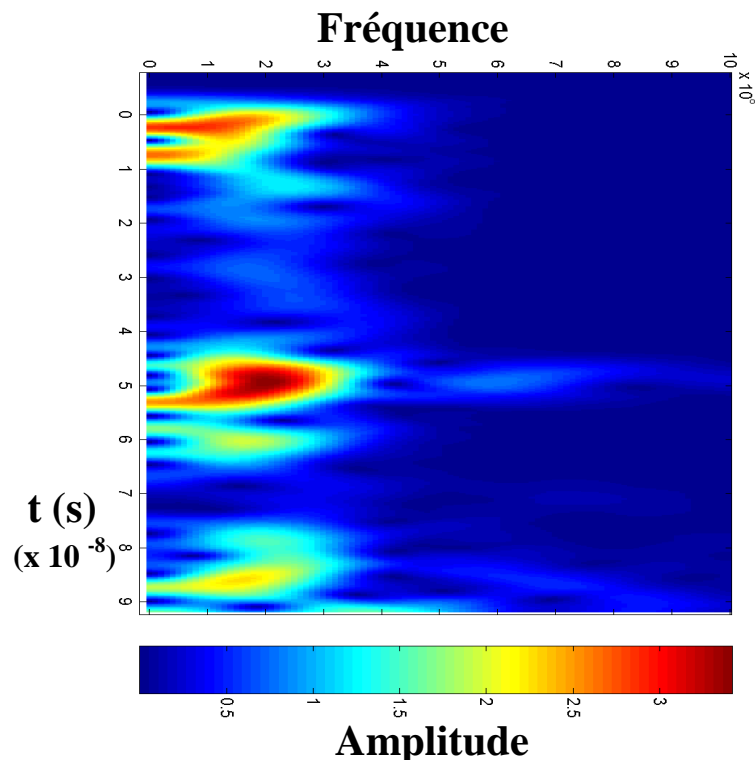


Figure 4.4.5.4 : Diagramme temps / fréquence obtenue sur la trace S 13

4.4.6 - Contribution à la cartographie des cavités sur l'ensemble de la Médina

Comment les radargrammes ont-ils été exploités pour localiser et cartographier les cavités sur l'ensemble de la Médina ?

Les premiers radargrammes de la zone expérimentale ont été analysés en détail, afin de placer les forages de contrôle. Le type de document établi pour ces profils est celui de la figure 4.4.6.1, ci –dessous (C. Fauchard, R.Benot et al, 2006).

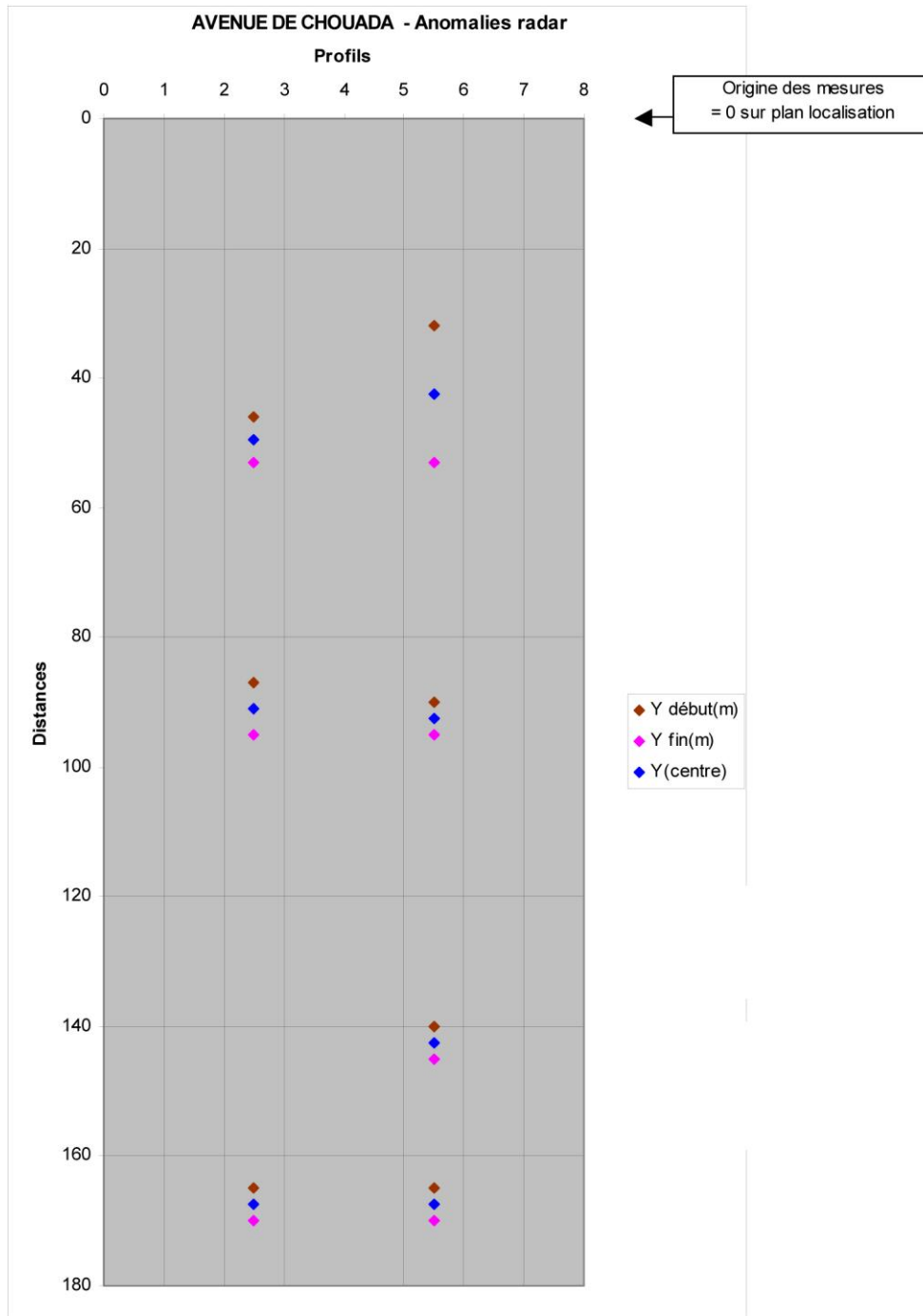


Figure 4.4.6.1 : Analyse détaillée de profils parallèles sur l'avenue Chouada

L'ensemble des 275 radargrammes enregistrés lors de cette mission, a ensuite été analysé, en recherchant systématiquement les types de réflexion et de réponses de l'environnement répertoriés dans la typologie présentée ci-dessus. (§ 4.4.3 – Typologie des réflexions).

En appliquant le principe de précaution maximale, une cavité potentielle a été déclarée, chaque fois que de tels signaux ou des signaux voisins ont été rencontrés.

La même approche a été appliquée aux radargrammes de la dernière phase. C'est ainsi que la carte finale présentée dans le dernier chapitre « Synthèse – Recommandations » a été construite.

Notre approche a été volontairement « alarmiste », comme le confirme la comparaison entre les différentes techniques.

4.5 – Corrélations entre les différentes techniques

L'organisation matérielle des travaux et la disponibilité des équipements n'ont malheureusement pas permis de tirer le maximum de profit de l'approche multi-méthodes. Des mesures répétées de contrôle, n'ont notamment pas pu être réalisées, a posteriori.

4.5.1 - Tomographie électrique et Radar

Quatre exemples sont fournis.

On note sur les sections Radar, des hyperboles de réflexion qui coïncident raisonnablement bien avec les anomalies résistantes mises en évidence par la tomographie électrique. En revanche, on note également d'autres hyperboles le long de ces mêmes profils.

L'intérêt de la tomographie est de permettre une première sélection des anomalies répertoriées par le Radar, avant un forage de contrôle ou avant tout autre complément d'investigation. Les anomalies « résistantes » étant d'abord privilégiées.

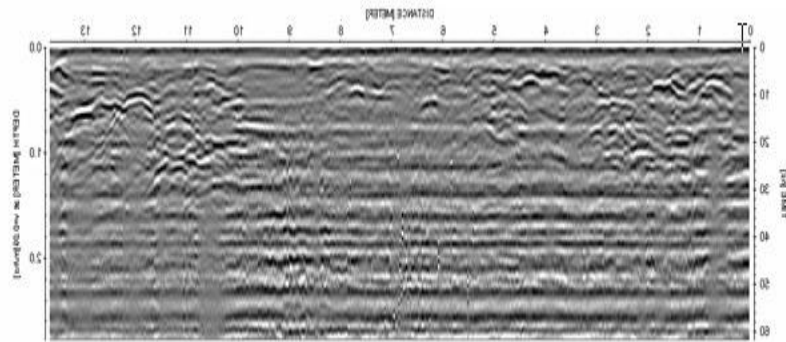
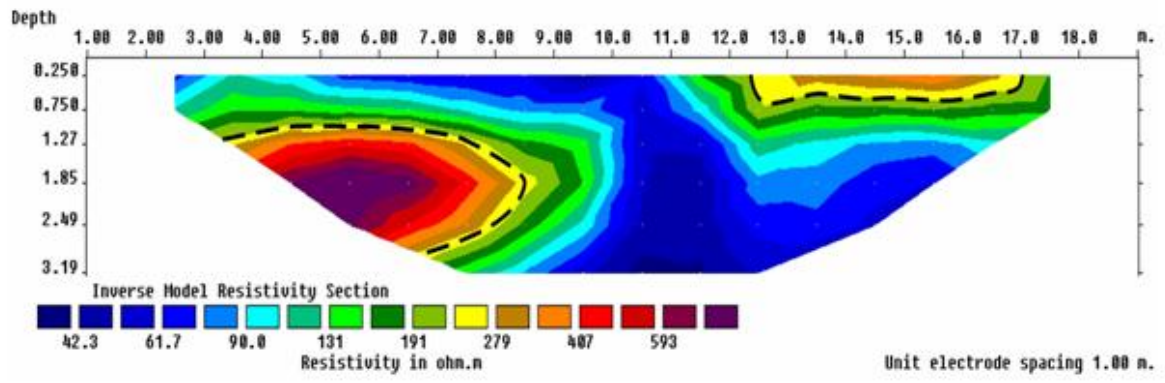


Figure 4.5.1 : Tomographie EB 4 – Radar 13

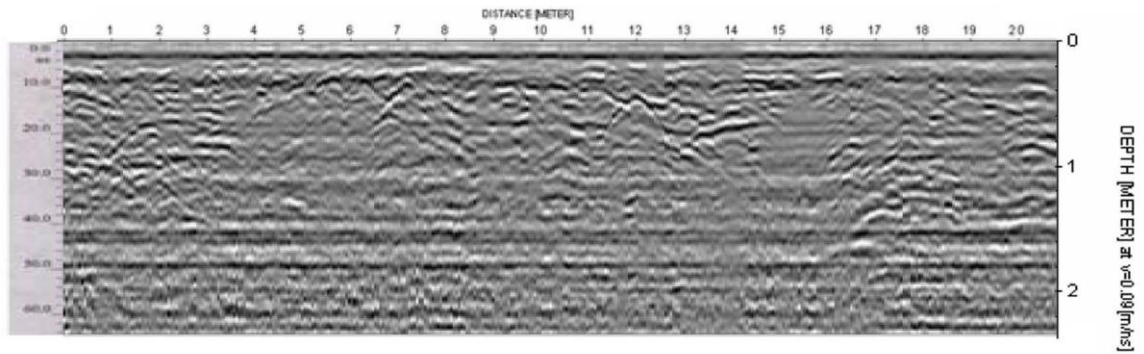
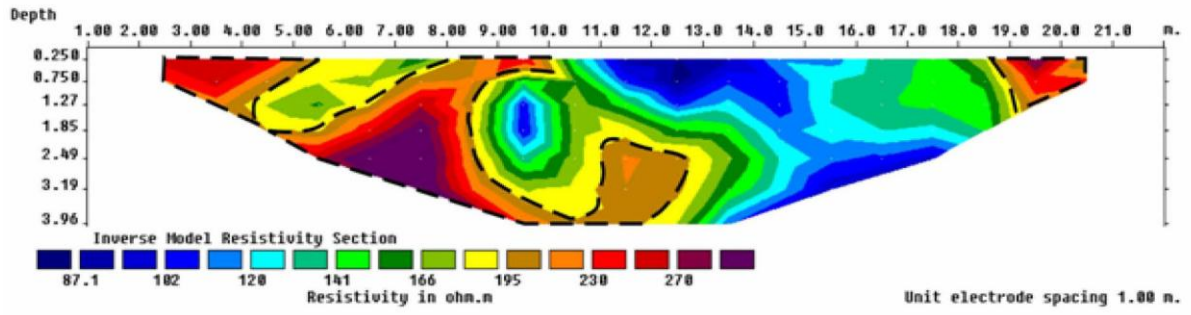


Figure 4.5.2 : Tomographie EV2 – Radar 166

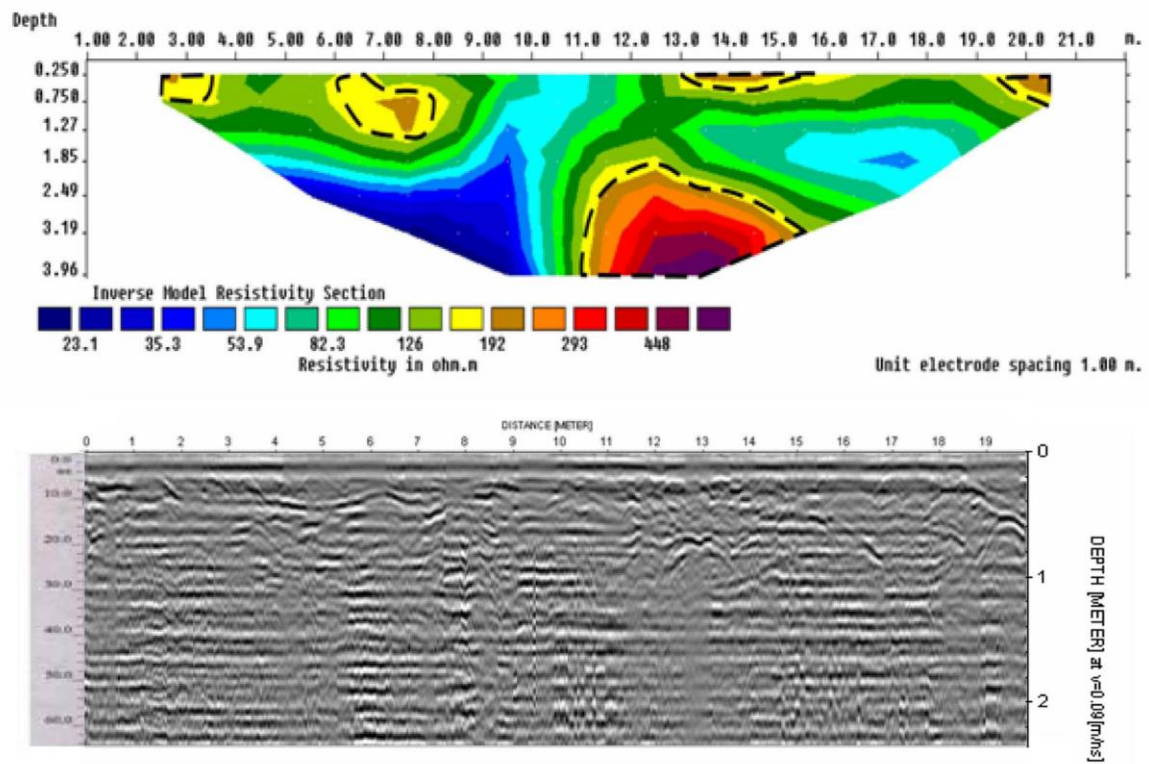


Figure 4.5.3 : Tomographie E3 – Radar 122

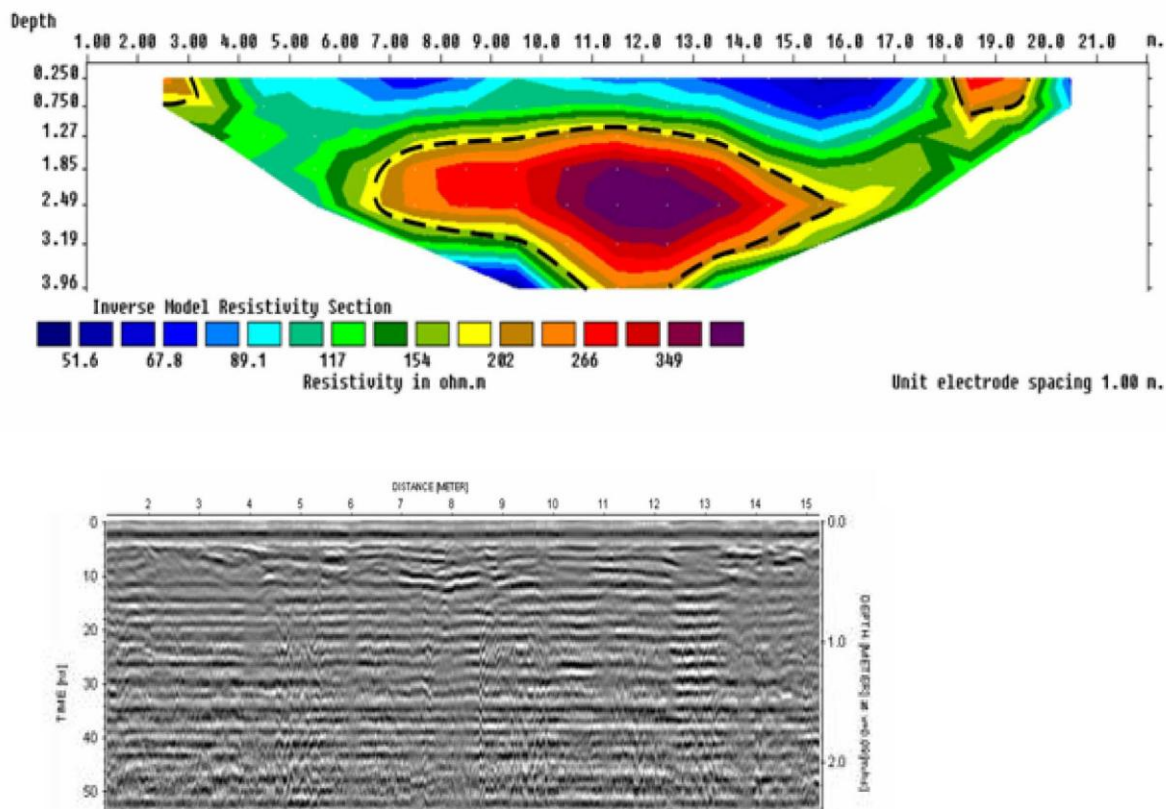


Figure 4.5.4 : Tomographie E5 – Radar 135

L'une des conclusions qui s'impose est que la carte finale rendue établie en priorité à partir du radar, ne saurait être considérée comme définitive pour des prises de décision locales. Toute prise de décision locale nécessitera un réexamen de l'ensemble des données et la plupart du temps des compléments de mesure, en relation directe avec l'utilisation finale du lieu considéré, comme il sera expliqué dans les recommandations ci-après (§ 5.4).

4.5.2 – Electromagnétisme et Radar

Deux exemples sont fournis.

La situation est la même que pour la corrélation tomographie / Radar. Sur chacun des profils radar on note plusieurs hyperboles ; par conséquent en appliquant le principe de précaution, on annonce plusieurs cavités vraisemblables,

le long du profil, ce qui d'ailleurs a été confirmé par les forages sur le premier profil.

L'électromagnétisme tendrait à en privilégier une seule, celle qui donne lieu à l'anomalie maximale. C'est donc toujours l'ensemble des informations, plus des compléments indispensables qu'il faut considérer pour chaque site.

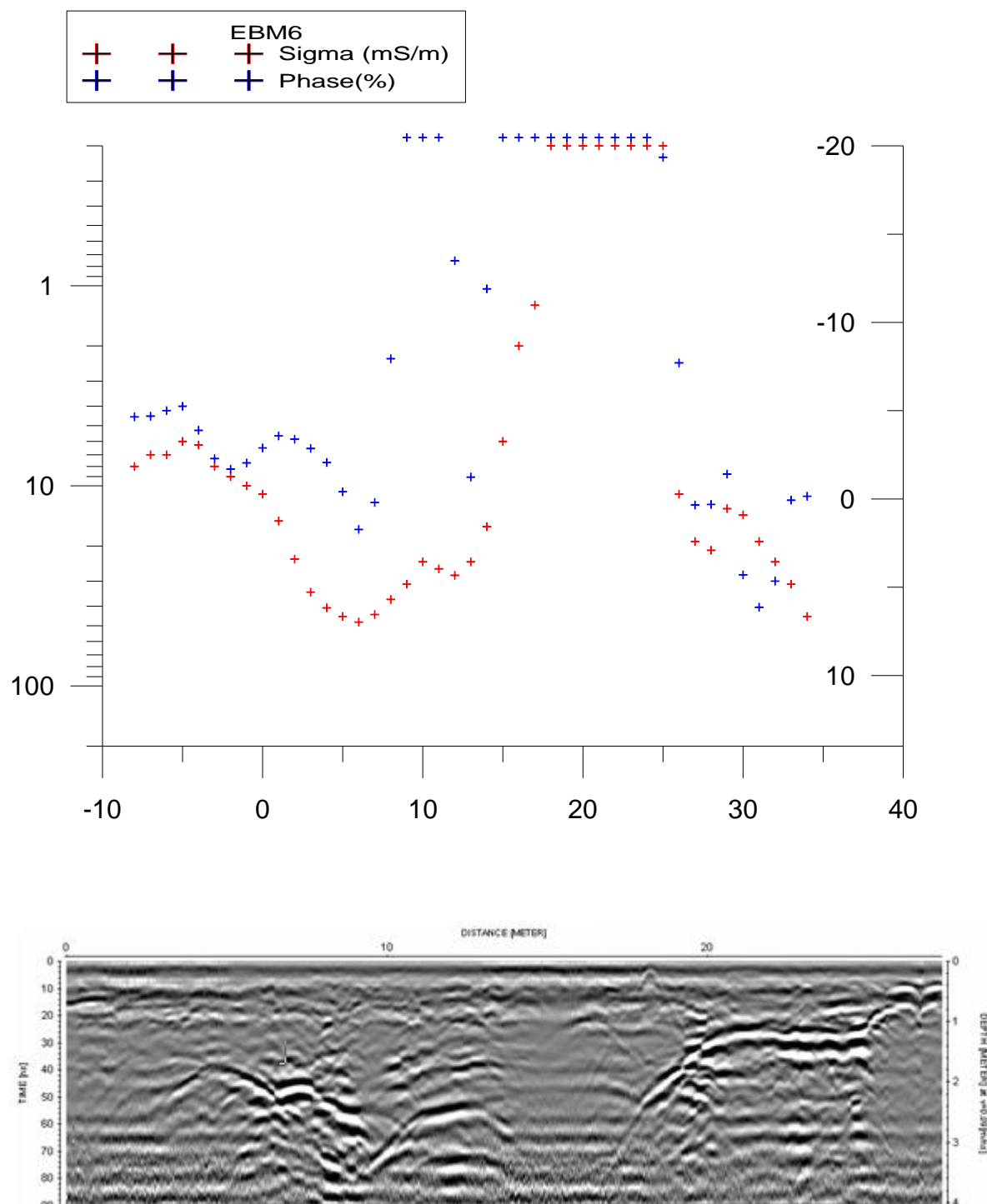


Figure 4.5.5 : Electromagnétisme EBM 5V – Radar 59

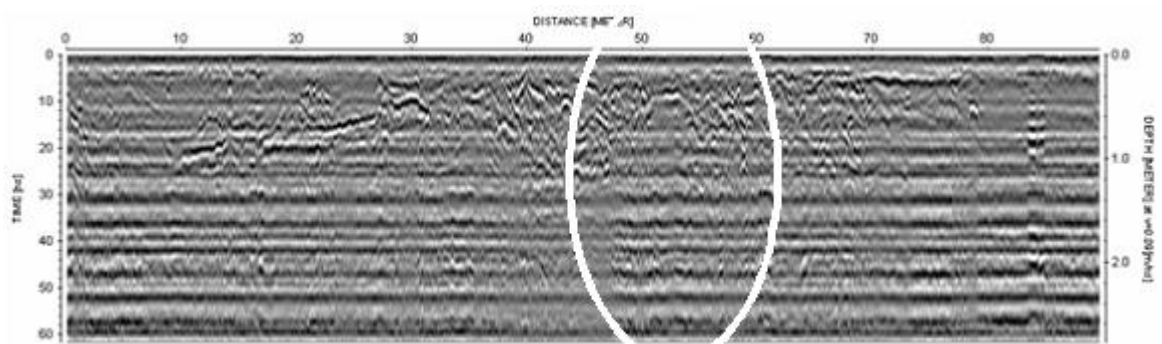
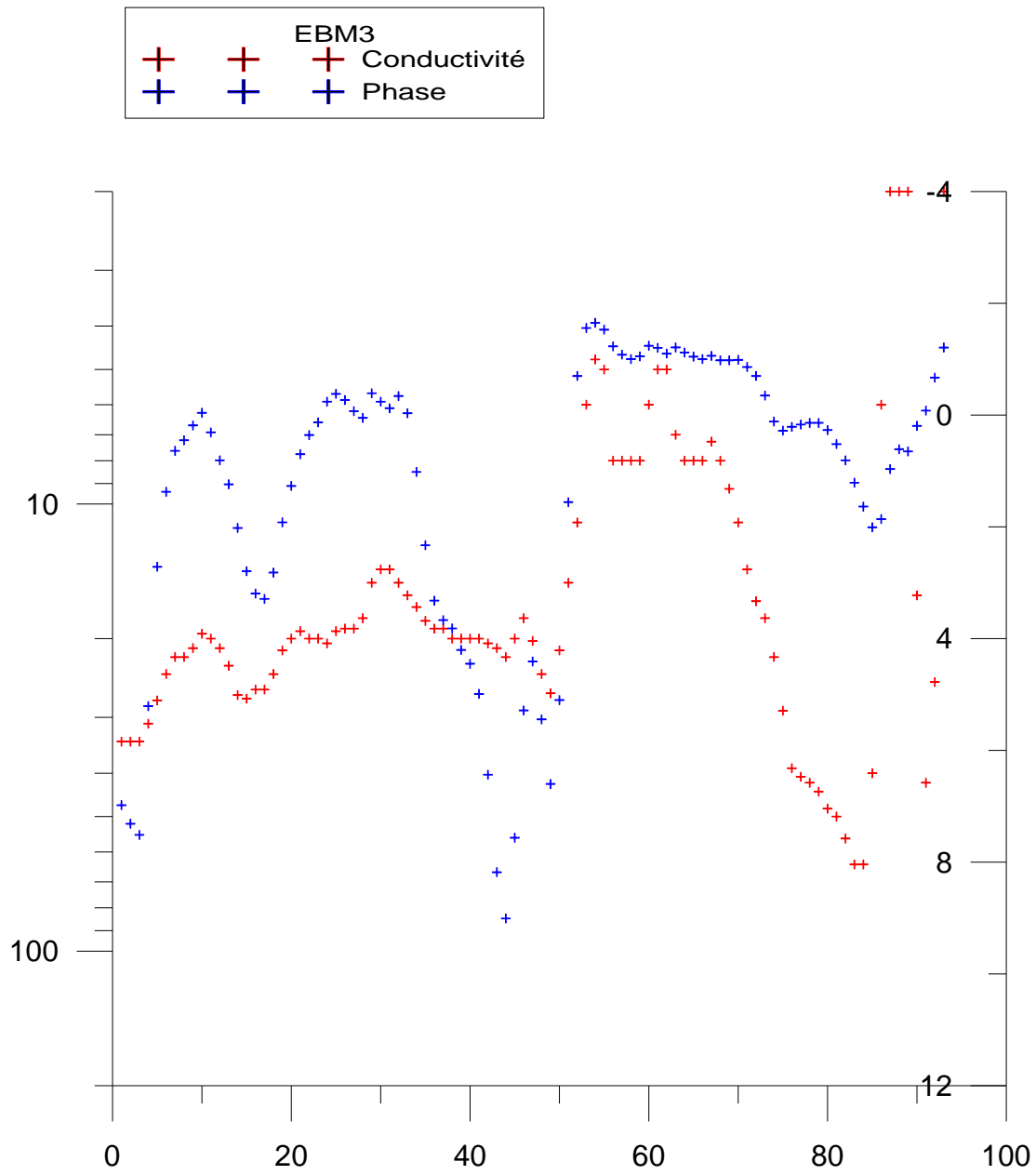


Figure 4.5.6 : Electromagnétisme EBM 3 – Radar 22

Chapitre 5

Synthèse - Recommandations

5.1 – Application des méthodes géophysiques

La quantité de données acquises est considérable. Elles n'ont été exploitées qu'en partie. Des conclusions générales peuvent néanmoins d'ores et déjà être tirées.

De plus nous avons proposé que les méthodes géophysiques soient encore utilisées lors des opérations de construction, de réhabilitation et d'aménagement de la médina.

5.1.1 – Le radar géologique

Le radar a pleinement rempli son rôle dans ce projet. Il a permis de réaliser la carte demandée et donc de débloquent la situation administrative. Il a démontré ses capacités d'imagerie de haute résolution. Ces images sont tellement riches qu'elles sont particulièrement difficiles à interpréter. D'autant plus que la permittivité est un paramètre moins discriminant que la résistivité électrique en génie civil, et que le radar caractérise les interfaces plutôt que les volumes, en première approximation.

Dans les cas simples néanmoins, il s'est montré très efficace comme l'ont confirmé les forages de contrôle.

Il se peut qu'il soit encore plus efficace pour des études de détail si l'on s'adresse à un équipement plus performant que le SIR 3000, parce que l'objectif ne sera pas les grands linéaires.

Pour résumer, c'est un outil de reconnaissance incontournable pour la recherche de cavités peu profondes.

5.1.2 – L'électromagnétisme en champ proche

L'électromagnétisme en champ proche est connu pour ses capacités à détecter des conducteurs confinés d'une part, et à cartographier des variations latérales de milieux subtabulaires d'autre part.

Il s'est montré efficace semble-t-il, pour détecter des contacts verticaux entre des formations relativement résistantes, notamment entre les formations détritiques et le vide, en mode HCP, soit VD, aussi bien à partir de la conductivité qu'à partir de la composante en phase.

En dépit de sa grande sensibilité aux conducteurs anthropiques et du fait que c'est une technique de profilage et non de tomographie, il mérite d'être de nouveau testé de manière plus systématique pour la recherche de cavités vides peu profondes, par comparaison notamment avec la tomographie électrique.

Pour résumer, si les résultats obtenus sur quelques uns des profils de Béni-Mellal sont confirmés, c'est un outil de reconnaissance recommandé dans des situations semblables.

5.1.3 – La tomographie électrique

Les images obtenues à Béni-Mellal s'avèrent d'une grande qualité et d'une grande précision. C'est un outil d'étude détaillée que nous recommandons pour la recherche de vides importants à faibles profondeurs.

Ses capacités d'imagerie 2D et 3D, du fait des programmes d'inversion, en font un outil précieux. Les problèmes de mise en oeuvre sur des revêtements durs posent malgré tout, un problème mal résolu aujourd'hui.

Pour conclure, la tomographie électrique est recommandée sans modération, chaque fois qu'elle peut être mise en œuvre, pour des études détaillées.

5.1.4 - La sismique

La place tenue par la sismique dans ce mémoire est faible. La sismique réfraction en effet n'est pas adaptée à la recherche de cavités vides dans le contexte géologique de Béni-Mellal. Certes il se peut que des anomalies de temps de trajet des premières arrivées soient liées à des effets secondaires dus à la présence de cavités peu profondes, mais cette technique ne peut être préconisée pour résoudre de tels problèmes.

Il est vraisemblable que les **techniques de tomographie sismique de haute résolution** permettraient la détection des cavités de Béni-Mellal, aussi bien que la tomographie électrique, du fait de leurs dimensions et de leur faible profondeur. Mais les contraintes de mise en œuvre en milieu urbain et de coût, les placeraient en seconde priorité par rapport à cette dernière.

Deux techniques sismiques nouvelles sont actuellement préconisées pour les recherches de cavités peu profondes : **(1) la sismique en ondes de surface** et **(2) la sismique passive**, qui consiste à enregistrer et à traiter les « bruits » microsismiques d'origine naturelle ou anthropique. La médina de Béni-Mellal, est un terrain d'expérience actuellement à la disposition des équipes de chercheurs.

5.1.5 – La microgravimétrie

Elle n'a pas été testée dans la médina. Elle ne peut être considérée comme une technique très adaptée à ce type d'objectif, en raison de la densité de l'habitat et de sa faible productivité.

Il serait intéressant néanmoins de réaliser quelques travaux expérimentaux, pour des raisons pédagogiques et pour progresser dans la technologie et la connaissance. La médina est à la disposition des équipes potentiellement intéressées.

5.1.6 - Les forages de contrôle

Comme il a été dit ci-dessus, les forages de contrôle font partie intégrante de toute campagne géophysique.

Il existe des foreuses spécialement adaptées aux objectifs fixés à Béni-Mellal – des forages de profondeur maximale de l'ordre de 6 à 8 mètres. Elles permettent de réaliser soit des forages destructifs, soit des carottages. Elles sont indispensables à toute équipe chargée des investigations de routine, aussi bien que de l'aménagement quotidien de la médina et à plus forte raison, lors d'opérations de la réhabilitation.

5.1.7 – Diagraphies, imagerie et géophysique de forage

Ce sont des outils complémentaires qui ne se justifient pas quotidiennement. Des opérations expérimentales sont en revanche conseillées à titre pédagogique et afin de progresser dans la technologie et dans les connaissances. L'étude indirecte d'un sous-sol sous un bâtiment en effet, ne peut se faire qu'à partir de forages réalisés à la périphérie – et éventuellement en son centre - par des tomographies – électrique, électromagnétique, sismique ou de radar.

5.2 - Cartographie des cavités de la Médina de Béni-Mellal

La carte de la localisation des cavités extraite du rapport final remis à l'Agence Urbaine de Béni-Mellal et aux autorités locales et régionales est fournie ci-dessous (fig. 5.2.1).

Elle montre clairement l'ampleur des difficultés que rencontrent aujourd'hui les autorités pour :

- 1 – assurer la sécurité des personnes et des biens,
- 2 – délivrer des permis d'ouvertures de nouvelles installations, de transformation d'usage et de permis de construire,
- 3 - procéder à la maintenance et au développement des réseaux,
- 4 – définir un projet de réhabilitation de la médina.

Cette carte n'est pas le fruit de la géophysique seule. Elle est le fruit de la méthodologie décrite au début de ce mémoire et préconisée dans le Guide Technique édité par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Mais c'est malgré tout le projet à l'initiative des géophysiciens qui a permis de la réaliser.

Cette carte ne peut être utilisée aveuglément par les décideurs telle quelle. Elle doit servir de support pour planifier les opérations futures, mais un dialogue avec les géophysiciens et des mesures complémentaires adaptées à chaque opération restent indispensables, comme il est proposé dans les recommandations.

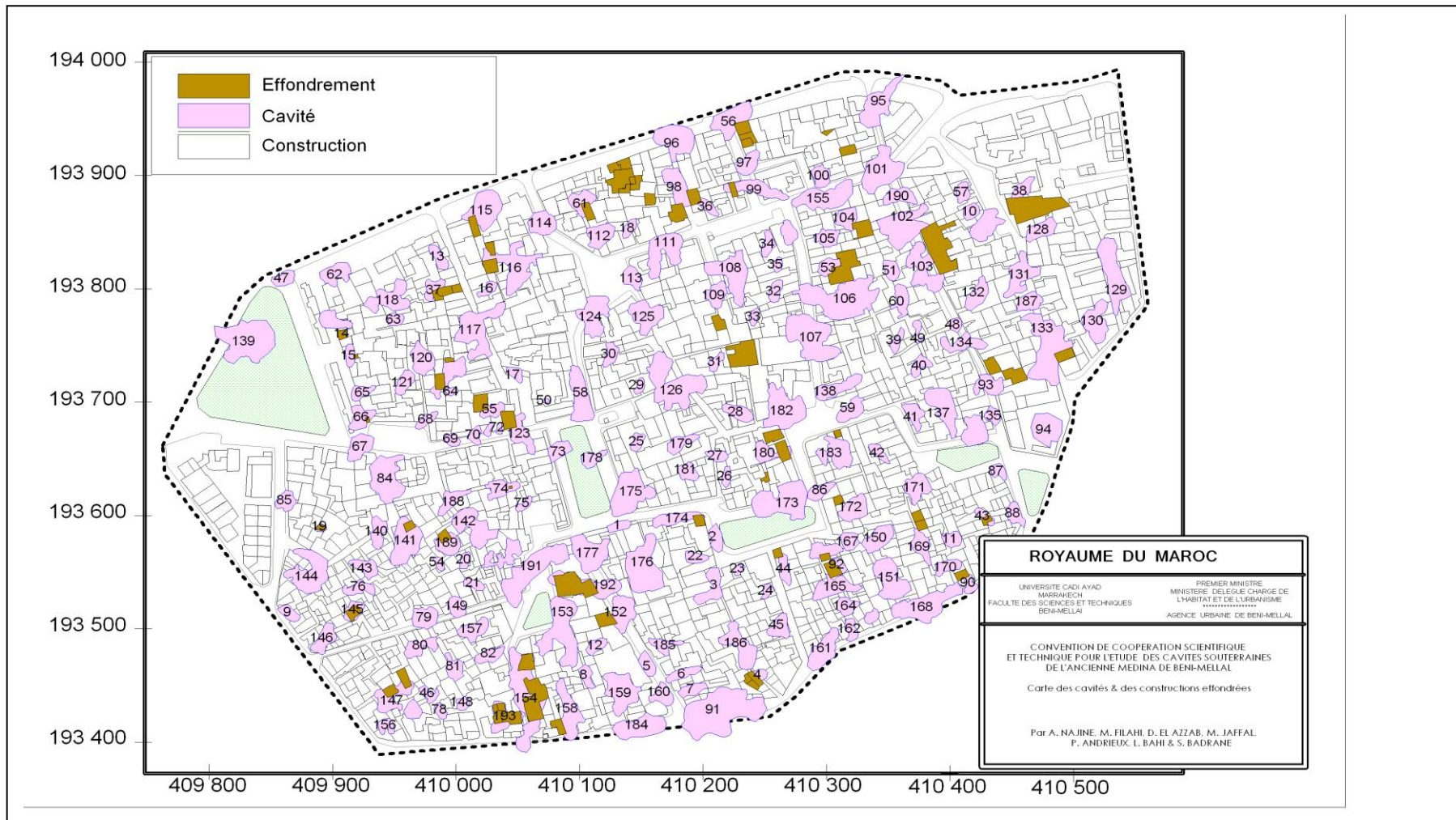


Figure 5.2.1 : Carte des cavités, remise à l'issue du projet

5.3 – Réponses aux questions posées par les responsables du projet – Conclusions partielles

Les travaux géophysiques, les forages de contrôle, les enquêtes et les visites sur le terrain ont permis de **confirmer certaines des connaissances** précédentes, de **corriger plusieurs interprétations** proposées antérieurement et de tirer **des conclusions nouvelles**.

5.3.1 – Conclusion générale

Tout projet d'aménagement réaliste choisi pour la Médina, est compatible techniquement, esthétiquement et financièrement avec l'existence des cavités souterraines.

Telle est la conclusion générale à laquelle nous sommes arrivés. Certes, celle-ci dépasse dans une grande mesure le domaine strict de compétence, du géologue, de l'hydrogéologue et du géophysicien, c'est à dire du spécialiste des géosciences. Elle découle cependant naturellement des travaux que nous avons réalisés.

**Cette conclusion générale doit maintenant être confirmée ou corrigée à la marge, par quelques essais quantitatifs en des lieux bien précis, conduits par le géotechnicien, sous le contrôle de l'urbaniste et de l'architecte
(voir § 5.4 - Recommandations)**

Les résultats spécifiques et leur interprétation, qui nous ont conduits à cette conclusion générale, sont les suivants:

A - Le sous-sol de la Médina, qui est de nature détritique et lacustre sur plus de 100 m d'épaisseur, est extrêmement sain et stable du point de vue

géologique et hydrogéologique. *(Cette conclusion que nous émettons en notre qualité de spécialistes des géosciences après nos travaux et de nombreuses visites de cavités, contredit clairement celle du rapport GESI 2004 – sous mission A2, page 73. Ce rapport du GESI a en effet été écrit par des ingénieurs qui n’ont vraisemblablement visité aucune cavité et qui se sont contentés de lire des éléments de rapports précédents, puis de les extrapoler à partir de leurs connaissances livresques sur les formations calcaires et sur la formation des karsts. Or il n’existe ni calcaire – hormis par endroits, une dalle supérieure peu épaisse et quelques bancs de travertins également très peu épais – ni nappe phréatique, puisque le niveau piézométrique est à plus de 20 m de profondeur, ni a fortiori de karsts, dans les 10 premiers mètres de ce sous-sol qui seuls nous intéressent.*

B – Toutes les cavités visitées et toutes celles qui ont conduit à des effondrements récents sont prouvées être des carrières souterraines. Elles ont été creusées par l’homme qui y a puisé les matériaux nécessaires à ses constructions en pisé. La technique d’exploitation de ces carrières souterraines est classique dans la communauté des carriers; il s’agit de la technique dite par «**chambres et piliers**» (voir le guide : Détection des cavités souterraines par la géophysique – Projet CRITERRE – Paris 2004)

C – Ce sont toujours des causes externes au sous-sol géologique et hydrologique qui ont conduit aux instabilités mécaniques, puis à la dégradation accélérée des piliers et enfin aux effondrements. Ces causes sont liées à l’activité humaine récente. La plupart des auteurs s’accorde à dire que les deux causes principales sont : (i) l’effet de la circulation des eaux usées et pluviales et éventuellement des fuites des circuits d’eau potable, ou au contraire le confinement non contrôlé et le manque d’aération (ii) l’usage des cavités comme latrines et dépôt de détritrus. Deux autres causes sont invoquées : (iii) les surcharges créées par des constructions hors normes et (iv) le trafic

automobile et les transports par camions, au-dessus de cavités pour lesquelles aucun soutènement récent n'a été entrepris.

D – Quelques exemples recensés de consolidation simple réussie et/ou d'utilisation optimale, permettent d'affirmer qu'il existe plusieurs solutions sûres et peu onéreuses pour remédier à l'existence de cavités sous les maisons d'habitation : murs de soutènement en pierres maçonnées dans la cavité à 2 étages dite «Kehf Ben Addi Hamza», près du boulevard Mohamed V d'une part et aménagement d'un sous-sol à usage commercial dans la cavité dite « Kehf Bata», à proximité de la place de la Liberté , d'autre part. Des contre-exemples de consolidation par piliers de béton ont également été rencontrés.

E - En conséquence, il nous paraît clair que dès que les causes externes de dégradation liées à l'activité humaine seront supprimées, **tout projet réaliste d'aménagement, d'urbanisme et d'architecture compatible avec la vocation choisie pour la Médina pourra être réalisé.** On peut commencer par **des projets locaux d'abord, c'est-à-dire à l'échelle d'un groupe de maisons ou d'un quartier.** L'ensemble de la Médina pourra ensuite être traité dans le cadre d'un projet complet d'aménagement. **Le surcoût lié à la consolidation et/ou à l'utilisation partielle ou totale de toutes les cavités existantes sera vraisemblablement marginal,** par rapport au coût total de tout projet architectural ou d'urbanisme, pourvu que ces contraintes soient prises en compte dès la conception dudit projet.

Rappelons néanmoins que quelques essais géotechniques qualitatifs et quantitatifs spécifiques, devront être conduits en certains lieux particuliers, pour confirmer ou modifier légèrement ces conclusions (voir Recommandations-Projet N°5.4.3.4, en annexe). Rappelons également que tous les essais spécifiques recommandés par les règles de l'art de l'aménagement et de la

construction, devront également être réalisés avant l'acceptation, puis la réalisation de tout ouvrage ou bâtiment spécifiques.

5.3.2 – Conclusions particulières

A – Un grand nombre des cavités déjà cartographiées a été confirmé. Leur géométrie a été en général bien définie, notamment l'épaisseur de leur recouvrement (voir § E ci-dessous).

B - Plus de 50 cavités nouvelles ont été cartographiées, ce qui conduit à un total de l'ordre de **200**). Nous **sommes sûrs que d'autres cavités restent à découvrir.**

C - Tous les quartiers de la Médina sans exceptions sont affectés, pratiquement de la même façon.

D - L'origine anthropique de la très grande majorité des cavités est démontrée, comme il a été dit ci-dessus. Il s'agit **de carrières souterraines** ; dont les éléments détritiques - graviers, sables et argiles - ont été extraits pour fabriquer **le pisé** utilisé pour construire les maisons et les murs. **La technique d'exploitation est celle dite des «chambres et piliers»**, par conséquent la géométrie de base des cavités est prévisible ; elle a été confirmée lors de toutes nos visites. Les passages d'une série de cavités à une autre et les tunnels de communication dont il est question oralement et dans certains écrits, sont vraisemblablement postérieurs à leur création. Nous n'en avons reconnu aucun au cours de nos travaux.

Il n'y a aucun phénomène de karstification dans les 10 premiers mètres du sous-sol, si ce n'est peut-être de légers décollements entre la dalle supérieure de calcaire quartzitique lorsqu'elle existe et les éléments détritiques, comme cela semble exister dans la carrière de Bou Acchouch.

E - Le toit des cavités est en général à une profondeur située entre 50 cm et 1 m à l'entrée, puis il s'approfondit jusqu'à 2 m environ. La dalle de calcaire quartzitique mentionnée dans tous les rapports n'est à coup sûr, pas toujours présente ; elle n'a été rencontrée que très rarement au cours de nos visites. De nombreux piliers dégradés ont été observés, ainsi que des décollements de portions des plafonds dans certaines cavités.

G - L'existence de cavités superposées est confirmée par les forages et les visites, ce que la géophysique de surface en l'état actuel de ses développements ne permettait pas de conclure

Ces conclusions nouvelles et la carte présentée répondent clairement aux objectifs fixés à cette étude, tels qu'ils sont définis dans le rapport GESI de 2004. Des solutions durables peuvent être proposées pour l'assainissement, les réseaux, l'habitat et donc pour l'aménagement de la médina .

5.4 – Recommandations

5.4.1 – Recommandations générales

A – Avenir proche:

Un projet global d'aménagement de la médina peut-être lancé dès maintenant, si ce n'est déjà fait, puisque le diagnostic concernant l'état des 10 premiers mètres du sous-sol est désormais bien établi.

Nous confirmons que selon nous, **tout projet réaliste d'aménagement, d'urbanisme ou d'architecture est compatible avec l'existence des cavités comme il est dit dans la conclusion générale.**

Il est indispensable néanmoins que des essais techniques spécifiques soient conduits par des géotechniciens en des lieux spécifiques (voir Projet N° 5.4.3.4 ci-après).

Il faudra de plus, si les connaissances locales sont insuffisamment prouvées, imposer au concepteur de toute opération individuelle quelle que soit sa taille, (1) la vérification par les moyens adéquats de l'état local du sous-sol et (2) une conception des assises de son ouvrage en accord avec cet état.

B – Sécurité :

B 1 - Des opérations locales de suppression des causes externes de dégradation des cavités, qui conduisent inexorablement à des effondrements, devraient être lancées au plus tôt, pour éviter tout nouvel accident (eaux usées et pluviales, fuites, latrines, décharges, confinement). Cinq à dix zones à risques prioritaires, peuvent être définies par les services responsables des réseaux et grâce aux enquêtes menées en parallèle avec les travaux géophysiques (voir Projet N° 5.4.3.1).

B 2 – Des opérations locales de soutènement (après déblaiement partiel ou total si nécessaire) **pourront s'avérer indispensables dans ces zones prioritaires, pour un faible coût** (Murs en maçonnerie traditionnelle- pierres et non pisé ! - pour suppléer aux piliers défaillants. En aucun cas des piliers de béton, en accord avec les préconisations de 1978).

C - Sauvegarde :

Un certain nombre de cavités méritent d'être sauvegardées car elles appartiennent **au patrimoine culturel de Béni-Mellal** et du Maroc en général et qu'elles peuvent être aménagées et valorisées **du point de vue touristique** (techniques des carriers, artisanat, histoire locale...). Elles peuvent être choisies dès maintenant par les Associations concernées et à partir des enquêtes menées en parallèle avec

les travaux géophysiques. **Ce choix devrait être fait avant le début de tout nouveau chantier. (Projet N° 5.4.3.2).**

D – Comblement :

Aucune cavité ne devrait désormais être «comblée» avec les moyens du bord et/ ou avec du «tout venant» pour deux raisons (1) il n'existe pas de technique de consolidation universelle; chaque cavité devrait être traitée selon l'usage ultérieur qui sera fait en surface (route, parking, jardin, bâtiment public, immeuble neuf, habitat traditionnel...) et (2) un diagnostic détaillé, après déblaiement éventuel des encombrants actuels pourra ainsi être réalisé et enregistré officiellement, ce qui diminuera d'autant le surcoût des diagnostics ultérieurs et partant des opérations d'aménagement.

5.4.2 – Recommandations particulières

A – Quelles priorités ?

Simultanément à la mise en œuvre **des travaux de sécurité** (voir § B ci-dessus), **tout nouveau chantier individuel ou local peut être entrepris dès maintenant**, pourvu qu'il s'inscrive dans le projet global retenu pour la Médina, à la fois du point de vue des réseaux, de l'urbanisme, de l'architecture et de la vocation finale. **Une opération phare** de démonstration et d'entraînement pourrait débiter au plus tôt, sur un quartier particulier. Ces projets prioritaires peuvent être choisis parmi la liste des projets à court terme présentée ci-dessous (**voir § 5.4.3 – Projets à court terme**).

B – Réseaux, axes routiers, bâtiments publics, industries, immeubles....

Des experts et bureaux d'étude spécialisés sauront préconiser les techniques de consolidation et/ ou d'utilisation des vides actuels pour chaque usage particulier : RADET, Ponts et Chaussées, architectes....

Pour l'assainissement, la solution 4 proposée dans le rapport du GESI 2004 – sous mission A2, pp.76 à 78 – est séduisante pour plusieurs quartiers de la Médina (**voir Projet N° 5.4.3.3-A**). L'intérêt de la réhabilitation du réseau actuel mérite également d'être étudié (**voir Projet N° 5.4.3.3-B**).

Pour le réseau routier, les solutions techniques existent et ont été mises en œuvre en dehors du Maroc, que les cavités sous jacentes soient sauvegardées ou au contraire qu'elles soient volontairement détruites.

Pour des immeubles éventuels en bordure de la Médina, la création de **deux niveaux en sous-sol**, pourrait être une solution séduisante.

C – Habitat, commerce et artisanat traditionnels, parcs...

A la suite de la visite de quelques cavités consolidées, il nous semble que des murs ou piliers en maçonnerie traditionnelle (pierres et non pisé !) se substituant aux piliers d'origine plus ou moins endommagés, constitueraient une très bonne solution définitive pour ces usages. *A vérifier auprès des architectes cependant.*

D – Création dans les Services Techniques de la Ville, d'une Unité Technique Spécialisée dans les Travaux dans la Médina. Elle pourrait être intitulée : «UTSM». Placée sous la responsabilité d'un ingénieur ou d'un technicien supérieur, elle apporterait **le soutien technique et les moyens** nécessaires pour établir ou confirmer l'état du sous-sol, **avant chaque opération de petite envergure** - réhabilitation ou de construction d'habitat individuel modeste-. Pour toutes les opérations de grande envergure, le Maître d'œuvre ou le Maître d'Ouvrage aura la responsabilité et la charge du diagnostic de l'état du sous sol au droit de son ouvrage ou de sa construction. Cette unité technique spécialisée pourrait être équipée au minimum:

- de moyens de creusement de puits de contrôle et de déblaiement,
- d'une mini sondeuse (profondeur maximum de l'ordre de 5 m, diamètre de l'ordre de 10 cm),
- d'une caméra de sondage.

E – La place de la géophysique et en particulier du Radar géologique et de la tomographie électrique dans les futures opérations locales de diagnostic:

L'apport de l'approche «Radar + forages de contrôle» d'une part et «Tomographie électrique» d'autre part, a été clairement démontré au cours de ce projet. **Une campagne systématique d'investigation Radar et/ou de tomographie électrique lorsqu'elles sont possibles (½ jour à 1 jour) pourrait à l'avenir, précéder toute opération de diagnostic local, quelle que soit son envergure (grands et petits travaux). Des opérations de Radar de forage, non encore testées à Béni-Mellal, mais mises en œuvre sur des sites semblables en dehors du Maroc, pourraient y être ajoutées (voir Projet N° 5.4.3.7).**

Ces opérations pourraient être conduites, soit par l'Unité Technique mentionnée ci-dessus (§ B) après formation du responsable, soit par un bureau d'étude marocain habilité, soit par une équipe habilitée de la FST. L'équipement Radar nécessaire (SIR 3000 ou SIR 20 de GSSI) appartiendrait en totalité ou en partie à l'équipe d'intervention. La location partielle ou totale de l'équipement et la formation du personnel sont en effet assurées au Maroc par les représentants de la société GSSI.

La création de cette unité technique et l'expérience ainsi accumulée par cette unité, en étroite collaboration avec notre équipe de géophysiciens, conduiront inévitablement à moyen et long termes, à une diminution des coûts des opérations de diagnostic, au développement des techniques d'auscultation en milieu urbain et vraisemblablement à la création d'une activité commerciale nationale et internationale de service, dans le domaine du Génie Civil.

5.4.3 – Exemples de projets à court terme

5.4.3.1 – Sécurité

Recensement des 5 sites les plus dangereux de la Médina – Remédiation temporaire ou définitive : La moyenne annuelle des effondrements importants

dans la Médina est de l'ordre de 2 à 3, au cours des cinq dernières années. **Si l'on recense aujourd'hui, les 5 sites les plus dangereux et si les mesures sont prises pour qu'il n'y ait ni effondrement, ni accident (évacuation des eaux, correction des fuites, soutènement par maçonnerie, suppression des surcharges, évacuation temporaire éventuelle des habitants....) la sécurité sera assurée à 100 % à partir de septembre 2007.**

La liste de ces 5 sites sera établie conjointement par les représentants des autorités et des associations concernées et par notre équipe, à partir des résultats de nos enquêtes.

5.4.3.2 – Sauvegarde - Valorisation

A – Recensement des cavités à préserver

Il y a au minimum 4 bonnes raisons de conserver certaines des cavités actuelles, puis de les réaménager spécialement (1+2+3) patrimoines historique (la Médina), professionnel (carrière – construction) et artisanal (huilerie, tannerie...) qui peuvent être rassemblés sous le vocable patrimoine culturel et (4) le tourisme.

La liste des cavités à préserver sera établie de la même façon que la précédente

B – Cartographie de tunnels et galeries de communication entre cavités

Si ces éléments souterrains complémentaires des cavités existent, il pourrait être intéressant pour **le sport et pour le tourisme**, de les découvrir et de les cartographier par les techniques de la spéléologie de pointe.

Des équipes de spéléologie française et suisse pourraient être contactées ; elles accepteraient vraisemblablement d'organiser des stages d'été de découverte, en direction des jeunes marocains ‘

5.4.3.3 – Assainissement – Eaux pluviales – Eau potable :

A – Assainissement du type « Unités autonomes légères pour le traitement des Eaux usées et la collecte des Eaux pluviales » (solution 4, page , Rapport GESI 2004 – Annexe A2)

La proposition faite dans le rapport GESI 2004, d'installer des unités légères d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, dans les quartiers qui ne peuvent pas être reliés au réseau principal actuel pour des raisons de topographie est a priori séduisante. **C'est aujourd'hui la seule solution qui semble réaliste pour 3 ou 4 quartiers recensés dans ledit rapport.** Il se pourrait que ce soit également une bonne solution pour des quartiers où le réseau actuel est extrêmement dégradé et nécessite de tout façon, des travaux, donc de nouveaux investissements.

Une ou deux opérations pilotes pourraient être lancées au plus tôt dans les quartiers non équipés actuellement. Une démarche prudente pourrait consister à organiser une visite d'installations de ce type aux Etats-Unis ou en Australie par 2 ingénieurs ou techniciens supérieurs de Béni-Mellal, impliqués dans les futurs travaux d'assainissement.

B - Assainissement le long des grands axes de communication

Le système d'assainissement classique actuel installé dans la Médina, est particulièrement dégradé, ce qui contribue aux effondrements accidentels. Il est dégradé pour 2 raisons, (1) parce qu'il n'a pas été construit en prenant en compte l'existence des cavités peu ou pas cartographiées à l'époque, d'où les ruptures et (2) en raison d'une maintenance préventive et d'un entretien insuffisants. **La question se pose de savoir s'il faut réhabiliter le système actuel en prenant en compte la bonne cartographie des cavités et en choisissant des techniques de construction adaptées à ces conditions, ou s'il faut abandonner ce type de réseau classique et avoir recours aux unités légères décrites ci-dessus, pour la plus grande partie de la Médina, sinon pour toute la Médina.**

Un projet d'étude pourra être confié à un bureau spécialisé pour conclure sur ce point avant d'entreprendre la réhabilitation complète du réseau actuel. Ce bureau d'étude travaillera à partir de l'excellent rapport* mentionné ci-dessus (GESI – 2004) et il prendra en compte les résultats du fonctionnement des unités autonomes pilotes installées dans les quartiers sélectionnés (Projet 5.4.3.3-A ci-dessus).

** Ce rapport est excellent du point de vue des réseaux; il ne l'est pas, comme il a été dit ci-dessus, concernant la problématique des cavités !*

5.4.3.4 - Préparation de la validation du Projet d'Aménagement de la Médina - Tests géotechniques

Un bureau d'étude suisse pourrait être choisi*, après un appel d'offre international éventuellement, **pour réaliser des essais géotechniques quantitatifs sur une dizaine de sites soigneusement sélectionnés au minimum**, de façon à confirmer ou à modifier à la marge notre conclusion générale et de façon à valider a priori les grandes options du Plan d'Aménagement de la Médina.

Les sites à tester seront soigneusement sélectionnés par les responsables des Services Techniques de la Ville, le bureau d'étude chargé du Plan d'aménagement de la Médina et notre équipe de géophysiciens. Quelques suggestion : (1) **le plancher inférieur** de cavités à **double étage** ; (2) **le plancher inférieur** pour plusieurs cavités à **un seul étage** dont des huileries ; (3) **essais en surface** au-dessus de cavités bien identifiées – chambres et piliers d'origine, avec murs de soutènement, comblées avec du tout venant..._ ; (4) des lieux stratégiques choisis par le bureau d'étude chargé du Plan d'aménagement...

** L'indépendance et la compétence des bureaux suisses en matière de géotechnique et de Génie civil ne sont pas à démontrer.*

5.4.3.5 – Opération phare

S'il y a dès maintenant un accord général des responsables territoriaux sur l'aménagement d'un quartier particulier et si ce projet s'intègre à coup sûr dans le futur Projet d'Aménagement de la Médina, **cette opération phare peut débiter dès maintenant**, en suivant les recommandations générales et particulières faites ci-dessus (§ 1 et 2)

5.4.3.6 – Constitution de l'Equipe Technique Spécialisée (ETSME)

Si le principe de la création d'une telle Unité est retenu, elle peut-être mise en place dès que nécessaire et les investissements en équipements spécialisés (mini sondeuse et caméra de forage) peuvent être programmés pour la fin de l'année 2007 ou le début de l'année 2008.

5.4.3.7 – Opération pilote de l'ETS, accompagnée d'une opération «Radar de puits et forages»

Les techniques d'investigation et de diagnostic ne progressent que par l'accumulation des expériences. **Il serait bien que 2 ou 3 opérations pilotes de diagnostic de l'état réel du sous-sol à l'emplacement d'un futur ouvrage ou d'une future construction puisse être menées par l'ETSM au plus tôt, en étroite collaboration avec notre équipe de géophysiciens.** Au cours de ces opérations, **le Radar de puits ou de forage devrait être testé.** L'équipement spécialisé nécessaire peut-être loué dans un premier temps, jusqu'à ce qu'il soit démontré que l'achat de l'unité d'acquisition, des antennes et des logiciels de traitement s'impose.

5.4.3.8 – Le Projet d'Aménagement de la Médina (PAM ?)

Les connaissances actuelles du sous-sol de la Médina permettent d'ores et déjà d'affirmer que tout projet réaliste est acceptable. Le réalisme du Projet d'Aménagement de la Médina, qui sera prêt dans quelques mois pourra ainsi être apprécié dès sa présentation, du point de vue technique et financier. **Quand les résultats du projet N° 5.4.3.4 seront connus, la version définitive du PAM pourra être proposée et définitivement validée.**

Conclusions

Les trois objectifs de cette thèse concernaient (1) les techniques géophysiques, (2) la cartographie des cavités de la Médina et (3) des préconisations pour les opérations futures de mise en sécurité, de sauvegarde et d'aménagement.

Ce que nous avons apporté dans chacun de ces domaines est exposé en détail dans le dernier chapitre « Synthèse et Recommandations ». Nous ne pouvons qu'être brefs dans ces conclusions et nous projeter dans l'avenir

1 – L'apport dans le domaine géophysique :

A – Le radar géologique a démontré qu'il était l'outil de reconnaissance incontournable des premiers mètres du sous-sol, grâce à ses capacités d'imagerie de haute résolution spatiale et à sa capacité à couvrir rapidement de grands linéaires.

Il a permis de réaliser la carte demandée. Il a fourni des réponses claires dans des cas simples, qui ont été confirmées par les forages. Localement, l'étude des signatures spectrales des traces et mieux, l'étude des spectres le long de fenêtres glissantes peuvent permettre vraisemblablement de tirer des conclusions sur les contrastes de permittivité, donc dans une certaine mesure de différencier les réflecteurs au toit des vides, des réflecteurs géologiques.

Il est recommandé de tester un radar de très haute qualité pour des études locales de détail avec des profondeurs d'investigations plus importantes, dans l'espoir de diminuer le nombre de forages de contrôle.

B - L'électromagnétisme en champ proche de type EM 31, est également un outil de reconnaissance incontournable. Il a démontré une parfaite répétitivité et une grande sensibilité aux contacts verticaux semble-t-il, dans la configuration HCP ou HD, aussi bien avec la conductivité, qu'avec la composante en phase. Il n'a pas été testé de manière suffisamment systématique dans ce projet, notamment en parallèle avec la tomographie électrique. Il mérite de l'être.

C - La tomographie électrique est un outil très performant lorsqu'il peut être mis en oeuvre. Il a permis de cartographier sans ambiguïté des anomalies résistantes dont le toit était situé à moins d'1 m de profondeur.

D - Les nouvelles techniques sismiques en ondes de surface et la sismique passive méritent d'être testées si l'environnement le permet. En revanche l'étude des arrivées premières est peu ou pas adaptée.

E – Il est fortement préconisé de créer une équipe d'intervention géophysique qui interviendrait au cas par cas dans le cadre de l'aménagement et de la réhabilitation de la Médina. Elle serait équipée au minimum d'un radar, plus performant d'ailleurs que le SIR utilisé pour ce projet, d'un EM 31 et d'un équipement de tomographie électrique. Elle pourrait intervenir en d'autres lieux au Maroc.

F - Les données de très bonne qualité acquises lors de la mission expérimentale, qui n'ont pas été totalement exploitées du point de vue scientifique, notamment en radar, constituent un ensemble à la disposition de la communauté scientifique internationale.

G – Au cours des années à venir enfin, la Médina est proposé comme un champ d’expérimentation possible pour la confirmation de l’intérêt de l’électromagnétisme en champ proche et de la tomographie électrique et pour des tests des nouvelles méthodes sismiques, des diagraphies et de géophysique de forage.

2 - Apport à la cartographie des cavités de la Médina, en réponse à la demande de l’Agence Urbaine

A - Une carte comportant près de 200 cavités a été remise, qui regroupe l’ensemble des informations nouvelles obtenues à partir de la bibliographie, des enquêtes, des visites et de la géophysique. Elle répond au mieux à la demande des maîtres d’ouvrage.

B - Le rapport d’accompagnement de la carte contient des éléments très précis concernant la géologie locale et la problématique des cavités, qui corrigent en grande partie des informations antérieures trouvées dans nombre de rapports et de publications antérieurs qui pouvaient induire en erreur les décideurs.

C - La nouveauté du projet tel qu’il a été mené, par rapport aux précédents, concerne l’importance qui a été donnée à l’approche intégrée des géosciences, par opposition à des interventions séparées d’ingénieurs spécialistes non géologues, qui d’une façon générale avaient réalisé peu ou pas de travail de terrain.

D - La géotechnique quantitative toutefois a été trop absente parmi les géosciences. Il est recommandé de faire appel à un bureau géotechnique international pour confirmer un certain nombre d’hypothèses, avant d’entreprendre des travaux d’aménagement d’envergure.

E – Les travaux ultérieurs dans la Médina ne peuvent être entrepris à partir de cette seule carte et de ce rapport. L’équipe de géoscientifiques et les géophysiciens en particulier doivent être étroitement associés à ces travaux. Des interventions

géophysiques ponctuelles complémentaires seront indispensables tout au long du projet d'aménagement et de réhabilitation.

F – L'approche à caractère exhaustif qui a été choisie pour la médina de Béni-Mellal n'est pas recommandée pour d'autres sites éventuels. Il vaut mieux une approche concentrée sur des objectifs limités et associer les aménageurs dès le stade de la reconnaissance et des études, afin de gagner du temps et de diminuer les coûts.

3 – Des préconisations pour les travaux à entreprendre dans la médina à la suite de cette étude

Une liste de projets à court et à moyen terme est proposée dans le chapitre «Synthèse et Recommandations». L'équipe du Laboratoire de géophysique de la FST de Béni-Mellal a demandé officiellement à y être associée.

BIBLIOGRAPHIE

ABDUL NASSER S.S. and **LEE C. Y.** (1999) : Detection of man-made voids by 2D & 3D geoelectric imaging surveys, *Exploration geophysics*, 30 (4), pp. 141 – 145.

ARCHAMBAULT CH., COMBE M. et **RUHARD J.P.** (1975) : Plateau des phosphates, in "Ressources en Eau du Maroc", tome 2, plaines et bassins du Maroc atlantique, Notes et mém. serv. géol. Maroc n° 231, Rabat, 239-259.

ARIOUA A. (1995) : Evaluation de la qualité des eaux de l'Oum–Rbia avec essai de modélisation, Thèse de 3ème cycle, Fac. des sciences Semlalia, Marrakech, 150 p.

BENOT R. (2007) : Localisation de cavités dans la Médina de Béni-mellal – Résultat des sondages géotechniques, Rapport interne CETE de l'Ouest, Dossier N° 16111, 10 p.

BENZAQUEN M. (1963) : La bordure septentrionale de l'Atlas de Beni – Mellal, Contribution à l'étude géologique de la région d'Elksiba, Notes serv. géol. Maroc, 22, 170, 45-80.

BOLELLEI E. (1948) : Hydrogéologie du Maroc (Béni–Amir, Béni–Moussa), Notes et mémoires du service Géologique du Maroc, n°97, 205-215.

BOURCART J. (1942) : Carte géologique d'exploration du territoire autonome du Tadla au 1/200.000, Notes et Mém. serv. .géol. Maroc., N° 58 et 58bis.

BORNE V. (1990) : La méthode électromagnétique EM34-3 pour la prospection de subsurface, Bulletin de l'association internationale de Géologie de l'ingénieur, n°42.

BRADFORD J H. et **DEEDS J.C.** (2006) : Ground penetrating radar theory and application of thin-bed offset-dependent reflectivity, *Geophysics*, vol. 71, n°3, [Note(s): K47-K57].

BRGM. (1962) : Méthodes d'études et de recherche des nappes aquifères, Editions BRGM – Paris – France- 158 p.

BRGM. (1993) – Etude des systèmes aquifère de la plaine du Tadla, Rapport – 127 p.

CHARRIERE A. (1990) : Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intercontinentale: le Moyen – Atlas au SE de Fès (Maroc), Thèse sciences, Université de Toulouse, 589 p.

CHARRIERE A. (1992) : Discontinuités entre les "couches rouges" du Jurassique moyen et du Crétacé inférieur dans le Moyen Atlas (Maroc), C. R. Acad. Sciences Paris, 309, II, 611 -614.

CHARROUD M., AIT SLIMANE A. et **FEDAN B.** (1993) : Répercussions de la tectonique locale et des transgressions – régressions atlantiques sur l'évolution crétacé et paléogène de la bordure sud – ouest des Moyen Atlas (Maroc). 14 th, Internat. Meeting of sedimentology, Marrakech, avril 1993, résumé, 95–96.

CHEW W.C. (1990): Waves and field in inhomogeneous media, Van Nostrand Reinhold.

- CHOUBERT G. et MARÇAIS J. (1952)** – Aperçu structural, in Géologie du Maroc, Notes et Mém.serv.géol.Maroc, n°100, 9-73.
- CHOUBERT G. et MARÇAIS J. (1956)** – Les grands traits de la géologie du Maroc, Introduction géologique au lexique stratigraphique du Maroc –Notes Serv. .géol. Maroc, n° 134 et lexique stratigraphique international, CNRS, Paris 4, Afrique, 1a, Maroc, 5 -38.
- CHOUBERT G.F et MURET A. (1960-62)** : Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques, in Livre Mémoire P. Fallot, Soc. Géol. Fr., 1. 1961, 447 p.
- CHOUBERT G.F., FAURE et MURE A. (1964)** : Plate-forme de l'Afrique du Nord, in Tectonique de l'Europe, notice expli. carte tecton. intern. Europe 1/2500000, Nauk-Nedra, éd., Moscou, 354 – 358.
- CHOUBERT G.F., HOTTINGER L., MARCAIS J. et SUTERG. (1964)** : Stratigraphie et Micropaléontologie du Néogène au Maroc Septentrional- Institut " Lucas Mallado ". C.S.I.C. (España), Curs. y conf, 9, 229-257.
- CHOUTEAU M. (1996)**: Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering, Geophysical prospecting, vol. 44, 215-232.
- CHOUTEAU M. (2001)**: Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques - Géophysique appliquée II, GLQ3202, Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal.
- COMBE M. (1977)** : HAUT ATLAS calcaire, in" ressources en Eau du Maroc ", tome 3, domaines Atlasique et sud Atlasique, Notes et mém. serv. géol., Maroc, N°231/3, Rabat, 116-139
- COMBES P.F. (1996)** : Micro - ondes. Lignes, guides et cavités, Dunod.
- DANIELS J.J. (1988)** : Locating caves, tunnels and mines, The Leading Edge, v 7, N° 3, pp. 32 – 52.
- DANIELS J.J., GUNTON D.J. and SCOTT H.F. (1988)** : Introduction to subsurface radar, IEE Proceedings, vol .135, n°4
- DANIELS J.J. (1996)** : Surface Penetrating Radar, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics, series 6.
- DAVIS J.L. and ANNAN A.P. (1989)** : Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting 37, 531-551.
- DRESNAY R.D. (1971)** : Extension et développement des phénomènes récifaux jurassiques dans le domaine atlasique marocain, particulièrement au lias moyen, Bull. Soc. géol.fr., (7), 13, 46-56.
- DRESNAY R.D. (1972)** : Les phénomènes de bordure des constructions carbonatées du Lias moyen du Haut atlas oriental (Maroc), C.R. Acad. Sci. ,Paris, 275 D, 535-537.
- DRESNAY R.D. (1976)** : Development and paleogeographic extent buildups and organic reefs during Jurassic time in Atlas Mountains of Morocco, Northwest Africa, Am. Ass. Petrol. Geol. Bull, 60, 667-668.

DRESNAY R.D. (1988) : Répartition des dépôts carbonatés du Lias inférieur et moyen le long de la cote atlantique du Maroc : conséquences sur la paléogéographie de l'Atlantique naissant, *J. Afr. Earth Sciences.*, 7, 385-396.

DROT J. (1964) : Rhynchelloidea et spiniferoidea siluro-devoniens, Maroc présaharien. Notes et mem. serv. géol. Maroc, 178, 238 p.

EYRAUD L., GRANGE G. et OHANESSIAN H. (1973) : Théorie et technique des antennes, Librairie Vuibert.

FAUCHARD C. (2001) : Utilisation de radars très haute fréquence. Application à l'auscultation non destructive des chaussées, Thèse de l'université de Nantes.

FAUCHARD C., POTHERAT P. (2004) : Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques, Guide technique du Laboratoire des Ponts et Chaussées, 170 p.

FAUCHARD C., BENOT R., FILAHI M., NAJINE A. et ANDRIEUX P. (2006) : Campagne de mesures Radar dans la Médina de Béni-Mellal – Maroc, Rapport interne CETE Normandie Centre.

FAUCHARD C., BENOT R., FILAHI M., NAJINE M., et ANDRIEUX P. (en cours) : Geophysical methods for void detection – The case of GPR in Béni-Mellal – Morocco, Communication personnelle.

FEDAN B., LAVILLE E. et EL MEZGUELDI A. (1989) : Le bassin jurassique du Moyen Atlas (Maroc) - Exemple de bassin sur relais de décrochements, *Bull- Soc- géol. France*, 8, 6, 1123-1136.

GUEGUEN Y., et PALCIAUSKAS V. (1992) : Introduction à la physique des roches, Ed Hermann, Paris 299 p.

**GUERIN R., PANISSOD C., THIRY M., BENDERITTER Y., TABBAGH A., et HUET-
TAILLANTER.** (2002) : La friche industrielle de Mortagne du Nord - III - Approche méthodologique d'étude géophysique non destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées, *Bull. Soc. Géol. France*, t. 173, n°5, 471-477.

HOLLENDER F. (1999) : Interprétation de la distorsion des signaux géo radar propagés et réfléchis – Développement d'une tomographie par bandes de fréquences, Thèse de L'institut National Polytechnique de Grenoble.

HSSISSOU Y. (1991) : L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc), alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas, Thèse Univ. Franche- Comté. N°ordre 221.

IRVING J. and KNIGHT R. (2003) : Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data, *Geophysics*, 68(3), 960-970.

LEPAROUX D. (1997) : Mise au point de méthodes radar pour l'auscultation structurale et texturale de milieux géologiques très hétérogènes, Thèse de l'université de Rennes.

LOKE M.H. and BARKER R.D. (1996) : Rapid least square inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi Newton method, *Geophysical prospecting*. 44, 131-152.

MARIIN J. (1981) : Le Moyen Atlas central, étude géomorphologique, Notes et Mém.- Serv.- géol.- Maroc, 258 et 258 bis, 445p. Rabat.

MC NEILL J.D. (1980a) : Electrical conductivity of soil and rocks, Technical Notes TN -5, Geonics limited.

MC NEILL J.D. (1980b) : Electrical terrain conductivity measurement at low induction numbers, Technical Notes TN-6, Geonics limited.

MONBARON M. (1985) : Sédimentation, tectonique synsedimentaire et magmatisme basique : l'évolution paléogéographique et structurale de L'Atlas de Beni Mellal (Maroc) au cours du Mésozoïque, ces indices sur la tectonique tertiaire, *Ecl - géol. Helv.*, 74, 625-638.

OGILVY R.D and LEE A.C. (1991) : Interpretation of VLF-EM in phase data using current density pseudo sections, *Geophysical prospecting*, vol.39, 845-859.

RADEET. (2004) : Etude du Schéma directeur d'assainissement liquide de la ville de Beni Mellal. Mission A : Investigation préliminaires, Rapport Définitif Global Environmental Sustainability Inc. Rabat, Maroc.

REYNOLDS J.M. (2000) : An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley and Sons.

TELFORD W.N., GELDART L.P. et SHERIF R.E. (1990) : Applied geophysics, Cambridge University Press.

TRITCH J-J., TOULEMONT., DURVILLE J-L. et POTHERAT P. (2002) : Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, Guide technique, Collection Environnement, Edition Laboratoire Central des Ponts et chaussées, 130 p.

VERSETY. (1988) : Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/100.000, feuille de Quasbat-Tadla, Notes et Mémoires du service géologique du Maroc, 340 bis, 132 p.

VOGELSANG D. (1987) : Examples of electromagnetic prospecting for karsts and fault systems, *Geophysical prospecting*, vol.35, 604–617.

WATELET J.M., MONTAGNE D. et WOJNAROWICZ M. (2002) : Risques d'effondrement de carrières souterraines en milieu urbain, *Revue Française de Géotechnique*, N° 100, pp. 35 – 41.