

Étude du bruit de fond sismique en vue d'un microzonage sismique de la ville de Tunis

Nejla BOUDEN-ROMDHANE

Docteur de l'École des Mines de Paris, Maître Assistante
École nationale d'Ingénieurs de Tunis

Pierre MECHLER

Professeur
Directeur du département de Géophysique appliquée
Université Pierre et Marie Curie

RÉSUMÉ

L'essentiel de la ville de Tunis est installé dans une cuvette constituée de formations vaseuses et argilo-sableuses saturées du Quaternaire, reposant sur un substratum plus compact ; cette configuration laisse présager la possibilité d'effets de sites sismiques, d'autant que Tunis et sa région sont des zones tectoniquement instables.

Nous avons réalisé un premier microzonage de la ville à l'aide de la méthode « H/V bruit de fond », qui consiste à enregistrer le bruit de fond sismique et à effectuer le rapport spectral de la voie horizontale sur la voie verticale. Cette technique permet d'estimer les fréquences de résonance du site ainsi que le degré d'amplification.

Les mesures de bruit de fond ont intéressé environ 280 sites, selon un maillage confectionné à partir d'un zonage géotechnique préalablement établi. La présentation en parallèle des deux types de zonage, géotechnique et sismique, montre une corrélation entre la réalité géotechnique et géomorphologique, d'une part, et l'effet sismique attendu, d'autre part.

MOTS CLÉS : 42-41 - Tunisie - Vase - Argile - Sable - Sismique - Méthode - Mesure - Résonance - Fréquence - Effet de site - Bruit de fond - Microzonage sismique.

Introduction

L'expérience montre que la seule façon efficace de se protéger des effets destructeurs des tremblements de terre est de faire de la prévention et de construire les bâtiments en respectant des normes de construction parasismique. Tous les codes actuels tiennent compte pour cela du séisme maximum probable obtenu à partir d'une étude de la sismicité historique de la région considérée, mais aussi des conditions géotechniques locales du lieu où doivent être implantées les constructions envisagées. À défaut de données plus précises, les codes de construction prévoient une classification des terrains en quelques catégories et indiquent les modifications qui doivent être apportées dans chaque cas au spectre du séisme de référence, donné au rocher.

La détermination expérimentale de la réponse du sol, l'effet de site sismique, est, à l'évidence, bien supérieure à une classification qui reste toujours un peu arbitraire.

Tunis et sa région sont des zones modérément instables sur le plan sismique. D'après la sismicité historique, les séismes destructeurs y ont une périodicité importante, de quatre siècles environ, et Ambraseys, cité par B. Ammar (1987), admet la possibilité d'un séisme important vers la fin de ce siècle.

La ville de Tunis ne dispose pas encore de microzonage sismique. La campagne de mesures que nous y avons réalisée devrait permettre de combler cette lacune.

La méthode de prospection des effets de site sismiques utilisée est la méthode « H/V bruit de fond ». Proposée par Nakamura (1989), cette méthode a été validée expérimentalement par Duval (1994) et décrite en détail dans le numéro de mai-juin 1996 du présent bulletin (Duval et al., 1996). Cette description récente, à laquelle nous renvoyons le lecteur, nous permet de ne décrire la méthode « H/V bruit de fond » que de façon succincte.

L'effet de site sismique traduit l'amplification (ou l'atténuation) en fonction de la fréquence que subit une onde sismique lors de la traversée des dernières dizaines de mètres de sa propagation, de par la nature et la structure du sol. Les évaluations classiques s'obtiennent soit par modélisation de la structure géotechnique (supposée connue !), soit par enregistrement de la sismicité réelle du site comparée à celle d'une référence au rocher. Cette dernière méthode est, au moins théoriquement, la meilleure estimation expérimentale que l'on puisse obtenir, puisque l'on mesure directement le paramètre utile. Elle se heurte cependant à des difficultés pratiques importantes, principalement la durée importante des mesures (et donc un prix élevé) et la difficulté de faire des enregistrements sismiques en ville en raison du bruit ambiant.

La méthode « H/V bruit de fond » consiste à enregistrer le bruit de fond sismique du site et à calculer le rapport spectral entre les signaux obtenus sur les voies horizontales et ceux de la voie verticale. Le pic de la courbe en fonction de la fréquence de ce rapport donne bien la fréquence de résonance du sol et sa valeur une estimation correcte de l'amplification que l'on observe sur des séismes réels. Si la théorie de cette méthode est encore un domaine de recherche, sa validité expérimentale semble très bien établie.

Le site de Tunis

Au sens géomorphologique, Tunis est constituée de quatre unités (fig. 1). Il s'agit de la cuvette ou vallée de Tunis, des collines du sud de Tunis, des reliefs de l'ouest et de ceux du nord.

Sa vallée est orientée WNW-SSE et descend de l'ouest vers l'est. Ancienne vallée de la Medjerda, cette zone s'ouvre vers le lac de Tunis à l'est et aurait été érodée et remblayée sur plusieurs dizaines de mètres d'alluvions.

Les collines de Sidi Bel Hassen (88 m NGT) et Jebel Jeloud-Kharrouba (108 m NGT) constituent les reliefs du sud de Tunis et sont orientées NE-SW. Le côté est de ces reliefs plonge brutalement vers le lac sud de Tunis ; le versant sud, quant à lui, descend en gradins réguliers vers les quartiers de Bellevue et Elouardia.

Les reliefs de l'ouest de Tunis s'interposent entre la vallée de Tunis et la dépression continentale occupée par Sebket Essijoumi. Il s'agit, du sud au nord, du chapelet des buttes de la Manoubia (68 m NGT), de Montfleury (52 m NGT), de la Rabta (52 m NGT) et de la Kasbah (43 m NGT). Ces reliefs sont orientés NW-SE, et descendent brutalement du côté ouest vers la Sebket Essijoumi et en pente plus modérée vers la vallée de Tunis.

Les collines de Ras Tabia - Jebel Lahmar (85 m NGT), la colline du Belvédère (75 m NGT) et El Manar appartiennent à une même unité allongée selon l'axe N-S allant du Belvédère au Jebel Nahli (236 m NGT) ; elles constituent les reliefs du nord de la ville.

L'essentiel des matériaux du sous-sol tunisois a été charrié principalement par les deux grands oueds qui traversent la région : l'oued Medjerda au nord et l'oued Miliane au sud. Nous ne pouvons aborder une étude géotechnique de Tunis sans les présenter.

L'oued Medjerda prend sa source dans le constantinois algérien et se déverse à Ras-Ettarf au nord-ouest du golfe de Tunis, à 20 km de la capitale. Il n'en a pas toujours été ainsi puisque J. Piementa (1959) et M. Ennabli (1983) admettent l'existence d'une ancienne vallée de la Medjerda entre les collines du Belvédère et de la Kasbah. Cette thèse s'appuie sur la présence d'une sédimentation alluvionnaire et subsidente au droit du quartier de Lafayette. Le déplacement du cours de la Medjerda de son ancienne vallée vers la vallée actuelle serait dû à un glissement de terrain survenu au nord-ouest de Tunis (au lieu-dit Oued Ellil), qui aurait réduit le débit de l'oued jusqu'à son assèchement progressif, puis sa progression vers le nord.

Plus modeste, l'oued Miliane suit un cours parallèle à celui de la Medjerda et se jette au sud de Tunis au voisinage de la ville de Radès. Là aussi, Piementa (1953) pense que l'oued Miliane, ancien affluent de la Medjerda, empruntait l'ancienne vallée de Tunis et en a été dévié par le même glissement.

L'extrême variété des caractéristiques géotechniques des sols rend utile un récapitulatif des grandes unités lithologiques (Saïdane et Trabelsi, 1996). Dans la région de Tunis au sens large, affleure une série où tous les étages sont représentés, du Trias au Quaternaire. Dans la ville de Tunis, seules les séries allant du Crétacé inférieur au Quaternaire affleurent.

La vallée de Tunis est occupée presque exclusivement (hormis les formations anthropiques) par des dépôts quaternaires reposant sur un substratum pliocène. L'épaisseur de ces sédiments quaternaires peut atteindre 360 m, comme le

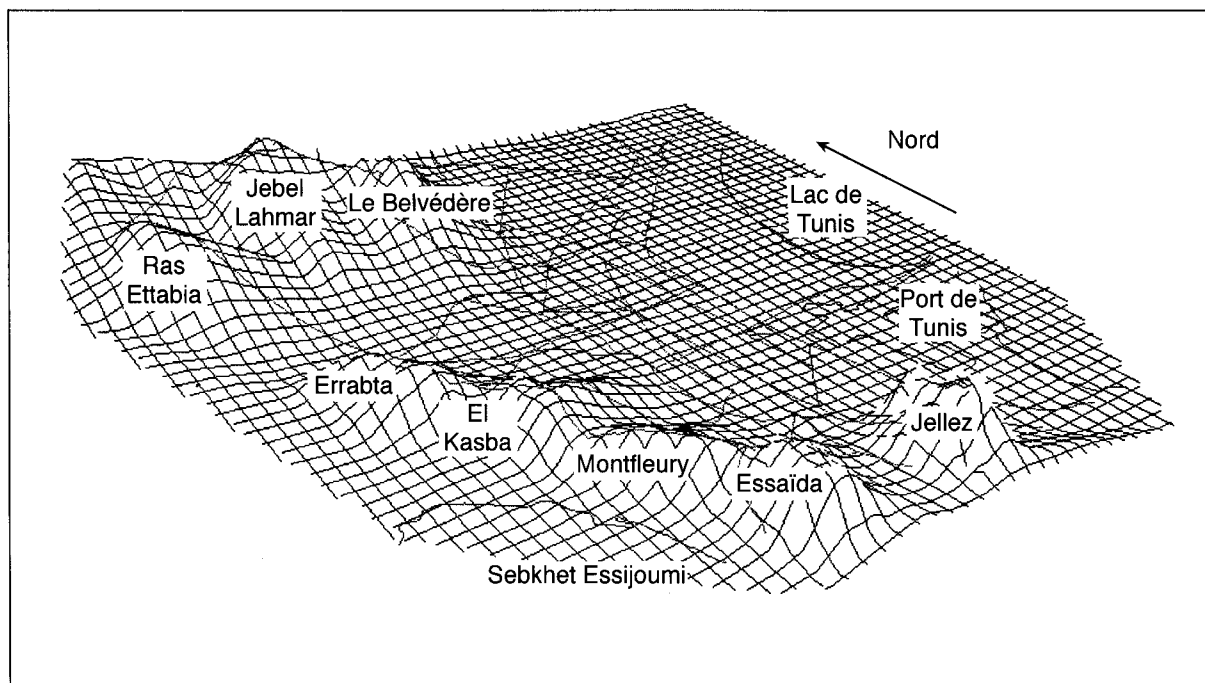


Fig. 1 - Les grandes unités géomorphologiques de la ville de Tunis. La représentation tridimensionnelle en « fil de fer » est superposée aux côtes et aux principales artères de la ville.

montre un sondage profond réalisé à l'ouest du lac nord de Tunis. Parmi ces recouvrements, il faut distinguer les terrains attribués au quaternaire ancien fluvio-continentale de ceux du quaternaire récent, représenté par les vases.

Lors de l'orogénèse, Ben Ayed et *al* (1983) admettent que ce site a subi un soulèvement général accompagné de l'effondrement des bassins du lac de Tunis et de la Sebkhet Essijoumi. Piementa (1959) avance que le passage de la Medjerda entre les collines du Belvédère et de la Kasbah date de la même époque, d'où la mise en place d'une sédimentation alluvionnaire constituée de sables et d'argiles. La puissance de ces couches, notamment dans le quartier Lafayette, laisse supposer que l'alluvionnement s'est accompagné d'une forte subsidence (Piementa, 1959). Simultanément à cet épisode, les sédiments mio-pliocènes soulevés par l'orogénèse ont été soumis à un climat semi-désertique, qui a donné lieu à des couches rougeâtres rubéfiées avec passées sableuses, enrichies d'une croûte calcaire (tuf) qui caractérise les dépôts continentaux du Quaternaire.

Deux types de sédiments du Quaternaire ancien cohabitent à Tunis :

- > les sédiments attribués au régime continental, identifiés grâce aux croûtes calcaires minces et aux nodules tuffeux (quartier de Lafayette et cité Jardin) ;
- > les sédiments d'origine lagunaire ou marine, formés d'une croûte carbonatée surmontant des calcaires à gros blocs et des dolomies (quartier de Bab Jedid, en pied de la butte de Sidi Bel Hassen).

Le Quaternaire récent (Holocène) est représenté, quant à lui, par les vases des zones de dépressions (lac de Tunis et Sebkhet Essijoumi), d'une part, et par les sables limoneux et argileux des lits des oueds El Menzah et Khaznadar qui ont raviné le site de Tunis, d'autre part :

- > les vases de la lagune de Tunis se sont déposées lors de l'évolution du lac de Tunis durant le quaternaire récent. Sur une épaisseur allant de 5 à 60 m se sont déposées, à partir du substratum, des vases profondes sableuses grises, des vases semi-profondes grises et vertes limoneuses et, enfin, des vases noires. D'après les travaux géophysiques de B. Ammar (1987), les sédiments aux abords et dans le lac de Tunis dépasseraient 600 m. Ce faciès vaseux est interrompu par des croûtes et encroûtements calcaires et par des lentilles de sable et d'argile ;
- > les alluvions sablo-graveleuses ont été déposées par les oueds qui ont raviné le site de Tunis avant l'urbanisation. Nakouri (1975) a constaté que les caractéristiques de ces alluvions d'oueds sont identiques aux caractéristiques des sables enfouis dans la vase de Tunis. Il s'agit vraisemblablement de sables développés en zones de déjection des oueds dans le lac de Tunis et, de ce fait, absents dans les zones éloignées de toute embouchure ;
- > les formations anthropiques correspondent à Tunis à des remblais urbains de grande extension et d'épaisseurs variables disposés à partir du XIV^e siècle entre la Médina et le port de Tunis pour gagner du terrain sur la lagune. Ces remblais sont constitués de matériaux argileux, de déchets de carrières, de tuf et de sable de dragage du lac de Tunis.

Zonages géotechniques de la ville de Tunis

Plusieurs études du sous-sol ont été tentées par Nakouri (1975), Kaaniche (1987) et Ammar (1987) et ont abouti, pour les plus récentes, à un zonage géotechnique. La figure 2 récapitule ces travaux et permet d'identifier cinq entités géotechniques :

La zone I

Elle est une succession de remblais, de complexe vaseux et de formations argilo-sableuses à croûte ou argileuses compactes qui constituent le substratum :

- les remblais, d'épaisseur variable, ont des caractéristiques géotechniques hétérogènes de par leurs origines citées plus haut ;
- les vases superficielles grises et molles, d'origine lagunaire, englobent les vingt premiers mètres du complexe vaseux de Tunis ;

- les argiles vaseuses, grises et vertes d'origine marine (elles sont fréquemment coquillères) se situent entre 20 et 40 m de profondeur ;
- les argiles vaseuses jaunes d'origine continentale surmontent directement le substratum ; leur toit est repéré à 40 m de profondeur et leur épaisseur moyenne évaluée à 20 mètres.

Des niveaux sableux et argileux sous forme de lentilles sont parfois repérés dans les vases marines (entre 20 et 40 m de profondeur). Ces lentilles sableuses, argileuses, voire gréseuses sont aussi présentes dans les vases superficielles ; elles présentent des caractéristiques géotechniques assez bonnes (non mentionnées) et constituent de véritables « pièges géotechniques ».

Le substratum de Tunis est à dominance argileuse et son toit est fortement chahuté, affleurant par endroits et disparaissant à plus de 60 m aux abords du lac de Tunis.

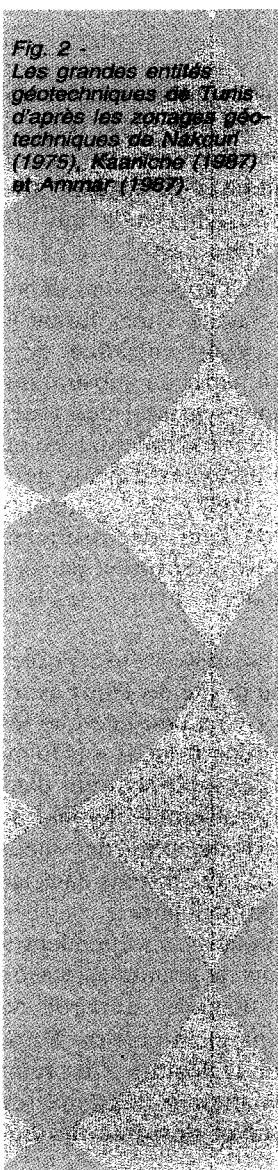
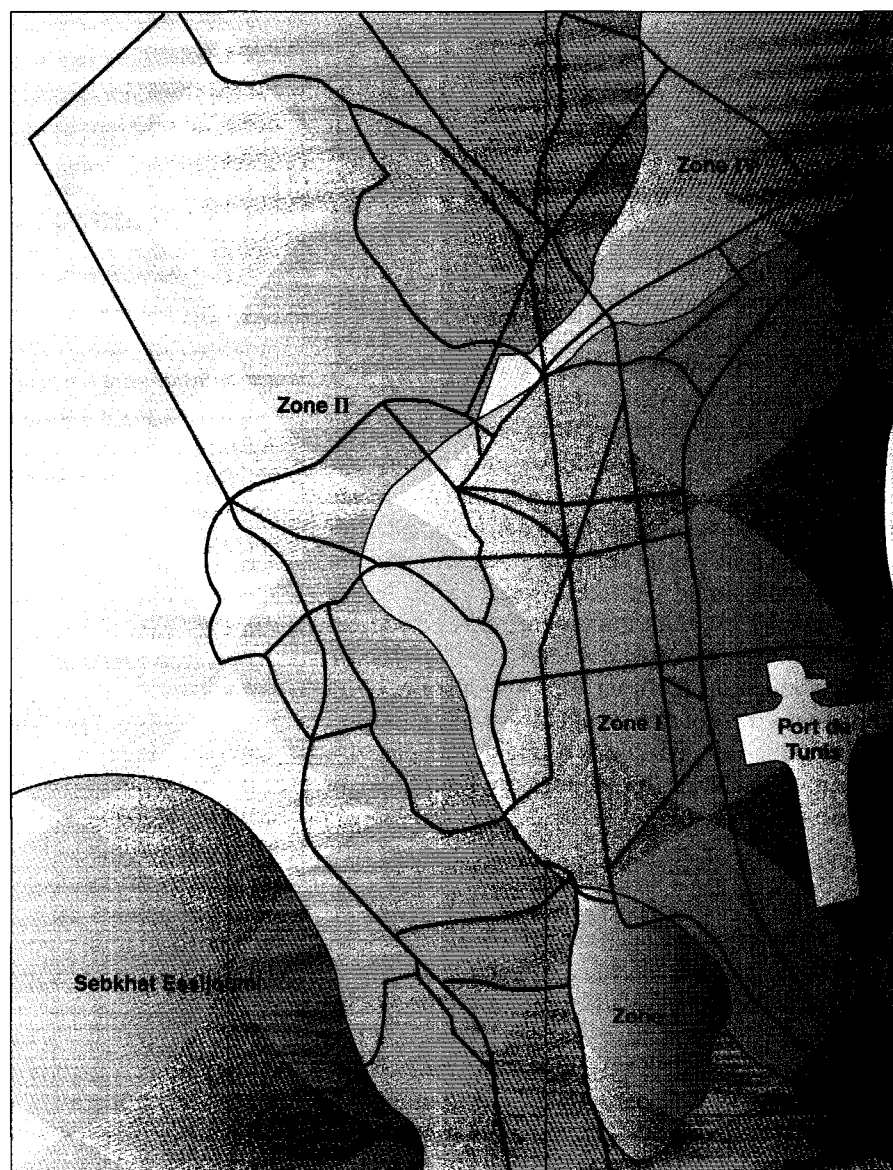


Fig. 2 - Les grandes entités géotechniques de Tunis d'après les zonages géotechniques de Nakouri (1975), Kaaniche (1987) et Ammar (1987)



Le tableau I regroupe les caractéristiques pressiométriques des formations en place.

TABLEAU I
Caractéristiques pressiométriques
des formations en place dans la zone I

Formations	Module pressiométrique E_M (MPa)	Pression limite P_l (MPa)
Vases grises et molles	0,5 à 3	0,1 à 0,5
Argiles vaseuses grises et vertes	3 à 10	0,8 à 1,8
Argile vaseuse jaunâtre	10 à 15	1,6 à 3
Substratum argilo-sableux	> 25	> 3

La zone II

Elle entoure la zone précédente et intègre les versants des reliefs nord et ouest. Elle est composée de deux horizons bien différenciés : une couverture tuffeuse à caractéristiques moyennes et un substratum argileux à argileux sableux nettement plus résistant, comme le montre le tableau II :

- > la couverture tuffeuse a une épaisseur variable (15 m à Bab Souika et 4 m sur les versants de la colline d'Errabta) ;
- > le substratum est une alternance de sable, d'argile, de grès et parfois même de calcaire à gros bancs et de dolomies. Ce complexe est résistant et ses caractéristiques géotechniques sont bonnes.

TABLEAU II
Caractéristiques pressiométriques
des formations en place dans la zone II

Formations	Module pressiométrique E_M (MPa)	Pression limite P_l (MPa)
Tuf	3 à 5	0,4 à 1
Alternance d'argiles et sables	8 à 20	0,6 à 2
Substratum argileux compact	25 à 40	> 3

La zone III

Elle intéresse les sommets des collines nord et ouest. Les limites de cette zone ne sont pas définies avec rigueur et n'ont pas été portées sur la figure 2. Il s'agit de terrains à dominante argileuse, avec quelques niveaux de sable de caractéristiques géotechniques bonnes à très bonnes (tableau III). Les formations argileuses sont surconsolidées et présentent des tendances au gonflement, comme c'est le cas à El Manar.

TABLEAU III
Caractéristiques pressiométriques
des formations des sommets des collines

Formations	Module pressiométrique E_M (MPa)	Pression limite P_l (MPa)
Argile à passées sableuses	15 à 45	> 1,5

La zone IV

Elle est caractérisée par la succession peu commune suivante, qui comporte, du haut vers le bas :

- > des remblais divers de faible épaisseur (environ un mètre) ;
- > une alternance de roches tuffeuses argilo-sableuses et de croûtes calcaires d'épaisseur allant parfois jusqu'à 20 m. Les pressions limites y dépassent souvent 3 MPa à 10 m de profondeur ;
- > des vases argileuses grises épaisses de 5 à 15 m à caractéristiques géotechniques médiocres ;
- > un substratum argileux.

Le tableau IV regroupe les caractéristiques pressiométriques des formations en place.

TABLEAU IV
Caractéristiques pressiométriques
des formations en place dans la zone IV

Formations	Module pressiométrique E_M (MPa)	Pression limite P_l (MPa)
Tuf argilo-sableux et croûtes calcaires	5 à 15	> 0,5
Argile vaseuse jaunâtre	2 à 8	0,5 à 1,5
Substratum argilo-sableux	10 à 25	> 2

La zone V

Elle englobe le relief sud de Tunis, la colline de Sidi Bel Hassen-Jellaz ; elle est formée de calcaire et de calcaire marneux d'âge Eocène inférieur et Crétacé. Très peu de données sont disponibles, la butte étant occupée principalement par la cimetière de Tunis.

Ce zonage géotechnique présente l'avantage d'identifier les entités géotechniques et de les délimiter, mais ne restitue pas la réalité géotechnique exacte au droit d'une adresse précise. Pour servir les besoins du microzonage sismique, il a fallu reconstituer une base de données qui englobe les sondages carottés et pressiométriques profonds réalisés au cours des dix dernières années, avec un souci d'homogénéité des mesures (Saïdane et Trabelsi, 1996 ; Réjiba, 1997).

La représentation du module pressiométrique E_M , de la pression limite P_1 et de la profondeur du substratum a été réalisée au moyen du Système d'informations géographiques « ARC/INFO » (Réjiba, 1997). Au préalable, les mesures ont été interpolées par la méthode des puissances inverses (dite IDW), qui semble la mieux adaptée pour tenir compte des variations rapides du paramètre à interpoler.

Les deux représentations proposées sont :

- une représentation tridimensionnelle « en fil de fer » (fig. 3), qui permet de visualiser rapidement la morphologie du toit du substratum par rapport à la surface du sol ;
- une représentation en dégradé de couleurs de E_M et P_1 à 10 et 20 m de profondeur (fig. 4 et 5) allant du bleu (valeurs les plus faibles) au rouge (valeurs les plus fortes), superposée à la carte des artères principales et des côtes, et qui présente quelques valeurs du paramètre interpolé, ce qui offre l'avantage d'un meilleur repérage et d'une appréciation quantitative rapide des niveaux atteints.

Campagne de mesures et moyens mis en œuvre

Des expériences précédentes (Duval, 1994) ont montré que les interprétations de la méthode « H/V bruit de fond » étaient perturbées par des parasites à faible distance des capteurs (quelques

mètres). La campagne de mesure sur Tunis a donc été menée de nuit, entre 23 h et 5 h, durant cinq semaines. Elle a intéressé 260 points (fig. 6). Si l'on intègre les mesures réalisées pour vérifier la stabilité dans le temps du rapport H/V, la campagne totalise 300 enregistrements de dix minutes chacun.

Nous disposons ainsi d'une banque de données comprenant :

- le numéro de la mesure,
- les coordonnées Lambert du point,
- son adresse,
- la nature du support du capteur (sur le trottoir, sur le bitume, ...),
- la description de l'environnement proche (présence de bouche d'égout, lignes électriques, etc.),
- les conditions météorologiques,
- les enregistrements,
- les résultats des traitements.

Le choix des points de mesures a évidemment été fait en suivant le zonage géotechnique décrit ci-dessus, le principe étant de disposer de « coupes » de bruit de fond traversant les entités géotechniques en place. Pour ce faire, les premiers points de mesure furent implantés au voisinage immédiat de sondages carottés et pressiométriques. Lors de l'avancement de la campagne, nous avons constaté la possibilité d'augmenter le nombre de mesures pendant le temps où nous disposons du matériel ; en conséquence, le maillage a été resserré pour obtenir une meilleure définition des effets de site.

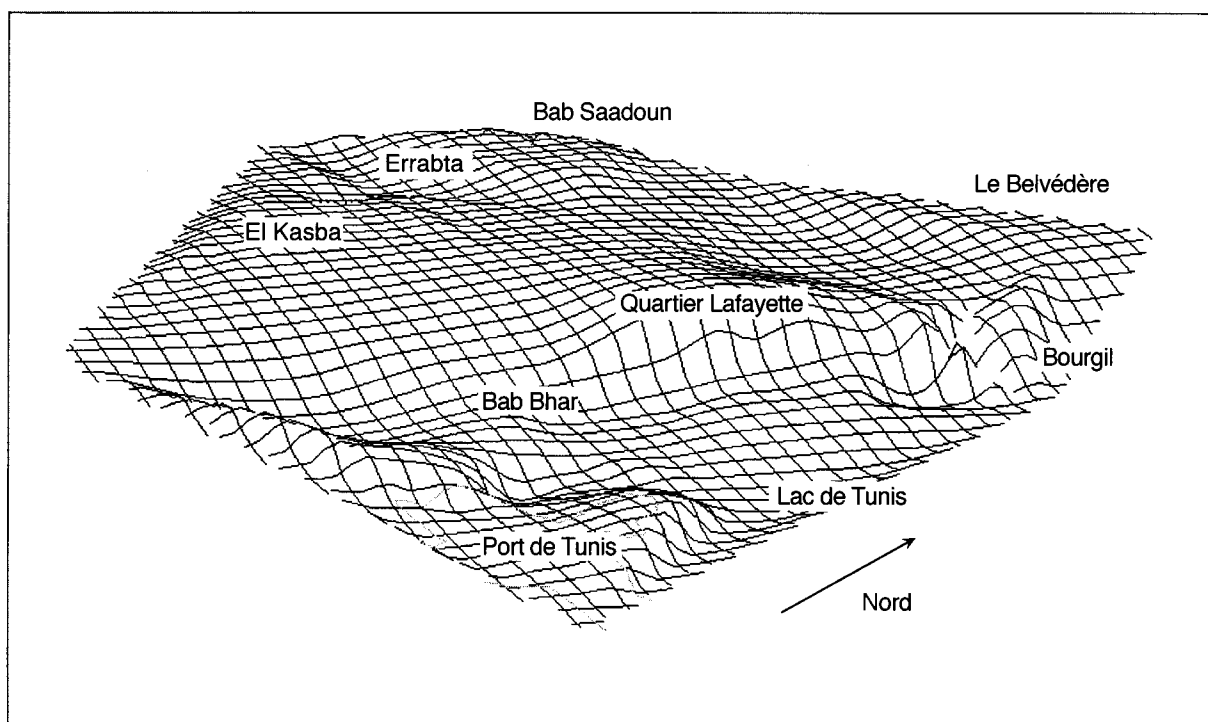


Fig. 3 - Morphologie du toit du substratum Mio-Pliocène de la vallée de Tunis (par rapport à la surface du sol). La représentation tridimensionnelle n'englobe que les zones pour lesquelles nous disposons d'une densité importante de résultats de sondages carottés et pressiométriques profonds et récents.

Fig. 4 - Cartes d'interpolation en dégradé de couleurs du module pressiométrique E_M (en 10^5 .Pa) à différentes profondeurs. Les nuances et valeurs en bordures de cartes sont à considérer avec réserve

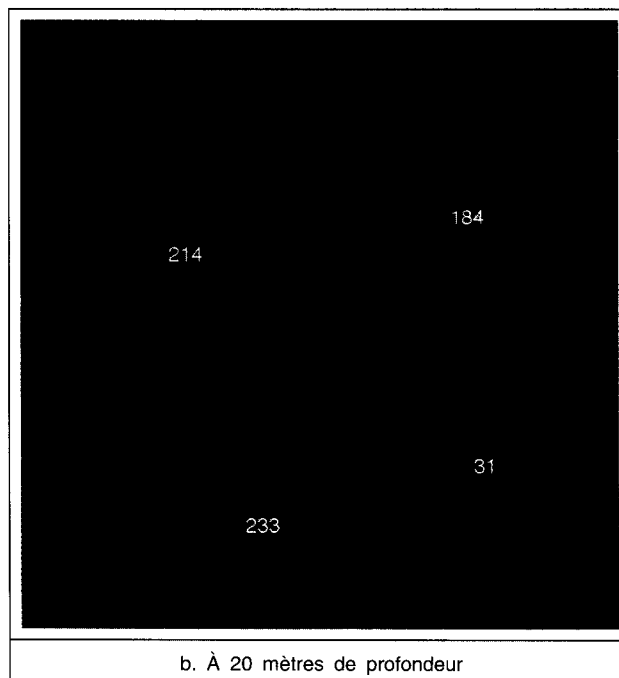
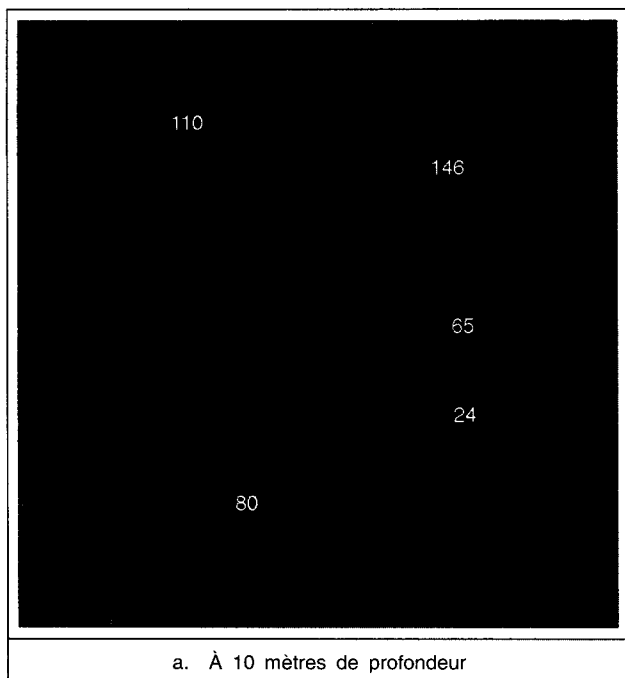
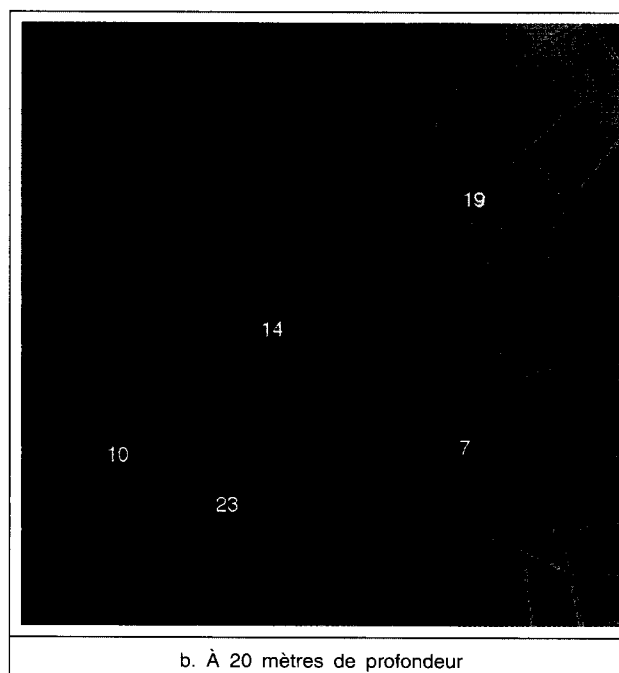
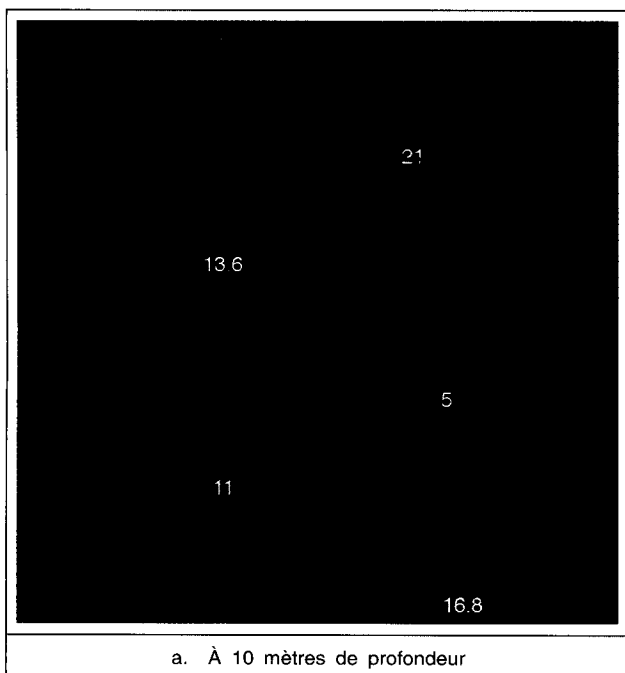


Fig. 5 - Cartes d'interpolation en dégradé de couleurs de la pression limite P_l (en 10^5 .Pa) à différentes profondeurs. Les nuances et valeurs en bordures de cartes sont à considérer avec réserve



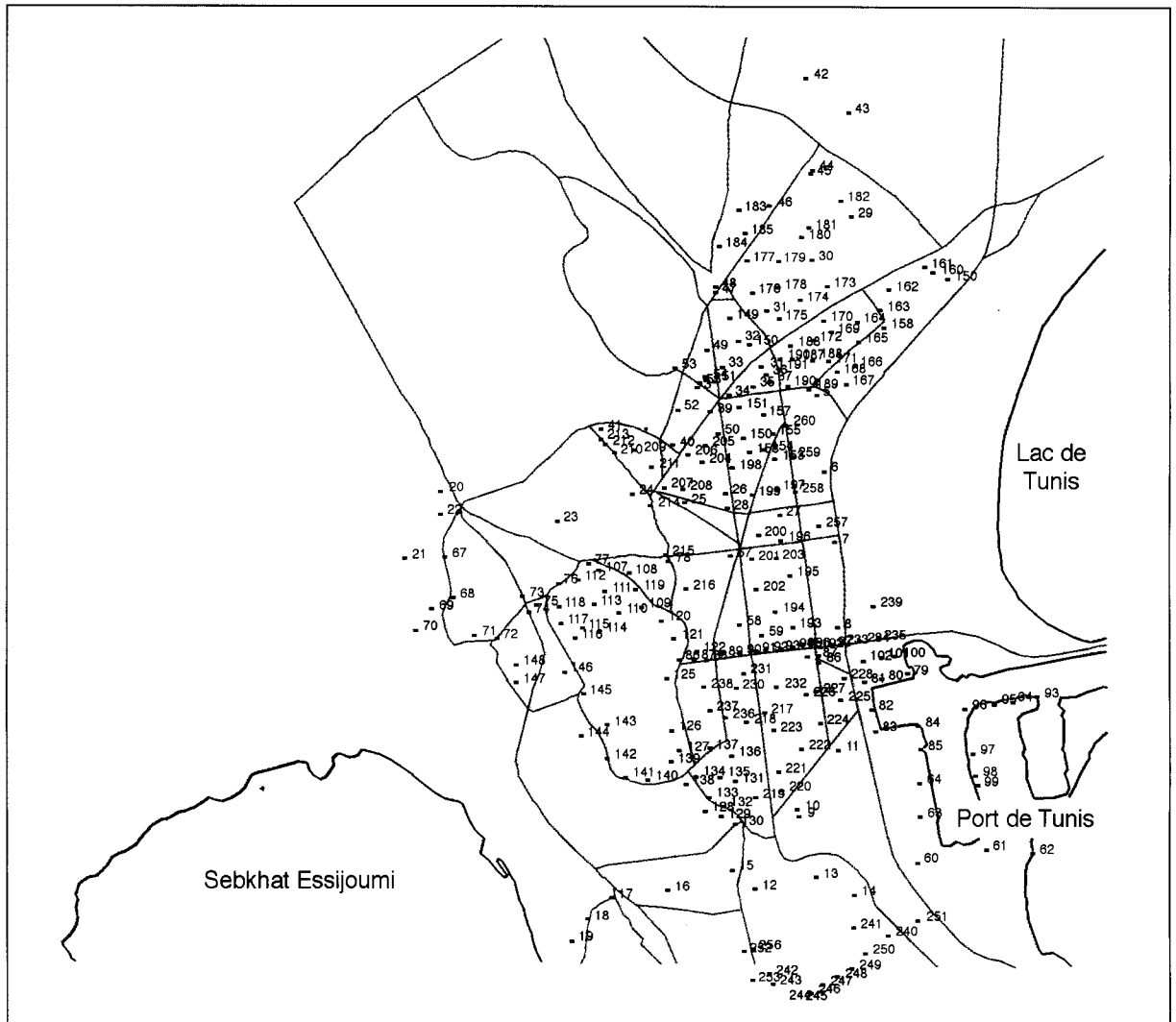


Fig. 6 - Campagne de mesures. Carte de sites explorés par bruit de fond.

La chaîne d'acquisition est installée à bord d'un véhicule et comprend trois sismographes de fréquence propre 1 Hz (un vertical et deux horizontaux, l'un orienté nord-sud, l'autre est-ouest). L'ensemble est piloté par un micro-ordinateur, ce qui permet, outre les traitements que nous décrirons plus loin, de visualiser directement sur le terrain les signaux enregistrés ainsi qu'un premier traitement spectral. Il est donc possible, tout en travaillant rapidement, de garantir la qualité des mesures.

Traitement du signal

La méthode « H/V bruit de fond » nécessite le calcul du spectre des différentes composantes du bruit de fond enregistré. Ces spectres doivent obligatoirement être moyennés et lissés. La séquence de traitement est donc la suivante :

- rétablissement du signal réel par déconvolution des traces,
- sélection automatique des fenêtres à traiter à partir d'un seuil réglable,

- application d'une fonction d'apodisation de Hanning à taux réglable,
- recouvrement ajustable des fenêtres en fonction du taux de l'apodisation,
- calcul du spectre des trois traces et lissage passe-bas de ceux-ci,
- calcul de la moyenne des spectres.

Finalement, les trois courbes suivantes, fonction de la fréquence, sont obtenues :

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{S_{NS}^2 + S_{EW}^2}{2S_V^2}}, \frac{S_{NS}}{S_V} \text{ et } \frac{S_{EW}}{S_V}$$

S_{NS} (ou L), S_{EW} (ou T) et S_V (ou V, ou encore Z) sont respectivement les spectres des voies horizontales dirigées nord-sud (voie latérale), est-ouest (voie transversale) et de la voie verticale.

Ces courbes permettent de définir, pour chaque point de mesure, la fréquence de résonance du sous-sol et l'amplification correspondante.

Finalement, nous avons tracé, après interpolation, les cartes des variations de fréquence et d'amplitude sur la ville de Tunis.

La figure 7 montre deux types de séries de courbes, qui représentent chacune les spectres des voies verticale (Z), horizontale latérale (L) et horizontale transversale (T), ainsi que les rapports spectraux H/V, L/V et T/V :

□ la figure 7a regroupe les courbes obtenues au point 8, sur l'aire du chantier de l'immeuble Sindbed à Bab Bhar ; la moyenne des spectres a été effectuée sur 35 spectres sélectionnés automatiquement par le biais du seuil de vibration (l'automatisation du traitement par sélection du seuil de vibration figure parmi les nouveautés introduites dans l'utilisation de la méthode). Les courbes représentatives de H/V, L/V et T/V montrent un pic de fréquence identifiable autour de 0,5 Hz et une amplitude comprise entre 3,8 et 5. Le chantier de l'immeuble Sindbed a aussi été l'objet de sondages carotté et pressiométriques (profondeur 60 m) qui ont révélé des formations vaseuses, d'épaisseur 56 m, surmontant un substratum plus compact. Il s'agit d'une structure à deux terrains, à fort contraste d'impédance, pour laquelle des calculs simplifiés (qui reposent sur un modèle unidimensionnel à stratification plane) aboutissent à une fréquence de résonance et à une amplification comparables au pic de fréquence et à l'amplitude issus de la mesure du bruit de fond ;

□ la figure 7b montre les courbes obtenues au point 157, sur l'aire d'un chantier de bâtiment, à l'intersection des rues de Syrie et d'Ibn El Jassar dans le quartier Lafayette. Dans ce cas, la moyenne des spectres a été effectuée sur 75 spectres. L'interprétation des courbes représentatives de H/V, L/V et T/V est moins aisée que dans le cas précédent, dans la mesure où il est difficile de dégager un pic de fréquence prédominant. Là aussi, nous disposons de sondages pressiométriques profonds qui montrent une alternance d'argiles plastiques et d'argiles vaseuses sur une épaisseur de 42 m (profondeur du substratum sableux et tuffeux) interrompue par une couche de sable fin consolidé épaisse de 70 cm à 20 m de profondeur environ. Le choix du pic de fréquence (6,5 Hz) a nécessité un traitement manuel plus fin (pour écarter des bruits « parasites » éventuels) ainsi qu'une évaluation des réponses modélisées des structures géotechniques en place.

Représentation des résultats

Les méthodes d'interpolation et les représentations graphiques adoptées pour le zonage géotechnique ont aussi servi pour les résultats de bruit de fond (fréquence et amplitude de pic) :

- une représentation tridimensionnelle « en fil de fer » (fig. 8) qui donne une interprétation visuelle rapide des phénomènes ;
- une représentation en dégradé de couleurs allant du bleu (valeurs les plus faibles) au rouge (valeurs les plus fortes), qui est, peut-être, la plus utilisable

en liaison avec les cartes géotechniques (fig. 9) ;

- une carte des isovaleurs, qui est certainement la plus précise (fig. 10).

Commentaires

Comme les rapports $\frac{S_{NS}}{S_V}$ et $\frac{S_{EW}}{S_V}$ présentent globalement les mêmes tendances, ces commentaires portent sur les représentations relatives au rapport spectral H/V.

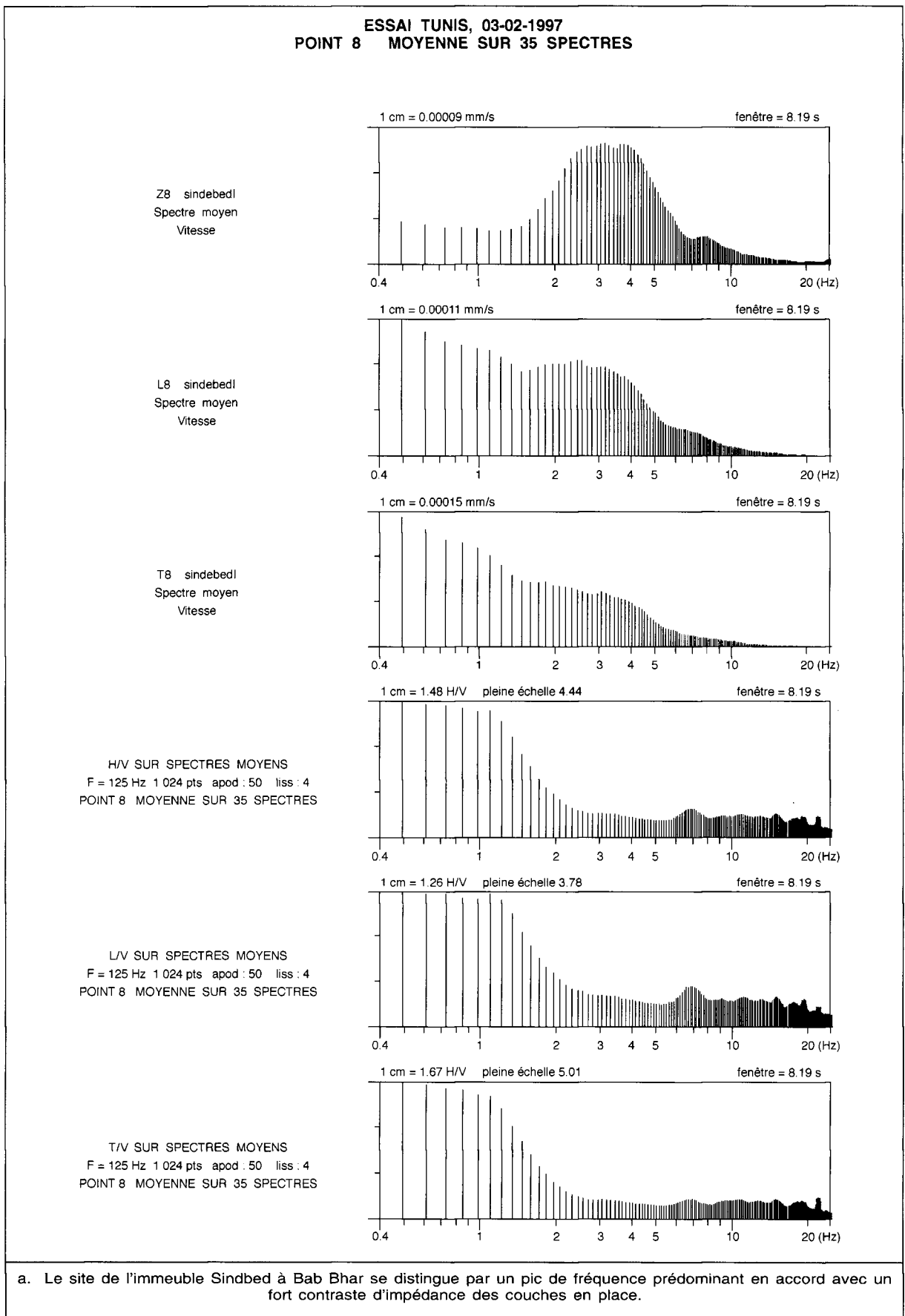
L'examen des cartes amène aux commentaires suivants :

- les fréquences de résonance les plus basses (< 1,5 à 2 Hz) intéressent le port de Tunis, Bab Bhar et la partie sud du quartier de Lafayette. Ces régions coïncident avec la zone I de la carte géotechnique et correspondent à des formations vaseuses et argileuses plastiques d'épaisseur supérieure à 20 m, reposant sur un substratum argilo-sableux compact. Ces mêmes régions bénéficient d'un facteur d'amplification important, voisin de 4, voire supérieur ;
- des fréquences de résonance intermédiaires (2 Hz à 4 Hz) sont enregistrées au pied des reliefs au sud comme à l'ouest, où alternent des affleurements d'argiles sableuses à lentilles et bancs gréseux, mais aussi des zones de remblais surmontant des argiles plastiques et un substratum argileux compact de la zone géotechnique II. Dans ce cas, les niveaux d'amplitudes attendus sont voisins de 2 ;
- les fréquences de résonance importantes (supérieures à 5 Hz) sont relevées, de même, au niveau des buttes de Sidi Bel Hassen-Jellaz, d'Essaïda, de la Kasbah, de la Rabta et du Belvédère (en pied, seulement). Ces fréquences dépassent 10 Hz aux sommets des reliefs et correspondent à des niveaux d'amplification modérés (voisins de 2) avec toutefois une exception pour Borg Zouara (nord ouest de Tunis) et les versants abrupts d'Essaïda (mis à part son sommet) pour lesquels les amplifications attendues dépassent le niveau 3.

Les zones décrites ci-dessus présentent une cohérence spatiale aussi bien des paramètres sismiques enregistrés que des caractéristiques géotechniques. Ce n'est plus le cas de la zone géotechnique IV, qualifiée d'anomalie, car caractérisée par une alternance de roches tuffeuses, croûtes calcaires et vases argileuses grises sur un même substratum argileux compact.

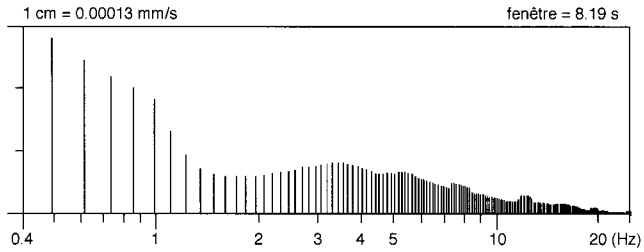
Cette zone présente une alternance de valeurs maximales et de valeurs plus modérées aussi bien pour la fréquence de résonance que pour les niveaux d'amplification. Cet aspect chahuté des paramètres sismiques est certainement à mettre en liaison avec l'extrême variabilité de la qualité géotechnique des couches et de leurs épaisseurs.

Fig. 7 - Exemples de résultats d'enregistrement du bruit de fond : spectres et rapports spectraux

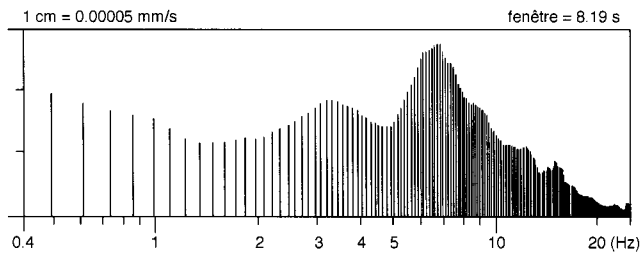


**ESSAI TUNIS, 23-02-1997
POINT 157 MOYENNE SUR 75 SPECTRES**

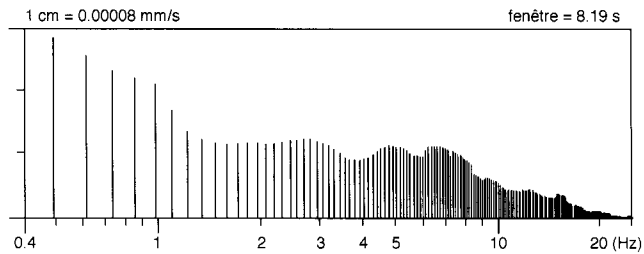
Z157 syr, jazar, chantier, t
Spectre moyen
Vitesse



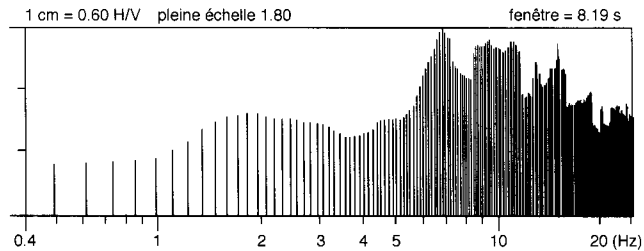
L157 syr, jazar, chantier, t
Spectre moyen
Vitesse



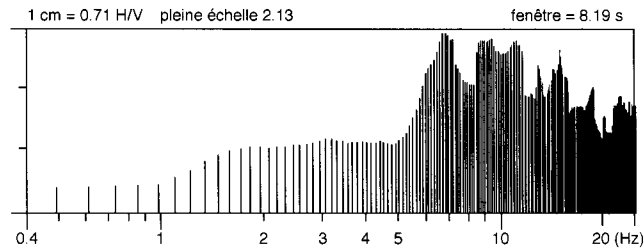
T157 syr, jazar, chantier, t
Spectre moyen
Vitesse



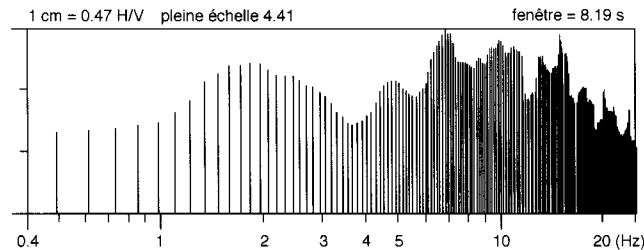
H/V SUR SPECTRES MOYENS
F = 125 Hz 1 024 pts apod : 50 liss : 4
POINT 157 MOYENNE SUR 75 SPECTRES



L/V SUR SPECTRES MOYENS
F = 125 Hz 1 024 pts apod : 50 liss : 4
POINT 157 MOYENNE SUR 75 SPECTRES

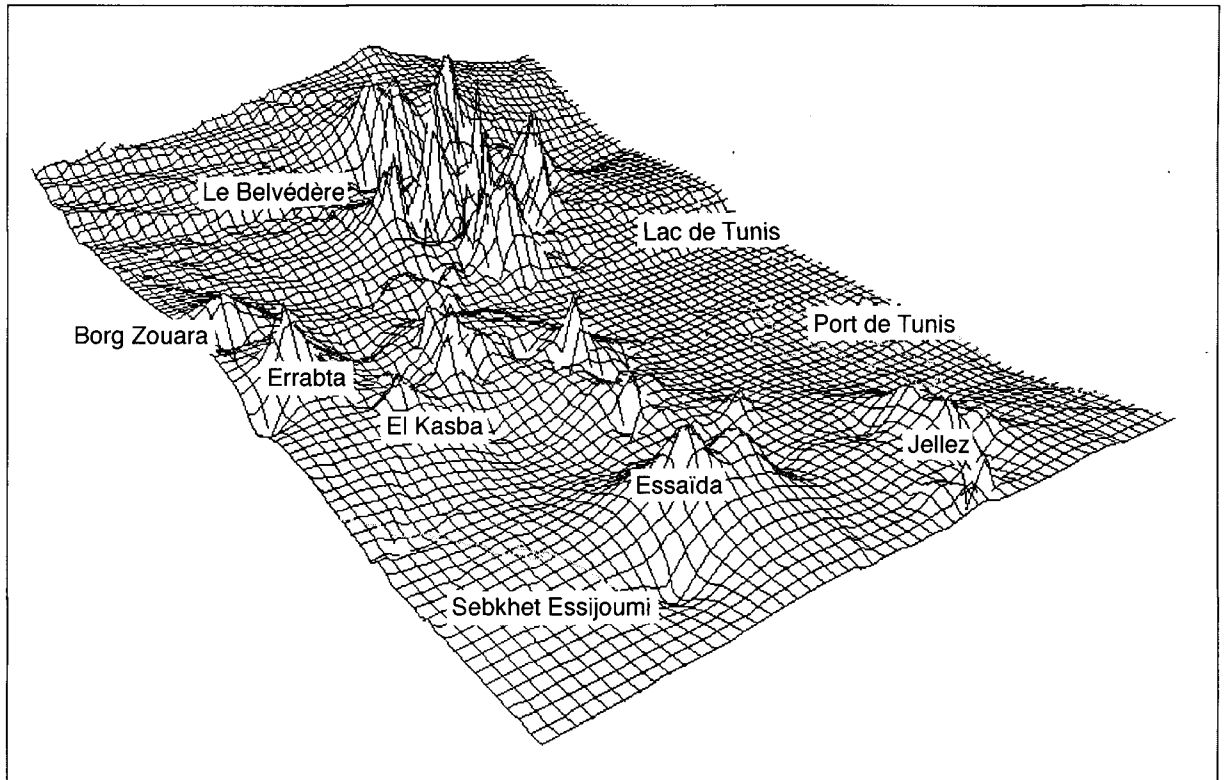


T/V SUR SPECTRES MOYENS
F = 125 Hz 1 024 pts apod : 50 liss : 4
POINT 157 MOYENNE SUR 75 SPECTRES

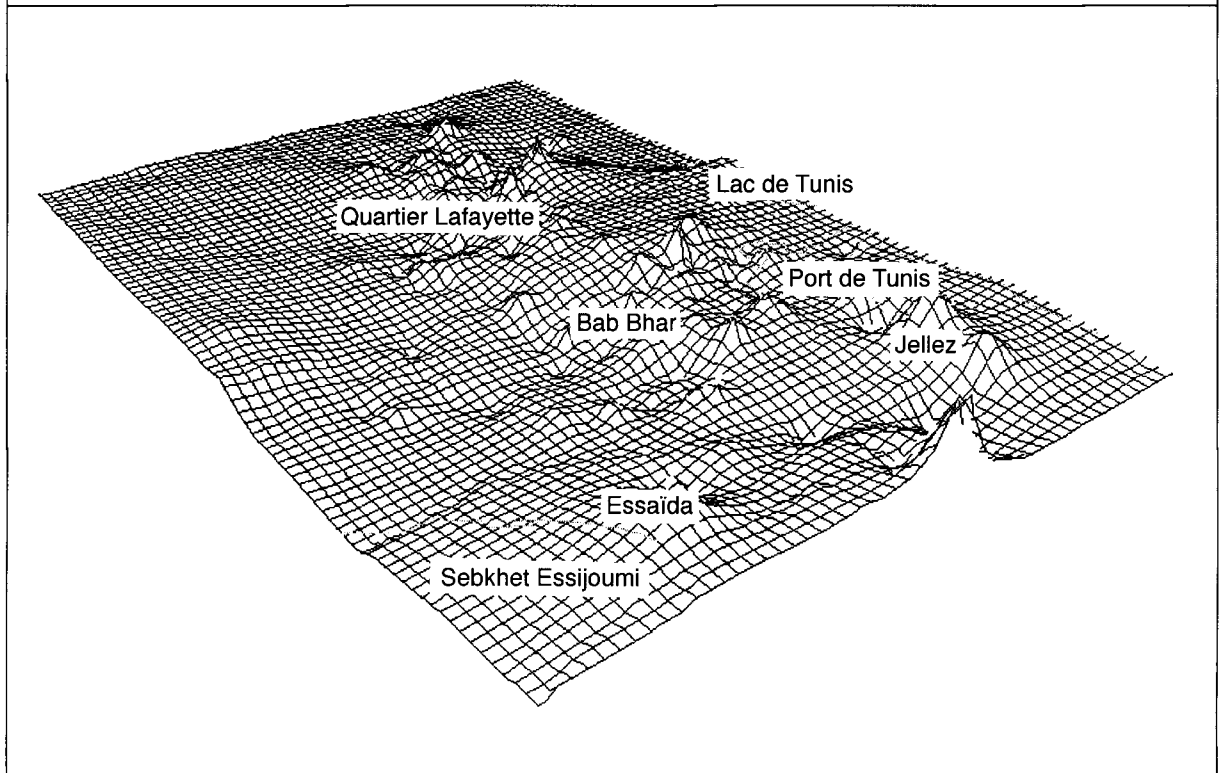


b. Le site de la rue de Syrie et Ibn El Jazar ne présente pas de pic de fréquence prédominant. La structure géotechnique sous-jacente semble justifier ces résultats (existence d'un réflecteur sableux, autre que le substratum profond, intercalé dans les formations argileuses et vaseuses de surface).

Fig. 8 - Représentation tridimensionnelle des résultats interpolés de la campagne « H/V bruit de fond », fréquence de pic et amplitude, entre 0,5 Hz et 15 Hz



a. La représentation de la fréquence de pic présente une cohérence visuelle d'une part, avec la géomorphologie du site, et d'autre part, avec la morphologie du toit du substratum.



b. La représentation de l'amplitude montre la même cohérence : les zones à fort contraste d'impédance, tout comme les sommets des buttes, présentent les amplifications maximales attendues.

Fig. 9 - Cartes d'interpolation en dégradé de couleurs de la fréquence de pic (en Hz) et de l'amplitude maximale du rapport spectral H/V (sans unité) entre 0,5 Hz et 15 Hz. Les nuances et valeurs en bordures de cartes sont à considérer avec réserve

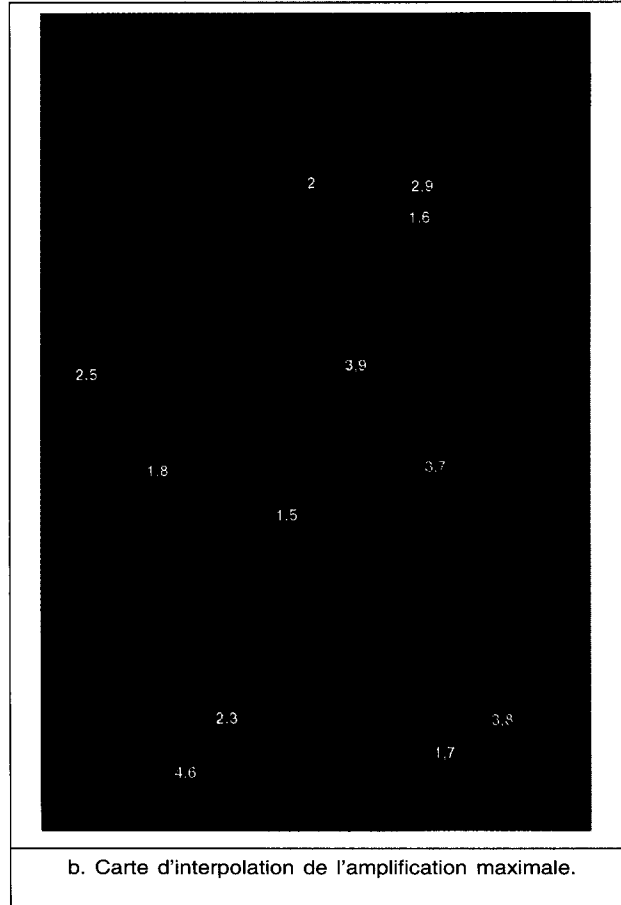
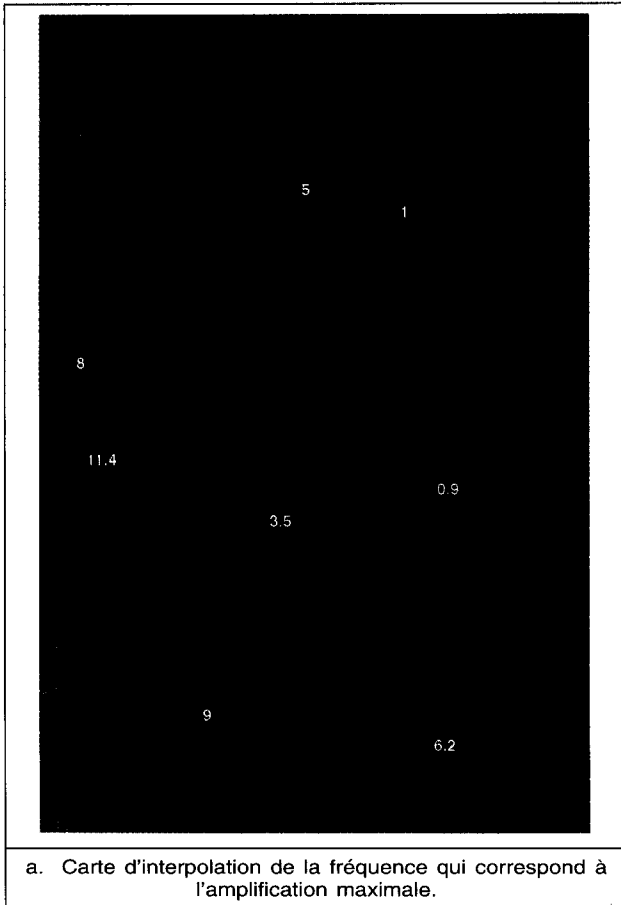
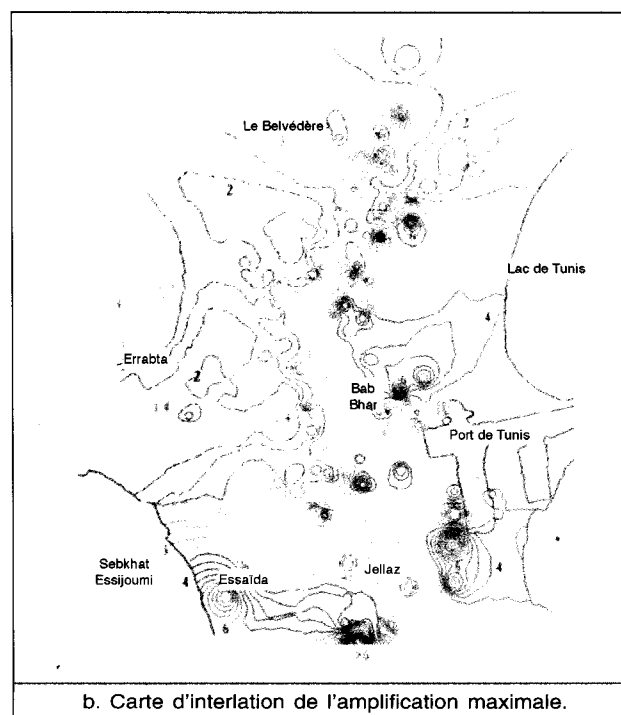
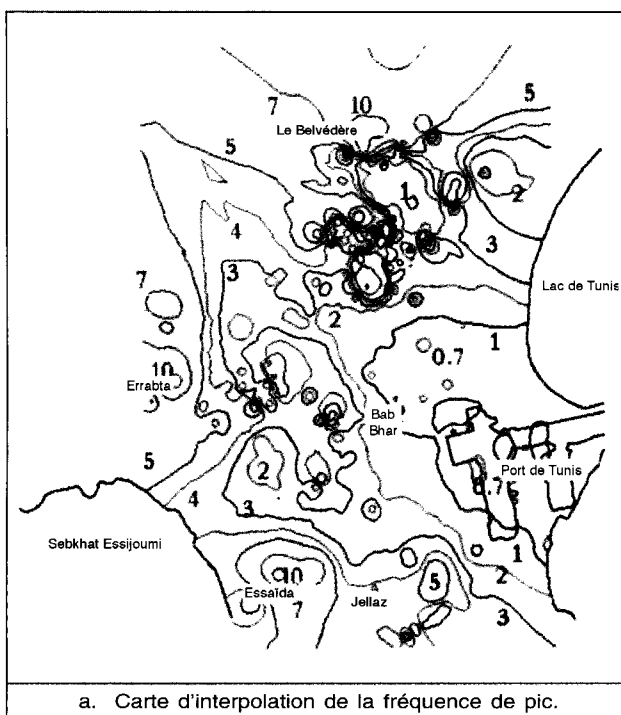


Fig. 10 - Cartes en courbes d'isovaleurs de la fréquence de pic (en Hz) et de l'amplitude maximale des rapports spectraux H/V entre 0,5 Hz et 15 Hz (sans unité)



Modélisation numérique

Si l'on admet la linéarité du comportement des sols, les premiers résultats de calcul par un modèle multicouche unidimensionnel à stratification plane, semblent conforter, eux aussi, la corrélation précédente dans les zones éloignées des reliefs (Bab Bhar, au bord du lac de Tunis). Par contre, pour les zones jouxtant les reliefs ou bien les incluant, l'approche bidimensionnelle est nécessaire, puisqu'on devrait s'attendre à des phénomènes de focalisation des ondes.

De telles modélisations font intervenir la masse volumique, la vitesse des ondes de compression V_p et de cisaillement V_s , et l'épaisseur ainsi que le facteur de qualité Q de chacune des couches. Aucun des paramètres géophysiques n'est disponible, à notre connaissance, sur Tunis. Il a été toutefois possible, moyennant des corrélations admises entre les vitesses V_p et V_s , d'une part, et les caractéristiques pressiométriques et le nombre de coups de SPT, d'autre part, de dégager une signature géophysique des formations en place. Le facteur de qualité Q est plus difficile à estimer. Nous savons cependant que les ondes sont fortement atténuées dans les vases et nous pouvons donc prendre des facteurs d'atténuation de l'ordre de quelques unités pour ce type de formations.

Les résultats des modélisations unidimensionnelles pour les sites éloignés des reliefs ainsi que les résultats des modélisations bidimensionnelles pour les sites proches des reliefs ou bien les incluant seront exposés dans une communication ultérieure.

Conclusions

La ville de Tunis, sans être dans une zone extrêmement sismique, présente un risque sismique certain. Son développement actuel dans un site géologiquement complexe et sur des terrains de

qualité géotechnique médiocre nécessite la prise en compte de l'aléa sismique.

Cette première approche des effets de site sismiques de la ville de Tunis par la méthode « H/V bruit de fond » confirme l'intérêt de la méthode :

➤ il est important de souligner la très bonne stabilité dans l'espace des résultats ainsi que les corrélations avec les modèles géotechniques déjà existants ou relevés pour les besoins de l'étude, comme le montre la similitude d'aspect entre les cartes géotechniques et les cartes « H/V bruit de fond ». Signalons, au passage, la bonne stabilité dans le temps des mesures, ainsi que la bonne stabilité du rapport spectral, même si les expériences antérieures auraient pu nous dispenser de vérifier ce point ;

➤ les mesures sur le terrain ont pu être réalisées en un temps très court, cinq semaines, avec un équipement relativement léger, le pilotage de toute la campagne par micro-ordinateur permettant une grande fiabilité des mesures et une première interprétation rapide. Cette expérience montre qu'il est possible, même avec des moyens limités, d'acquérir les données nécessaires à un microzonage sérieux.

Une deuxième campagne de mesures, avec rapports spectraux par rapport au site de référence, est en cours et devrait pouvoir contrôler les résultats de notre étude, notamment les niveaux d'amplification atteints, puisqu'il apparaît que ce sont les résultats les plus controversés de la méthode « H/V bruit de fond ».

Enfin, l'idée que cette méthode puisse être étendue à des investigations géotechniques « d'appoint » et géophysiques de subsurface, trouve ici confirmation, du moins dans des sites à remplissages sédimentaires et à fort contraste d'impédances.

Remerciements

Que toutes les entreprises et bureaux d'études tunisiens (Hydrosol, la SCET, GETU,...) qui ont mis gracieusement à notre disposition leurs résultats géotechniques, le Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale de l'ENIT ses moyens informatiques et le Centre d'études et de recherches sismiques (CERS, Paris) ses moyens géophysiques, soient ici remerciés.

Remercions aussi tous les membres du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nice et du Laboratoire central des Ponts et Chaussées qui nous ont fait profiter de leur précieuse expérience, dans le cadre d'une coopération franco-tunisienne sur le microzonage sismique. Enfin, la campagne de mesures n'aurait pas été possible sans le soutien financier de l'Institut français de coopération à Tunis.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMMAR B. (1987), *Étude de l'environnement de Tunis et de sa région en relation avec l'art de l'ingénieur en génie civil*, thèse de doctorat d'État présentée à l'Université des Sciences et techniques du Languedoc, 557 pages.
- BEN AYED N., VIGUIER C., BOBIER C. (1983), *Les éléments structuraux essentiels de la Tunisie septentrionale*, Notes du Service géologique de Tunis, 47, pp. 5-19.
- DUVAL A.-M. (1994), *Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond : Évaluation expérimentale*, thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, décembre, 265 pages.
- DUVAL A.-M., MENEROUD J.-P., VIDAL S., BARD P.-Y. (1996), Une nouvelle méthode d'évaluation de la réponse des sols aux séismes par enregistrement du bruit de fond, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **203**, mai-juin, pp. 75-90.
- ENNABLI M. (1983), *Étude hydrogéologique des aquifères du nord-est de la Tunisie*, Thèse de Doctorat es-Sciences naturelles de l'Université de Nice, 350 pages.
- KAANICH (1987), *Conception et réalisation d'une base de données géologiques et géotechniques orientée vers la cartographie géotechnique automatique : application à la ville de Tunis*, Thèse de Docteur en Génie civil et sciences de l'habitat présentée à l'INSA de Lyon, juillet, 391 pages.
- NAKAMURA Y. (1989), *A method for dynamic characteristic estimations of subsurface using microtremors on the ground surface*, Quarterly report of Railway Technical Research Institut., Tokyo, 30, pp. 25-33.
- NAKOURI (1975), *Contribution à l'étude géotechnique des sols de Tunis*, Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur de l'ENIT, juin, 140 pages.
- PIEMENTA J. (1953), *Sur les déplacements de l'embouchure de la Medjerda et les caractères de son delta*, Compte rendu de l'Académie des Sciences, Paris, juin, t. 236, 9, pp. 946-948.
- PIEMENTA J. (1959), *Le cycle Pliocène actuel dans les bassins parliques de Tunis*, Mémoire de la Société Géologique de France, Paris, Tome XXXVIII, fasc. 1, 85, pp. 1-176.
- REGIBA F. (1997), *Application des SIG à la cartographie géotechnique*, Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur de l'ENIT, juin, 105 pages.
- SAIDANE I., TRABELSI M. (1996), *Contribution à l'élaboration de la carte géotechnique de Tunis : élaboration d'une base de données géotechniques et géophysiques*, Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur de l'ENIT, juin, 140 pages.

ABSTRACT

Investigation of the seismic background noise in order to perform seismic microzoning of the city of Tunis

N. BOUDEN-ROMDHANE - P. MECHLER

Most of the city of Tunis is built in a basin consisting of Quaternary mud and sandy clay formations which rest on a more compact bedrock. This configuration suggests that seismic effects might occur on the site, in particular as Tunis and its region are tectonically unstable.

An initial microzoning of the city was performed using the H/V background noise method, which consists of recording the seismic background noise and finding the ratio between the horizontal and vertical spectra. With this technique it is possible to estimate the resonance frequencies of the site and the degree of amplification.

Background noise measurements were taken at about 280 sites, on the basis of a grid which was drawn up using prior geotechnical zoning. When the two types of zoning (geotechnical and seismic) are placed side-by-side the correlation between on the one hand the geotechnical and geomorphological situation and on the other the anticipated seismic effect is apparent.