



Coïncidences spectrales du bruit de fond entre sol et bâti existant dans la ville d'Imzouren, Maroc (Spectral coincidences of background noise between soil and existing buildings in Imzouren city, Morocco)

A. Douiri^{1*}, T. Mourabit¹, A. Cheddadi¹, M. Chourak², S. Louhibi³

¹ Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Tanger, Maroc.

² Université Mohamed Premier, Oujda, Faculté Pluridisciplinaire, Nador, Maroc.

³ Université Mohamed Premier, Ecole National des Sciences Appliqués, Oujda, Maroc.

Received 26 July 2014; Revised 27 September 2014; Accepted 29 September 2014.

* Corresponding author. E mail: douiri.abdelhalim@gmail.com; Tel: 0661673384

Abstract

The resonance of a building with the ground occurs when its free oscillations frequency is close to the ground's one (Frequency (Hz) is the number of oscillations per second of a building). The oscillation amplitudes then, increase to a considerable extent and become a particularly destructive phenomenon, inducing more damage during seismic activity. We present the results of the comparison between the values of the natural frequencies of the different categories of buildings (ranging from a minimum value of 2.47 Hz and a maximum value of 14.3 Hz, extensive band), and the natural frequencies of the soil [0.931 to 4.905 Hz]. The comparison of the frequency values in zone 3 and zone 4 (spatial frequency distribution map of the city Imzouren) with those of some buildings suggests the possibility to have the phenomenon of resonance ground-building occurrence in these areas in case of seismic shaking.

Keywords: Morocco, Imzouren, site effect, H/V method, natural frequency, resonance ground-building.

Résumé

La résonance d'un bâtiment avec le sol se produit lorsque ses oscillations libres ont une fréquence proche de celles du sol. La fréquence (exprimée en Hertz) correspond au nombre d'oscillations d'un bâtiment par seconde. Les amplitudes d'oscillation croissent alors d'une manière considérable se transformant ainsi en un phénomène particulièrement destructeur qui provoque plus de dégâts lors des activités sismiques.

Nous présentons les résultats de la comparaison entre les valeurs des fréquences propres des différentes catégories de bâtiments (variant entre une valeur minimale de 2,47 Hz et une valeur maximale de 14,3Hz, bande très étendue), et les fréquences propres des sols [0,931- 4,905 Hz]. Le rapprochement des valeurs des fréquences de la zone 3 et la zone 4 de la carte de distribution spatiale des fréquences de la ville d'imzouren à celles de certains bâtiments laisse prévoir la possibilité d'avoir le phénomène de résonance sol-structures au niveau de ces zones en cas d'une sollicitation sismique.

Mots clés : Maroc, Imzouren, effet de site, méthode H/V, fréquence propre, résonance sol-structure.

1. Introduction

Il a été constaté plusieurs fois dans les relevés post-séismique, que les bâtiments présentant des fréquences fondamentales similaires à celles du sol de fondation présentaient des dommages sensiblement plus importants (Caracas 1967, Mexico 1985, Equateur, 1996,...etc). En effet l'essentiel des effets des séismes provient des vibrations caractérisées par leur fréquence et amplitude transmises par les ondes sismiques émises à la source et modifiées au cours de leur propagation par les hétérogénéités de surface. En particulier, la variabilité spatiale liée à la nature géologique et topographique de terrains rencontrés. Cette variabilité spatiale liée à la géologie de surface est appelée "effets de site".

Si l'une des fréquences du sol coïncide avec l'une des fréquences du bâtiment, et que l'énergie incidente à cette fréquence est importante, le mode correspondant du bâtiment sera particulièrement excité, les déformations résultantes en seront plus importantes, et donc l'endommagement plus élevé si l'énergie incidente du séisme est suffisante.

La présente étude traite de (i) l'évaluation de l'effet de site et de (ii) la détermination de la fréquence fondamentale de vibration d'un certain nombre de bâtiments situés dans la ville d'Imzouren. En parallèle, une comparaison a été faite entre les fréquences fondamentales du sol et celles des bâtiments en vue de prévoir la présence ou non du phénomène de 'résonance' entre sol et bâti existant dans la ville d'Imzouren.

2. Situation de la ville d'Imzouren

La ville d'Imzouren est située au nord du Maroc dans la province d'Al Hoceima à proximité de la côte méditerranéenne, et à 18 Km (seulement 5 kilomètres à vol d'oiseau) au Sud-Est de la ville d'Al Hoceima (Figure 1). Le patrimoine immobilier du centre de la ville qui est caractérisé par la concentration de bâtiments d'habitat denses relativement nouveaux et généralement construits pour la plupart avant l'avènement des premières règles parasismiques [1].

La zone d'étude, concerne 5147 bâtiments, dont une vaste gamme de types structuraux. Le parc logement du centre d'Imzouren est à dominante d'habitat économique de type RDC à R+3 (maison marocaine moderne) qui abrite 95% des ménages [2].

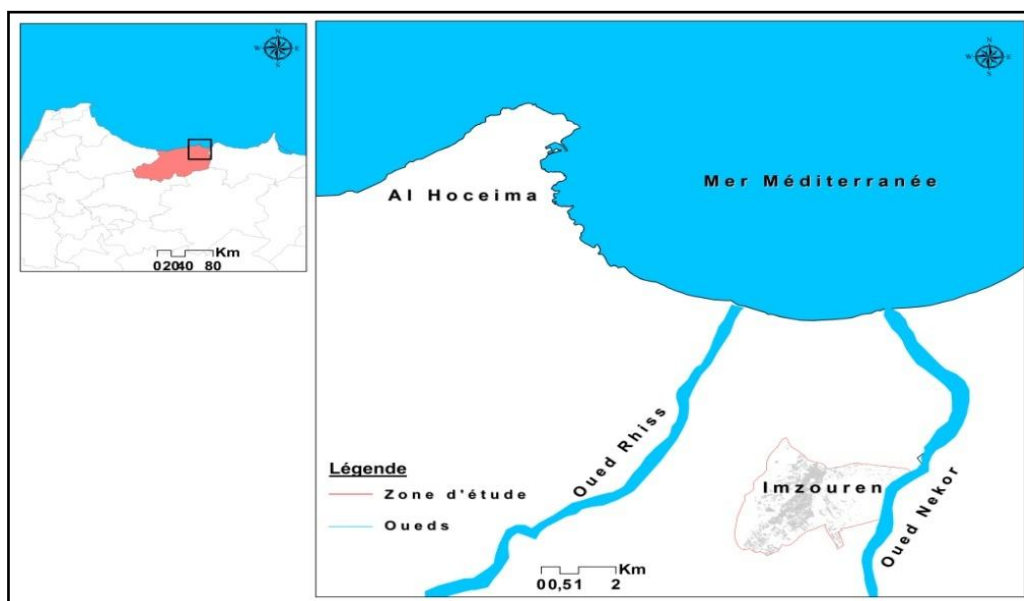


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

3. Evaluation des effets de site dans la ville d'Imzouren

3.1. Approche

À partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, la technique utilisée dans ce travail consiste pour le traitement du signal, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale des ondes sismiques: c'est la méthode appelée couramment H/V [3,4,5], et validée expérimentalement par Duval [6]. Ce rapport permet d'obtenir une pseudo-fonction de transfert F au point de mesure suivant le rapport $F=H/V$.

La typologie des rapports H/V permet de caractériser les zones du point de vue géotechnique, notamment le comportement dynamique du sol suite à une sollicitation sismique. En ce sens, il s'agit d'une technique géophysique utile pour évaluer la fréquence propre fondamentale des terrains meubles, présentant un bon contraste d'impédance avec leur soubassement. Aussi, cette technique permettra de dégager une meilleure définition du mouvement attendu sur le site, et par conséquent en mesures préventives, une meilleure adaptation de la résistance des structures.

3.2. Campagnes de mesure

Les campagnes des mesures ponctuelles de bruit de fond ont été réalisées en deux temps dans la commune : en janvier 2011 et au cours de l'hiver de 2012. Une station d'acquisition CityShark II [7] couplée à un capteur Lennartz LE- 3D (vélocimétrie à trois composantes de fréquence propres 5 secondes) ont été utilisés durant ces campagnes de mesures (Figure 2).



Figure 2: Type de matériel utilisé pour l'enregistrement du bruit de fond. Station d'enregistrement CityShark II (à gauche) et sismomètre Lennartz 5-secondes (à droite).

Au total, 127 stations de mesures de bruit de fond ont été observées afin de couvrir l'ensemble du territoire de la commune. La figure 3 montre la distribution spatiale des points de mesure dont la densité varie en fonction de l'hétérogénéité géologique des terrains et le degré d'urbanisation. La fréquence d'acquisition est de 200 Hz et la durée d'enregistrement de chaque mesure est de 20 minutes.

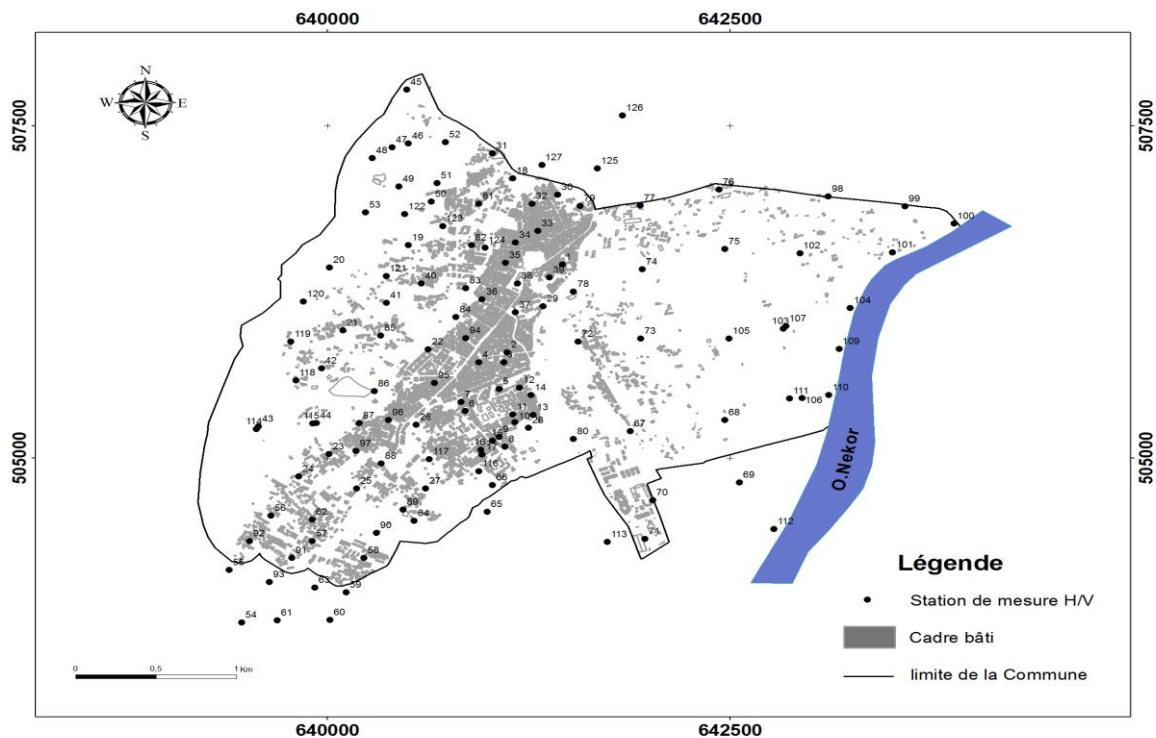


Figure 3: Distribution spatiale des stations de mesure H/V dans la commune d'Imzouren.

3.3. Traitement des données

Le traitement des données a été réalisé avec le logiciel Géopsy, mis au point par Marc Wathelet [8]; les paramètres de calcul ont été sélectionnés pour respecter les recommandations du consortium SESAME [9].

Pour le calcul des rapports H/V, seules des fenêtres temporelles de 40 secondes et libres de signal transitoires sont sélectionnées grâce à un algorithme d'anti-triggering (« LTA-STA »).

Pour chaque fenêtre, les spectres de Fourier des trois composantes sont calculés et lissés suivant Konno & Ohmachi [10] ($b = 40$). Les rapports spectraux de chaque fenêtre sont ensuite calculés en faisant le rapport de la moyenne quadratique des spectres de Fourier des composantes horizontales et du spectre de Fourier de la composante verticale. Le rapport H/V final est enfin obtenu en calculant la moyenne géométrique des rapports spectraux de chaque fenêtre. La figure 4 montre un exemple d'enregistrement de bruit sismique ambiant et la courbe H/V associée réalisée au point n°1.

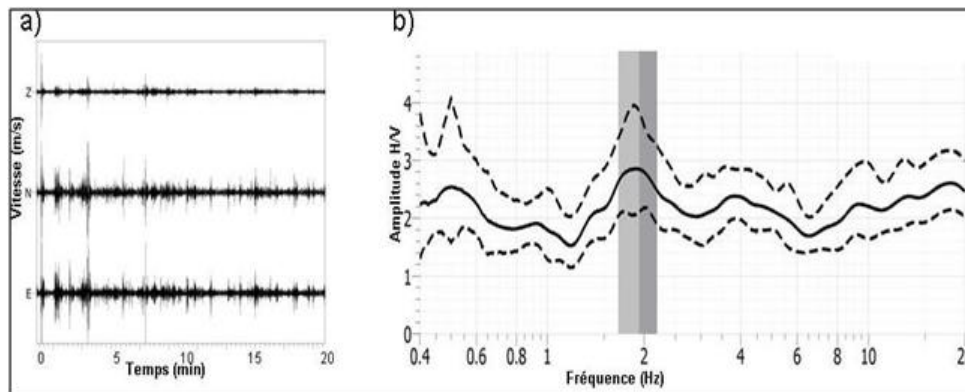


Figure 4: a) Exemple d'enregistrement de bruit sismique ambiant du point n° 1. Composante verticale (Z), composantes horizontales: Nord-Sud (N) et Est-Ouest (E). b) la courbe noire continue : représente la valeur moyenne du rapport H/V. Les courbes en pointillées : les valeurs à \pm un écart type du rapport H/V. Les rectangles gris clair et sombre représentent le domaine d'incertitude sur la valeur de la fréquence du(es) pic(s), la fréquence du pic se situant à la frontière entre les deux rectangles est prise en considération.

3.4. Résultats

L'évaluation des effets de site sismiques dans la ville d'Imzouren par la méthode « H/V » bruit de fond, montre que la plus part des mesures H/V, ont apporté des résultats d'une précision satisfaisante (Figure 5, Figure 6), confirmant ainsi l'applicabilité de la méthode pour un contexte géologique présentant un contraste d'impédance marqué et une géométrie relativement simple.

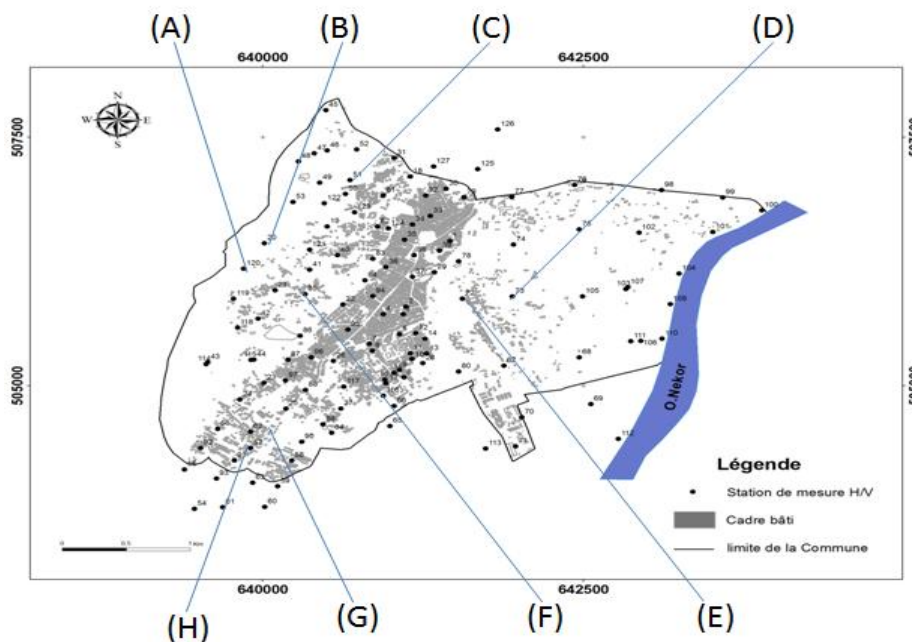


Figure 5: Distribution spatiale des stations de mesure H/V. La figure 6 représente un échantillon des spectres de réponses dans chaque zone homogène dans la commune urbaine d'Imzouren.

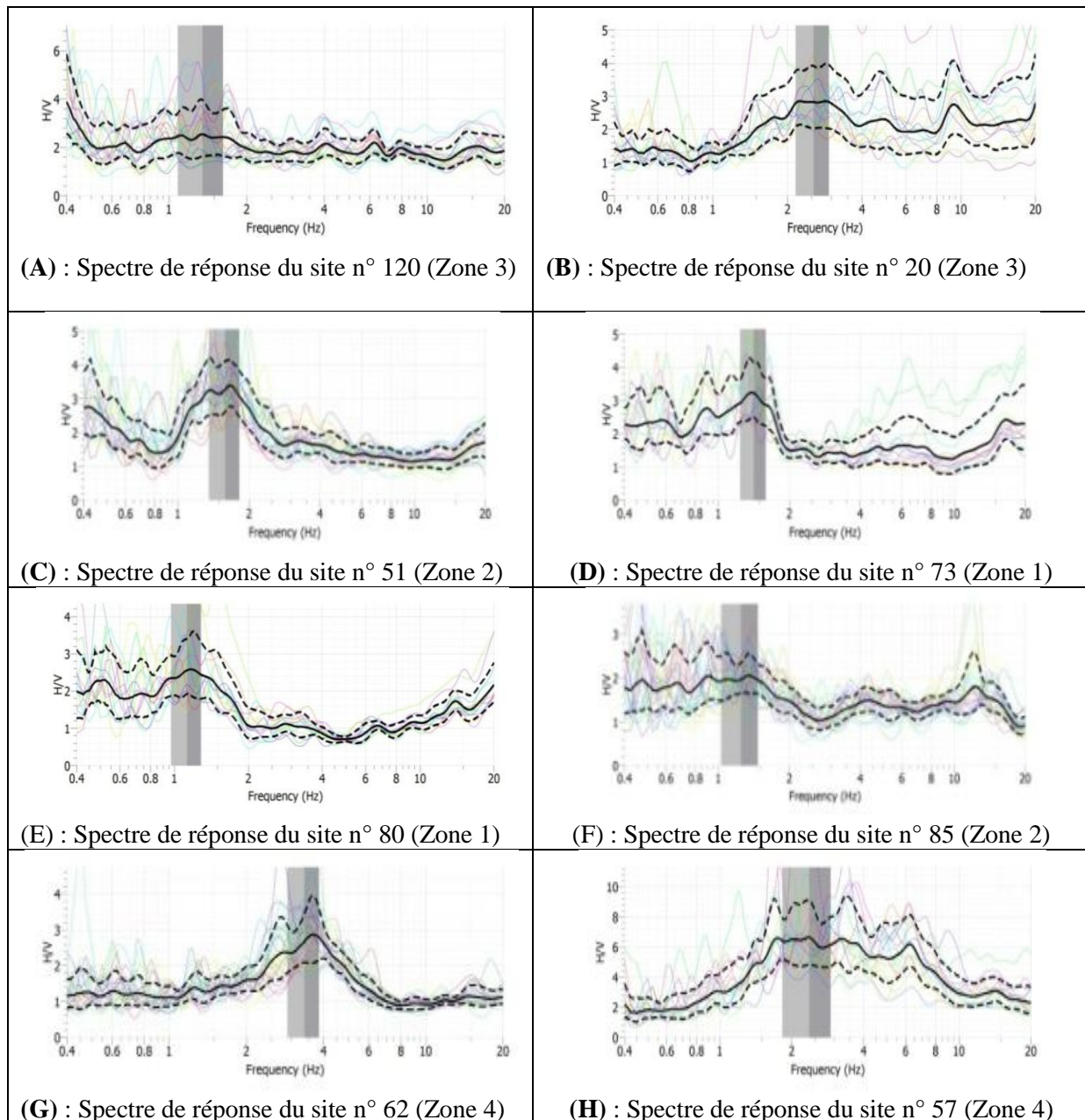


Figure 6: Exemple des spectres de réponses dans chaque zone homogène (Figure 7) dans la commune urbaine d’Imzouren.

Les résultats de la carte de distributions spatiales des valeurs des iso-fréquences dans la commune qui ont fait l’objet du traitement des rapports spectrales ‘H/V’ des mesures du bruit de fond des données de 127 sites, ont montré que la répartition spatiale des fréquences fondamentales varie suivant quatre zones homogènes (Figure 7) dont les valeurs les plus basses coïncident avec l’étendue de la plaine Ghiss-Nekor et le centre de la ville d’Imzouren où l’épaisseur des dépôts de couverture est très importante (comprise entre 20 à plus de 90 mètres) [11].

Les valeurs moyennes et intermédiaires sont en majorités localisées au niveau des plateaux d’Imzouren et sur des parties où affleure le substratum schisteux de l’unité de kétama, avec la présence de certaines valeurs intermédiaires dans la partie Est de la commune. Les plus fortes valeurs se localisent au niveau de la zone Sud-Ouest de la commune où la topographie est très accentuée et dans certains endroits où affleure le substratum de l’unité de kétama [11].

Conséquemment, une corrélation positive apparait si l’on compare les valeurs obtenues à partir des rapports « H/V » et les conditions géologiques (figure 7) et topographiques de la commune [11].

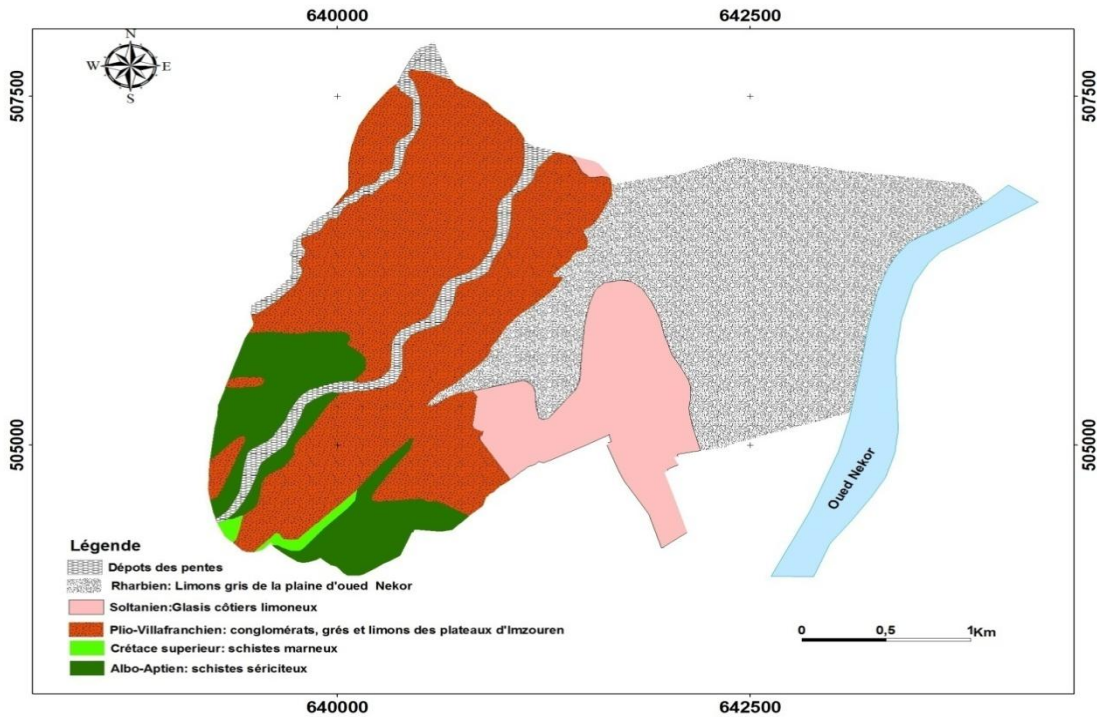


Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude (Simplifiée de notes & mémoires du service géologique n° 302, 1984).

Il est en même pour les résultats de la variation des fréquences fondamentales avec le profil lithologique (qui traverse la ville d'Imzouren à Troughout passant par Oued Nekor) présentant la variation de la géométrie du substratum (figure 8). D'après ces résultats on constate que les fréquences fondamentales dans cette zone sont inversement proportionnelles à l'épaisseur de la couche des sédiments.

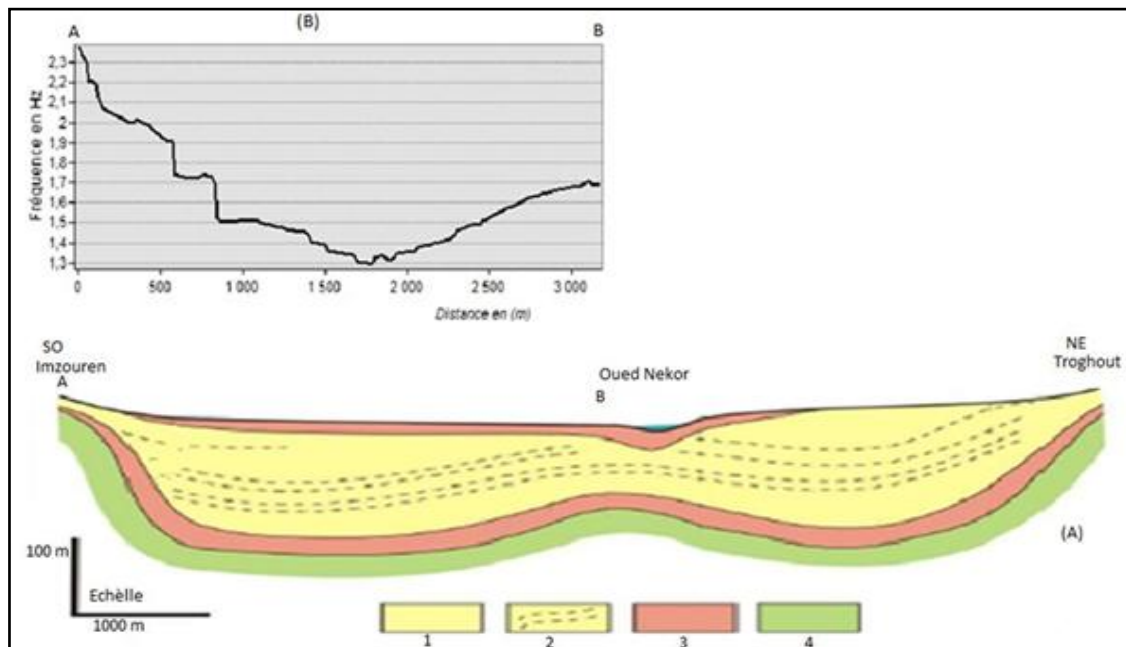


Figure 8 : (A) Profil lithologique synthétique de la plaine Ghiss-Nekor Salhi [12] modifié [11]. 1 : Alluvions détritiques (sables et graviers), 2 : Alluvions détritiques : limono- argileuses, 3 : Matériaux argileux, marneux et limoneux, 4 : Schistes (substratum). (B) Profil de la variation des fréquences fondamentales suivant la section A-B indiquée dans la figure 9 [11].

De même, cette distribution des fréquences montre une quasi-parfaite concordance des valeurs de fréquences obtenues avec les intensités sismiques enregistrées dans la ville après le séisme du 24 février 2004.

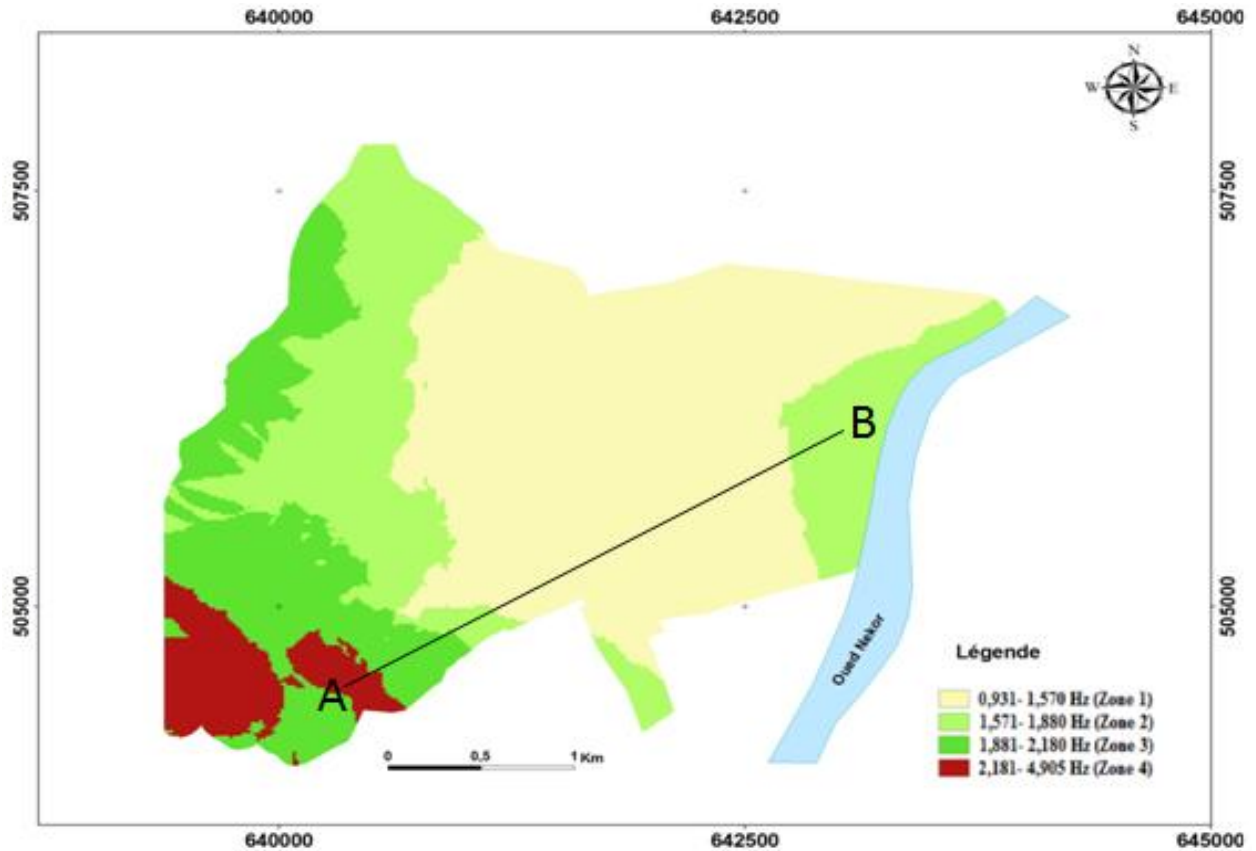


Figure 9: Carte de distribution spatiale des fréquences (en Hz) et identification des zones homogènes (microzonage sismique de la commune d'Imzouren).

4. Détermination 'in situ' des fréquences propres des bâtiments

4.1. Approche et technique utilisée

Le "bruit de fond ambiant" est présent partout, notamment en milieu urbain. Son origine est due aux activités humaines comme le trafic routier ou les industries, et aux activités naturelles comme le vent, la houle océanique, etc. Malgré la faible amplitude de cette sollicitation (10^{-2} à 10^{-4} g) [13], il est possible de mesurer la réponse des bâtiments à cette sollicitation et déduire leurs caractéristiques dynamiques dans le domaine de petites déformations [14, 15, 16]. Pour déterminer les fréquences propres des bâtiments, nous avons fait recours au même appareillage pour l'enregistrement du bruit de fond sur le sol (Figure 2), et qui a été souvent utilisé pour des études de structure [17].

La technique utilisée dans ce travail consiste pour le traitement du signal à effectuer des enregistrements du 'bruit de fond ambiant' au niveau de l'étage supérieur des bâtiments (le sismomètre est installé sur le toit ou, à défaut, sur un point plus élevé du bâtiment instrumenté), durant 30 minutes à une fréquence d'échantillonnage de 200 Hertz, et on règle le gain afin de ne pas saturer le signal d'enregistrement.

4.2. Bâtiments étudiés

Les bâtisses existantes dans la ville d'Imzouren sont en général des constructions récentes dont les hauteurs varient du RDC au R+3 avec une structure poteau-poutre en béton armé et un remplissage en briques creuses. Pour cette étude, nous nous sommes volontairement limités à ce type de constructions choisi en fonction de sa représentativité en nombre et en type. La Figure 10 illustre des exemples de typologies des constructions existantes dans la ville à différentes hauteurs.



Figure 10: Typologie des constructions existantes au niveau de la ville d'Imzouren

4.3. Campagnes de mesures

Les mesures du bruit de fond ont été réalisées sur une population de 41 bâtiments qui représentent les principales typologies des constructions rencontrées dans les zones caractéristiques de la ville et sur les différents types des sols. La Figure 11 montre la localisation des bâtiments où les mesures ont été réalisées.

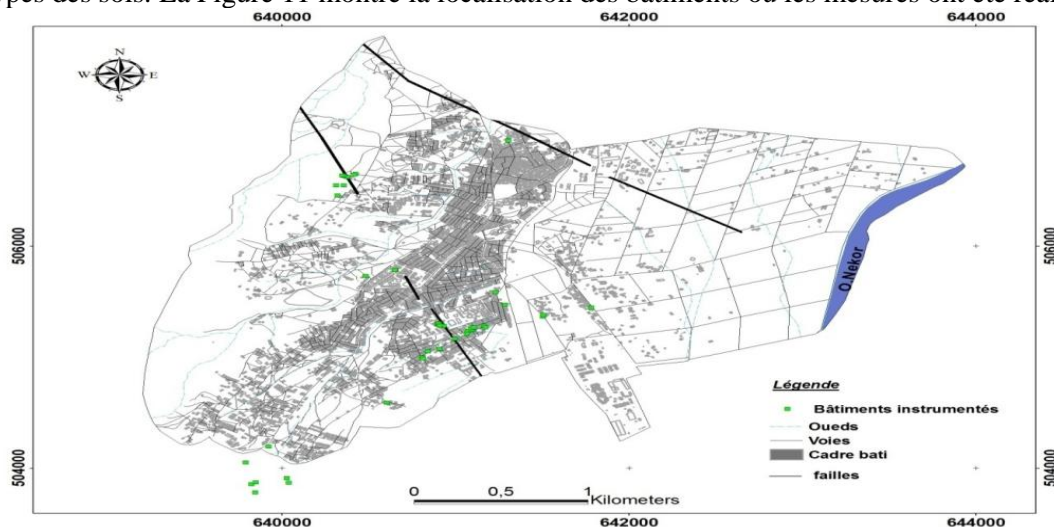


Figure 11: Localisation spatiale des bâtiments instrumentés.

4.4. Traitement des données

Le traitement des données a été opéré à l'aide du logiciel Géopsy [8]. Les amplitudes spectrales sont obtenues moyennant les amplitudes spectrales de fenêtres de signal sélectionnées [18] suivant le procédé suivant :

- Sélection automatique des fenêtres (40 secondes) réalisée par un anti-trigger qui rejette toutes les parties perturbées du signal par le passage d'une voiture par exemple ou par un choc ;
- Calcul des amplitudes spectrales sur ces fenêtres par une FFT (Fast Fourier Transform) ;
- Lissage des amplitudes spectrales par la méthode de Konno et Ohmachi [10] avec une constante de lissage de 40 ;
- Moyenne des amplitudes spectrales lissées.

Les fréquences des bâtiments sont alors estimées comme étant les fréquences des pics des amplitudes spectrales moyennées. Les pics de ces moyennes (valeurs maximales des spectres) correspondent aux fréquences propres des bâtiments. Les résultats sont présentés selon les deux directions; N (Longitudinale) et E (Transversale). La Figure 12 illustre un exemple des signaux ainsi que les spectres de réponse correspondant dans les deux directions du bâtiment.

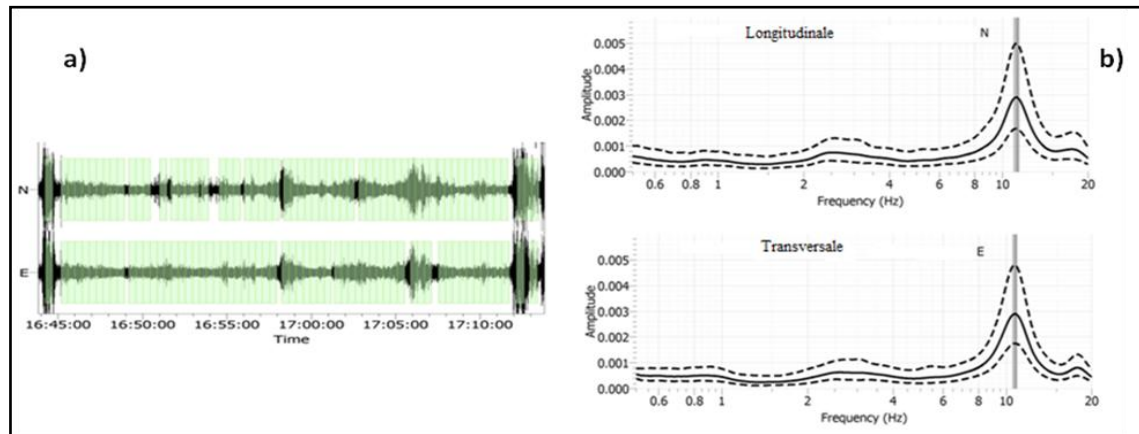


Figure 12: a) Exemple d'enregistrement du signal du bruit de fond suivant les deux directions.
 b) les spectres de réponse correspondant à un bâtiment de type R+1.

4.5. Résultats

La lecture des fréquences fondamentales des structures dans la direction transversale montre que les valeurs obtenues varient entre la valeur minimale de 2,47 Hz dans le RDC et la valeur maximale de 14,3 Hz au niveau de R+2 ; et pour la direction longitudinale, elles varient entre une valeur minimale de 2,81 Hz pour la structure RDC et la valeur maximale de 13,18 Hz au niveau de R+1 (Tableau 1). Aussi, nous constatons que ces fréquences varient d'une façon aléatoire au niveau des structures qui ont des dimensions géométriques semblables (hauteurs, largeurs et longueurs).

Tableau 1: Les valeurs max et min des deux directions des fréquences propres des bâtiments obtenues à l'aide des enregistrements du bruit de fond.

Typologie d'Habitats (Nombre d'étages)	Fréquences (Direction Longitudinale)		Fréquences (Direction Transversale)		Nombre des bâtiments instrumentés
	F _{0min} en (Hz)	F _{0max} en (Hz)	F _{0min} en (Hz)	F _{0max} en (Hz)	
RDC	2,81	11,64	2,47	10,64	7
R+1	3,37	13,18	5,67	13,33	9
R+2	3,19	10,44	3,34	14,34	14
R+3	4,88	10,69	4,19	9,35	11

D'après les résultats obtenus, les réponses pour les différents types de constructions sont très hétérogènes et présentent des caractéristiques difficiles à interpréter. La complexité desdits résultats, probablement due à la complexité des structures, ne permet pas d'identifier clairement un pic propre aux bâtiments du fait de leurs hauteurs qui varient entre le RDC à R+3 (Il est aussi évident que des bâtiments d'une hauteur donnée n'auraient pas exactement la même fréquence); et des autres facteurs qui interviennent dans l'hétérogénéité de ces résultats, notamment les différences de rigidité et de résistance du système structural dans les directions longitudinale et transversale, les formes complexes en plan et en masse, la mauvaise qualité des matériaux, la position du bâtiment dans l'îlot (tête, angle, milieu) ainsi que l'âge de la structure, ... etc.

4. Comparaison entre les fréquences des sols et les fréquences des bâtiments instrumentés

La comparaison des fréquences propres des différentes catégories de bâtiments (Tableau n° 1) avec les fréquences propres des sols nous donnent une indication sur la possibilité d'occurrence du phénomène de résonance sol-structures lors d'une sollicitation sismique, principalement au niveau de la zone 3 et la zone 4 (Figure 9). D'un point de vue strictement théorique et afin d'éviter le phénomène de résonance, la fréquence

propre d'un ouvrage doit différer de la fréquence propre du sol de fondation, Les fréquences fondamentales des bâtiments mesurées varient d'une valeur minimale (F_0 min) de 2,47 Hz à une valeur maximale (F_0 max) de 14,34 Hz (Figure 13), alors que celles du sol varient de 0,931 à 4,905 Hz. Or, nous savons que la fréquence des bâtiments diminue lors d'un tremblement de terre du fait notamment de l'apparition de fissures [19].

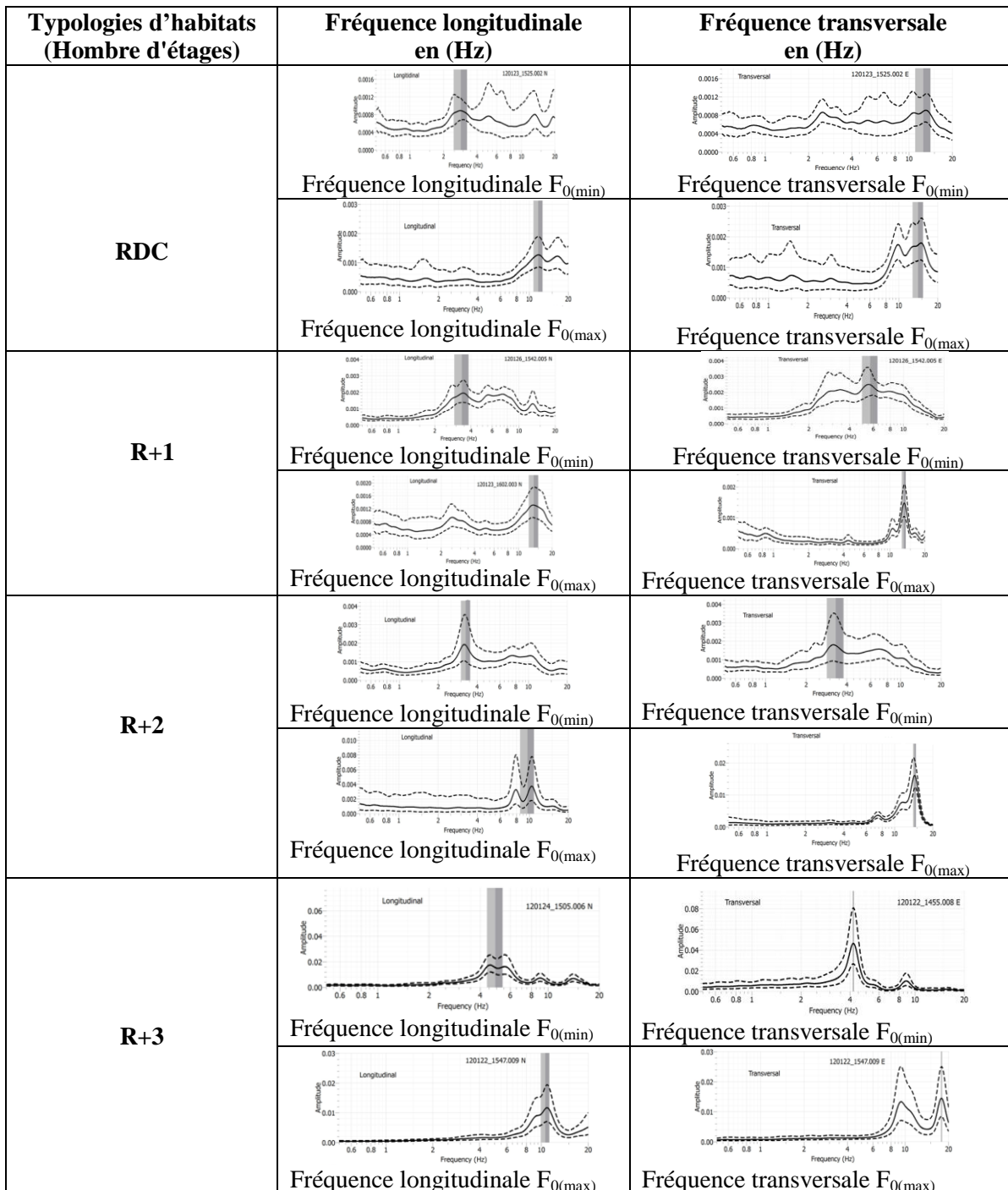


Figure 13: Spectres de réponses fondamentales (max et min) dans la direction longitudinale et transversale des différentes typologies des bâtiments instrumentés dans la ville d'Imzouren obtenues à l'aide des enregistrements du bruit de fond.

Toutefois, les bâtiments à hautes fréquences ne semblent pas être menacés par le phénomène de résonance. L'observation des dommages constatés lors du séisme du 24 février 2004 dans la ville d'imzouren, montre que la plupart des constructions totalement effondrés se localisent au niveau de la zone 2 et la zone 3. A ce titre, le risque des bâtiments totalement effondrés peut être attribué à la coïncidence entre la fréquence de ces bâtiments et celle du sol lors de cette activité sismique.

Conclusion

L'analyse des rapports de bruit de fond « H/V » enregistrés au niveau de la commune, montre la présence des pics bien marqués dans l'intervalle [0,931- 4,905 Hz] qui traduit bien la présence d'un contraste d'impédance important entre le substratum et les formations superficielles, et par conséquent la présence des effets de site au niveau de la ville d'Imzouren. Les résultats des valeurs des fréquences des sols obtenues dans la commune, qui varient entre 0,931 Hz et 4,905 Hz et celles des bâtiments qui varient dans l'intervalle [2,47-14,34 Hz], représentent une donnée importante dans le domaine du génie parasismique, d'une manière spéciale dans l'identification des problèmes potentiels de résonance entre le sol et les ouvrages, et de concevoir des structures nouvelles ayant des périodes propres très éloignées de celle du sol qui les supporte afin de réduire les effets destructeurs des séismes sur les constructions. Les domaines fréquentiels mesurés au niveau des sols et dans les différents bâtiments, montrent une zone de concordance entre 2,47-14,34 Hz. L'éventualité d'une résonance sol-structure semble évidente partout dans la commune urbaine d'Imzouren. Les dégâts dépendent par conséquent de l'énergie transmise par les sols lors des sollicitations sismiques. Celle-ci, est relativement libérée davantage dans les zones 2 et 3, où les intensités maximales ont été observées suite au tremblement de Terre de 2004.

Références

1. Louhibi S., Chourak M., El kihel E., El hammoumi A., Douiri A., Evaluation of the Seismic Vulnerability of Buildings in Al Hoceima (Morocco), *International Journal of earth sciences and engineering*, (2014) 1505-1511.
2. Le Haut Commissariat Au Plan statistiques "Recensement Général de la Population et de l'Habitat" (2004).
3. Nogoshi M., Igarashi T., On the propagation characteristics of microtremors, *J. Seism. Soc. Japan*, 23 (1971) 264-280.
4. Nakamura Y., A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.* 30:1, (1989) 25-30.
5. Nakamura Y., Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC, *Quarterly Report of RTI*, 37, 3, (1996) 112-127.
6. Duval A.M, Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond : Evaluation expérimentale, *thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI*, décembre, (1994) 265.
7. Chatelain J.L., Gueguen P., Guillier B., Frechet J., Bondoux F., Sarrault J., Sulpice P., Neuville J.M., CityShark, a user-friendly instrument dedicated to ambient noise (microtremor) recording for site and building response, *Seismological Research Letters*, 71, N° 6 (2000) 698-703.
8. Wathelet M., Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion, *Thèse de doctorat, Université de Liège*, (2004) 161.
9. SESAME, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient Vibrations - measurements, processing and interpretations. *SESAME European research project, deliverable* (2004) D23.12, 2005.
10. Konno K., Ohmachi T., « Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 88, n°1, (1998) 228-241.
11. Douiri A., Mourabit T., Cheddadi A., Chourak M., Pertinence de la méthode H/V « bruit de fond », pour l'évaluation de l'effet de site dans la ville d'Imzouren (Rif central, Maroc), *Notes et Mémoires du Service géologique*, (2014) in presse.
12. Salli A., Géophysique, Hydrogéologie et Cartographie de la Vulnérabilité et du Risque de Pollution de l'Aquifère de Ghis-Nekor (Al Hoceima, Maroc), *Thèse de doctorat, Fac. Sci., Univ. Tetouan*, (2008) 308.
13. Bard P.Y., Dunand F., Gueguen Ph., Chatelain J.L., Guillier B., Vassail T., Caractérisation du comportement dynamique des sols et structures par mesures de vibrations ambiantes: Développements récents et questions en suspens, *Colloque International, "Risque, Vulnérabilité & Fiabilité dans la construction"*, (2003) Alger 11 & 12 octobre.
14. Farsi M.N., Identification des structures de Génie Civil à partir de leurs réponses vibratoires et vulnérabilité du bâti existant, *Thèse de doctorat, Observatoire de Grenoble, LGIT, Université Joseph Fourier*, (1996) 194.
15. Boutin C., Hans S., Erdin I., Lorient M., Approche de la vulnérabilité sismique par l'étude du comportement de bâtiments réels, *Rapport de recherche*, (1999) ENTPE.
16. Hans S., Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation. Contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique, *Thèse de doctorat*, (2002) ENTPE.
17. Michel C., Gueguen P., El Arem S., Mazars J., Kotronis P., Full-scale dynamic response of an RC building under weak seismic motions using earthquake recordings, ambient vibrations and modelling, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 39 (4) (2010a) 419-441.
18. Atakan K., Bard P.Y., Moreno B., Roquette P., Tento A., J-SESAME User manual. SESAME Project WP03 H/V Technique: data processing, Department of Earth Science, University of Bergen, (2003) 12.
19. Pellesier V., Estimation du risque sismique de la ville d'Aigle, Mondat ECA, Pully, suisse. (2003).

(2015); <http://www.jmaterenvirosci.com>