

DÉTECTION AU NIVEAU DU SOL DE LA RÉPONSE DYNAMIQUE D'UNE TOUR PAR MESURE DE BRUIT DE FOND SISMIQUE

GROUND-LEVEL DETECTION OF THE DYNAMIC RESPONSE OF A TOWER BY MEASURING SEISMIC AMBIENT NOISE

Stéphane BRÛLÉ¹, Julie RODET^{1,2}, Sarah GUILLON¹, Benoît TAUZIN²

¹ MENARD, Chaponost, France

² LGLTPE - Université Claude Bernard Lyon 1, École Normale Supérieure de Lyon, CNRS, Université Jean Monnet, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – Les bâtiments sollicités par le vent et le bruit de fond sismique réémettent une partie de l'énergie de vibration en ondes sismiques, agissant telles des sources secondaires. A partir de mesures du bruit ambiant au niveau du sol, cet article montre des fréquences associées à des modes de vibration d'une tour jusqu'à des distances horizontales de plusieurs dizaines de mètres du résonateur.

ABSTRACT – Acting as secondary sources, buildings subjected to wind loads and seismic ambient noise emit a part of the vibration energy in the form of seismic waves. Based on measurements of ambient noise acquired at ground level, this article points out the frequencies associated with the vibration modes of a tower, at recording distances up to few tens of meters horizontally from the resonator.

1. Introduction

De 1996 à 2000, des études menées par Wirgin et Bard (Wirgin et al., 1996), Guéguen, Bard et Semblat (Gueguen et al., 2000) mettent en avant la possibilité que les grands bâtiments, en milieu urbain dense, puissent significativement modifier le signal sismique par rapport à celui observé dans une zone non construite. Les travaux de Clouteau et Aubry sur la modification du signal sismique de surface due à la présence d'un environnement urbain dense confirment numériquement le principe (Clouteau et Aubry, 2001).

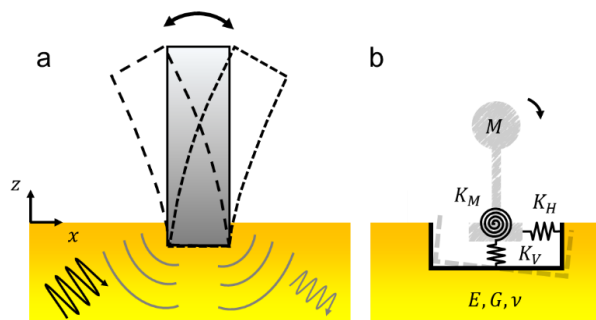


Figure 1 : (a) Bâtiment vibrant sous l'effet de la sollicitation sismique de type bruit ambiant. Il devient une source secondaire de vibrations transmises au sol. (b) Modèle d'interaction sol-structure avec trois degrés de liberté dans le plan (x, z) et des interfaces sol-fondation représentées par des modèles analogiques de Maxwell et de Kelvin-Voigt (K_H, K_V, K_M), respectivement la raideur horizontale, verticale et en rotation selon y (Brûlé et Cuira, 2018).

Vers 2015, le concept de « métasurface » appliqué au génie civil est réapparu dans les publications. Fondamentalement, une métasurface est la version bidimensionnelle du métamatériau, constituée d'un réseau périodique de motifs sub-longueurs d'onde dont l'épaisseur est très faible par rapport à la longueur d'onde du signal (Brûlé et al., 2021).

Parfois appelé « Above-Surface Resonators (A.S.R.) » (Brûlé et al., 2020), ce modèle de résonateur vertical ancré au sol et libre en tête (Figure 1a) permet de considérer les effets de couplage entre les ondes sismiques et les vibrations des résonateurs de surface tels que les bâtiments élancés ou même les arbres (Colombi et al., 2015 ; Colombi et al., 2016 ; Brûlé et al., 2017 ; Brûlé et al., 2019 ; Marigo et al., 2020). Ces effets de couplage peuvent théoriquement convertir des ondes en d'autres et agir sur une directivité choisie, redirigeant par exemple les ondes de surface vers les profondeurs terrestres. Le concept de l'interaction entre le signal sismique et les structures de surface n'est pas nouveau (Housner, 1957). L'interaction entre les immeubles de grande hauteur a été démontrée par des mesures sur le terrain dans la ville de Grenoble (Guéguen et al., 2016). Certaines études dans le domaine des résonateurs de surface sont parfois réalisées de manière totalement théorique, en supposant un milieu élastique et avec des bâtiments parfaitement encastrés dans un sol élastique (Ungureanu et al., 2019). Une approche similaire peut-être menée en introduisant aussi de l'interaction sol-structure avec des éléments rhéologiques d'interface (Figure 1b).

Cependant, il existe un mouvement relatif entre les bâtiments et le sol, même très léger, qui doit être caractérisé par des techniques d'interaction sol-structure. De plus, les sols de type sédimentaire, proches de la surface terrestre, ont tendance à être des matériaux non consolidés, contenant de l'eau et de l'air. Ces sols ont tendance à présenter un comportement viscoélastique dont l'une des particularités est leur amortissement matériel potentiellement élevé.

Dans la continuité des articles fondateurs cités dans cette introduction, nous apportons des résultats nouveaux et complémentaires. Cette étude montre qu'il est possible d'identifier la signature sismique d'un bâtiment jusqu'à une distance significative de celui-ci, à l'aide de capteurs ponctuels. Ce principe est d'intérêt pour les chercheurs travaillant sur les technologie de détection acoustique distribuée (DAS) à partir des fibres télécom (Jousset et al., 2018 ; Ajo-Franklin et al., 2019) afin de caractériser l'environnement sismique urbain (Rodet et al., 2022 ; Rodet et al., 2024). Pour cette démonstration, nous avons mis en oeuvre plusieurs étapes, telles la détermination analytique et expérimentale des modes vibratoires du bâtiment étudié, le pointé des modes identifiés au niveau du sol et la prise en compte des autres sources produites par les bâtiments voisins.

2. Description de l'expérience

Le bâtiment faisant l'objet de cette étude est la tour panoramique de la Duchère, structure en béton armé, située au Nord de Lyon. Fondée sur un radier, cette structure de 91 mètres de hauteur et 28.14 mètres de diamètre a été construite selon le principe d'un noyau central à section circulaire (Figure 2) et comprend deux niveaux souterrains.

Pour détecter la signature vibratoire de la tour nous avons choisi d'exploiter un espace extérieur recouvert d'un dallage en béton, entre plusieurs bâtiments de typologies variées (tour, bâtiments R+2 à R+5) sur lequel nous avons effectué des mesures en s'éloignant de la structure (Figures 3 et 4a).

Les bâtiments environnant la tour sont suffisamment éloignés les uns des autres pour que leurs signatures puissent être identifiées distinctement en se rapprochant ou de l'un ou de l'autre. Les points de mesure représentés en rouge sur la Figure 3a, transversaux au profil en jaune, ont également permis de mettre en évidence la sensibilité des mesures sismiques à la présence de sous-sol aménagés (les pelouses artificielles sur jardinières par exemple), sur lesquels la signature des bâtiments est difficilement identifiable.

Des mesures de bruit ambiant ont été effectuées à l'intérieur et à l'extérieur de la tour (Figure 4). Le matériel utilisé pour la réalisation des mesures comprend : un capteur triaxial (LE-3D/5sMKIII), un sismographe trois voies (SIGMA 4) et un ordinateur de terrain, équipé du logiciel Geoscope. Le capteur triaxial de période 5 s (0.2 Hz) a permis d'effectuer des mesures de la vitesse du sol au niveau des différents étages de la tour et

sur la dalle de béton externe côté nord (Figure 3a et 3b). Muni de trois géophones 2 Hz dans les trois directions d'enregistrement, le capteur est capable de mesurer des fréquences allant de 0.15 à 50 Hz. La fréquence d'échantillonnage choisie est de 125 Hz et le temps de mesure est de 30 minutes. Les mesures externes présentées dans cette étude (points jaunes sur la Figure 3a), ont été réalisées tous les mètres en s'éloignant du pied de la tour sur une distance totale de 40 mètres.

La tour étudiée est implantée sur un plateau rocheux paléozoïque, vestige de la chaîne varisque. Dans cette zone, le socle granitique affleure sous forme de dômes lenticulaires recoupant localement le socle métamorphique, principalement constitué de migmatites et de gneiss, d'après la carte géologique simplifiée de la ville de Lyon et ses environs, établie par le BRGM (Le Bayon et al., 2021). Au droit de la tour, ces terrains très raides, caractérisés par des V_s de l'ordre de 800 m/s, sont recouverts par près de 15 m de dépôts sédimentaires.

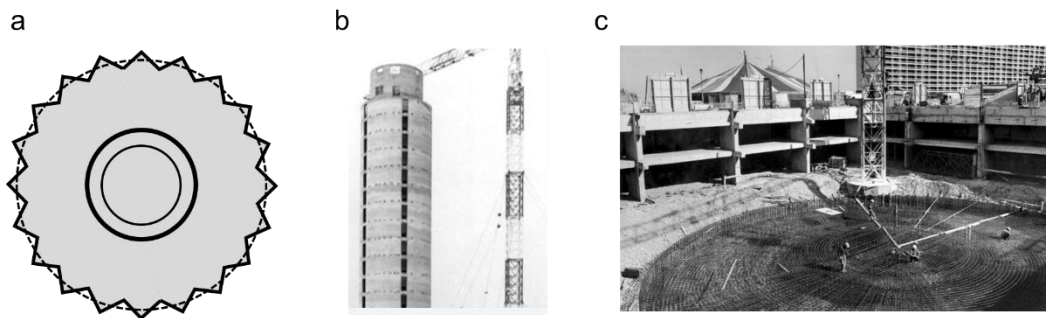


Figure 2 : (a) Coupe transversale de la tour avec noyau central à section circulaire. (b) Construction du noyau central (référence internet (1)). Le diamètre extérieur du noyau est d'environ 11 m pour une épaisseur de 0.45 m. (c) Construction du radier circulaire en béton armé (référence internet (2)).

3. Détermination analytique du mode fondamental et de ses harmoniques pour les modes en flexion de la tour

Nous avons retenu la méthode du code des Etats-Unis pour le dimensionnement ASCE 7-05 pour déterminer la fréquence fondamentale en flexion de la tour (1). Le modèle est celui d'une poutre verticale encastree au sol, libre au sommet.

$$f_0 = \frac{0.56}{H^2} \sqrt{\frac{EI}{m^*}} \quad (1)$$

Dans cette formule, E (MPa) désigne le module d'Young du béton. Nous retenons une valeur résiduelle pour du béton ancien et fissuré. Selon la norme EN-1992 pour le béton, pour une caractéristique à la compression du béton d'origine à 28 jours valant $f_{ck} = 30$ MPa, le module d'élasticité sécant E_{cm} prend la valeur d'environ 33 000 MPa.

Dans le cas de charges d'une durée telle que le béton subit un fluage, la déformation totale, fluage inclus, peut être calculée en utilisant le module d'élasticité effectif $E_{c,eff}$ du béton donné par la norme EN 1992-1. Sans justification particulière on retient $E_{c,eff} = E_{cm}/3$, soit $E_{c,eff} = 11$ 000 MPa.

Tableau 1. Fréquence théorique des premiers modes en flexion

| Fondamentale en flexion | 1 ^{ère} harmonique | 2 ^{ème} harmonique | 3 ^{ème} harmonique |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| f_0 (Hz) | f_1 (Hz) | f_2 (Hz) | f_3 (Hz) |
| 0.87 | 2.54 | 4.24 | 5.94 |

Le terme I (m^4) est le moment quadratique d'une section constituée de trois cylindres coaxiaux (figure 2a), H (m) la hauteur totale de la tour (91 m), m^* (kg/m), la masse par unité de longueur. Le calcul donne $f_0 = 0.87$ Hz. Le bâtiment étant encastré au rocher, nous négligeons ici l'allongement possible de la période équivalente $T_{eq}(s)$ de l'ouvrage consécutivement à l'interaction sol-fondation. On retient une expression analytique pour les harmoniques f_i adaptée à des bâtiments de grande hauteur avec n étages (Hans, 2002). Si le nombre n d'étage est assez grand les premiers rapports de fréquences peuvent s'écrire de façon approximée : $f_i/f_0 \approx 2(i + 1) - 1$. Ce qui signifie que les rapports de fréquence entre la fondamentale et les harmoniques sont 3,5,7...(voir Tableau 1).

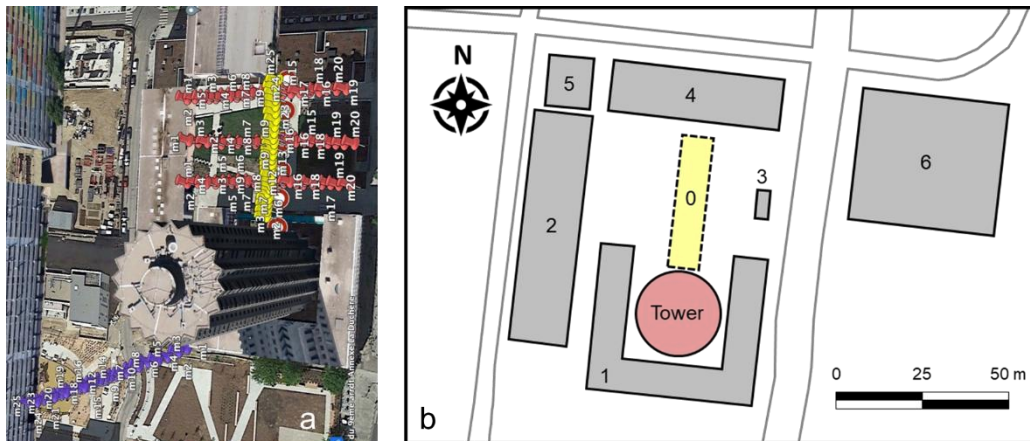


Figure 3 : (a) Vue aérienne sur Google Earth du site instrumenté. (b) Schémas de l'emplacement de la tour et de la zone de mesure en vue aérienne ainsi que des ouvrages voisins : tour instrumentée (disque rouge), la zone de mesure au niveau du sol (0 : rectangle jaune) et les principaux bâtiments voisins [1,2...7]. Les différents types de structure sont les suivants. 1 : bâtiment en U de 3 étages ; 2 : bloc d'immeubles de 4 étages (3 logements) ; 3 : immeuble de 1 étage ; 4 et 5 : groupe de bâtiments de 3 à 5 étages ; 6 : gymnase de 8 m de haut.

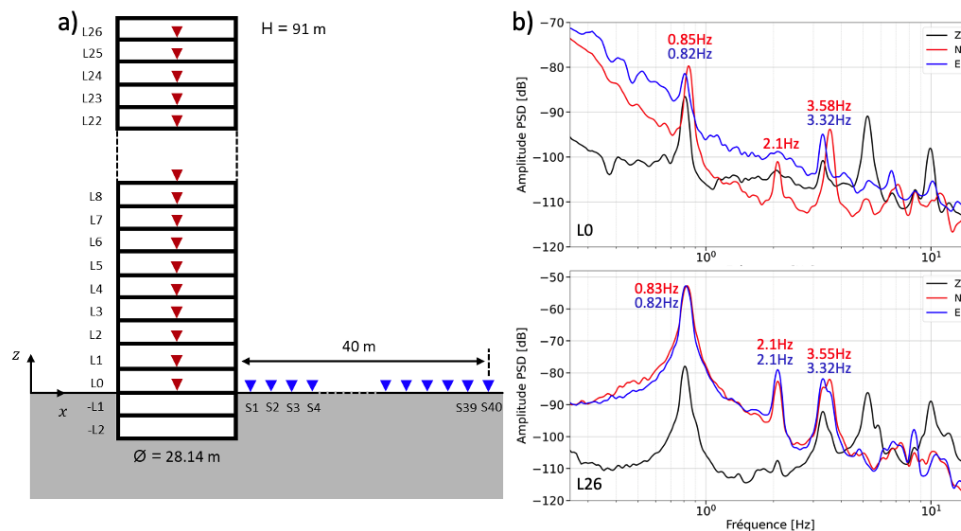


Figure 4 : a) Principe de mesure à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Pour chaque point de mesure, l'unique capteur utilisé est déplacé. Les triangles bleus (S1, S2...S40) représentent les mesures effectuées tous les mètres [1,2, ...40 m] au niveau du sol, tandis que les triangles rouges (L1, L2...L26) représentent les mesures effectuées à chaque étage de l'immeuble. b) Spectres des mesures réalisées au rez-de-chaussée (figure du haut) et au dernier étage de la tour (figure du bas).

4. Résultats des mesures de bruit ambiant

Les mesures de bruit effectuées ont permis d'estimer la distance sur laquelle le signal d'un bâtiment est perceptible avec un capteur triaxial conventionnel. Les fréquences du mode fondamental en flexion et ses harmoniques ont été mesurées sur des densités spectrales de puissance (PSD) décrivant la puissance moyenne du signal enregistré pour chaque fréquence (Figure 4b, 5 et 6). À l'intérieur de la tour, la fréquence dominante est pointée à 0.83 et 0.85 Hz dans les directions E-W et N-S respectivement (Figure 4b). Cette valeur est proche de la fondamentale en flexion de la tour, calculée analytiquement en § 3. Deux autres fréquences ont été identifiées : 2.10 Hz dans les deux directions et 3.32 et 3.58 Hz dans les directions E-W et N-S respectivement (Figure 4b). Compte tenu des fréquences théoriques à 2.5 et 4.2 Hz (§3), il pourrait s'agir de la première et de la seconde harmonique du mode en flexion. Il pourrait aussi s'agir pour l'une d'elle au mode en torsion (Guéguen et al., 2021).

À l'extérieur de la tour, les trois fréquences dominantes, attribuées à la tour, ont été identifiées à 5, 10, 15 et 20 mètres de la base de celle-ci (Figure 5). Une autre étude pourra déterminer si cet amortissement est purement géométrique, viscoélastique ou bien l'effet du bruit ambiant.

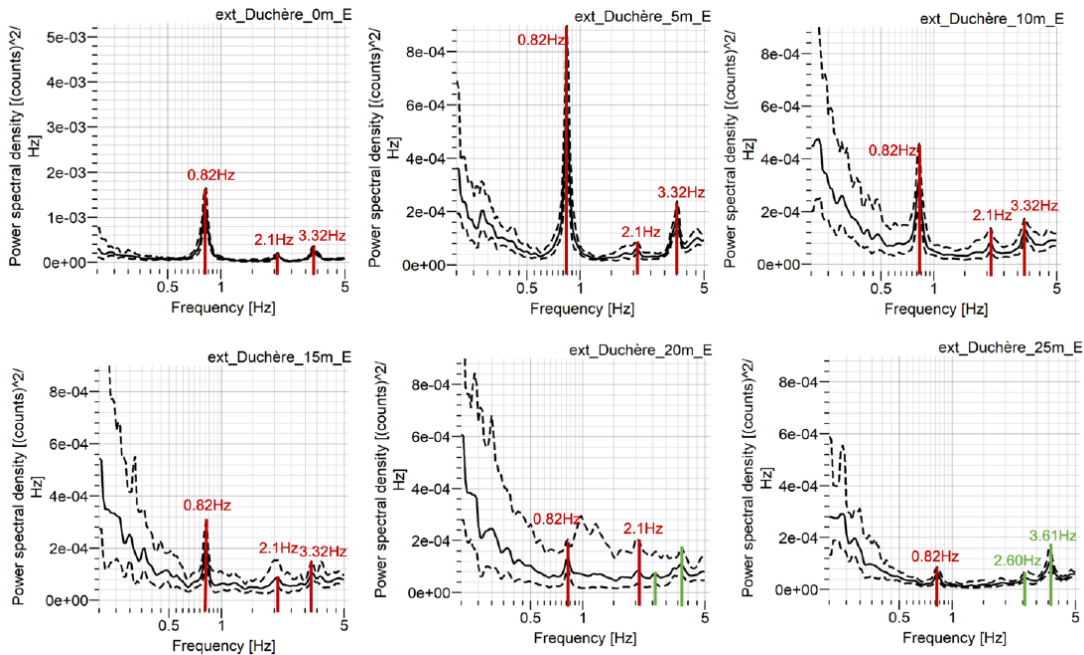


Figure 5 : Spectres PSD de la composante Est établis de 0 à 25 m avec un pas de 5 m (lire de gauche à droite). Le traitement des données a été effectué avec le logiciel libre GEOPSY (Wathelet et al., 2020) à partir de mesures de bruit de fond conventionnelles (Bard et al., 2008).

L'amplitude de la fondamentale de la tour décroît progressivement avec la distance (Figures 5 et 6) : elle a été relevée à $15.10^{-4} \text{ coups}^2/\text{Hz}$ en pied, 9.10^{-4} , $4.5.10^{-4}$, $2.75.10^{-4}$, $1.5.10^{-4}$, $0.6.10^{-4} \text{ coups}^2/\text{Hz}$ en s'éloignant par intervalles de 5 mètres sur une distance de 25 mètres (Figure 5). Concernant les autres fréquences caractérisées, leur amplitude décroît également sur les dix premiers mètres puis reste relativement constante jusqu'à 20 mètres, distance à partir de laquelle elles ne sont plus détectées.

Leur amplitude est de $2.5.10^{-4}$ en pied, $2.0.10^{-4}$ à 5 mètres et inférieure à 1.10^{-4} jusqu'à 20 mètres. Un autre bâtiment est détecté à 20 mètres de la tour.

On suppose qu'il s'agit du bâtiment 4 de la Figure 3 duquel on se rapproche. Il est ainsi possible d'observer sur le signal de bruit enregistré que le capteur s'éloigne de la tour en s'approchant d'une autre structure. Les premiers modes de cette structure ont été pointés en vert sur les Figure 5 et 6 à 2.6 et 3.61 Hz. Ces fréquences sont cohérentes avec la

raideur conventionnelle d'un tel bâtiment résidentiel. Sur la Figure 6, nous montrons que le mode fondamental de la tour de la Duchère peut être suivi jusqu'à une distance d'au moins 40 mètres de la tour.

Il semble donc que sur un sol suffisamment raide (avec une faible épaisseur de sédiments), il est possible d'identifier la signature spectrale d'un bâtiment dans des mesures de bruit ambiant obtenues à distance de celui-ci. Un corollaire est qu'il est possible de détecter la signature d'un groupe de bâtiments sans forcément pouvoir les identifier individuellement.

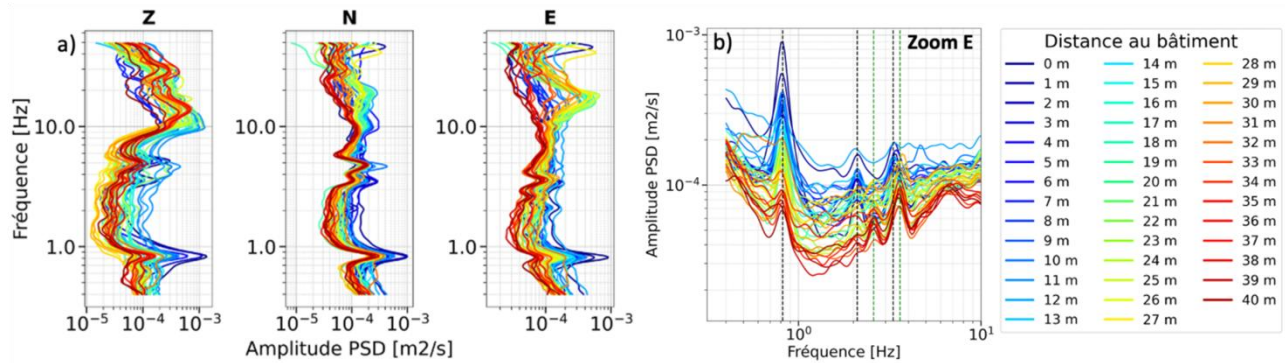


Figure 6 : Spectres illustrant les variations d'amplitude de la réponse vibratoire de la tour panoramique de La Duchère avec la distance sur 40 mètres a) et l'apparition du bâtiment résidentiel b). Les lignes en pointillés verts et noirs représentent les premiers modes du bâtiment 4 et de la tour respectivement.

5. Conclusions

Cette étude montre qu'une tour, sujette à l'excitation vibratoire du bruit ambiant, peut rayonner et être détectée avec des capteurs sismiques conventionnels à plus de mètres aux alentours. Ici, plusieurs fréquences associées à cette tour ont même été identifiées. Il peut s'agir de modes en flexion ou torsion. Il a également été montré que les fréquences émises par d'autres structures qui ne sont pas des immeubles de grande hauteur ont pu être détectées.

La méthodologie consistant à s'éloigner de la source principale que représente la tour pour observer la diminution de l'amplitude de fréquences préalablement identifiées par des mesures dans l'ouvrage, et capter la fréquence d'un autre ouvrage, s'est avérée efficace pour le site étudié. Nous l'appellerons « méthode de ségrégation des fréquences par l'offset » (MSFO). Elle a permis de voir apparaître les fréquences représentatives de la vibration d'autres ouvrages. La présence d'un substratum sismique à très faible profondeur y est probablement pour beaucoup dans cette détectabilité des fréquences. En effet, la configuration géologique atténuée probablement beaucoup moins les signaux émis par les bâtiments que dans un contexte de sol plus « mou ».

Cette étude confirme l'intérêt de l'étude de la réponse dynamique globale d'une zone urbaine dense telle une métasurface (Ungureanu et al., 2019 ; Brûlé et al., 2021 ; Brûlé et al., 2024). Elle confirme aussi que les transformations du sous-sol des agglomérations méritent d'être étudiées car pouvant apporter une modification de la réponse en surface par rapport à une situation en champ libre.

6. Références bibliographiques

- Ajo-Franklin J. B., Dou S., Lindsey N. J., Monga I., Tracy C., Robertson M., ... & Li X. (2019). Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection. *Scientific reports*, 9(1), 1328.
- Bard P-Y. (2008). The H/V technique: capabilities and limitations based on the results of the SESAME project, Foreword. *Bull. Earthq. Eng.*, 6, 1–2.

- Brûlé S., Ungureanu B., Achaoui Y., Diatta A., Aznavourian R., Antonakakis T., Craster R.V., Enoch S., Guenneau S. (2017). Metamaterial-like Transformed Urbanism. *Innov. Infrastruct. Solut.* 2:20.
- Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. (2019). Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics.* 8 (10): 1591–1605.
- Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. (2020). Emergence of Seismic Metamaterials: Current State and Future Perspective. *Phys. Lett., A.* 384 (1).
- Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. (2021). Métamatériaux acoustiques, électromagnétiques et sismiques pour les ondes du nanomètre au mètre. E1042 v1. *Techniques de l'Ingénieur.*
- Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. (2024). The importance of full-scale experiments for the study of seismic metamaterials, in *Encyclopedia of Condensed Matter Physics (Second Edition)*, Tapash Chakraborty, Eds. Academic Press, 2024, pp. 519-528.
- louteau D., ubry D. (2001). Modification of the round Motion in Dense rban reas. *J. Comput. Acoust.* 9, N°4, pp. 1659-1675.
- Colombi A., Roux P., Guenneau S., Rupin M. (2015). Directional cloaking of flexural waves in a plate with a locally resonant metamaterial. *J. Acoust. Soc. Am.* 137, 1783-1789.
- Colombi A., Roux P., Guenneau S., Gueguen P., Craster V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances, *Sci. Rep.* 6: 19238. Guéguen P., Colombi A. (2016). Experimental and Numerical Evidence of the Clustering Effect of Structures on Their Response during an Earthquake: A Case Study of Three Identical Towers in the City of Grenoble, France. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2016; 106 (6): 2855–2864.
- Guéguen P., Bard P.Y., Semblat J.F. (2000). From soil-structure interaction to site-city interaction. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New-Zealand.
- Guéguen P., Astorga A. (2021). The Torsional Response of Civil Engineering Structures during Earthquake from an Observational Point of View. *Sensors* 2021, 21, 342.
- Hans S. (2002). Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation - Contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique. Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2002.
- Housner G.W. (1957). Interaction of Buildings and Ground During an Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47(3): 179–186.
- Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., ... & Krawczyk C. M. (2018). Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nature communications*, 9(1), 2509.
- Le Bayon B., Dromart G., Egal E. (2021). Carte géologique de Lyon et ses environs. BRGM.
- Marigo J-J., Pham K., Maurel A., Guenneau S. (2020). Effective model for elastic waves propagating in a substrate supporting a dense array of plates/beams with flexural resonances. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 143(11):104029.
- Rodet J., Brûlé S., Gueguen Ph., Tauzin B., Coutant O., Lanticq V., Rollet R., Granger J., Depret O. (2022). Fibres optiques, sismologie et géotechnique pour ville intelligente : le projet DASARA à Lyon. 11^{ème} JNGG 2022, 28-30 juin 2022, Lyon, France. p. 917-925.
- Rodet J., Tauzin B., Amin Panah M., Guéguen Ph., Nziengui Ba D., Coutant O., Brûlé S. (2024). Urban dark fiber distributed acoustic sensing for bridge monitoring. *Structural Health Monitoring.* 2024;0(0).
- Ungureanu B., Guenneau S., Achaoui Y., Diatta A., Farhat M., Hutrdurga H., Craster R.V., Enoch S., Brûlé S. (2019). The influence of building interactions on seismic and elastic body waves. *EPJ Appl. Metamat.* 6, 18.

- Wathelet M., Chatelain J.-L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M. and Savvaidis A. (2020). Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878—1889.
- Wirgin A., Bard P-Y. (1996). Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(3):914–920.

Références Internet (dernière consultation le 05/02/2024) :

- (1) <https://www.indigene-paysages.com/paysages/requalification-du-parvis-de-la-tour-panoramique-de-la-duchere-lyon-69>
- (2) https://www.facebook.com/tour.panoramique.lyon/photos?locale=fr_FR