

FIBRES OPTIQUES, SISMOLOGIE ET GEOTECHNIQUE POUR VILLE INTELLIGENTE : LE PROJET DASARA À LYON

OPTICAL FIBERS, SEISMOLOGY AND GEOTECHNICS FOR SMART CITIES: THE DASARA PROJECT IN LYON

Julie RODET¹, Stéphane BRÛLÉ¹, Benoît TAUZIN², Destin NZIENGUI^{3,4}, Mohammad AMIN PANAH², Olivier COUTANT³, Philippe GUÉGUEN³, Kristell MICHEL⁵, Vincent LANTICQ⁴, Raphaël ROLLET⁶, Jérôme GRANGER⁷, Olivier DEPRÊT⁶

¹ Ménard, Chaponost, France

² LGLTPE - Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France

³ ISTerre - Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

⁴ Febus Optics, Pau, France

⁵ École Normale de Lyon, Lyon, France

⁶ Grand Lyon THD, Lyon, France

⁷ Métropole de Lyon, Lyon, France

RÉSUMÉ – Le réseau urbain de fibre optique transformé en réseau sismologique de grande envergure offre des perspectives sur l'analyse de la réponse dynamique des ouvrages de surface. Regroupés par typologie caractéristiques, par zones urbaines mais aussi par classes de sol, les bâtiments, idéalisés en oscillateurs, émettent à leur base des signaux qu'il convient ensuite de pointer sur les enregistrements de la fibre optique.

ABSTRACT – The urban deployment of fiber optic network diverted to a large-scale seismological network offers perspectives on the analysis of the dynamic response of surface structures. Grouped by characteristic typology, by urban districts but also by soil classes, the buildings, idealized as oscillators, emit signals at their base which should then be plotted on the fiber optic data.

1. Introduction

Une ville intelligente ou « ville connectée » est une ville utilisant avantageusement les technologies de l'information et de la communication pour améliorer la qualité des services urbains ou réduire leurs coûts en utilisant des capteurs permettant de gérer et valoriser les ressources et les actifs. Parmi ces réseaux déjà en place en milieu urbain et péri-urbain, la fibre optique est une technologie faisant l'objet de l'attention des sismologues. En effet, la technique de Distributed Acoustic Sensing (D.A.S.) permet la mesure de déformation de la fibre optique dans l'axe et en chaque point de la fibre.

En plus des signaux telluriques, les bâtiments de la couverture urbaine représentent des oscillateurs sources de signaux additionnels transmis dans le sol. Une exploitation potentielle du réseau de fibres optiques serait par exemple d'identifier les signaux sismiques émis par ces bâtiments. Pour identifier la signature de ces ouvrages, une approche théorique préalable d'interaction sol-structure sous sollicitation sismique est un prérequis, afin ensuite d'identifier ces informations sur les enregistrements issus du réseau de fibres optiques.

2. Les bâtiments dans le rôle « d'oscillateurs urbains »

La propagation des ondes sismiques induit du balancement au niveau des bâtiments ainsi que des efforts internes au droit des fondations (Pecker, 1986; Belmouden et Lestuzzi, 2006). Soumis à des forces d'inertie, les bâtiments tentent de préserver leur équilibre en transmettant des efforts à leur sol support. Le couplage du système de fondation des bâtiments avec le terrain est ainsi à l'origine de l'interaction sol – structure inertielle (ISS)

dans le cadre de laquelle la structure devient elle-même une source d'oscillations transmises vers le sol. Le signal sismique entrant, appliqué à la base de tous les ouvrages, est déjà lui-même le résultat d'une propagation complexe au sein des bassins sédimentaires. Le net contraste d'impédance sismique entre le substratum sismique (matériau de consistance rocheuse caractérisé par des vitesses d'ondes de cisaillement V_s supérieures à 800 m/s) et les sols de couverture est notamment à l'origine d'amplification des signaux mesurés en surface. Ces phénomènes spectaculaires d'amplification avec les dégâts associés sur le bâti ont été abondamment documentés suite aux séismes de Mexico du 19 septembre 1985 (AFPS, 1985) et du 19 septembre 2017 (AFPS, 2018).

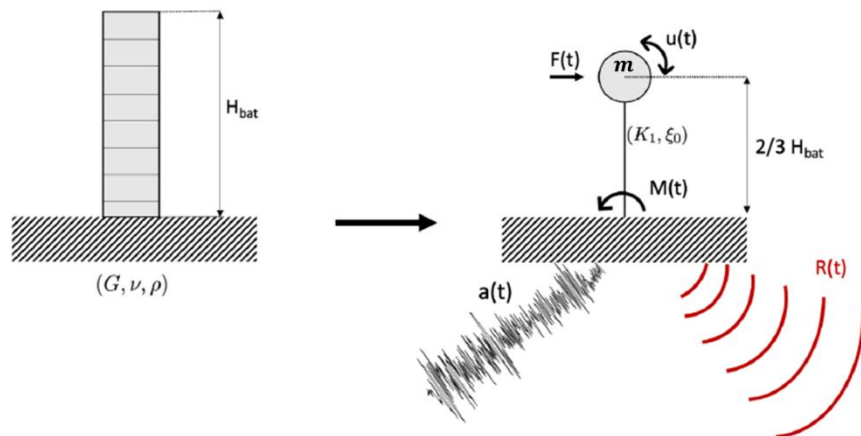


Figure 1. Principe du bâtiment régulier à étages identiques (à gauche) modélisé en oscillateur ancré dans le sol, avec une masse concentrée m à la hauteur $H=2/3.H_{\text{bâtiment}}$. La raideur de l'ouvrage est K_1 et son amortissement est ξ_0 (Rodet, 2021). Les oscillations du bâtiment sous l'action du signal entrant caractérisé par une accélération $a(t)$, génèrent une émission de signal vers le sol. $M(t)$ est le moment au niveau de la fondation, $F(t)$, l'effort horizontal et $u(t)$ le déplacement de la masse m . Le sol est caractérisé par ses paramètres élastiques G , le module de cisaillement et ν , le coefficient de Poisson ainsi que par son poids volumique ρ (kg.m^{-3}).

Dans cet article, nous utilisons le référentiel de la norme EN 1998, communément appelée Eurocode 8 ou EC8 pour caractériser les classes de sol. Dans le formalisme forfaitaire de cette norme, la morphologie des spectres de réponse élastique des bâtiments à risque normal (accélération (m.s^{-2}) versus période fondamentale T (s) du bâtiment), est déterminée par la classe de sol. Les autres paramètres tels que l'accélération au rocher (fonction de la zone géographique du territoire national) et la catégorie d'importance de l'ouvrage, interviennent dans l'amplitude du spectre. Par cette approche, ces spectres prennent implicitement en compte les effets cinématiques, c'est-à-dire le déplacement du sol en champ libre. La classification des sols permet de définir des bornes hautes et basses de vitesses d'ondes de cisaillement, sur la base de valeurs fournies par l'EC8 pour chaque classe de sol.

Les effets inertiels de l'interaction sol-structure au niveau des fondations, c'est-à-dire le déplacement et les efforts, peuvent être obtenus par modélisation du système mécanique {bâtiment, fondations} par un jeu de modèles analogiques reproduisant le comportement élastique ou visco-élastique, à la fois du bâtiment dans son ensemble et à la fois des interfaces sol-fondation (Guéguen et al., 2002 ; Brûlé et Cuira, 2018). Ces modèles peuvent avoir un ou plusieurs degrés de liberté. Les types de degrés de liberté sont par exemple la translation horizontale et la rotation dans le plan vertical. En Figure 1 on illustre un cas d'oscillateur dont la base est simplement ancrée dans le sol.

D'un point de vue expérimental, les enregistrements de vibrations in situ fournissent les caractéristiques modales des ouvrages et s'avèrent ainsi être des outils fondamentaux pour évaluer la vulnérabilité du bâti existant (Farsi et Bard, 2004). Toutefois, la mise en oeuvre de telles mesures demeure délicate dans les zones urbaines du fait de la présence de nombreux réseaux et acteurs économiques (Guéguen et al., 2019). Contrairement aux mesures ponctuelles avec capteurs conventionnels, les signaux enregistrés en permanence par les systèmes d'écoute sismique distribuée D.A.S. (Distributed Acoustic Sensing) pourraient fournir d'autres possibilités observationnelles, en donnant accès à une multitude de données expérimentales le long des réseaux de fibre optique urbains.

3. Le projet D.A.S.A.R.A.

Le projet D.A.S.A.R.A. (Distributed Acoustic Sensing Auvergne-Rhône-Alpes) a été sélectionné dans le « Pack Ambition Recherche » par la Région (Tauzin et al., 2020). Le principe consiste à « détourner » une partie du réseau de télécommunications de la Métropole du Grand Lyon (superficie 700 km²) en une antenne sismologique de grande ouverture et ultra-dense (Figure 2). La technique de Distributed Acoustic Sensing (D.A.S.) repose sur la mesure de délais de pulses laser émis à haute fréquence et réfléchis sur les petites hétérogénéités présentes dans la fibre (Zhan, 2020). L'analyse des déphasages entre pulses laser permet de quantifier la déformation dans l'axe de la fibre.

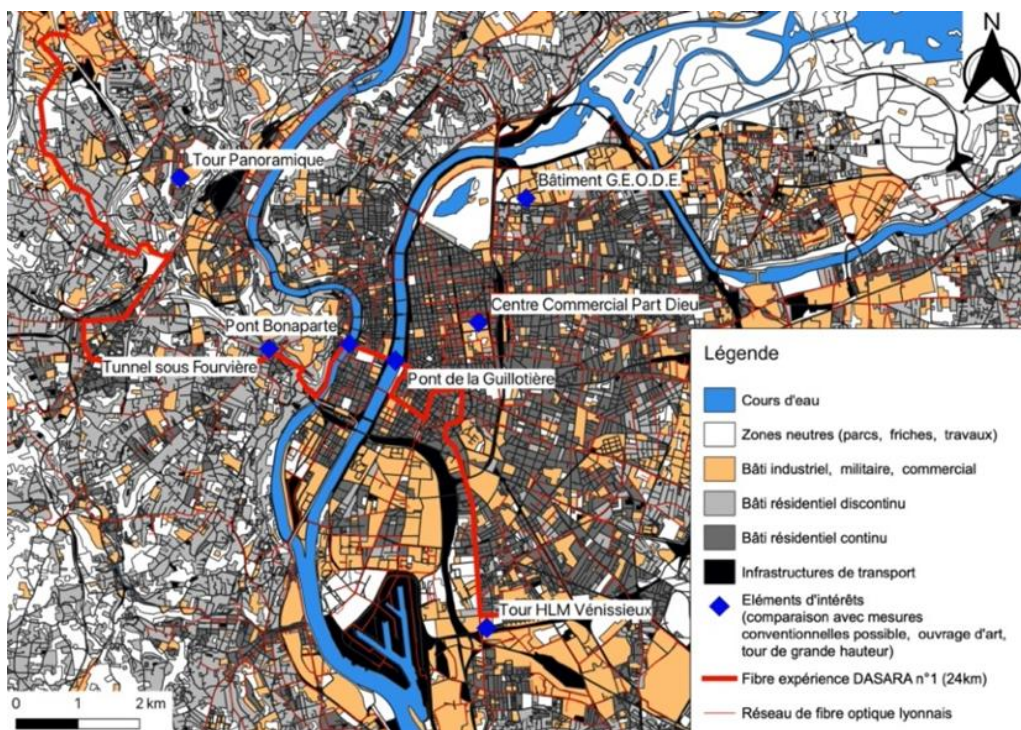


Figure 2. Carte représentant le réseau de fibre optique de l'agglomération lyonnaise (en rouge), les infrastructures de transport (en noir) et les différentes typologies de bâti identifiées.

Les premières données acquises au sein de la métropole de Lyon ont été obtenues à partir d'une route optique longue de 24 km s'étendant de Limonest, au nord-ouest, à Vénissieux, au sud-est (Figure 2). Cette route optique parcourt divers terrains géologiques, une grande variété de quartiers urbains (résidentiel plus ou moins dense, tours de faible, moyenne et grandes hauteurs) ainsi que plusieurs ouvrages d'art (ponts). La densité de mesure, correspondant ici à un capteur virtuel tous les 5 mètres, est équivalente au déploiement de 5 000 capteurs mono-composante. Le tracé de la fibre sur la Figure 2 concerne un bâti essentiellement résidentiel discontinu et continu (période fondamentale T entre 0.3 et 0.6 s (CETE, 2013)), avec quelques ouvrages d'intérêt tels

les ponts franchissant la Saône et le Rhône ($T = 0.2$ et 2.5 s) et les tours de moyenne à grande hauteur ($T > 1.3$ s).

4. Cartographie des sols selon l'EC8

Il s'agit d'identifier des zones sismo-géotechniques caractéristiques selon les critères de classification des sols de la norme EN 1998 (A à E). Les classes de sol permettent d'identifier des paramètres en petites déformation par défaut, comme le module de cisaillement G intervenant dans la définition des raideurs à l'interface sol-structure. L'étude paramétrique reposant sur la combinaison des classes de sol et de la typologie des ouvrages permettra d'appréhender un signal caractéristique à la base de ces ouvrages. La Figure 3 est une cartographie des classes de sol. Au droit du passage de la fibre étudiée (tracé en rouge), les sols rencontrés sont essentiellement de classe C ($T_{sol} > 0.2$ s) ou D ($T_{sol} > 0.45$ s). Les périodes sont décrites par leur borne inférieure car, vitesse V_s des ondes de cisaillement et épaisseur H_{sol} au droit du site interviennent dans la valeur de la période théorique $T_{sol} = 4H_{sol}/V_s$. Ces sols peuvent potentiellement solliciter à la résonance le bâti décrit en §3.

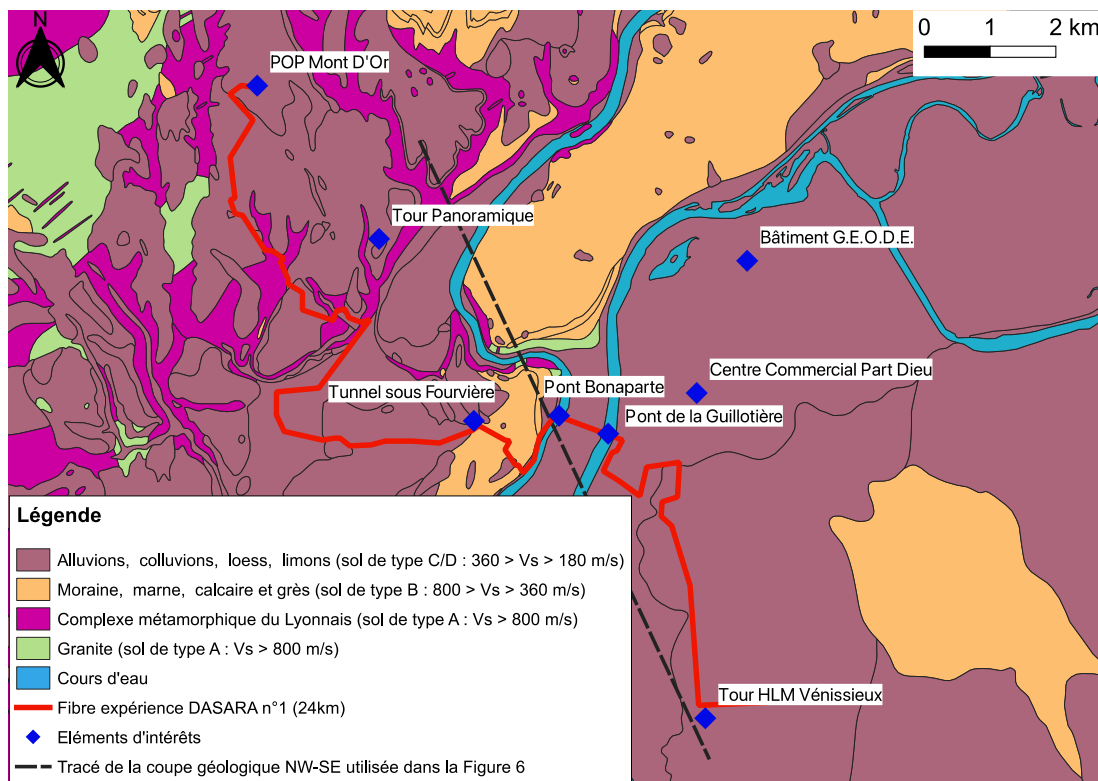


Figure 3. Identification des classes de sol EC8 à l'échelle de l'agglomération lyonnaise (Rodet, 2021).

5. Typologie des ouvrages classés par période fondamentale théorique

Au vu de la carte détaillée du bâti de la métropole de Lyon disponible par ailleurs (voir Rodet, 2021) mais non présentée ici, plusieurs catégories de bâtiments ont été identifiées.

Ces catégories ne sont pas exhaustives mais ont permis de simplifier la carte du bâti pour de future modélisation. Pour identifier les zones propices à l'ISS, une carte de rapport $T_{bât}/T_{sol}$ a été établie (Figure 4). La double approche bâti et sol permet de produire une carte avec moins de clusters. Ce rapport $T_{bât}/T_{sol}$ est un paramètre caractérisant l'ISS (Semblat et al., 2008 ; Kham et al., 2006). En effet, les caractéristiques vibrationnelles du sol et des bâtiment contrôlent l'influence de l'ISS. Ainsi, le phénomène de résonance est d'autant plus important que la période propre des bâtiments et la période fondamentale du

sol sont proches, $T_{\text{bat}}/T_{\text{sol}} \sim 1$. La résonance induit un déplacement horizontal important du bâtiment et donc, une transmission d'une énergie significative au niveau des fondations. Dans ces conditions, il est possible d'identifier rapidement les zones géographiques de l'agglomération, au droit desquelles, la probabilité de capturer un signal fort est maximale.

La combinaison sol-bâti suggère que les cas de résonance maximale sont à rechercher au droit des tours de grande hauteur (Tour Panoramique et Part-Dieu). Cela signifie qu'en ces emplacements, l'énergie transmise par la fondation est plus significative qu'ailleurs et que la probabilité de capturer et d'identifier ce signal par la fibre optique, est plus élevée.

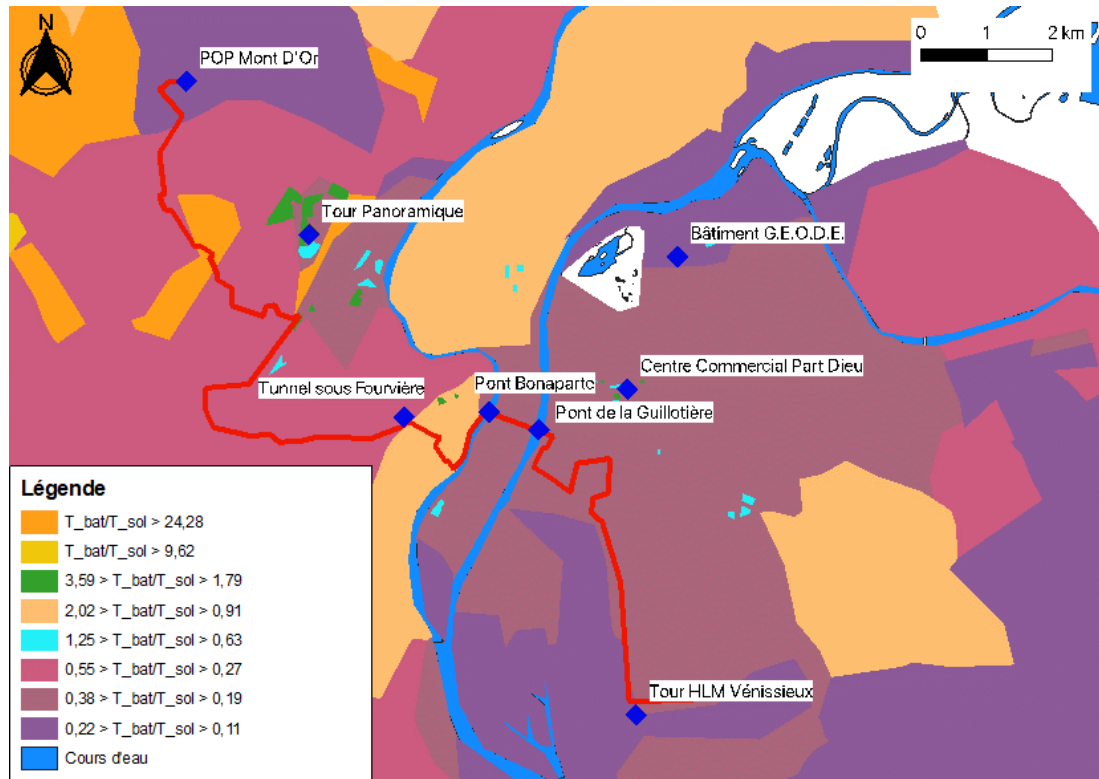


Figure 4. Distribution des bâtiments du tissu urbain de l'agglomération lyonnaise, regroupés par paramètre adimensionnel $T_{\text{bâtiment}}/T_{\text{sol}}$. $T_{\text{bâtiment}}$ et T_{sol} sont respectivement les périodes fondamentales du bâtiment et du sol (Rodet, 2021).

6. Premiers résultats

Afin d'avoir des points de comparaison pour valider les mesures optiques capturant la réponse dynamique de bâtiments, des enregistrements de bruit de fond sismique avec des sismomètres conventionnels ont été réalisés dans des bâtiments d'intérêt localisés dans l'agglomération lyonnaise. Il s'agit de mesure de type H/V et PSD. La méthode géophysique non-invasive H/V avec un mono-capteur est basée sur l'enregistrement du bruit de fond sismique. L'analyse des rapports spectraux des enregistrements vélocimétriques horizontaux / verticaux permet de pointer des pics que l'on rattache à des modes de vibration du sol et/ou du bâtiment. Une autre façon de représenter l'information enregistrée est d'utiliser, pour chaque composante x, y et z du capteur, la densité spectrale de puissance (DSP en abrégé, Power Spectral Density ou PSD en anglais) comme étant le carré du module de la transformée de Fourier, divisée par le temps d'intégration (Figure 5). Comme pour la méthode H/V, il faut identifier des pics à rattacher à des modes de vibration.

En supposant que les bâtiments mesurés soient principalement sollicités horizontalement (hypothèse d'ondes planes), l'étude s'est concentrée sur l'analyse des composantes d'enregistrements est-ouest (E-W) et nord-sud (N-S) du bâtiment de 14

étages testé à Vénissieux près de Lyon. En corrélant les pics retrouvés sur les spectres des différents étages, des modes ont été mis en évidence en Figure 5. Les fréquences pointées peuvent correspondre à des modes en flexion et en torsion du bâtiment (Michael, 2011).

Par comparaison avec la fréquence fondamentale théorique en flexion attendue pour un ouvrage de telle hauteur, on rattache le pic à 1.6 Hz dans la direction E-W et celui à 1.8 Hz dans la direction N-S à la fréquence fondamentale en flexion (Figure 5). Pour le sol, la fréquence fondamentale a été pointée vers 0.9 Hz en utilisant plutôt les rapports spectraux H/V. Cette tour n'est donc pas susceptible d'entrer en résonance avec le sol.

La Figure 5 présente les spectres obtenus au rez-de-chaussée et au dernier étage de la tour de Vénissieux pour les deux composantes d'enregistrement horizontales. Les deuxième et troisième modes de la tour sont pointés à 2.3 Hz et 4.3 Hz dans les deux directions d'enregistrement. En revanche, le quatrième mode est pointé à 5.6 Hz dans la direction E-W et à 6.2 Hz dans la direction N-S. Un cinquième mode peut être pointé entre 7 et 8 Hz dans les deux directions. Quelle que soit la direction d'enregistrement, l'amplitude de la fondamentale augmente plus les étages sont élevés. Cependant, les harmoniques ont des amplitudes variables selon les étages. Par ailleurs, il peut être constaté que la signature spectrale du trafic routier (au-delà de 10 Hz) n'est clairement visible que dans les premiers étages et devient quasi-imperceptible en haut de la tour (Figure 5).

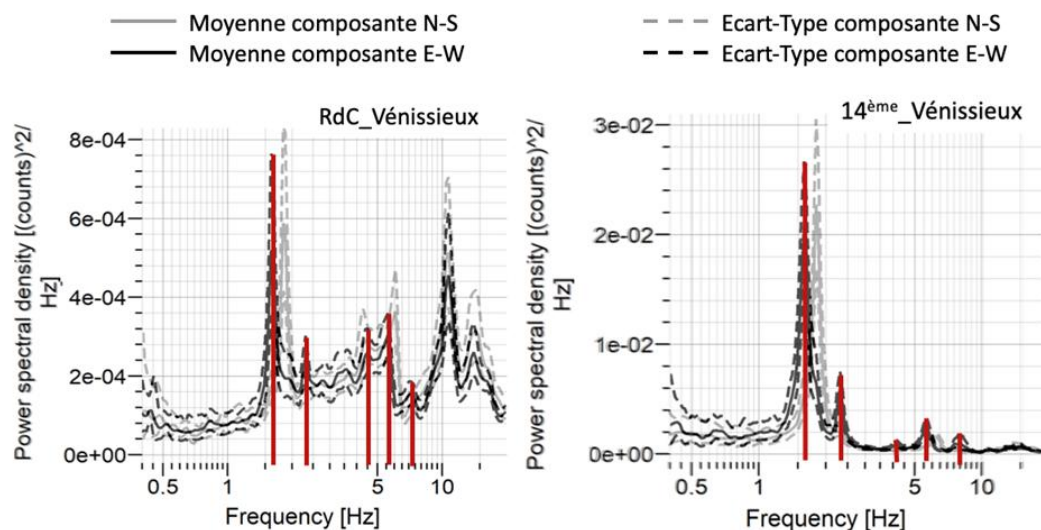


Figure 5. Spectres illustrant la réponse spectrale de la tour HLM de Vénissieux. Ces spectres ont été obtenus à partir de mesures de bruit de fond conventionnelles (Bard et al., 2008) réalisées à l'aide d'un capteur trois composantes Lennartz. Le traitement des données a été effectué avec le logiciel libre GEOPSY (Wathelet et al., 2020).

Par ailleurs, dans le cadre des premières exploitations des résultats issus de la fibre optique, la combinaison de la densité du DAS avec l'ouverture de 24 km (Figure 6) permet une exploration ciblée des sources responsables du bruit de fond sismique urbain. Pour le cas étudié, les données acquises le long de la route optique D.A.S.A.R.A. (Figure 6) sont dominées par les signaux associés au trafic routier (pente de ~ 15 m/s ≈ 50 km/h) et aux ponts sur le Rhône et l'autoroute A6 (bandes verticales de forte amplitude). La fenêtre temporelle vers 14h30 heure locale est propice à une excitation sismique d'origine anthropique avec un bruit plus marqué en amplitude vers la fin du profil (7 000 - 25 000 m), sur les rives gauches du Rhône et de la Saône. La variabilité en amplitude du signal associée au pont sur l'A6, vers 200 m de distance, est le résultat du trafic routier sur et sous le pont.

7. Conclusions

Le réseau urbain de fibre optique transformé en réseau sismologique de grande envergure montre tout son potentiel à capter la signature de sources de vibrations telluriques ou anthropiques. L'analyse effectuée dans le cadre du projet D.A.S.A.R.A. s'accompagne aussi de l'identification des signaux d'ouvrages caractéristiques comme les bâtiments, les ponts, etc. au moyen de méthodes géophysiques non invasives basées sur l'enregistrement du bruit de fond sismique. Ces données alimenteront une bibliothèque de signatures fréquentielles d'ouvrages, ou de quartiers, qui seront ensuite comparées aux informations issues du DAS. À elle seule, la méthode de bruit de fond appliquée aux ouvrages offre un vaste champ d'exploration (paramètres dynamiques de l'ouvrages, effets de l'interaction sol-structure, effets du vieillissement sur les matériaux constitutifs, effets climatiques (Mikael, 2011), modifications structurales (Ulm, 1993), etc.). Le projet D.A.S.A.R.A., en raison de sa densité et de son étendue, pourrait aussi permettre un suivi de l'évolution des caractéristiques vibratoires des structures sur le long terme et contribuer ainsi à la gestion de la maintenance des ouvrages urbains.

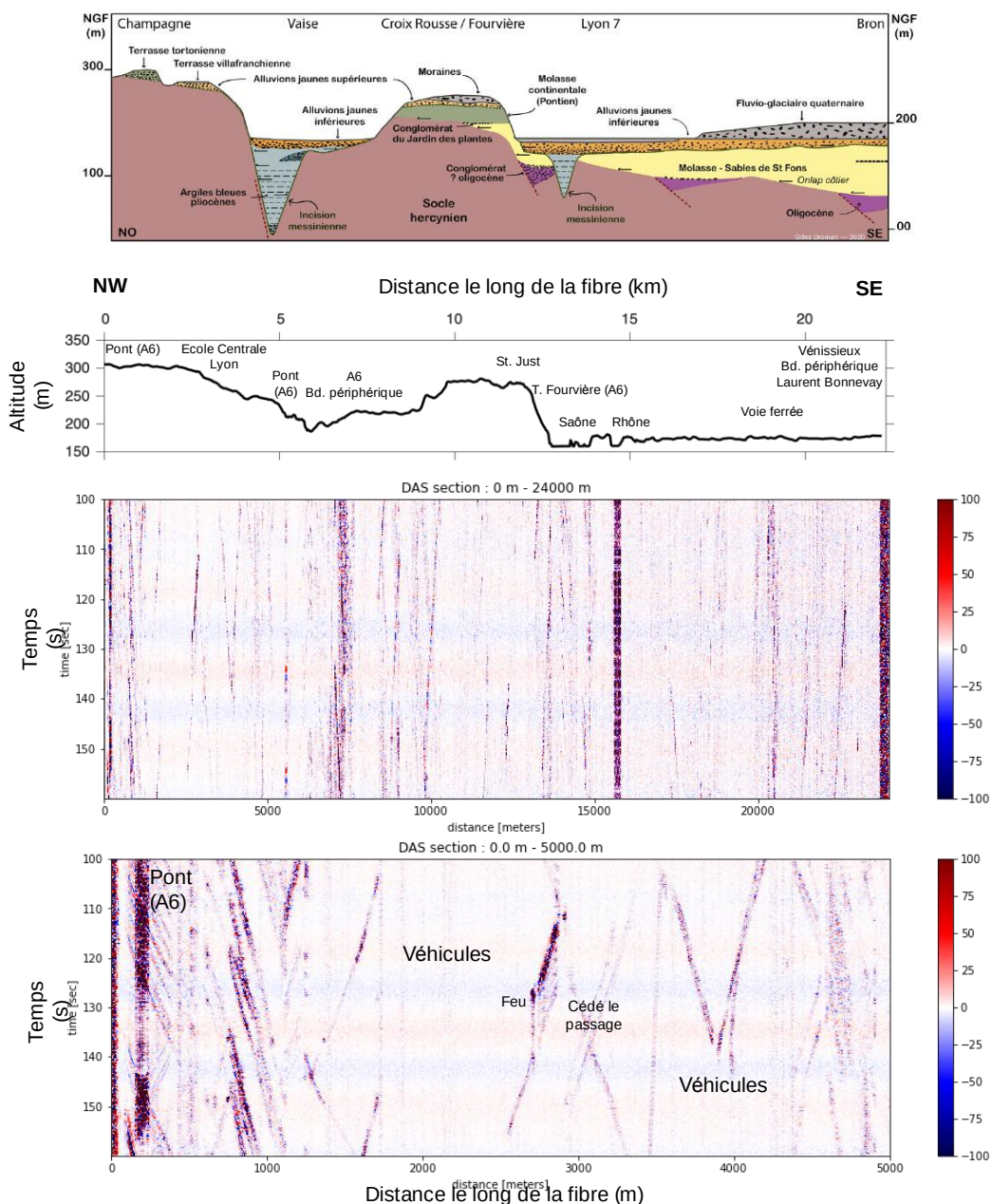


Figure 6. a) Coupe géologique NO/SE au niveau de l'agglomération lyonnaise (Source : Gilles Dromart, 2019). b) Profil topographique le long des 24 km de fibre utilisés pour la première acquisition du projet DASARA. c) 60 secondes de données sur les 24 km de fibres, Limonest étant situé à la distance 0 mètre. d) Zoom sur les 5 premiers kilomètres de fibre. La signature d'ouvrages (ponts) et véhicules est mise en évidence. Traitement et images effectués par D. Nziengui (FEBUS Optics/Université Grenoble Alpes).

8. Références bibliographiques

- AFPS (1985). Le séisme de Mexico du 19 septembre 1985. Compte-Rendu de Mission.
- AFPS (2018). Rapport de la Mission Post-Sismique sur le séisme du Mexique du 19 septembre 2017.
- 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.
- Belmouden Y., Lestuzzi P. (2006). Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en Suisse. Rapport de Recherche, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Brûlé S. et Cuira F. (2018). Pratique de l'Interaction sol-structure sous séisme. Application aux fondations et aux soutènements. Editions AFNOR.
- CETE (2013). Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant. Proposition de critères décisionnels pour une stratégie de renforcement.
- Farsi M. N. and Bard P.-Y. (2004). Estimation des périodes propres de bâtiments et vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de Grenoble. *Revue française de génie civil*, vol. 8, no. 2-3, pp. 149-179.
- Guéguen P., Bard P.-Y. and Chávez-García F. J. (2002). Site-city seismic interaction in Mexico City-like environments: an analytical study. *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 92, no. 2, pp. 794–811.
- Guéguen P., Mercerat E. D., Singaicho J. C., Aubert C., Barros J. G., Bonilla L. F., Cristyanyi M., Douste-Bacqué I., Langlaude P., Mercier S. et al. (2019). Metacity-quito: A semi-dense urban seismic network deployed to analyze the concept of metamaterial for the future design of seismic-proof cities. *Seismological Research Letters*, vol. 90, n° 6, pp. 2318–2326.
- Kham M., Semblat J.-F., Bard P.-Y. and Dangla P. (2006). Seismic site-city interaction: main governing phenomena through simplified numerical models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, n°5, pp. 1934–1951.
- Mikael A. (2011). Evaluation des paramètres physiques des bâtiments: amortissement, fréquence et modes de comportement des structures de génie civil: Approche expérimentale.
- Pecker A. (1986). Comportement des fondations sous sollicitation sismique. *Revue française de géotechnique*, (37), 29-39.
- RESIF (2020). Etude des effets d'interactions Sol – Structure sous sollicitation sismique à l'échelle de l'agglomération lyonnaise. Lettre n° 20 d'information du Réseau Sismologique et Géodésique Français p.12.
- Rodet J. (2020). Étude des effets d'interaction sol – structure sous sollicitation sismique à l'échelle de l'agglomération lyonnaise. Rapport de stage Master 2 de L'ENS Lyon.
- Semblat J.-F., Kham M. and Bard P.-Y. (2008). Seismic wave propagation in alluvial basins and influence of site-city interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 98, n°6, pp. 2665–2678.
- Tauzin B., Gueguen P., Coutant O., Lanticq V., Deprêt O., and Granger J. (2020). Distributed acoustic sensing Auvergne Rhône-Alpes, Pack Ambition Recherche de la région Auvergne Rhône-Alpes.
- Ulm F., Clément J.L. and Argoul P. (1993), Coefficient de comportement : approche chute de fréquence, III^{ème} Colloque National Parasismique, St-Rémy-lès-Chevreuses.

- 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.
- Zhan Z. (2020). Distributed acoustic sensing turns fiberoptic cables into sensitive seismic antennas. *Seismological Research Letters*, vol. 91, n° 1, pp. 1–15.