

Projet SIPROVIB : Développement d'un modèle analytique prédictif du couplage dalle/sol

Application à la prédiction vibratoire d'une plateforme de tramway

Loïc Grau,
Denis Bozzetto,
Walid Wasmine
Acouphen
33, route de Jonage
BP 30
69891 Pusignan CEDEX
E-mail : loic.grau@acouphen.fr

Bernard Laulagnet
Laboratoire Vibrations et Acoustique (LVA)
Campus LyonTech La Doua - INSA de Lyon
Bât. St Exupéry
25 bis, avenue Jean Capelle
69621 Villeurbanne
E-mail : bernard.laulagnet@insa-lyon.fr

Résumé

Cet article présente différentes approches méthodologiques pour les études d'impact et les études de conception d'une ligne de tramway. Il montre en particulier le problème complexe des sols, du couplage dalle/sol et du rôle des structures réceptrices. Pour la prédiction vibratoire, il convient d'être prudent lorsqu'il s'agit d'appliquer un modèle à des situations en dehors de la « plage » pour laquelle le modèle est étalonné et validé car comme cela est cité dans la norme ISO 14837-1 « l'incertitude liée à une extrapolation augmente avec l'étendue de l'extrapolation ». Pour répondre aux besoins des bureaux d'études pour définir l'environnement vibratoire des infrastructures de tramways, Acouphen a développé un modèle fondé sur une approche semi-analytique avec des limites clairement établies, une gamme de fréquences, ou encore des types d'onde permettant une prédiction déterministe. Ce modèle constitue également un outil d'aide à la conception (vibratoire) d'une plateforme de tramway.

Abstract

This paper is concern with vibration due to tramway railway. It aims at introducing the methodological approach for impact assessment and design of new tramway railway. A focus is made on the complexity of the ground and furthermore on the ground/plate interaction. It is crucial to be careful when it comes to use a model out of the frequency range it has been built for. As mentioned in standard ISO 14837-1, "the uncertainty surrounding the extrapolation tend to increase with the extrapolation distance". As a needed response by consultancy firms, Acouphen designs a semi-analytical model in a very specific frequency range which allows making prediction of ground plate interaction and ground wave propagation. This modeling is also an advisor tool for the design of a tramway slab.

La prévision de l'impact vibratoire d'un tramway a pour but d'évaluer les risques de dommages causés aux structures des constructions, mais aussi de gêne pour les riverains et de perturbations d'équipements sensibles. La méthode appliquée pour l'analyse des impacts intègre la mesure de la densité de force spectrale [1] lors d'un passage de tramway « standard » sur une plateforme avec prise en compte du couplage sol-plateforme puis de la décroissance des vibrations dans le sol avec l'analyse des ondes de Rayleigh en surface et enfin de l'interaction sol-structure (réponse du bâtiment). Cette méthode, par son caractère global, est réalisée seulement sur certaines zones (sondages) afin d'obtenir un ordre de grandeur de l'impact vibratoire sur les bâtiments situés à proximité. L'analyse, fondée sur la caractérisation *in situ* des lois de propagation « types » par zone urbaine homogène, permet de faire un premier inventaire des constructions susceptibles d'être exposées. Lors des études de conception de ligne notamment en phase PRO, une prédiction fine des émissions vibratoires est indispensable afin de conforter le respect des seuils et d'évaluer des points singuliers (réseaux VRD, constructions particulières), ainsi qu'un dimensionnement précis des dispositifs de réduction des vibrations.



Fig. 1 : Dalle de tramway de Grenoble (38) - Cours Jean Jaurès
Tramway slab in Grenoble (38) – Cours Jean Jaurès

Ces dernières années, on a vu se développer intensivement des méthodes éléments finis et éléments de frontière dans ce domaine qui entraînent souvent des temps de calcul lourds et donc très contraignants. De plus, la complexité que représente le sol et les structures couplées ne permet pas d'effectuer des prédictions trop simplistes. On peut penser que les modèles semi-analytiques sont des alternatives intéressantes pour la modélisation de couplage sol-structure.

Les connaissances acquises sur le couplage fluide-structure depuis les années 60 [2] nous ont permis de faire une extension de ces nombreux modèles au cas des sols [3].

Dans ce contexte et pour répondre à certaines demandes de bureaux d'études, Acouphen a entrepris une recherche dans le cadre d'un contrat CIFRE menée avec le LVA de l'INSA de Lyon, qui dispose d'un long savoir-faire en vibro-acoustique et la société de tramways lyonnaise Systra. Cette recherche vise à développer un outil de calcul pertinent (optimisation de dispositifs) avec des temps de calculs raisonnables (quelques minutes).

C'est ainsi que le modèle de simulation de propagation des vibrations « SIPROVIB » a été conçu.

Développement d'un modèle semi-analytique

L'ingénieur travaillant dans le domaine des vibrations et de l'acoustique est couramment amené à utiliser des modèles simples de type masse-ressort-amortisseur. Toutefois, ces modèles s'avèrent insuffisants pour la modélisation de cas complexes présentant de forts couplages entre éléments. En effet, il est bien connu en acoustique (sous-marine par exemple) que le fluide apporte de la masse ajoutée à la structure. Dans le cas d'un couplage avec le sol, celui-ci apporte également de la raideur ajoutée en basse fréquence puis de la masse ajoutée à fréquence plus haute. La transition entre ces deux phénomènes s'effectue à la fréquence de coïncidence entre le nombre d'onde de Rayleigh et la célérité des ondes de flexion. De plus, le sol apporte de l'amortissement ajouté de façon considérable ce qui est à l'origine de l'aspect « aplati » des vibrations des structures couplées.

Il est donc possible de donner une représentation modale du couplage sol-structure où l'apport en masse ajoutée ou en raideur ajoutée est fortement dépendant de la fréquence. Cette dépendance est d'autant plus importante à prendre en compte que des modèles largement utilisés ne considèrent le sol que comme un ressort constant avec la fréquence !

Ce modèle semi-analytique nécessite de quantifier précisément les caractéristiques mécaniques du système.

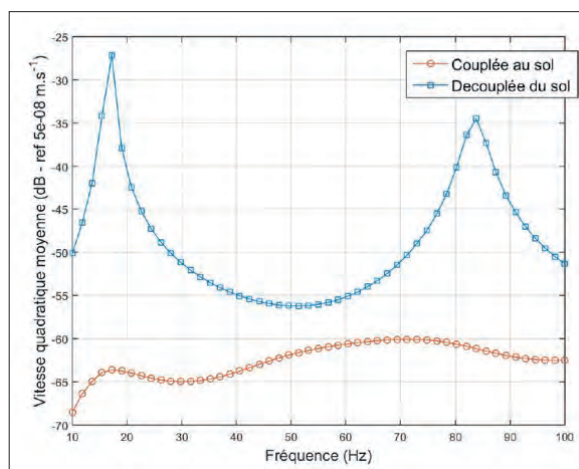


Fig. 2 : Comparaison des vitesses quadratiques moyennes d'une plaque couplée au sol (rouge) et non couplée (bleue)
Comparison of the surface averaged RMS plate velocity coupled (red) and uncoupled (blue) to the ground

La connaissance du sol à travers des caractérisations MASW

La connaissance des caractéristiques mécaniques et géométriques des sols constitue une des données d'entrée sensibles pour tout modèle prédictif du couplage sol-structure. À l'inverse de l'acoustique environnementale où ces données sont aisées à obtenir (propagation uniquement des ondes de dilatation), dans le cas d'une caractérisation du sol il est demandé un savoir-faire bien spécifique autant sur ce que représentent les équations de sol que sur des techniques d'inversion avancées. En effet, les vibrations de sol vérifient les équations de Navier [4] où deux ondes se propagent dans le milieu, les ondes de cisaillement et les ondes de dilatation, que l'on nomme ondes de volume. De plus, la stratification du sol induit une dépendance de la vitesse de propagation à la fréquence (milieu dispersif). Ainsi pour caractériser un sol, on cherchera à connaître les célérités et les amortissements de dilatation et de cisaillement, les masses volumiques et les hauteurs des couches.

Il existe de nombreuses méthodes pour caractériser les sols mais on peut retenir la méthode MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) comme étant une méthode « simple » et performante pour les plages de fréquence qui nous intéressent (10 Hz – 250 Hz). Cette méthode consiste à mesurer en différents points du sol, à la surface, le niveau vibratoire suite à la génération d'un impact. L'onde que l'on mesure à la surface se nomme onde de Rayleigh ; la différence de phase entre les différents points de mesure nous permet d'obtenir la courbe de dispersion de l'onde de surface. À partir de cette étape, une délicate opération consiste à effectuer un processus d'inversion pour le recalage du modèle « sol stratifié ».

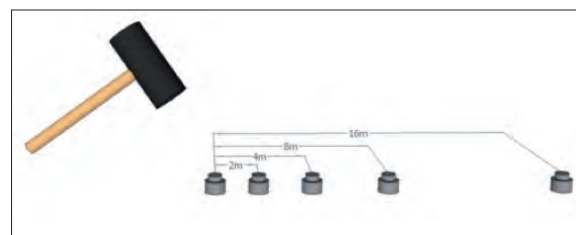


Fig. 3 : Mesure de décroissance vibratoire dans le sol
Measurement of ground wave propagation for site characterization

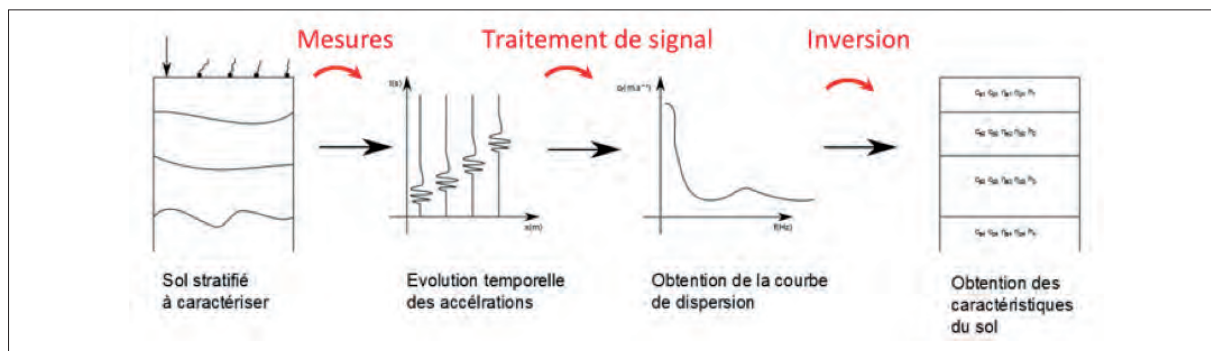


Fig. 4 : Vue d'ensemble du principe de la méthode MASW
Overview of the MASW method

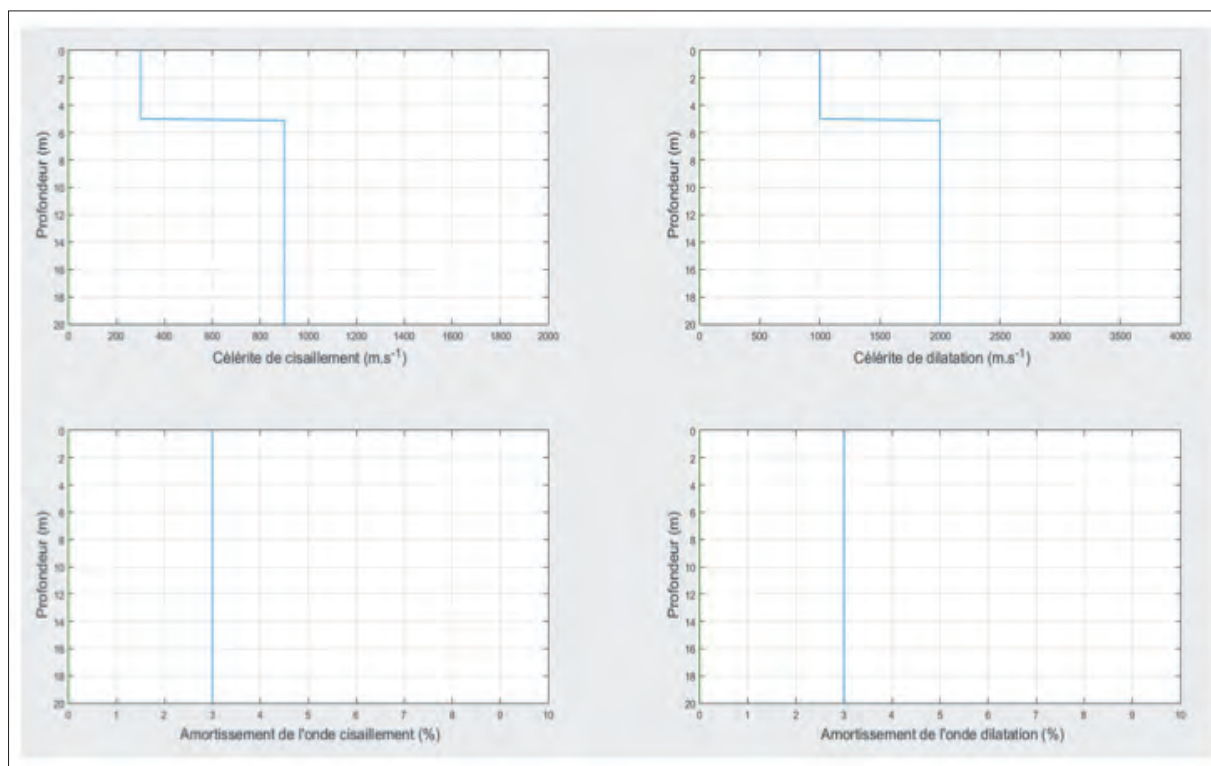
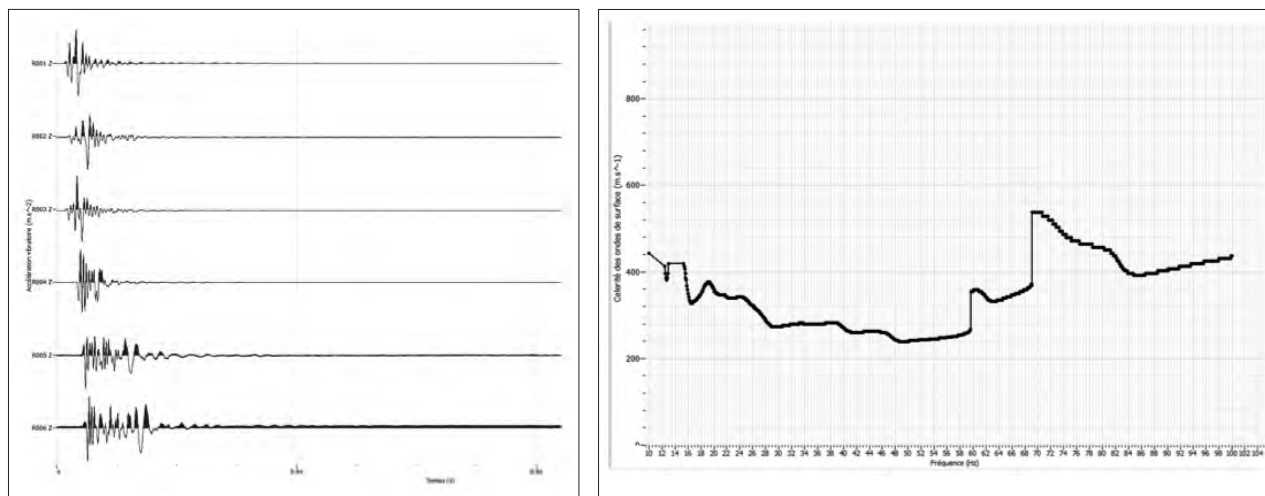


Fig. 5 : Exemple de résultats des étapes de caractérisation d'un sol
Example of steps for the near-surface site characterization

Des modèles semi-analytiques rapides et performants pour l'ingénieur

Malgré la complexité d'une plateforme ferroviaire (présence de ferrallages, de rails, de caniveaux, etc.), celle-ci peut être approximée par une succession de plaques minces (béton) de dimension finie respectant les hypothèses de Kirchhoff [5] aux basses fréquences (10 Hz - 250 Hz), à savoir que l'on néglige le cisaillement et l'inertie rotationnelle dans la structure. L'intérêt majeur d'un tel modèle réside tout d'abord dans la vitesse de calcul : on modélise ainsi une dalle de tramway sur un sol bicouche en quelques minutes. De plus, ce type de modèle permet le changement de certains paramètres, comme l'effort injecté, sans nécessité de refaire les calculs.

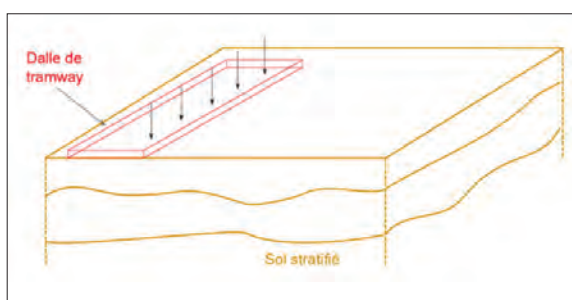


Fig. 6: Représentation d'une dalle de tramway excitée par 5 efforts équivalents à un passage de tramway et couplée à un sol stratifié
Overview of a tramway slab coupled to a stratified ground excited by 5 equivalent force

Ce modèle de couplage sol-structure a été validé sur quelques sites et en particulier sur le projet de tramway de « Décines Grand Stade » en collaboration avec Systra. Globalement sur une mesure à la surface du sol à une distance variant de 2 m à 20 m de la dalle, on note des écarts inférieurs à 3,5 dB en moyenne. On peut voir une bonne corrélation du modèle par rapport à l'expérience sur la figure 8. Ce qui confirme que ce type de modèle est pertinent pour modéliser une dalle de tramway.

Il est également possible d'étendre le modèle de couplage d'une dalle à la surface d'un sol à celui de plusieurs dalles où l'intérêt principal consiste à prendre en compte d'éventuels obstacles sur le chemin de propagation ainsi que « le dallage » d'un bâtiment.

Ce modèle constitue donc un outil performant et adapté à l'ingénierie notamment il peut être pour le maître d'œuvre un outil en termes d'optimisation des plateformes et de compréhension des phénomènes d'interaction sol-structure. Il permet notamment d'effectuer une mise au point de la conception de la plateforme du point de vue de l'« émission vibratoire » (dimensions, épaisseur, raideur, dispositif anti vibratoire...).

SIPROVIB : un véritable outil d'évaluation et d'aide à la conception

Dans un souci de réduction des niveaux vibratoires pour assurer une qualité de cadre de vie à des riverains d'infrastructures de transports et des coûts maîtrisés de réalisation de ces infrastructures, la prise en compte de la taille des structures ainsi que leur couplage avec le sol sont essentiels en termes d'optimisation.

L'effet du couplage sol-structure étant complexe à aborder, l'effet du sol sur la structure est souvent minimisé voire placé au second ordre devant l'excitation de la charge roulante. Pourtant les résultats simulés et mesurés pour une même structure entre différents sites et différents sols, montrent des écarts allant jusqu'à 10 dB ; en particulier dans le cas où des modes de couche de sol coïncident avec des fréquences de résonance de la structure.

Les premiers résultats de calculs obtenus avec SIPROVIB et ayant fait l'objet de validations expérimentales sur un certain nombre de sites nous montrent que le modèle peut gérer des conceptions particulières de plateformes qui sont fortement dépendantes du sol et des structures en jeu.

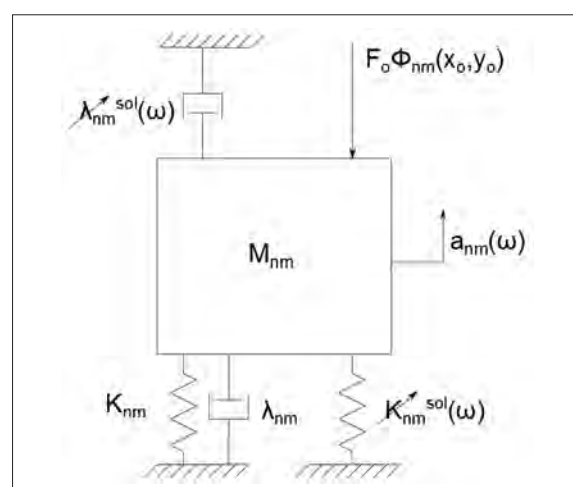
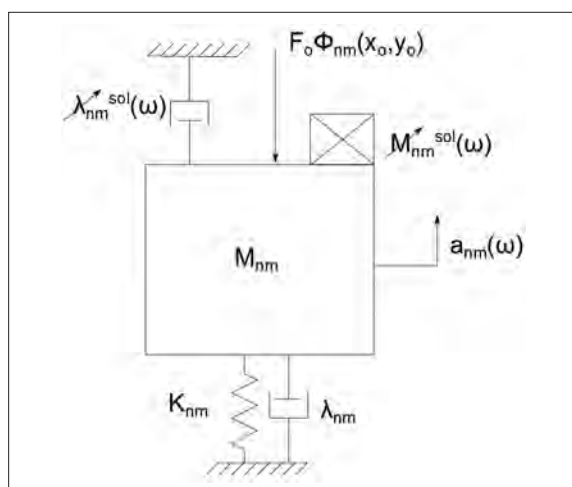


Fig. 8 : Représentation du couplage sol-structure en termes de masse, raideur et amortissement ajoutés
Representation of the ground added-mass, -stiffness and -damping

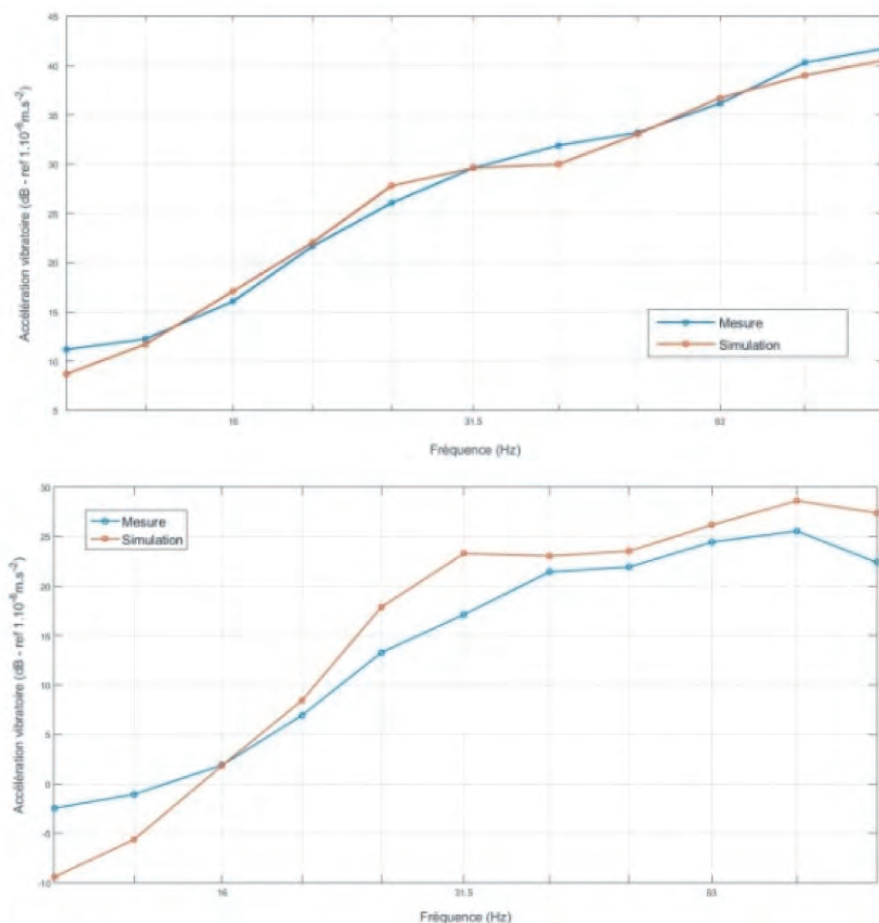


Fig. 7 : Comparaison théorie-expérience d'une dalle de tramway à « Décines Grand Stade » en un point sur la dalle et dans le sol
Theory-experiment comparison of the ground/slab modeling at « Décines Grand Stade »

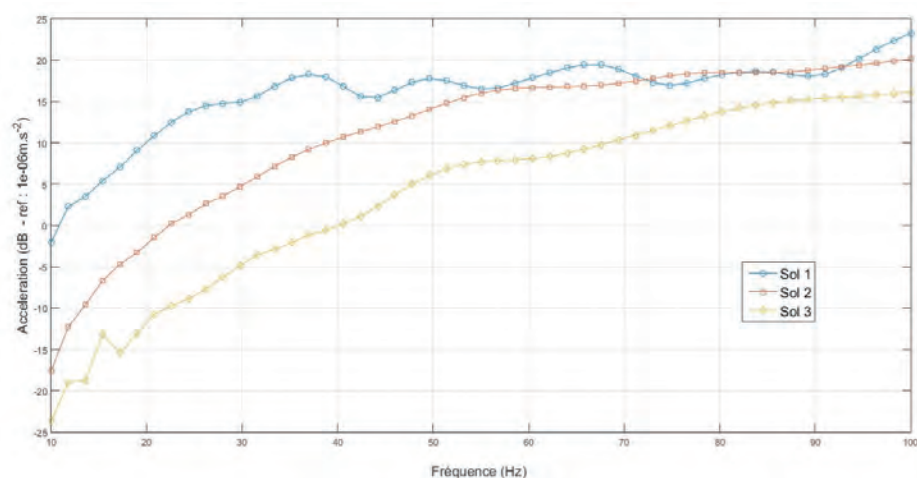


Fig. 9 : Accélération vibratoire à la surface du sol suite à l'excitation de la dalle pour trois types de sols différents
Ground acceleration at the top surface for three different ground characteristics

Par exemple, l'étude de conception d'une pose de voie d'une dalle simple de 6 m de large ou d'une variante de dalle double de 3 m chacune présente un fort intérêt au regard des résultats obtenus entre les deux solutions. La diminution de moitié de la surface excitée en contact avec le sol ainsi que la fluctuation de l'épaisseur

des dalles apportent des réductions significatives des niveaux vibratoires transmis. De plus dans le cas de deux dalles, la deuxième dalle non excitée peut jouer un rôle de Barrière Vibratoire Horizontale et permet des réductions importantes du niveau vibratoire jusqu'à 10 dB, et tout de même 4 dB vers 40 Hz.

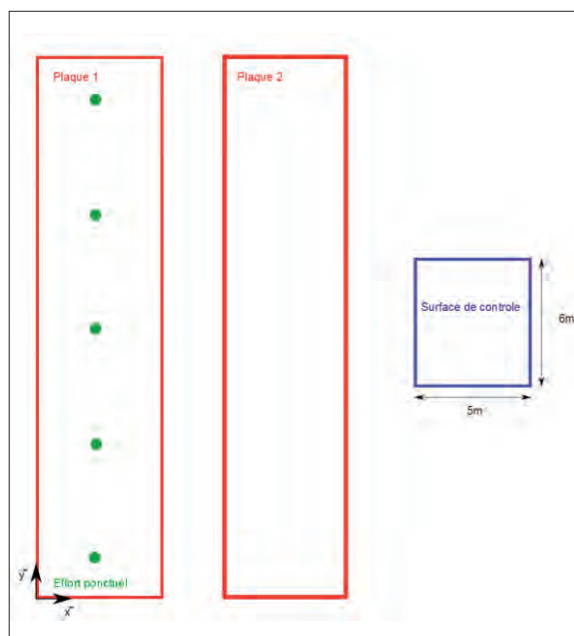


Fig. 10 : Vue de dessus du modèle de deux voies de tramway et de la surface de contrôle sur laquelle on calcule la perte par insertion
Top view of the two tramway slabs and the control surface on which the insertion loss is simulated

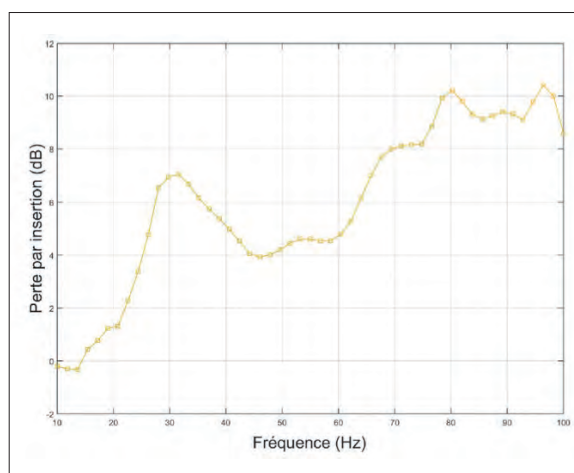


Fig. 11 : Perte par insertion due à la présence de la deuxième dalle
Insertion loss due to the second slab

Actuellement, les performances d'atténuation aux vibrations des produits résilients sont simplement caractérisées en laboratoire sur des échantillons (méthode selon modèle oscillateur simple), sans prendre en compte les effets de flexion de dalle ni l'effet de sol.

De plus, la difficulté d'estimer sur site la performance réelle des dispositifs, en termes de perte par insertion, nécessite de renforcer la méthode de mesurage car les écarts ne sont pas négligeables entre la mesure et les données des fabricants.

Le recours au modèle SIPROVIB qui permet de prédire le couplage sol/structure pour une dalle et également le couplage dalle + résilient adapté au système peut également constituer un outil d'aide au développement d'une nouvelle génération de produits et/ou systèmes antivibratiles.

Remerciements

Cette étude a bénéficié de la contribution de Systra. Les auteurs remercient leur soutien dans ce travail.

Références bibliographiques

- [1] Hanson, Carl E., Towers, David A. and Meister, Lance D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment. U.S. Department of Transportation. Burlington : s.n., 2006.
- [2] Laulagnet, Bernard, Sound radiation by simply supported unbaffled plate, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 103 (5), pp. 2451-2462., 1998
- [3] Grau, Loïc and Laulagnet, Bernard, The ground cross-modal impedance as a tool to analyse ground/plate interaction and ground wave propagation, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 137(5), 2015
- [4] Foti, Sebastiano, Carlo G. Lai, Glenn J. Rix and Claudio Strobba, Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. s.l. : CRC Press, 2014. 978-0415678766.
- [5] Guyader, Jean-Louis. Vibrations des milieux continus. s.l. : Hermes Science, 2002.

L'outil SIPROVIB permet un travail collaboratif avec les maîtres d'œuvre de projets d'infrastructures de tramways pour garantir un minimum de transmission vibratoire dans le sol.

Il s'agit là d'un outil d'aide à la conception qui peut permettre d'éviter d'avoir trop souvent recours à une dalle flottante sous résilient alors que le sol peut lui-même être une solution.

Il permet également de caractériser le rôle d'une barrière à la surface en recherchant à optimiser l'effet dû à la rupture d'impédance.

Des perspectives voient le jour avec la possibilité de modéliser des systèmes intégrant des résilients adaptés au couplage sol/structure.