CFA/VISHNO 2016

Modélisation d'une Barrière Vibratoire Horizontale pour atténuer les vibrations au passage de tramway

L. Grau[a] et B. Laulagnet[b]
[a]ACOUPHEN, 33 Route de Jonage, 69891 Pusignan, France
[b]INSA Lyon, 25 bis, avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France
loic.grau@acouphen.fr

LE MANS

Les vibrations se propageant dans le sol issues de sources diverses constituent des nuisances de plus en plus importantes dans les sociétés contemporaines et représentent un enjeu majeur d'un point de vue sanitaire et environnemental. L'une des sources de nuisance principales concerne le ferroviaire : par exemple les tramways dont les infrastructures s'implantent de plus en plus souvent dans un milieu fortement urbanisé. Afin de faire face à cette problématique, il est important d'être capable de concevoir des systèmes d'atténuation des vibrations dans le cas où la plateforme de tramway est déjà existante. La Barrière Vibratoire Horizontale (BVH) est un système qui montre, en ce sens, des performances très intéressantes en terme d'atténuation lorsqu'une structure couplée au sol est excitée ponctuellement. Pour ce faire, on prend en compte deux dalles en vibration de flexion. La première représente la plateforme de tramway et est excitée par des efforts ponctuels. La seconde dalle de tramway représente la BVH. Son rôle consiste à bloquer les vibrations se propageant à la surface du sol. Par ailleurs, par des méthodes inverses, il est possible de caractériser les efforts équivalents appliqués sur la plateforme de tramway au passage du tramway. Ces efforts prennent en compte divers paramètres liés au matériel roulant tels que le tramway, l'interaction roue-rail, la rugosité… On utilise donc ces efforts pour caractériser le passage de tramway et étudier la performance de la BVH.

1 Introduction

Les vibrations d'origine ferroviaire sont de plus en plus étudiées notamment avec l'implantation des voies ferrées dans un milieu fortement urbanisé. Face à cette problématique, il est important non seulement d'être en mesure de prédire l'impact vibratoire d'une nouvelle ligne mais également de proposer des solutions adaptées afin de réduire ces nuisances.

Ces dernières années ont vu l'émergence de solutions afin d'atténuer les vibrations se propageant dans le sol d'origine ferroviaire. Ces systèmes d'atténuation peuvent se situer au niveau de la plateforme ferroviaire avec l'utilisation de tapis anti-vibratile que l'on place sous la dalle de tramway ou de semelle que l'on glisse entre le rail et les traverses. Ces solutions montrent des performances intéressantes permettant d'obtenir environ 20dB d'atténuation au-delà de 80Hz pour les sites les plus favorables [1].

Cependant les fréquences d'excitation du matériel ferroviaire de type tramway engendrent des vibrations sur une plage [10Hz ; 100Hz] d'où la nécessité de concevoir des systèmes d'atténuation des vibrations performants à basse fréquence. Dans ce contexte, les barrières vibratoires constituent une solution. Il en existe de différentes catégories et l'on retiendra entre autres les barrières verticales et les barrières horizontales. Les barrières verticales ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années et certains ont montré des performances en atténuation d'environ 10dB à partir de 25Hz [2]. Ces systèmes présentent cependant l'inconvénient de nécessiter une grande quantité de béton pour leur conception mais également d'engendrer une amplification vibratoire à basse fréquence.

La Barrière Vibratoire Horizontale (BVH) est une alternative à la barrière verticale récemment étudiée dans le cas d'effort ponctuel appliqué sur la plateforme d'un tramway, constituée d'une dalle de béton reposant sur le sol comme le montre la figure 1 [3]. L'objet de la présente étude est d'étendre le calcul d'atténuation d'une barrière sollicitée par un effort ponctuel, à un système d'efforts équivalents au passage d'un tramway. La notion d'efforts équivalents au passage de tramway a fait l'objet d'études préliminaires [4] et revient à la définition d'un problème inverse. Ainsi par la mesure des accélérations dans le sol à proximité de la voie et à l'aide d'un modèle direct de propagation dans le sol, on remonte à un système d'efforts équivalents appliqué à la plateforme tramway qui nous permet de nous approcher des efforts réellement appliqués.

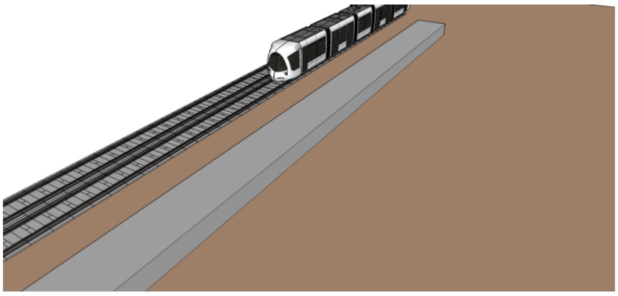

Figure 1 : Vue d'ensemble d'une BVH à proximité de la dalle de béton

2 Formulation du problème

Dans cette section, nous allons présenter la formulation du problème qui consiste à représenter la structure comme une dalle en vibration de flexion couplée au sol sur sa surface [5]. Dans une seconde section, nous présenterons brièvement la notion d'efforts équivalents au passage de tramway.

1.1 Modélisation de la BVH

1.1.1 Equations du mouvement de la structure

La dalle de tramway est modélisée par une dalle en vibration de flexion sous les hypothèses de Kirchhoff. Cette dalle sera indicée 1. Il a été montré que les hypothèses de mouvement de dalle en vibration de flexion sont suffisantes pour représenter la vibration de la plateforme de tramway. Cette dalle excitée d'un côté par un effort ponctuel au point(x_0, y_0), d'amplitude F_0 est couplée au sol sur l'autre face.

La seconde dalle représente la BVH et sera indicée 2. Cette dalle non excitée par un effort extérieur, sera couplée au sol et jouera le rôle de récepteur.

Les équations du mouvement de ces deux structures sont données en régime harmonique par :

$$\begin{cases} D_1^*\nabla^4 w_1(x,y) - \omega^2\rho_1 h_1 w_1(x,y) = F_0\delta(x-x_0)\delta(y-y_0) \\ \qquad +\sigma_{p1}(x,y) \\ D_2^*\nabla^4 w_2(x,y) - \omega^2\rho_2 h_2 w_2(x,y) = \sigma_{p2}(x,y) \end{cases} \quad (1)$$

Une solution de ces équations du mouvement de dalle est donnée par l'intermédiaire d'une décomposition modale sur les modes de plaques. Les conditions aux limites de plaque guidée seront prises en compte dans la mesure où elles permettent la prise en compte du mouvement de corps rigide. La décomposition des déplacements et de l'effort extérieur se mettent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} w_1(x,y) = \sum_{nm} a_{nm}(\omega)\phi_{nm}(x,y) \\ F(x,y) = \sum_{nm} F_{nm}\phi_{nm}(x,y) \\ w_2(x,y) = \sum_{pq} b_{pq}(\omega)\phi_{pq}(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

où a_{nm}, b_{pq}, ϕ_{nm}, et ϕ_{pq} sont respectivement les amplitudes modales et déformées modales des dalles 1 et 2.

Une décomposition modale de l'effort est également nécessaire pour des questions de régularisation du problème.

En remplaçant les expressions (2) dans (1), les contraintes appliquées par le sol sur la structure peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \sum_{nm}\left((D_1^* k_{nm}^4 - \omega^2\rho_1 h_1)a_{nm}(\omega) - F_{nm}\right)\phi_{nm}(x,y) = \sigma_{p1}(x,y) \\ \sum_{pq}\left(D_2^* k_{pq}^4 - \omega^2\rho_2 h_2\right)b_{pq}(\omega)\phi_{pq}(x,y) = \sigma_{p2}(x,y) \end{cases} \quad (3)$$

Il est maintenant nécessaire d'exprimer les contraintes appliquées à la surface du sol à partir des équations du mouvement dans le sol.

1.1.2 Equations du mouvement du sol

Le sol est modélisé à partir des équations de Navier qui consiste à considérer le sol comme un milieu homogène, isotrope et semi-infini qui sont données par :

$$\mu\Delta\vec{u} + (\lambda+\mu)\overrightarrow{grad}\left(div(\vec{u})\right) + \rho\omega^2\vec{u} = \vec{0} \quad (4)$$

En utilisant une décomposition de Helmholtz, les équations de Navier se mettent sous la forme de deux équations aux potentiels :

$$\begin{cases} \Delta\phi + k_p^2\phi = 0 \\ \Delta\vec{\psi} + k_s^2\vec{\psi} = \vec{0} \end{cases} \quad (5)$$

où $\emptyset$ correspond au potentiel scalaire et $\vec{\psi}$ correspond au potentiel vecteur.

Les conditions aux limites à la surface du sol sont nulles partout à l'exception des contraintes normales appliquées à l'interface entre les deux dalles et le sol. On a alors :

$$\begin{cases} \sigma_{xz}(x,y,0) = 0 \\ \sigma_{yz}(x,y,0) = 0 \\ \sigma_{zz}(x,y,0) = \begin{cases} 0 \ si \ (x,y) \in \mathbb{R}^2 - S_1 U S_2 \\ \sigma_{p1}(x,y) \ si \ (x,y) \in S_1 \\ \sigma_{p2}(x,y) \ si \ (x,y) \in S_2 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Une solution des potentiels peut être donnée à partir d'une transformée spatiale de Fourier 2D des équations (5) et (6). Cela conduit à la relation contrainte déplacement dans le domaine des nombre d'onde sous la forme suivante:

$$\tilde{u}_z(k_x,k_y,0) = N(k_x,k_y)\tilde{\sigma}_{p1}(k_x,k_y) + N(k_x,k_y)\tilde{\sigma}_{p2}(k_x,k_y) \quad (7)$$

1.1.3 Système linaire des amplitudes modales

Afin d'obtenir les inconnues de notre problème à savoir les amplitudes modales de la dalle 1 et 2, on utilise la continuité des déplacements entre les dalles et sol.

La relation de continuité se met sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{1}{4\pi^2}\iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}(k_x,k_y,0)e^{j(k_x x + k_y y)}\,dk_x dk_y = w_1(x,y) \\ \frac{1}{4\pi^2}\iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}(k_x,k_y,0)e^{j(k_x x + k_y y)}\,dk_x dk_y = w_2(x,y) \end{cases} \quad (8)$$

On remplace l'expression (7) des déplacements à la surface du sol ainsi l'expression des déplacements de plaque (2) dans (8). Un processus d'orthogonalisation permet alors de donner l'expression des amplitudes modales de plaque sous forme matricielle ; cela conduit à l'expression suivante :

$$\left(\begin{pmatrix} \gamma_{nmrs}^{11} & \gamma_{pqrs}^{12} \\ \gamma_{nmtu}^{21} & \gamma_{pqtu}^{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} M_{nm}(\omega_{nm}^2 - \omega^2) & (0) \\ (0) & M_{pq}(\omega_{pq}^2 - \omega^2) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} S_{rs} & (0) \\ (0) & S_{tu} \end{pmatrix}\right)\begin{pmatrix} a_{nm}(\omega) \\ b_{pq}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{nmrs}^{11} & \gamma_{pqrs}^{12} \\ \gamma_{nmtu}^{21} & \gamma_{pqtu}^{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} F_{nm} \\ (0) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Où l'on définit la mobilité intermodale des modes de plaque caractérisant l'influence du sol sur les modes de dalle :

$$\gamma_{nmrs}^{11} = \iint_{-\infty}^{+\infty} N(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{nm}(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{rs}^*(k_x,k_y)dk_x dk_y$$

$$\gamma_{pqtu}^{22} = \iint_{-\infty}^{+\infty} N(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{pq}(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{tu}^*(k_x,k_y)dk_x dk_y$$

Et la mobilité intermodale des modes d'une plaque sur les modes d'une autre plaque,

$$\gamma_{pqrs}^{12} = \gamma_{nmtu}^{21} = \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-j(k_x(e_x+L_{x1})+k_y L_{y1})}N(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{pq}(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{rs}^*(k_x,k_y)dk_x dk_y$$

Où e_x est la distance entre les dalles selon l'axe perpendiculaire à la voie.

A partir des amplitudes modales de plaque, on peut exprimer le déplacement en tous points à la surface du sol. Une transformée de Fourier inverse 2D est appliquée à l'expression (7) ce qui conduit à l'expression du déplacement en composante normale au sol :

$$u_z(x,y,0) = \sum_{nm}\left(M_{nm}(\omega_{nm}^2 - \omega^2)a_{nm}(\omega) - F_{nm}\right)T_{nm}(x,y) + \sum_{pq} M_{pq}(\omega_{pq}^2 - \omega^2)b_{pq}(\omega)T_{pq}(x,y) \quad (10)$$

Où $T_{nm}(x,y) = \frac{1}{4\pi^2}\iint_{-\infty}^{+\infty} N(k_x,k_y)\tilde{\emptyset}_{nm}(k_x,k_y)e^{j(k_x x + k_y y)}dk_x dk_y$ et $T_{pq}(x,y) = \frac{1}{4\pi^2}\iint_{-\infty}^{+\infty} N(k_x,k_y)e^{-j(k_x(L_{x1}+e_x)+k_y e_y)}\tilde{\emptyset}_{pq}(k_x,k_y)e^{j(k_x x + k_y y)}dk_x dk_y$

Il est désormais possible d'évaluer l'effet de la BVH sur le niveau vibratoire à la surface du sol. Il est nécessaire d'exprimer l'effort équivalent appliqué sur la dalle au passage d'un tramway.

1.2 Caractérisation d'un système d'effort équivalent au passage d'un tramway

Dans cette section, nous allons aborder la notion d'effort équivalent au passage d'un tramway obtenu par la définition d'un problème inverse. Il s'agit d'une technique de caractérisation des efforts récemment appliquée dans le cas des passages de tramway.

Le tramway est constitué d'un ensemble de paramètres à l'origine de l'excitation de la dalle de tramway. Dans ces paramètres on retrouve classiquement la vitesse du tramway, la masse de la caisse, des bogies, des essieux et de la roue, la raideur des suspensions primaires et secondaires, le contact roue-rail et la rugosité relative roue-rail. Devant la grande difficulté à connaître l'ensemble de ces paramètres et de déterminer l'effort injecté par une méthode directe, il a été choisi de déterminer les efforts par une méthode inverse, qui consiste à définir les efforts dus à la charge roulante en des points fixes. Dans un premier temps, on détermine la fonction de transfert entre un point d'excitation i et un point de réception à la surface du sol j. et on construit une matrice des fonctions de transfert accélération sur force de la forme:

$$[H_{ij}] \qquad (11)$$

Par la suite, on dispose des accéléromètres le long de la voie de tramway et on y mesure les accélérations lors du passage d'un tramway. A partir de ces mesures, on détermine le spectre sur la durée du passage de tramway $\{x_j\}$ qui permet de d'exprimer l'effort appliqué par le tramway sur la plateforme par la relation:

$$\{f_i\} = [H_{ij}]^{-g}\{x_j\} \qquad (12)$$

Où $[H_{ij}]^{-g}$ est une pseudo-inversion au sens des moindres carrés de la matrice des fonctions de transfert. Cette inversion est notamment nécessaire dans le cas où on a plus de points de mesure que d'efforts appliqués.

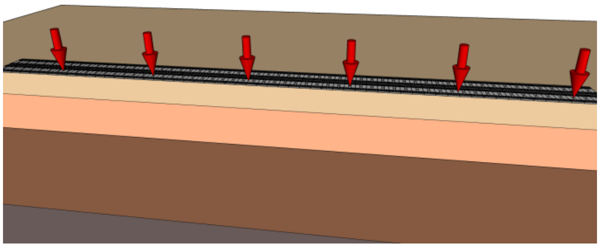

Figure 2 : Représentation des efforts équivalents appliqués sur une dalle de tramway

La position et la localisation des efforts reconstitués ont été choisies au nombre de 5 espacés de 5m environ.

2 Efficacité du système d'atténuation des vibrations par BVH

Dans cette section, nous allons présenter quelques résultats de performance de barrière vibratoire en considérant des caractéristiques de sol mesurées sur site ainsi que des efforts équivalents de passage de tramway.

L'indicateur de performance consistera à considérer le niveau vibratoire sur une surface moyenne à la surface du sol à travers l'expression suivante:

$$u_{z-av} = \frac{1}{S}\iint_S |u_z(x,y,0)|^2 dS$$

La perte par insertion sera déterminée comme le rapport entre le niveau vibratoire avec BVH et le niveau vibratoire sans BVH.

$$IL = 10\,log10\left(\frac{u_{z-av-avec\,HWB}}{u_{z-av-sans\,HWB}}\right) \qquad (13)$$

2.1 Effort injecté au passage de tramway

Dans un premier temps, on souhaite déterminer un système d'efforts équivalents transmis à la plateforme ferroviaire au passage d'un tramway. Pour cela, on mesure l'accélération vibratoire le long de la plateforme à 2m de celle-ci au passage d'un tramway. La figure 3 est un exemple d'accélération vibratoire au passage d'un tramway mesuré à la surface du sol. A partir de cette mesure, il est possible d'exprimer un effort équivalent en effectuant une inversion du problème.

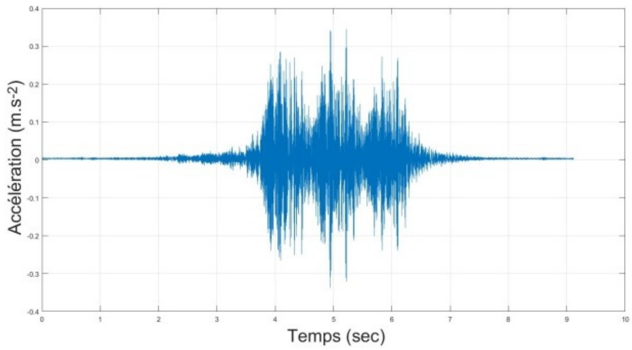

Figure 3 : Exemple de signal mesuré d'accélération au passage d'un tramway

L'inversion qui consiste à déterminer les efforts équivalents appliqués sur la plateforme est une inversion relativement stable principalement dû au fait que le sol apporte énormément d'amortissement ajouté à la structure. C'est d'ailleurs cette propriété qui ouvre des possibilités intéressantes en ce qui concerne les méthodes inverses dans le domaine du couplage sol/structure.

La figure 4 correspond à un exemple d'effort équivalent appliqué sur la plateforme de tramway. Nous allons utiliser par la suite cet effort afin de représenter l'effort appliqué par le tramway sur la plateforme. On pourrait par ailleurs montrer que dans le champ proche d'une dalle de tramway sur laquelle on applique 5 efforts équivalents, la contribution d'un seul effort suffit à retrouver le niveau vibratoire à la surface du sol jusqu'à une distance de 10m.

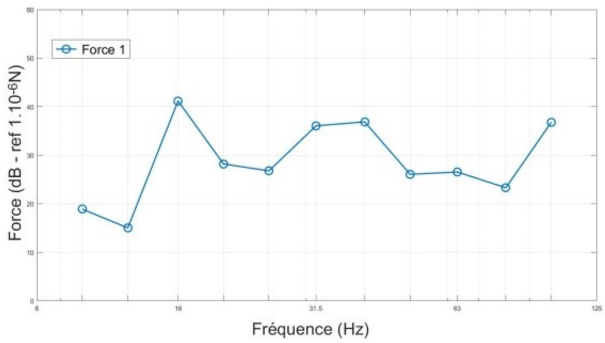

Figure 4: Effort équivalent appliqué sur la plateforme au passage d'un tramway

2.2 Performance de la BVH

On s'intéresse dans cette section à la performance d'une BVH dans le cas d'une excitation de tramway. On se place dans le cas d'un sol bicouche mesuré sur un site à Angers, France et dont on donne les caractéristiques dans la Table 1. Ces caractéristiques sont issues d'une caractérisation du sol par la méthode MASW.

	C_s (m.s^{-1})	C_p (m.s^{-1})	η_s	η_p	ρ (Kg.m^{-3})	h (m)
Sol 1	250	550	5%	5%	1200	5
Sol 2	500	1000	5%	5%	1500	∞

Table 1 : Caractéristiques mécaniques et géométriques du sol

La dalle de tramway ainsi que la BVH sont des dalles en béton donc on donne les caractéristiques dans la Table 2.

Dalle	E (Pa)	ν	η	ρ (Kg.m^{-3})	L_x (m)
1	2,5.10^{10}	0.3	5%	2500	10
2	2,5.10^{10}	0.3	5%	2500	10

Table 2 : Caractéristiques mécaniques et géométriques des deux dalles

On s'intéresse ici à la performance de la BVH dans une zone localisée à 1m derrière elle sur une surface de 5m*5m. La figure 5 montre la perte par insertion pour différentes épaisseurs de BVH. L'augmentation de l'épaisseur permet de faire fluctuer la fréquence de coïncidence des ondes de Rayleigh, ondes se propageant à la surface du sol, et des ondes de flexion. Plus l'épaisseur de la BVH augmente, plus la fréquence de coïncidence se décale en basse fréquence ce qui permet un blocage plus efficace des ondes. On observe également que la performance de la BVH est de l'ordre de 5dB au-delà de 30Hz ce qui présente un intérêt à ces fréquences.

La figure 6 correspond à la performance de la BVH pour différents modules de Young de dalle. On observe que l'augmentation du module de Young de la dalle permet une amélioration notable des performances.

Il existe un second critère important à prendre en compte à partir de laquelle la BVH peut atténuer les vibrations. Il s'agit de la largeur de la BVH qui doit vérifier le critère :

$$L_y > \frac{\lambda_R}{2} \qquad (14)$$

En effet on peut observer sur l'ensemble des courbes de perte par insertion, qu'il existe une fréquence proche de 25Hz à partir de laquelle l'atténuation commence. Il s'agit du critère spatial à vérifier pour obtenir une atténuation efficace par la BVH.

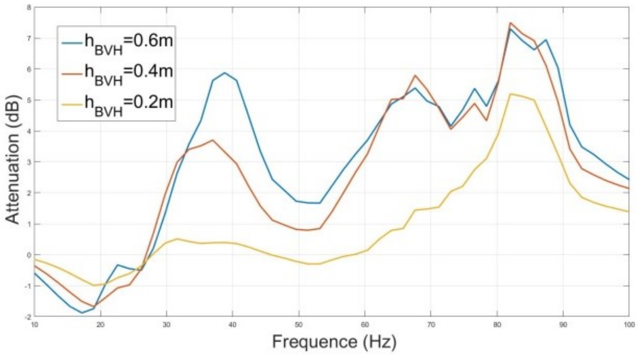

Figure 5: Perte par insertion due à la BVH pour différentes épaisseurs de BVH

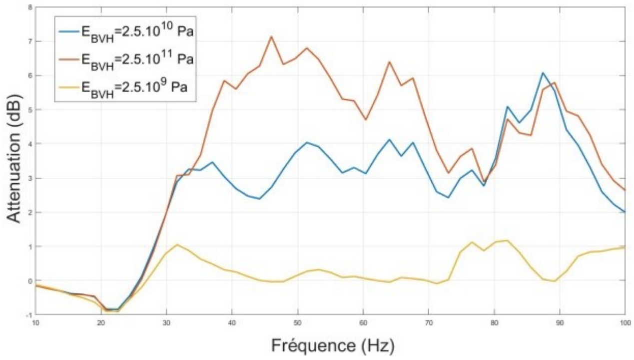

Figure 6: Perte par insertion due à la BVH pour différentes modules de Young de BVH

5 Conclusion

Cet article a présenté l'efficacité des écrans vibratoires en surface (BVH) dans le cadre d'efforts équivalents reconstitués au passage d'un tramway. Ainsi on se donne la possibilité d'estimer ces efficacités en se rapprochant au mieux des vrais efforts injectés, dans le cas d'excitations ferroviaires connues pour être complexes.

Références

[1] M. Maldonado, Vibrations dues au passage d'un tramway: mesures expérimentales et simulations numériques, *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes,* 2008

[2] P. Coulier et.al , Numerical and experimental study of stiff wave barriers for the mitigation of railway induced vibrations*, Proceedings of ISMA 2014*, 3489-3504

[3] L. Grau, B. Laulagnet, *Effect of horizontal wave barriers on ground vibration propagation*, The Journal of the acoustical Society of America, 138, (2015).

[4] L. Grau, *Approche analytique modale pour la prévision vibratoire de plaques couplées à des sols: Applications ferroviaires*, Thèse de doctorat, LVA (2015)

[5] L. Grau, B. Laulagnet, *Ground cross-modal impedance as a tool for analyzing ground/plate interaction and ground wave propagation,* The Journal of the acoustical Society of America, 137, (2015).