

Projet DIAVIBAT : Prédiction et contrôle de la performance sur site des dispositifs d'atténuation vibratoire dans les bâtiments

**Walid Wasmine,
Denis Bozzetto**

Acouphen
33, route de Jonage
BP30
69891 Pusignan CEDEX
E-mail : walid.wasmine@acouphen.fr

**Simon Bailhache,
Philippe Jean,
Michel Villot**

CSTB
24, rue Joseph Fourier
38400 Saint-Martin-d'Hères
E-mail : simon.bailhache@cstb.fr

Joseph Torbay

Acousystem SAS
39, boulevard Vauban
78280 Guyancourt
E-mail : joseph.torbay@acousystem.com

Résumé

De nouvelles méthodes pour prévoir et contrôler sur site l'efficacité des dispositifs d'atténuation vibratoire de bâtiments (plots élastomères ou boîtes à ressorts) sont proposées sur la base d'une approche par mobilités. La performance est exprimée sous la forme d'une perte par insertion. Les mobilités des structures en amont et en aval de la désolidarisation sont déterminées par calcul. Des validations numériques sur une configuration simple montrent, d'une part, que la prédiction de la performance via un simple modèle masse-ressort surestime l'efficacité des dispositifs tandis que la formule simplifiée utilisant les mobilités est plus précise et, d'autre part, que la seule mesure de la vitesse vibratoire de part et d'autre de la désolidarisation ne suffit pas à évaluer la performance sur site, la différence de vitesse devant être corrigée du rapport des mobilités des structures en présence. Des mesures ont été effectuées sur des bâtiments réels afin d'évaluer la faisabilité et les limites des méthodes proposées : une incertitude importante sur la performance des dispositifs sur site a été mise en évidence, dû à l'incertitude dans l'estimation des mobilités.

Abstract

New methods for predicting and controlling the on-site performance of vibration mitigation measures for buildings (elastomer mounts or spring units) are proposed, following a mobility-based approach. The performance is expressed in terms of an insertion loss. The mobilities of the structures on both sides of the decoupling line are determined from calculations. Numerical validations on a simple configuration show that predicting the performance using a simple mass-spring model leads to an overestimation of the actual efficiency while the simplified relationship based on mobilities is more accurate. It is also highlighted that measuring only the vibration velocity on both sides of the decoupling line is not sufficient to determine the actual performance; indeed the vibration level difference needs to be corrected using the ratio between the structures' mobilities. Measurements were performed on real buildings in order to assess the feasibility and limits of the proposed methods: significant uncertainty was found on the on-site performance of the vibration isolators, due to uncertainty in the determination of the mobilities.

Des dispositifs d'atténuation des vibrations et du bruit solidien ferroviaires dans les bâtiments existent sous la forme de boîtes à ressorts ou de plots élastomères insérés entre fondations (au sens large : structures sous la coupure vibratoire) et superstructure du bâtiment. Les méthodes actuelles de prédiction de la performance de ces dispositifs sont simplistes : en effet, elles se basent sur un simple modèle d'oscillateur simple, où les structures en amont de la désolidarisation sont considérées comme infiniment rigides et où la superstructure est assimilée à une masse (voir Figure 1, page suivante). De plus, il n'existe pas de méthode normalisée de contrôle sur site. Réunis autour du projet DIAVIBAT, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), la société Acouphen (bureau d'études en acoustique et vibrations) et la société

Acousystem (fabricant de plots élastomères et de boîtes à ressorts, filiale du groupe CDM) ont travaillé au développement d'une méthode de prédiction plus précise de la performance de ces dispositifs sur site (perte par insertion) à partir de leurs caractéristiques dynamiques et à la mise au point d'une méthodologie pour contrôler ces performances sur site. Cet article décrit les méthodes étudiées, basées sur l'approche vibratoire source-récepteur par mobilité récemment développée pour les équipements de bâtiment et en voie de normalisation (CEN/TC126). Une validation numérique est effectuée à l'aide du logiciel de calcul d'interaction sol-structures MEFISSTO [2] [3]. La faisabilité expérimentale de ces méthodes est ensuite évaluée sur la base de campagnes de mesures sur des bâtiments existants ou en cours de construction.

Le projet avait également pour but de comprendre comment la présence de dispositifs antivibratoires affecte la stabilité structurale des bâtiments, notamment du point de vue sismique. Cet aspect n'est pas traité dans cet article, néanmoins le lecteur peut se référer au rapport de synthèse pour plus de détails [1].

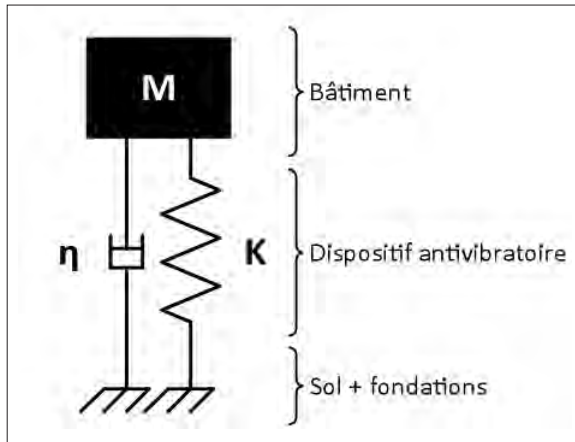


Fig. 1 : Modèle simplifié de bâtiment avec dispositif antivibratoire
 Simplified model of a building equipped with a vibration isolator

Méthode de prévision

La performance sur site des dispositifs considérés est exprimée par un gain par insertion en termes de puissance structurale injectée (*PFIG* : *Power Flow Insertion Gain*), grandeur plus pertinente que la transmissibilité en termes de forces, utilisée habituellement. Ce gain est estimé à partir des caractéristiques dynamiques des dispositifs d'atténuation vibratoire (mobilité Y_d) et des mobilités des structures amont (fondations du bâtiment de mobilité Y_s , indice S pour « source ») et aval (superstructure du bâtiment de mobilité Y_R , indice R pour « récepteur »). On rappelle que la mobilité est égale au rapport entre la vitesse vibratoire (complexe au sens mathématique) en un point et la force dynamique (également complexe) appliquée en ce même point (mobilité ponctuelle) ou en un point différent (mobilité de transfert). Elle s'exprime en $m \cdot N^{-1} \cdot s^{-1}$.

$$Y_{ij} = \frac{v_i}{F_j} \quad (1)$$

Ces mobilités peuvent être calculées ou mesurées ; les résultats de la thèse CSTB de Pierre Ropars [4] sur l'approche dynamique source-récepteur par mobilité ont été utilisés. Les formules obtenues sont simples pour un degré de liberté, ce qui est le cas lorsque la sollicitation verticale est dominante et un point de contact est considéré. Elles se compliquent avec plusieurs degrés de liberté. La performance est estimée à partir des modules des mobilités calculées ou mesurées par bandes de 1/3 d'octave selon la formule approchée :

$$PFIG \approx 10 \cdot \log \left(\frac{|Y_R|^2 + |Y_S|^2}{|Y_d|^2} \right) \quad (2)$$

Avec :

Y_r mobilité de la superstructure

Y_s mobilité de la fondation (infrastructure)

Y_d mobilité du dispositif

Notons qu'une atténuation correspond à un gain en dB (*PFIG*) négatif et que l'approximation très simple donnée n'est pas valide aux fréquences voisines de la fréquence de résonance du système.

Une validation numérique a été faite à partir d'un modèle éléments finis sol-structure (logiciel MEFISSTO, développé au CSTB et validé lors du projet ADEME VIBSOLFRET [5]). Un bâtiment simplifié avec fondations dans un sol homogène a été modélisé en 2D (voir Figure 2) sans et avec dispositif d'atténuation vibratoire de caractéristiques mécaniques données.

L'efficacité réelle du dispositif a pu être estimée numériquement (en comparant la puissance vibratoire injectée au bâtiment avec et sans dispositif) puis comparée à la méthode courante actuellement largement utilisée (calcul de la transmissibilité d'un simple modèle masse ressort) et à la méthode de prévision source-récepteur simplifiée. Les résultats montrent que le modèle masse-ressort surestime l'efficacité du dispositif alors que le modèle de prévision conduit à une estimation plus précise (sauf au voisinage de la fréquence de résonance du système), mais qui néanmoins surestime encore un peu la performance (voir Figure 3). Le modèle numérique montre aussi que les sollicitations verticales (ondes dans le plan des structures) sont dominantes dans la configuration testée, ce qui justifie les simplifications effectuées. Les mobilités des structures nécessaires au calcul prévisionnel ont été calculées par le modèle numérique ; les validations expérimentales décrites dans cet article montrent que ces estimations par calcul sont satisfaisantes.

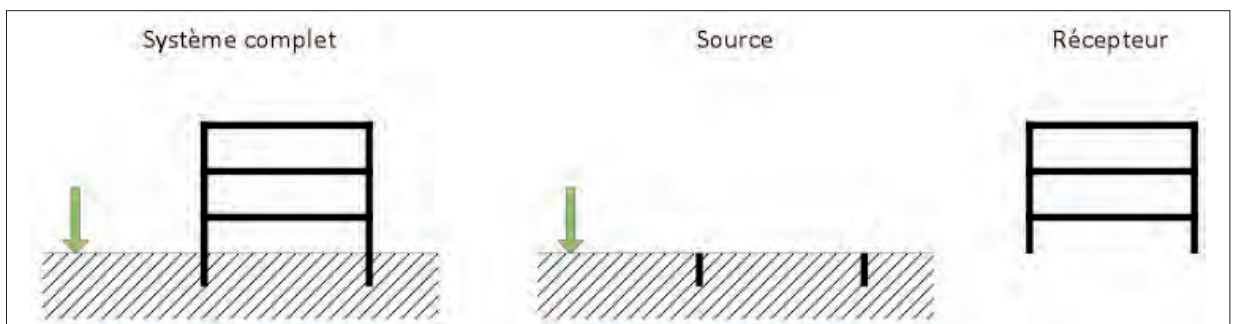


Fig. 2 : Configuration 2D bâtiment-sol (validation numérique)
 2D building-soil configuration (numerical validation)

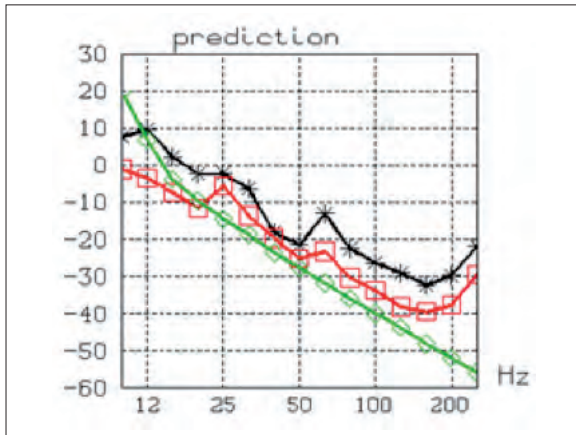


Fig. 3 : Configuration 2D bâtiment-sol (validation numérique) ; gains par insertion (PFIG) obtenus : modèle masse-ressort (vert), méthode de prévision (rouge), gain exact (noir)
 2D building-soil configuration (numerical validation); obtained insertion gains (PFIG): mass-spring model (green), prediction method (red), exact gain (black)

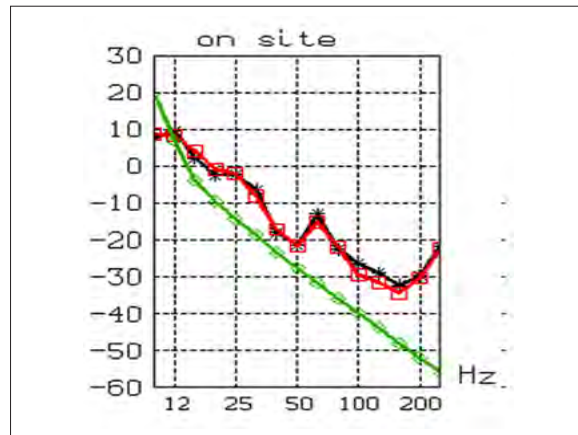


Fig. 4 : Configuration 2D bâtiment-sol (étude numérique) ; gains par insertion (PFIG) obtenus : modèle masse-ressort (vert), méthode de contrôle (rouge), gain exact (noir)
 2D building-soil configuration (numerical validation); obtained insertion gains (PFIG): mass-spring model (green), control method (red), exact gain (black)

Méthode de contrôle

La performance sur site peut également être exprimée à partir des vitesses vibratoires rms amont (côté fondations) et aval (côté superstructure) de part et d'autre du dispositif, et du module des mobilités des structures en présence, selon la formule :

$$PFIG \approx 10 \cdot \log \left(\frac{v_{\text{aval}}^2 (|Y_R|^2 + |Y_S|^2)}{v_{\text{amont}}^2 |Y_R|^2} \right) \quad (3)$$

Avec :

Y_R mobilité de la superstructure

Y_S mobilité de la fondation (infrastructure)

Le rapport des vitesses mesurées doit être corrigé d'un facteur qui dépend des mobilités des structures. Ce facteur est supérieur ou égal à 1, ce qui montre que le gain obtenu à partir du rapport des vitesses amont-aval sans correction est sous-estimé (l'atténuation est surestimée), sauf si la mobilité des fondations est très inférieure à celle de la superstructure, ce qui est loin d'être toujours le cas. La mesure des mobilités de fondations est possible en phase construction, avant pose des dispositifs et construction de la superstructure ; la mesure des mobilités de superstructure est plus compliquée, voire impossible (accessibilité réduite) ; alors une estimation des mobilités de structures semble être la bonne solution.

Comme pour la méthode de prévision, une validation numérique a été effectuée en 2D sur le même bâtiment simplifié. Les résultats montrent que l'équation (3) conduit à une bonne détermination de la performance du dispositif (voir Figure 4). L'estimation du facteur correctif est discutée dans la section suivante.

Validations expérimentales

Le but des validations expérimentales est double :

- Mesurer des mobilités de structure sur site, de façon à avoir quelques données typiques et surtout les comparer aux mobilités calculées avec le logiciel MEFISSTO de

façon à valider expérimentalement ces calculs ;

- Contrôler quelques sites en fin de construction pour voir la faisabilité de la méthode de contrôle développée et déterminer l'efficacité du traitement mis en place.

Mesure de mobilité de structures en cours de construction

Deux sites en construction ont fait l'objet d'une campagne de mesure. L'avancement des deux sites permettant de mesurer les mobilités des fondations (mobilité de la source Y_s) juste avant le début de la construction de la superstructure des bâtiments.

Les mobilités ponctuelles de fondation ont été mesurées suivant la norme ISO 7626-1 et -5.

Le type de fondation testé est le suivant :

- Site A : Semelle filante sur sol renforcé par inclusions -pieux-rigide
- Site B : Longrines appuyées sur semelles peu profondes.

Les mesures ont été effectuées en plusieurs emplacements des fondations.

Le calcul des mobilités a été effectué aux mêmes emplacements que ceux de la mesure en prenant en compte les caractéristiques mécaniques du sol (sol homogène « moyen » pour le site A et sol multicouches « mou » pour le site B). La comparaison des résultats de mesures et des résultats de la modélisation sur le logiciel MEFISSTO (voir Figure 5, page suivante) montrent que les mobilités calculées sont du même ordre de grandeur que les mobilités mesurées, sur la plage de fréquence 25-200 Hz, la précision étant de l'ordre d'un facteur 2, donc satisfaisante vu les simplifications du modèle et l'incertitude du sol. Ce résultat valide ainsi les calculs de mobilité par le logiciel.

Contrôle de sites en fin de construction

Deux sites de construction terminés, situés à proximité directe d'une voie ferrée et traités par la mise en œuvre de dispositifs anti-vibratiles, ont fait l'objet d'une campagne de mesures pour tester la faisabilité de la méthode de contrôle.

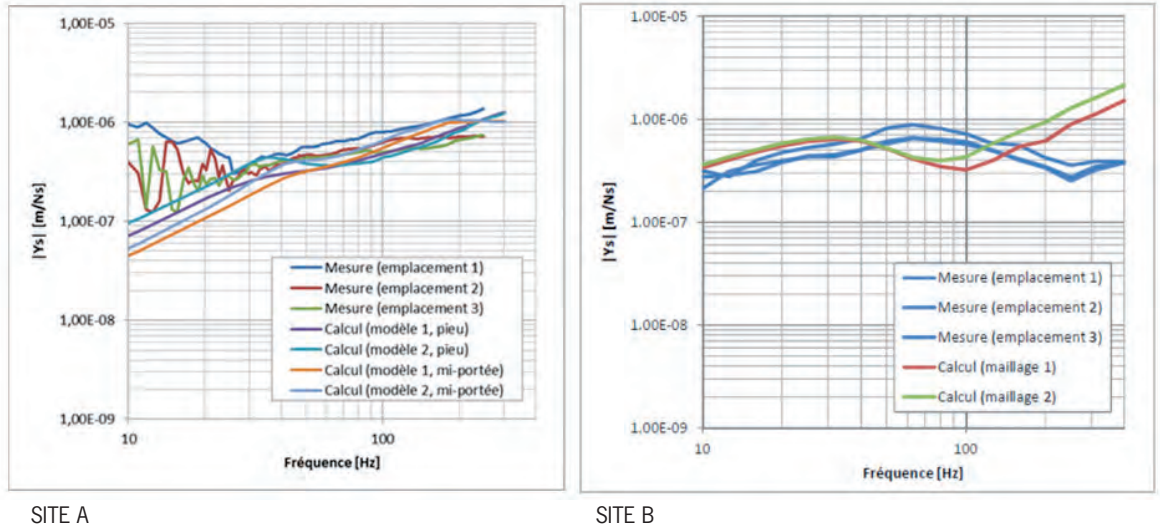


Fig. 5 : Mobilités mesurées des fondations des sites testés comparées aux mobilités calculées par MEFISSTO
 Foundation's Mobilities measured for both sites, compared with calculated mobilities using MEFISSTO

Sur les deux sites, les mesures de vitesses vibratoires amont/aval ont été faites sur des zones de traitement linéique (dispositifs distribués en tête de refends sur toute leur longueur) durant une vingtaine de passages de trains de façon à contrôler la performance du dispositif mis en place. Les mobilités des structures nécessaires à l'estimation du facteur correctif ont été estimées par calcul en 3D en termes de mobilités ponctuelles, les calculs de mobilité en 2D conduisant à des réponses irréalistes par rapport aux structures réelles 3D ; notons que, pour être exact, le calcul du terme correctif devrait être effectué dans le cas complexe d'un système source – récepteur linéique avec N points de contact.

Le premier site est un exemple de bâtiment muni de plots élastomères. Les vitesses amont/aval ont été mesurées en deux emplacements. Les différences de niveaux vibratoires mesurées sont présentées Figure 6 en termes de valeur moyenne et écart type, et montrent sans correction une atténuation d'environ 12 dB à partir de 40 Hz.

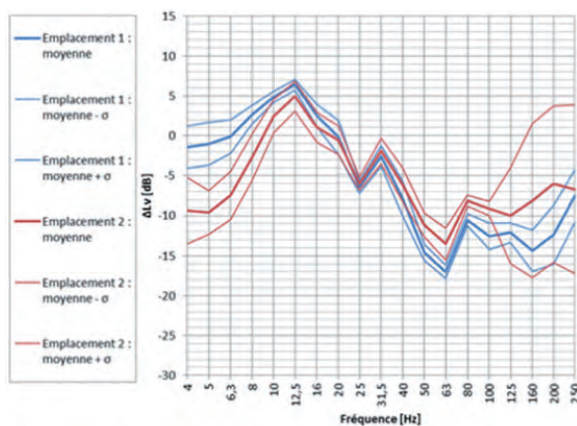


Fig. 6 : Différence (dB par 1/3 octave) des vitesses amont/aval site A
 Difference (dB 1/3 octave band) of velocity level above/below the system for site A

La performance du dispositif a été ensuite estimée, selon la méthode développée dans le projet, à partir de la différence des niveaux vibratoires mesurés corrigée d'un terme fonction des mobilités amont (fondations du bâtiment) et aval (bâtiment en superstructure) donné par l'équation (3). Ces mobilités ont été estimées par calcul, leur mesure directe étant quasi impossible (accessibilité très réduite) et biaisée (présence du dispositif d'atténuation). Et là est une difficulté majeure : des informations précises sur les fondations et les sols en présence ont été difficiles à obtenir, ce qui induit des incertitudes côté fondations (refend en tête duquel est monté le dispositif vibratoire + radier d'appuis).

La superstructure est plus classique (refends et dalles d'étage) et facilement modélisable (logiciel NASTRAN).

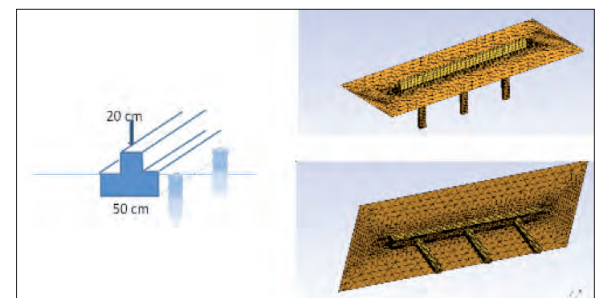


Fig. 7 : Fondations modélisées – Site A
 Modelization of foundation – Site A

Les mobilités ponctuelles calculées en 3D (Figure 8, page suivante) montrent sur la plage la plus sensible (25 - 100 Hz) une mobilité côté fondations plus grande que celle de la superstructure (facteur ~2), conduisant à un facteur correctif de l'ordre de - 7 dB, et à une atténuation du dispositif de 5 dB (au lieu des 12 dB du rapport des vitesses amont/aval) à partir de 40 Hz.

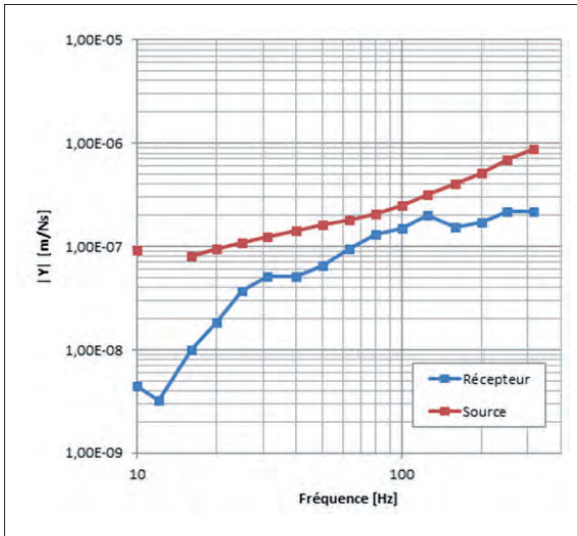


Fig. 8 : Mobilités (1/3 octave) amont (rouge) et aval (bleu) estimées par calcul (logiciel MEFISSTO 3D pour l'amont et NASTRAN pour la superstructure), Site n°1
Mobility (1/3 octave band) below (red) and above (blue) the system estimated by calculation (software MEFISSTO 3D for the mobility below the system and NASTRAN for the mobility above the system), Site n°1

Notons que ce rapport de 2 entre mobilités amont et aval est de l'ordre de l'incertitude et donc n'est peut-être pas significatif; des mobilités de même ordre conduiraient à un facteur correctif de - 3 dB et à une atténuation du dispositif de 9 dB ; notons également que d'après les calculs, l'écart entre les mobilités amont et aval croît aux basses fréquences.

Le deuxième site est un exemple de bâtiment muni de boîtes à ressorts. Les niveaux vibratoires amont/aval ont été mesurés en quatre emplacements. Les résultats de mesure de la différence de vitesse amont/aval sont données Figure 9 avec les écarts types correspondants et montrent sans correction une atténuation de l'ordre de 20 dB à partir de 20 Hz, fréquence plus basse que celle (40 Hz) obtenue sur le site précédent avec plots élastomères.

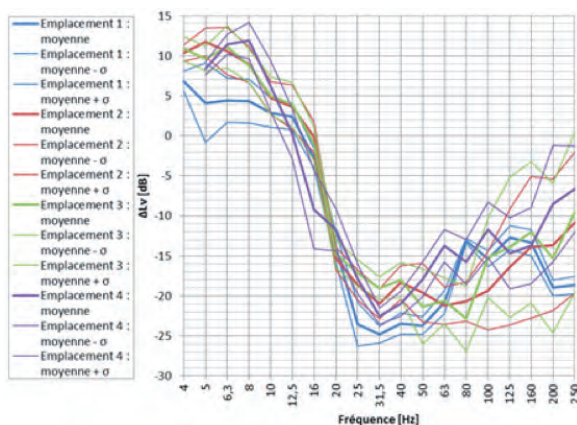


Fig. 9 : Différence (dB par 1/3 octave) des vitesses amont/aval, Site B
Difference (dB 1/3 octave band) of velocity level above/below the system for site B

La performance du dispositif est ensuite calculée (méthode identique à celle décrite pour le site A) pour un assemblage simplifié représentant les fondations : le refend en tête duquel est monté le dispositif vibratoire et les poteaux qui le soutiennent sur plusieurs niveaux et qui reposent sur des semelles ponctuelles peu profondes.

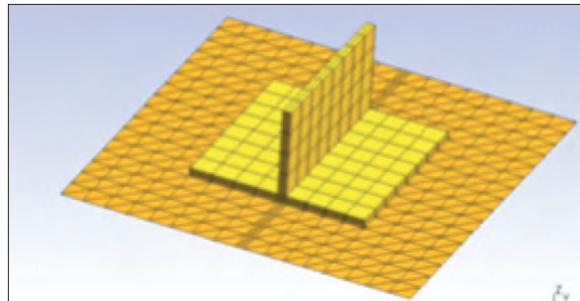


Fig. 10 : Fondations modélisées - Site B
Modelization of foundation - Site B

La figure 11 montre les mobilités amont calculées et leur variation en fonction du point considéré, qui sont du même ordre que celles calculées pour le site A (à l'exception d'une amplification sur l'intervalle 20-30 Hz) ; la superstructure étant de même type que le site A, les conclusions sont les mêmes : facteur correctif de l'ordre de - 7 dB, et atténuation du dispositif de 13 dB (au lieu des 20 dB du rapport des vitesses) sauf sur l'intervalle 20-30 Hz où la correction semble être plus importante.

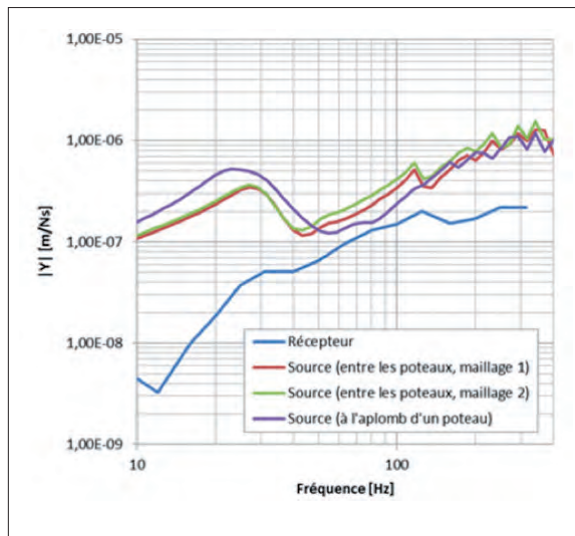


Fig. 11 : Mobilités ponctuelles amont (coté fondations) pour différents points d'application, estimées par calcul avec MEFISSTO 3D et comparées à la mobilité aval (bleu). Site B
Punctual mobility below the system for different locations, estimated by calculation using MEFISSTO 3D and compared to the mobility above the system (blue), site B

Remarques

Dans un premier temps il convient de préciser que les performances estimées ne sont malheureusement pas vérifiables expérimentalement sur site.

Toutefois, les deux sites testés montrent un rapport de vitesses amont/aval assez performant (transmissibilité en vitesse de 12 à 20 dB d'atténuation), diminué de 3 à 7 dB par un terme correctif estimé à partir des mobilités des structures en présence.

La valeur du terme correctif dépend de l'écart par fréquence entre la mobilité (ou admittance) de la superstructure et celle de l'infrastructure. Par conséquent, elle dépend des principaux éléments suivants :

- Nombre de planchers enterrés
- Nombre de planchers suspendus
- Type de structures
- Type de fondations
- Emplacement de la coupure dans le bâtiment

Cela montre l'importance d'une estimation correcte des mobilités de structures et le besoin d'une bonne connaissance des types de fondations et de structures enterrées associés aux différents types de superstructures (maison individuelle, petit collectif, bâtiment de grande hauteur) et types de sol. Dans ce projet, la précision est de l'ordre d'un facteur 2 sur les mobilités avec une incertitude sur les fondations et le sol et en utilisant des mobilités calculées de superstructure non validées expérimentalement et de précision inconnue. Il semble donc que la précision ne soit pas suffisante pour correctement estimer le facteur correctif nécessaire au contrôle sur site de la performance des dispositifs d'atténuation vibratoire.

Conclusions

Deux formules simplifiées ont été proposées pour prévoir et contrôler la performance des dispositifs d'atténuation vibratoire dans les bâtiments. Les données d'entrée sont des grandeurs robustes exprimées en 1/3 d'octave (vitesses vibratoires rms et modules de mobilité).

Une validation numérique simplifiée (en 2D) des deux méthodes proposées a été effectuée avec succès en utilisant le logiciel FEM/BEM MEFISSTO. Cette validation confirme que le modèle masse-ressort surestime la performance du dispositif. D'autre part, il apparaît que le rapport des vitesses amont/aval de la désolidarisation ne suffit pas pour contrôler la performance et ce rapport doit être modifié par un terme correctif, dépendant des mobilités de structures.

Le calcul numérique des mobilités de structure par MEFISSTO semble être fiable, ces calculs ayant été validés expérimentalement avec succès dans le cas de mobilités côté fondations, mesurables sur site avant construction de la superstructure ; les mesures (mobilités ponctuelles de fondations de type longrines) ont été comparées à des calculs en 3D. En revanche, aucune validation expérimentale de mobilité n'a pu être faite côté superstructure, une mesure directe étant quasi impossible (accessibilité très réduite) et biaisée (présence du dispositif d'atténuation). La mobilité au sommet d'un bâtiment avec dispositif d'atténuation vibratoire est sans doute similaire à la mobilité en aval du dispositif et sa mesure pourrait être utilisée pour valider ce cas.

Les deux contrôles sur site d'opérations terminées ont permis de tester la faisabilité de la méthode de contrôle, et ont montré la difficulté d'estimer la performance des

dispositifs d'atténuation sur site, l'incertitude dans l'estimation des mobilités de structures générant trop d'incertitudes sur la performance. Aucune validation des résultats n'a pu être faite, la méthode proposée étant la seule méthode permettant d'estimer la performance du dispositif installé in situ. Toutefois, un modèle empirique statistique de fonction de transfert vitesse vibratoire de fondations / vitesse de plancher aux étages habités existe [6] et provient de mesures de bâtiments non traités riverains de voies ferrées ; la mesure de cette fonction de transfert sur un bâtiment traité pourrait être comparée aux valeurs moyennes données par le modèle pour un bâtiment de même type et ainsi fournir une estimation de la performance du dispositif installé. Cette méthode n'a pas été testée, en particulier en raison de la difficulté d'accéder aux logements situés dans les étages une fois le bâtiment terminé.

Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un cofinancement de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

Références bibliographiques

- [1] Projet DIAVIBAT, « Prédiction et contrôle de la performance des dispositifs d'atténuation des vibrations ferroviaires dans les bâtiments », Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CSTB, ACOUPHEN et ACOUSYSTEM, convention n° 1217C0029, Décembre 2014
- [2] P. Jean, « Boundary and finite elements for 2D soil structure interaction problems », *Acta Acustica* 87, 2001, 56-66
- [3] P. Jean, C. Guigou and M. Villot, "A 2D 1/2 BEM model for ground structure interaction", *Building Acoustics* 11(3), 2004, 157-163
- [4] P. Ropars, "Modélisation des vibrations d'origine ferroviaire transmises aux bâtiments par le sol », Thèse Université de Paris Est / CSTB, décembre 2011
- [5] Projet VIBSOLFRET, « Vibrations dans le sol générées par le transport ferroviaire de marchandises », Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CSTB, SATEBA et la SNCF, convention n° 0766C0136, Novembre 2010
- [6] European project RIVAS on railway vibration, Deliverable D1.6, « Definition of appropriate procedures to predict exposure in buildings and estimate annoyance », 2012
- [7] A 3D FEM/BEM code for ground-structure interaction: implementation strategy including the multi-traction problem. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 59, 52-61, 2015