

Problématiques vibratoires dans la construction

Alain Fournol, Nicolas Souil
AVLS
18, avenue Charles de Gaulle
91400 Orsay
Tél : 01 64 46 08 08
Fax : 01 64 46 17 83
E-mail : avls@wanadoo.fr

Résumé
Ce texte aborde quelques problématiques vibratoires actuelles couramment rencontrées dans le domaine de la construction des bâtiments. Des résultats de mesure et de calcul sont présentés, concernant les différents sujets décrits : comportement dynamique des planchers, effet de la marche des piétons, suspensions antivibratiles de machines et de bâtiments.

Abstract
Several problems occurring in dynamic of building structures are dealt with in this paper : dynamic behaviour of floors, effect of pedestrian motion, filtering performance of mechanical equipment.

Caractérisation dynamique des planchers

Planchers mesurés

Dans le domaine qui nous intéresse ici, il est utile de disposer d'une représentation condensée des caractéristiques dynamiques essentielles d'un plancher : fréquence, raideur, amortissement modal. La représentation en admittance ("mobility" en anglais) est particulièrement appropriée. Il s'agit du quotient du spectre de réponse en vitesse vibratoire, par le spectre de force. Unités : m/s par Newton. Elle peut résulter aussi bien de mesures expérimentales réalisées (par impact au marteau instrumenté) sur une construction existante, que de calculs prévisionnels. La comparaison/superposition des informations prévisionnelles et expérimentales est possible, ce qui est particulièrement intéressant.

Voici un exemple de plancher mesuré :

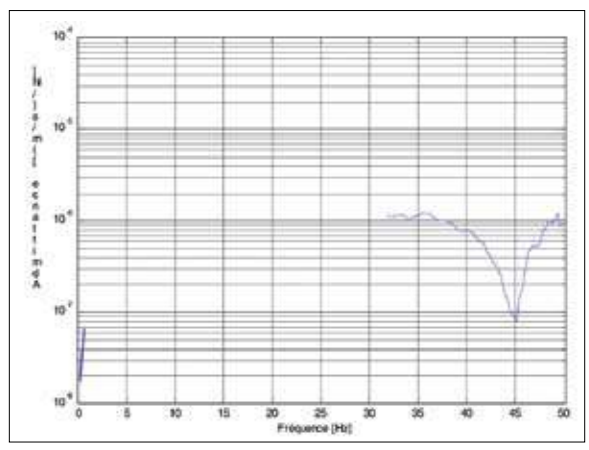


Fig. 1 : Admittance de plancher à dalles alvéolées, portée 11 m

Il faut noter que la mesure d'admittance est une mesure locale.

À condition de mesurer l'admittance au ventre du premier mode - qui est en général le centre du plancher - cette représentation permet en première approche et en négligeant l'effet des modes supérieurs d'avoir accès aux informations suivantes :

- première fréquence de résonance = 6,2 Hz,
- raideur statique et dynamique $K = 40.10^6$ N/m ($K = \square / \text{Admit}$ aux fréquences basses),
- Masse modale $M = 26$ tonnes ($M = K / \square^2$), à partir des données précédentes,
- amortissement modal 1^{er} mode = 1,2%, par méthode à - 3 dB ou curve-fit.

Le mode visible suivant se trouve à 9 Hz, ce n'est pas forcément le second mode puisque celui-ci présente normalement un nœud au centre du plancher.

Comme 6 Hz est très proche de l'harmonique 3 de la marche (1,6 Hz à 2,2 Hz selon la vitesse), un piéton qui produirait 30 N efficaces sur l'harmonique 3 - valeur réaliste - engendrerait une réponse de 5.10^{-4} m/s, soit 80 dBv (dB ref $5 \cdot 10^{-8}$ m/s).

En termes de solutions, la réponse dynamique du plancher sur ce premier mode peut être approchée en le modélisant par un système masse-ressort-amortisseur, de manière à bien évaluer l'influence des différents paramètres ; ceci sera réalisé plus loin.

L'information peut aussi être utilisée pour d'autres usages : l'application de 1 Newton efficace à 25 Hz produit ici environ 10^{-6} m/s.

L'effet d'une machine tournante peut donc être estimé si l'on connaît la force dynamique produite.

De façon générale, tous les types de planchers peuvent être représentés par un graphique de ce type sans nécessité de changer l'échelle des ordonnées (10^{-8} à 10^{-4} m/s/N). Les dallages et radiers massifs et rigides se trouvent vers le bas de la figure, les planchers souples et légers vers le haut.

Ci-dessous exemple :

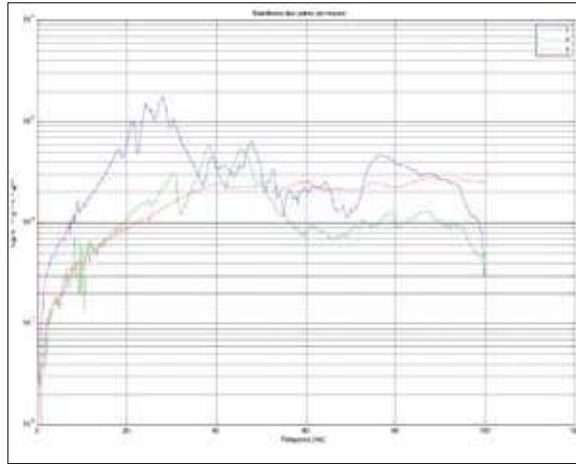


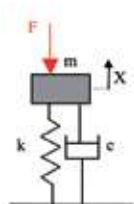
Fig. 2 : Admittances de planchers R-1, RdC et R+1

Les planchers dont l'admittance dépasse 10^{-5} m/s/N peuvent être des planchers «à problèmes» (au sens de la gêne vibratoire ressentie par les collaborateurs) car leur réponse est élevée pour une sollicitation faible.

En général les problèmes de gêne vibratoire peuvent survenir dans les cas suivants :

- coïncidence fréquentielle entre mode de résonance et excitation (c'est le cas du plancher représenté),
- trop faible amortissement (par exemple planchers mixtes non collaborants de grande portée, configuration paysagée : 0.4%),
- trop faible masse surfacique et/ou trop grande souplesse.

Système 1 ddl - Masse ressort



$$\text{Avec } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\text{et } \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_0}$$

exprimé en % de l'amortissement critique.

L'admittance, rapport de la vitesse sur la force s'écrit :

$$\frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{i\omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\zeta\omega\omega_0)}$$

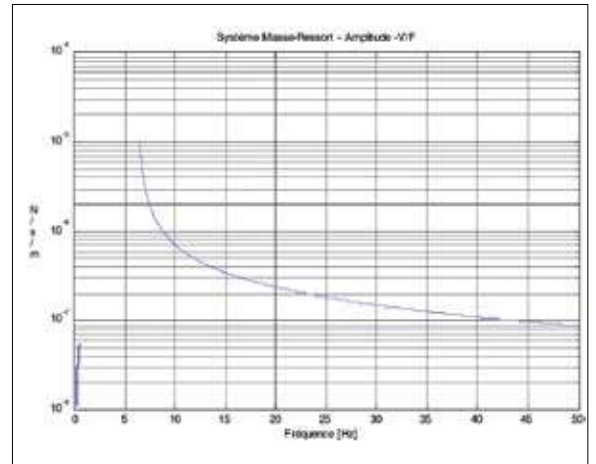


Fig. 3 : Admittance du système 1 ddl à 6,2 Hz

Niveaux vibratoires engendrés par les piétons sur les planchers

Les méthodes de conception actuelle des planchers utilisent des matériaux légers (structures mixte-poutres acier et planchers bac acier collaborant).

Le confort vibratoire lors de la marche d'individus en est rendu plus difficile à obtenir, que cela soit sur les planchers légers de petite portée (manque de masse) que sur les planchers de grande portée (possible coïncidence en fréquence et faible amortissement).

Les vibrations fortement ressenties lors du passage d'un groupe de personnes dans un couloir voire à l'étage supérieur provoquent couramment une nette perception vibratoire qui induit une forte inquiétude et parfois des doutes (injustifiés) concernant la pérennité de la structure.

Il est donc de plus en plus courant d'étudier les niveaux vibratoires liés à la marche des individus, en amont des projets. Cela passe par une étude fine du comportement vibratoire du plancher (modèle aux éléments finis) et par une modélisation des efforts induits par les piétons.

Les amplitudes des forces aux différentes harmoniques dépendent du poids de l'individu et du modèle de marche utilisé. Ces amplitudes sont exprimées en termes de DLF (Dynamic Load Factor), rapport entre l'amplitude de l'harmonique N et le poids du piéton ($F=M \cdot g$).

La littérature donne plusieurs exemples de modèles [1-4].

La figure 4 présente les DLFs associés au modèle de piéton défini dans l'ISO 10137.

La méthode de calcul la plus complète consiste à appliquer les efforts temporels de chaque pas aux différents points situés sur un cheminement de piéton représentatif.

La figure 5 donne l'exemple de 4 pas successifs pour une cadence de marche de 1,8 Hz ainsi que la somme de ces forces.

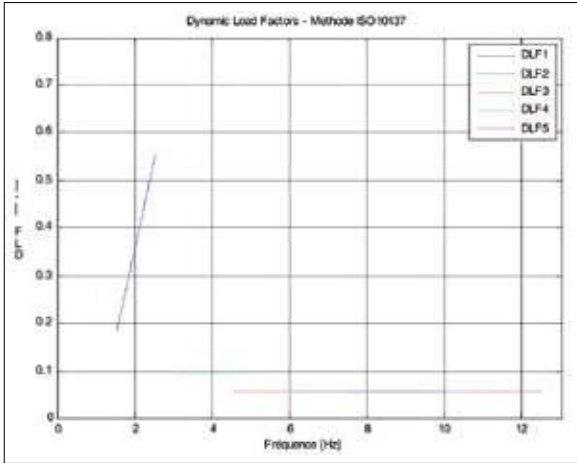


Fig. 4 : Dynamic Load Factors DLFs - ISO 10137

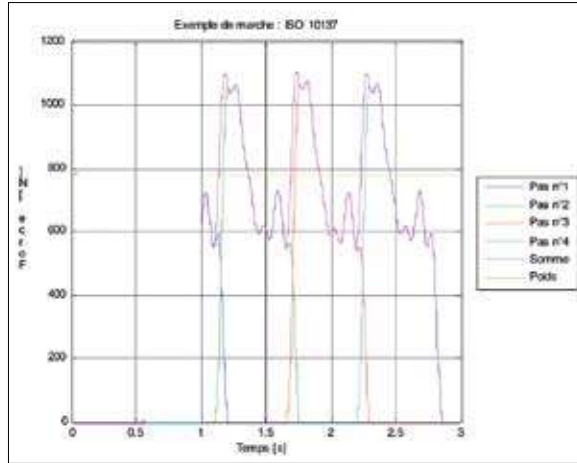


Fig. 5 : Exemple de marche - F=1,8 Hz - ISO 10137

La réponse vibratoire calculée en tout point du plancher, permet de situer le plancher dans une échelle de performance vibratoire (gabarits ISO 10137 définis en tiers d'octave de vitesse vibratoire).

La figure 6 présente une comparaison entre mesure et calcul dans la bande de fréquence [0-20] Hz.

On observe sur les signaux temporels une grande différence de niveaux crêtes.

Cette différence est principalement due au modèle d'excitation piétonnière selon ISO 10137 qui ne considère pas les harmoniques supérieures à l'ordre 5, ce qui est déjà élevé et correspond à 10 Hz pour une marche à 2,0 Hz.

Par contre, l'écart entre calcul et mesure est inférieur ou égal à 5 dB entre les tiers d'octave 1,25 et 10 Hz ce qui démontre la pertinence de ce modèle pour les harmoniques considérées.

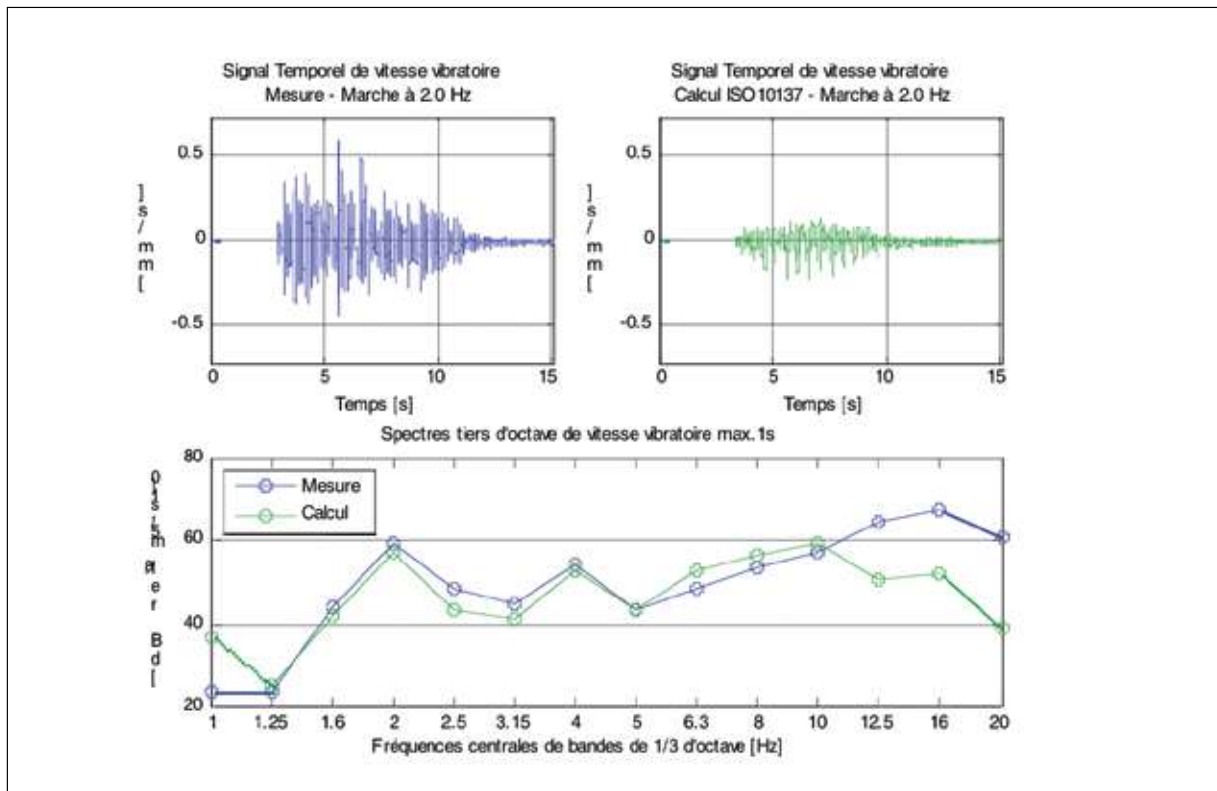


Fig. 6 : Mesure et calcul piéton - F=2,0 Hz

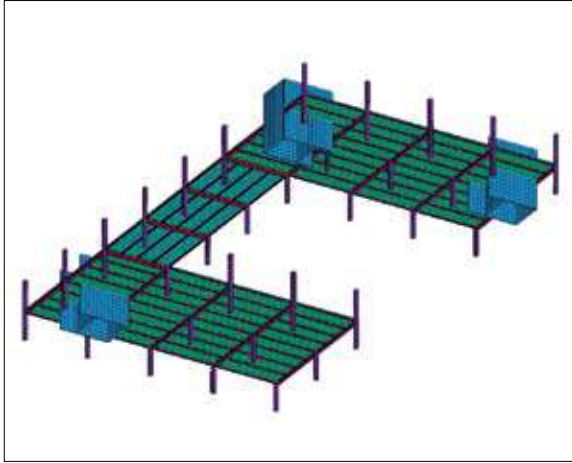


Fig. 7 : Calcul piéton – Modèle 3D de plancher

La figure 8 ci-dessous présente un autre résultat de calcul de marche d'un piéton. La répartition des maximum de spectres tiers d'octave en dB ref. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s est représentée.

On observe donc les niveaux vibratoires à proximité immédiate du piéton mais aussi ceux provoqués sur des parties voisines du cheminement.

Niveaux vibratoires engendrés par les circulations ferroviaires

Les circulations ferroviaires induisent des vibrations (contact roue-rail, par rugosité) qui se propagent via le terrain jusqu'aux fondations des bâtiments, puis aux plan-

chers et parois des espaces habitables, où une gêne peut être ressentie :

- par vibrations tactiles,
- par régénération acoustique des parois.

Si l'on excepte l'analyse de la source vibratoire proprement dite, cette problématique peut être divisée en plusieurs sous-ensembles :

- propagation dans le sol,
- interaction sol-structure,
- propagation dans la structure du bâtiment,
- amplifications de planchers,
- régénération acoustique dans le volume de réception.

La question qui se pose souvent à l'acousticien est de déterminer si un bâtiment à construire à proximité d'une voie ferrée peut être réalisé sans protection antivibratile ou non.

Des mesures vibratoires initiales peuvent être réalisées sur site, mais le bâtiment n'existant pas encore, le comportement vibratoire du sol est différent de ce qu'il sera après construction

Interaction sol-structure

La littérature technique est peu proluxe sur l'application qui nous intéresse ; cependant il est important d'obtenir une idée assez juste du niveau vibratoire futur sur les fondations du bâtiment : c'est un point de passage obligé des vibrations qui se prête bien à une vérification a posteriori.

Le graphique en figure 9 est une tentative de représentation du niveau vibratoire mesuré sur le terrain avant/après construction du bâtiment.

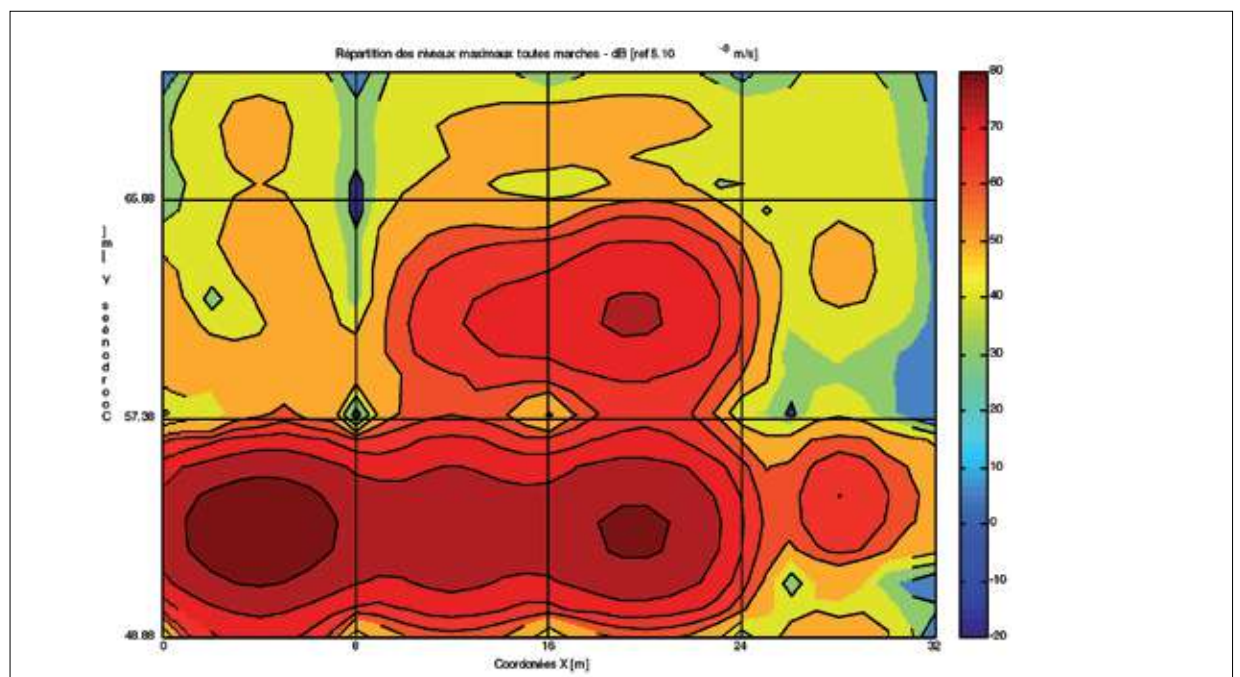


Fig. 8 : Calcul piéton - Répartition des niveaux vibratoires sur un plancher, pour un scénario de cheminement

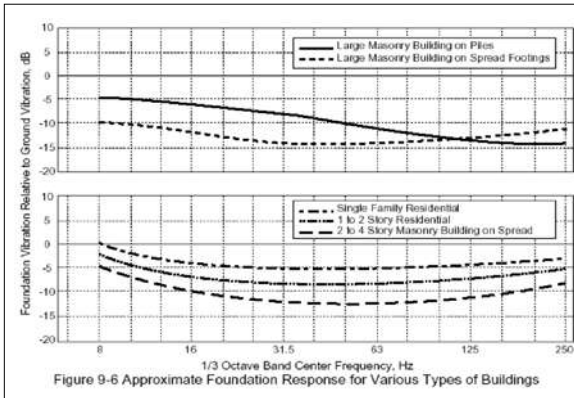


Fig. 9 : Extrait de « High speed ground transportation noise & vib impact assessment »

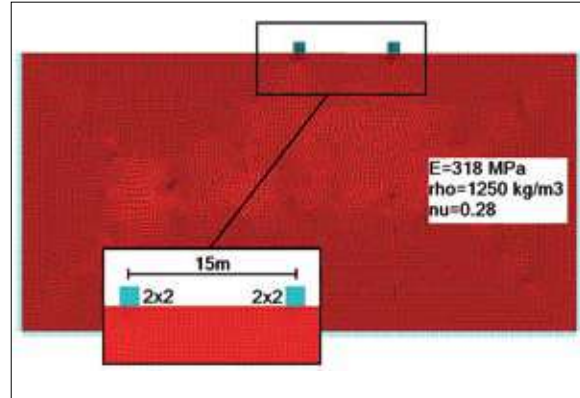


Fig. 11 : Modèle FEM 2D, source - récepteur

Les occasions de réaliser des mesures comparatives avant/ après construction sont rares, ci-dessous un exemple de comparaison de ces mesures, qui ne fait pas apparaître de contradiction avec le document précédent.

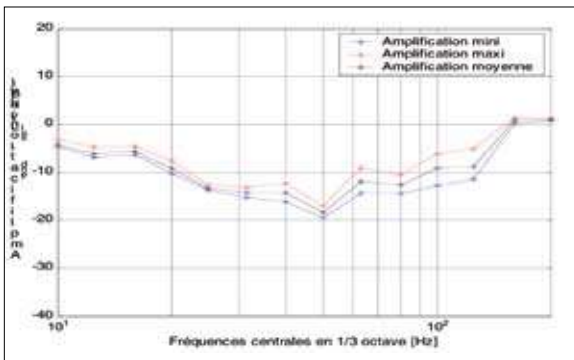


Fig. 10 : Extrait de « High speed transportation ground noise & vib impact »

Les facteurs influant sur l'allure de ces spectres sont :
 - la dimension de la fondation vis-à-vis de la longueur d'onde,
 - la masse et la rigidité de la fondation,
 - les paramètres mécaniques du sol.

Il est intéressant de tenter de recouper de tels effets par la modélisation. Le modèle 2D présenté ci-contre permet à titre d'exemple d'estimer les différences entre une mesure directe sur terrain naturel et la même mesure effectuée sur un massif de réception (en béton armé dans cet exemple, $h=L=2$ m) pour une même excitation appliquée sur un massif «émetteur» situé à 15 m.

Pour les hypothèses indiquées, on distingue une différence de niveau vibratoire à partir de 30 Hz, qui atteint un facteur 10 à 80 Hz.

Une mesure réalisée directement sur terrain naturel surestime donc nettement les niveaux vibratoires présents sur des fondations, et il faut donc tenir compte de facteurs correctifs importants.

Pour limiter les incertitudes il est préférable de mesurer sur une infrastructure existante, ou sur une dalle BA coulée à cet effet.

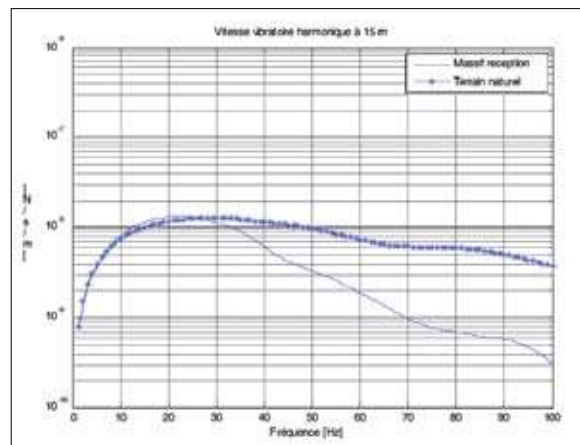


Fig. 12 : Niveaux vibratoires à 15 m du massif «émetteur» - avec et sans massif

Amplification de planchers

Les infrastructures d'immeubles sont solidaires du terrain, massives et très amorties.

Les niveaux vibratoires sous l'effet des circulations ferroviaires y présentent peu de foisonnement.

Par contre les niveaux vibratoires mesurés sur les planchers montrent une grande variabilité.

Ceci est dû aux résonances de ces structures – peu amorties – dont les fréquences de résonance peuvent coïncider ou non avec les excitations ferroviaires.

La figure 13, page suivante, montre la superposition de spectres 1/3 octave mesurés sur un même bâtiment : on constate une amplification de plus de 20 dB entre les fondations et le plancher du R+1.

Ces amplifications sont systématiquement rencontrées – cet exemple est tout de même dans la frange haute - dues aux premières fréquences de résonance de plancher et au faible amortissement.

En pratique on peut prendre sans risque en vertical l'hypothèse de 15 dB d'amplification sur la première fréquence de résonance de plancher (entre voile infra et plancher).

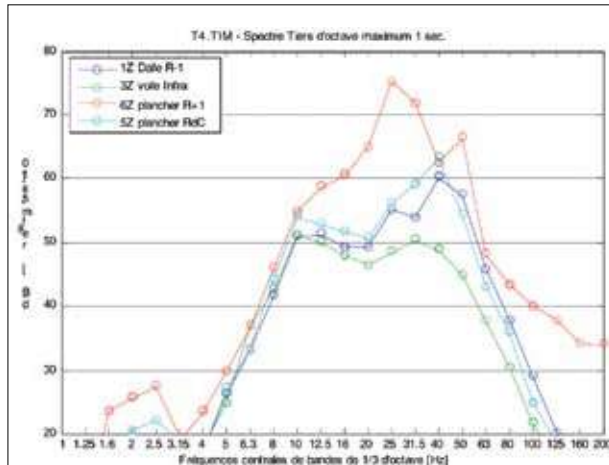


Fig. 13 : Spectre de niveau vibratoire vertical sur différentes parties d'un même bâtiment au passage d'un train

Les vibrations des parois du local en sous-sol induisent un niveau sonore dont le spectre 1/3 octave est représenté figure 13 ci-dessus.

Cette salle étant vide, inoccupée, répond fortement sur un mode acoustique à 40 Hz qui gouverne ici le niveau sonore en dB(A), cf figure 14.

L'amortissement des modes acoustiques à très basse fréquence est donc un paramètre à ne pas négliger.

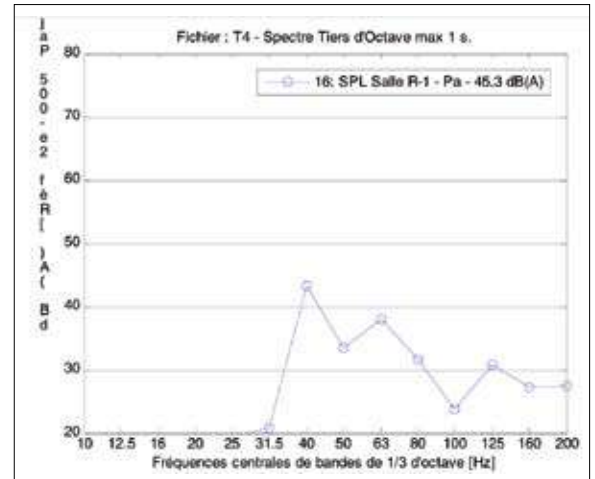


Fig. 14 : Spectre de niveau sonore (pondéré A) dans salle R-1.

Suspensions antivibratiles

Suspension de bâtiments

Pour des constructions soumises à des nuisances ferroviaires importantes, il est nécessaire de prévoir une suspension antivibratile du bâtiment.

Cette désolidarisation consiste à « séparer » les superstructures des infrastructures par insertion d'un produit résilient (Exemple : polyuréthane) ou ressorts (typiquement suspension à 3 Hz).

Le principe de base de l'isolation sismique repose sur la théorie du système masse ressort 1 ddl dont l'efficacité de filtrage ne dépend que de la fréquence de suspension et du taux d'amortissement (% de l'amortissement critique) associé.

Cependant la souplesse des infrastructures mais aussi celle des superstructures peut entraîner un écart par rapport à cette efficacité (très) théorique.

La figure suivante présente différentes courbes en fréquence d'amplification sismique (rapport entre les niveaux vibratoires sur la partie suspendue par rapport aux niveaux vibratoires imposés à la base, en vertical) :

- pour illustrer l'influence de la souplesse des infrastructures sont comparés le système 1 ddl à 3 Hz et ce même système posé sur deux poutres différentes (L=10 m). On observe une dégradation du filtrage aux fréquences de résonance des poutres et un filtrage plus efficace à certaines fréquences. Ce phénomène est également dépendant de la position du système 1ddl (au centre) vis-à-vis des noeuds des modes propres d'ordre pair de la poutre.

- pour illustrer l'influence de la souplesse des infrastructures, la comparaison de plusieurs structures suspendues est menée: un système 1 ddl et deux poutres (L=10 m). Chacun est suspendu à 3 Hz. On observe une forte dégradation du filtrage aux modes de résonance des poutres ainsi que sur toute la bande de fréquence d'étude.

Pour tous les calculs, l'amortissement est fixé à 1,5 % de l'amortissement critique.

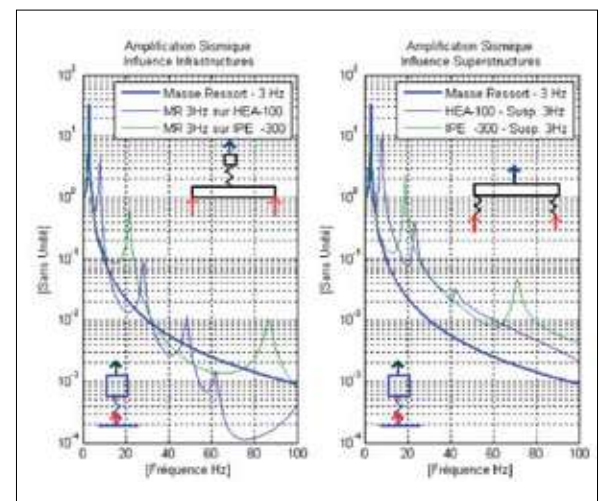


Fig. 15 : Influence de la souplesse des infrastructures et des superstructures - Amplification sismique

Équipements techniques en terrasse

La suspension des équipements en terrasse se heurte à deux problématiques : l'influence de la souplesse des châssis (généralement de type poutre acier IPE) et celle de la souplesse du plancher accueillant les équipements.

La figure suivante présente différentes courbes en fréquence de transmissibilité en force (rapport entre la force après filtrage et la force injectée, même équation que précédemment).

- pour illustrer l'influence de la souplesse des planchers sont comparés le système 1 ddl à 3 Hz et ce même système posé sur deux poutres différentes (L=10 m). La dégradation du filtrage (transmissibilité en Force) se situe aux fréquences de résonance des poutres.

- pour illustrer l'influence de la souplesse des châssis, la comparaison des transmissibilités en Force pour différentes structures suspendues: un masse-ressort et deux poutres (L=10 m), chacun suspendu à 3 Hz. On observe une forte dégradation du filtrage aux modes de résonance des poutres.

Pour tous les calculs, l'amortissement est fixé à 1,5 % de l'amortissement critique.

Références bibliographiques

[1] ISO 10137 : Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations - Bases du calcul des constructions - Aptitude au service des bâtiments et des passerelles sous vibrations , ISO 10137:20007 (E), Second Edition 2007-11-15

[2] P. Young, Improved floor vibration prediction methodologies, ARUP Vibration Seminar, October 4, 2001

[3] H. Bachmann, A.J. Pretlove, H. Rainer, Dynamic forces from rhythmic human body motions, in: Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines, Birkhäuser, Basel, 1995, Appendix G

[4] J.H. Rainer, G. Pernica, D.E. Allen, Dynamic loading and response of footbridges, Canadian Journal of Civil Engineering 15 (1) (1988) 66-71

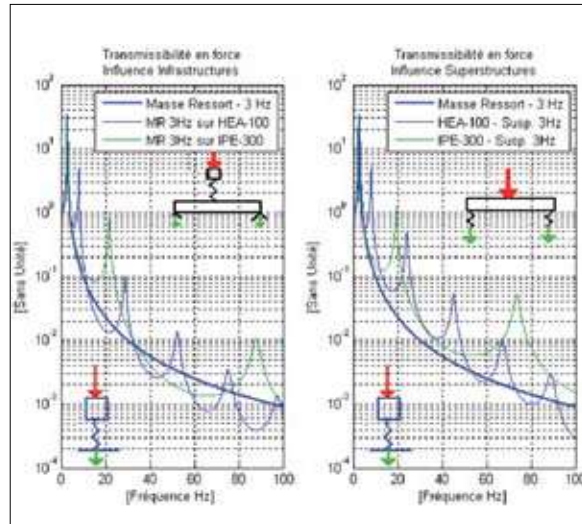


Fig. 16 : Illustration de l'influence de la souplesse des planchers et des châssis - Transmissibilité en force