

# Modèle de réponse vibratoire de planchers légers par méthodes analytiques

C. DÉPIERRE<sup>a</sup>, D. BARD<sup>b</sup>, J. NEGREIRA<sup>b</sup>, S. BAILHACHE<sup>a</sup>

a. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)  
24 rue Joseph Fourier 38400 Saint-Martin-d'Hères - France  
[clement.depierre@cstb.fr](mailto:clement.depierre@cstb.fr), [simon.bailhache@cstb.fr](mailto:simon.bailhache@cstb.fr)

b. Div. of Engineering Acoustics, Lund University, 22100 Lund - Suède  
[delphine.bard@construction.lth.se](mailto:delphine.bard@construction.lth.se), [juan.negreira@construction.lth.se](mailto:juan.negreira@construction.lth.se)

## Résumé :

*Pouvoir prédire le bruit transmis au sein des bâtiments est depuis plusieurs années une grande préoccupation. Cette problématique a été largement traitée pour les bruits aériens, mais reste plus complexe pour les bruits d'impacts. En effet les caractéristiques de l'excitation en termes d'amplitude et de contenu fréquentiel dans le cas d'un bruit d'impact dépendent autant de l'excitateur (la source de choc) que du récepteur (la paroi impactée). Or, ces bruits figurent en bonne place des sources d'insatisfaction citées par les occupants de bâtiments résidentiels, en particulier dans le cas de constructions légères. Des outils de prévision tel que la norme EN 12354-2 permettent de prédire les niveaux sonores induits par une excitation à la machine à choc mais ne donnent pas d'indication quant aux niveaux générés par un autre type d'excitation. Un outil de synthèse sonore serait alors idéal pour à la fois pouvoir prédire les niveaux sonores dus à diverses sources d'impacts mais aussi évaluer le ressenti des occupants par l'écoute.*

*Cette étude s'intéresse à simuler dans le domaine temporel la réponse vibratoire de planchers légers soumis à une excitation mécanique ponctuelle. Dans cette optique, un modèle analytique des modes de vibration d'une plaque mince orthotrope est utilisé. Pour des éléments constructifs homogènes, en béton plein par exemple, ce modèle permet de reproduire la réponse vibratoire temporelle avec un jeu limité de données d'entrées et sans nécessiter des ressources de calcul importantes. Cependant, les planchers légers sont souvent constitués de panneaux équipés de tasseaux (solives) ou bien de lames assemblées entre elles (cas des éléments en bois lamellé croisé, dits « CLT »). Dans cette étude, ces spécificités de conception sont prises en compte en modélisant les planchers par des plaques minces orthotropes, dont les caractéristiques sont obtenues par une méthode d'homogénéisation.*

*Après une présentation du modèle utilisé et des hypothèses sur lesquelles il s'appuie, deux applications sont présentées : la première concerne un plancher bois sur solives, et la seconde un plancher en CLT 3 couches. Les réponses vibratoires obtenues sont comparées à des résultats de mesures en laboratoire ou de simulations par éléments finis. Les résultats et perspectives sont ensuite discutés.*

## Abstract :

*The prediction of the noise transmitted by a building element has been a subject of interest for the last few years. The problematic of airborne sound is well known, but the case of structure-borne sound is more complicated. Indeed, the impact sound depends not only of the impact excitation but also of the resonant element (i.e. the floor). These impact sounds are often cited as a source of annoyance, particularly in the case of lightweight buildings. Some tools like the standard EN 12354-2 can be used to predict the sound pressure level induced by a tapping machine but these calculation methods can't predict the level generated by another impact source. A sound synthesis model would be therefore a good tool to not only predict the sound level induced by different impact sources, but also to assess the comfort of the users by performing listening tests.*

*This study aims to simulate in the temporal domain the vibration of floors under a mechanical point excitation. An orthotropic analytical plate model is used to synthesize these floors vibrations. This model presents a good relevance for homogenous floors like concrete floors. But lightweight floors are often composed of panels with stiffeners (joists) or cross laminated timber (CLT) which are non homogenous structures. In these cases, a homogenization method is used in order to use the above mentioned model.*

*After presenting the model and the hypothesis, two types of floors are considered: the first one is a wood floor with load-bearing beams, and the second one is a 3 layer CLT floor. The simulated vibration responses are compared to measurements or finite element simulations. Results and perspectives are then discussed.*

**Mots clefs : bâtiment; bruit d'impact; construction bois; homogénéisation; synthèse sonore**

## 1 Introduction

Pour s'adapter aux exigences de confort et de santé des usagers, il a été nécessaire de créer des indicateurs qui permettent de quantifier la qualité acoustique d'un ouvrage. Ces indicateurs font maintenant référence et sont utilisés pour vérifier la conformité avec les performances minimales définies dans la réglementation ou dans des référentiels de certification. Un grand intérêt est donc porté à leur prédiction et certains outils, comme la norme EN 12354 [1], permettent de les prédire de façon fiable [2]. Cependant les indicateurs utilisés pour les bruits d'impact, comme le niveau de bruit d'impact standardisé, sont des indicateurs qui rendent compte du niveau sonore généré par une excitation à la machine à choc qui n'est pas forcément représentative de bruits d'impact usuels [3]. De plus, ces indicateurs sont basés sur une performance objective de l'ouvrage, sans prise en compte de la subjectivité des occupants. Par ailleurs, ces indicateurs ne prennent généralement pas en compte les basses fréquences qui peuvent pourtant être ressenties comme gênantes [4].

Partant de ce constat, la conception d'un outil de synthèse sonore qui rendrait compte du son émis par un impact sur un plancher est envisagée. Un tel modèle comporte en effet plusieurs intérêts. Premièrement cela permet de prédire les niveaux sonores pour différentes sources de bruits d'impacts et différentes solutions constructives. Deuxièmement le fait de disposer de signaux temporels permet d'évaluer le ressenti des usagers par l'écoute, en incluant notamment les basses fréquences.

Le plancher est modélisé par un seul élément de type plaque. Des modèles de vibration de plaques existent mais ne peuvent pas prendre en général de signaux de force d'impact quelconques en donnée d'entrée [5]. Le modèle utilisé dans cette étude est un modèle analytique de plaque basé sur la théorie de Kirchhoff. Ce modèle donne accès à la réponse temporelle vibratoire du plancher avec un nombre limité de données d'entrée (force injectée, dimensions et paramètres mécaniques du plancher). Il fonctionne avec des hypothèses de plaques minces homogènes orthotropes ou isotropes. Une dalle en béton plein est l'exemple type d'un plancher pouvant être considéré comme homogène. Les planchers légers sont quant à eux rarement homogènes du fait de la présence de tasseaux, pourtant ce type de plancher est de plus en plus utilisé dans les constructions récentes et fait l'objet de nombreuses recherches [6,7]. Afin de pouvoir modéliser ces planchers légers, une méthode d'homogénéisation [8] est utilisée pour pouvoir se rapporter au cas d'un plancher homogène orthotrope équivalent.

Dans un premier temps le modèle, les hypothèses utilisées et la méthode d'homogénéisation sont présentés. Puis deux études de cas impliquant des planchers légers sont proposées. La première est une comparaison entre le modèle analytique et une étude en éléments finis sur un plancher bois sur solives. La seconde porte sur une comparaison du modèle analytique avec des mesures en laboratoire effectuées sur un plancher lamellé croisé (CLT).

## 2 Principe du modèle

Le modèle développé permet d'évaluer la vibration en un point du plancher en connaissant ses caractéristiques (dimensions et caractéristiques mécaniques), le signal temporel de la force injectée et la position (ponctuelle) d'application de cette force. Le modèle utilisé dans cette étude se base sur les hypothèses de plaque mince de la théorie de Kirchhoff.

Sous ces hypothèses, les fréquences propres d'une plaque simplement appuyée sur tous les bords sont obtenues en appliquant l'équation (1) [9].

$$f_{mn} = \frac{\pi^2}{\sqrt{\rho h}} \sqrt{\frac{D_x m^4}{L_x^4} + \frac{2D_{xy} m^2 n^2}{(L_x^2 L_y^2)} + \frac{D_y n^4}{L_y^4}} \quad (1)$$

Dans cette équation,  $\rho$  est la masse volumique,  $L_x$ ,  $L_y$  et  $h$  sont les dimensions de la plaque,  $D_x$  et  $D_y$  sont respectivement les modules de rigidité en flexion dans les directions  $x$  et  $y$  définis par la relation suivante :

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_x^2)} \quad (2)$$

Et  $D_{xy}$  est le module de rigidité en torsion défini par :

$$D_{xy} = D_x \nu_y + \frac{2Gh^3}{12} \quad (3)$$

Dans les équations (2) et (3)  $E_x$  et  $E_y$  sont les modules de Young du plancher dans la direction  $x$  et  $y$ ,  $G$  est le module de cisaillement,  $\nu_x$  et  $\nu_y$  sont les coefficients de Poisson dans la direction  $x$  et  $y$ .

Dans le cas d'une plaque isotrope, (1) devient :

$$f_{mn} = \sqrt{\frac{D}{\rho h} \left[ \left( \frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

Le signal temporel de vibration du plancher est ensuite simplement construit à l'aide d'une synthèse modale inspirée de [10] qui se résume dans l'équation (5).

$$h(t) = \frac{4}{M} \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{m=1}^{+\infty} A_{mn} e^{-\frac{t \ln(1000)}{T_{mn}}} \sin(2\pi f_{mn} t) \quad (5)$$

M est la masse totale du plancher,  $A_{mn}$  est un facteur d'amplitude modale dépendant de la position d'impact et de la position de mesure,  $f_{mn}$  est la fréquence propre du plancher défini par (1) et  $T_{mn}$  est le temps de réverbération structural calculé par rapport au facteur d'amortissement  $\zeta$  (6). Le facteur d'amortissement peut être trouvé grâce à des formules simplifiées comme définie dans la norme EN 12354 [1] par exemple, cependant ces formules sont limitées aux parois lourdes.

$$T_{mn} = \frac{1.1}{\zeta f} \quad (6)$$

L'équation (5) représente la réponse impulsionnelle du plancher en un certain point pour un point d'impact donné. Dans les faits la force injectée n'est jamais vraiment impulsionnelle. Dans ce cas la réponse vibratoire sera donnée par l'équation (7) :

$$v(t) = h(t) * YF(t) \quad (7)$$

Où  $F(t)$  est la force injectée au point d'impact et  $Y$  la mobilité du plancher en ce même point.

### 3 Méthode d'homogénéisation

La dénomination de planchers légers fait en général référence à des planchers en bois. Ce type de plancher peut être composé d'un solivage recouvert de panneaux ou de bois massif lamellé croisé. Dans tous les cas il s'agit de planchers non homogènes, et donc a priori non modélisables par le modèle présenté en section 2.

Pour pouvoir utiliser le modèle avec des planchers inhomogènes une technique d'homogénéisation est utilisée comme présenté dans [8]. Cette technique d'homogénéisation consiste à remplacer les éléments périodiquement hétérogènes par des éléments équivalents homogènes.

Pour calculer les nouveaux paramètres mécaniques de ce plancher équivalent, il est nécessaire de connaître les paramètres mécaniques de tous les éléments en amont et de pouvoir calculer leur moment quadratique.

L'épaisseur de la plaque homogénéisée est laissée à l'appréciation de l'utilisateur, il convient néanmoins de calculer une masse volumique équivalente pour que la masse totale du plancher homogénéisé soit égale à la masse du plancher réel.

Les coefficients de Poisson sont considéré nuls, comme suggéré par De Klerk [11].

Le module de Young équivalent dans une direction est donné par l'équation (8).

$$E_{x,eq} = \frac{1}{I_{x,eq}} \sum_{i=1}^N E_i I_{x,i} \quad (8)$$

Cette méthode d'homogénéisation ne nécessite donc que la connaissance de la géométrie, des modules de Young et des masses volumiques des différents éléments du plancher.

## 4 1<sup>er</sup> cas : Plancher bois sur solives

Dans cette partie, les résultats du modèle ont été comparés à ceux d'un modèle éléments finis issu d'une précédente étude [12]. Le détail de cette étude ne sera pas présenté ici, seulement les éléments nécessaires à la modélisation.

La structure étudiée est un plancher en bois associé à une paroi verticale afin de représenter un élément typique de construction légère.

La Figure 1 montre la structure étudiée. Le plancher est composé de solives qui supportent des panneaux de bois aggloméré, des tasseaux perpendiculaires aux solives sont fixés en dessous de celles-ci.



Figure 1 – Étapes de construction du système étudié

Finalement une paroi verticale en plaques de plâtre sur ossature bois est érigée au milieu du plancher. Le plancher est appuyé sur ses extrémités et en son milieu.

Les dimensions et caractéristiques de cette structure sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Résumé des propriétés et dimensions de la structure

	Modules d'élasticité [GPa]	Masse volumique [kg.m-3]	Dimensions [m <sup>3</sup> ]
Solives	E=8.5 (dans la longueur) G=0.7	432	9.3x0.045x0.22
Tasseaux	E=8.5 (dans la longueur) G=0.7	432	0.028x3.6x0.07
Panneaux	E=3	767	9.3x3.6x0.022

## 4.1 Hypothèses

Considérant la complexité du problème et le fait que le modèle élément finis est limité aux basses fréquences. Il a été choisi de ne comparer que les fréquences propres des premiers modes. Le modèle étudié étant un modèle de plaque, il n'est pas possible de prendre en compte la paroi verticale au milieu du plancher. Seule la moitié du plancher sera donc modélisée, en considérant tous les bords simplement appuyés.

Pour prendre en compte les effets des solives et des tasseaux, une méthode d'homogénéisation est utilisée (voir section 3). Les solives ont été prises en compte dans le calcul du module de Young dans la direction x et les tasseaux dans la direction y. La masse volumique est calculée de façon à ce que le plancher homogénéisé respecte la masse totale du plancher réel et les dimensions du plancher homogénéisé sont prises égales aux dimensions de la plaque d'aggloméré. Les dimensions et caractéristiques du plancher équivalent sont résumées dans le Tableau 2.

Un signal de force impulsionnel est considéré, cette force est appliquée ponctuellement au même endroit dans les deux modélisations.

Tableau 2 – Résumé des propriétés et dimensions de la structure après homogénéisation

$E_x$ [GPa]	$E_y$ [GPa]	$G$ [GPa]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\nu$ [-]	$h$ [m]	$L_x$ [m]	$L_y$ [m]
1480	9.34	0.7	1272.3	0	0.022	4.65	3.6

## 4.2 Résultats

Trois modes communs ont pu être identifiés entre les deux modèles. Ils sont montrés en Figure 2.a à 2.f. Certains modes présents dans le modèle éléments finis n'ont pas pu être retrouvés grâce à la modélisation analytique, notamment les modes impliquant la paroi verticale ou la seconde partie du plancher.

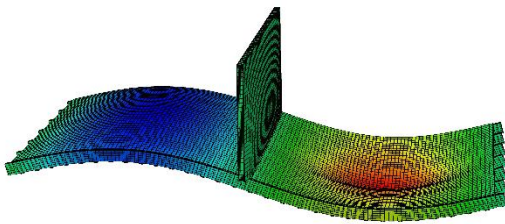


Figure 2.a -  $f=15.9\text{Hz}$

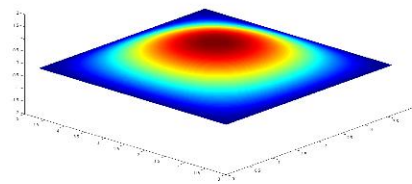


Figure 2.b -  $f=15.9\text{Hz}$

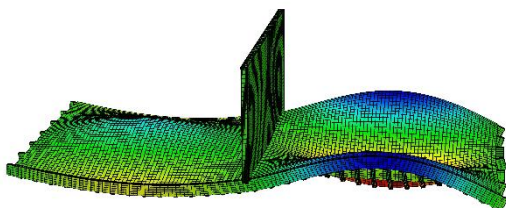


Figure 2.c -  $f=27.5\text{Hz}$

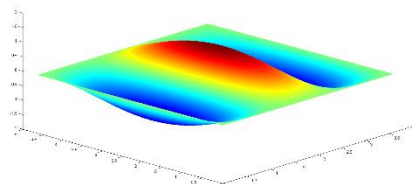


Figure 2.d -  $f=24.6\text{Hz}$

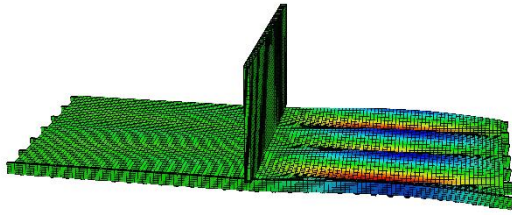
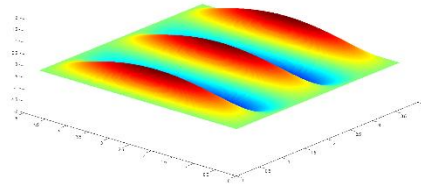
Figure 2.e -  $f=58.7\text{Hz}$ Figure 2.f -  $f=54.6\text{Hz}$ 

Figure 2 – Déformées modales pour le modèle élément finis (à gauche) et pour le modèle analytique (à droite)

Le Tableau 3 montre les valeurs des fréquences des trois modes identifiés pour le modèle éléments finis et le modèle analytique.

Tableau 3 – Fréquences propres [Hz] et pourcentage d'erreur

	Mode (1,1)	Mode (1,3)	Mode (1,5)
Modèle Analytique	15.9	24.6	54.6
FEM	15.9 (0%)	27.5 (11%)	58.7 (7%)

Les résultats montrent un bon accord entre les valeurs de fréquences propres du modèle éléments finis et du modèle analytique. La méthode d'homogénéisation semble fonctionner, au moins pour les premiers modes.

Cependant l'utilisation de ce genre de méthode d'homogénéisation peut impliquer des incertitudes quant à l'excitation. En effet, si l'excitation se fait sur une solive ou entre deux solives, la vibration résultante sera sûrement différente, il n'est pas possible de rendre compte de cet effet avec cette méthode.

Les résultats bien que cohérents sont assez limités du fait que le modèle éléments finis ne donne accès qu'aux fréquences et déformées propres d'une part et du fait des fortes hypothèses qui ont été faites pour modéliser une structure complexe avec un modèle de plaque d'autre part.

## 5 2<sup>ème</sup> cas : Plancher bois lamellé croisé (CLT)

Le plancher étudié dans cette partie est un plancher CLT composé de trois couches de dimensions latérales  $4.05 \times 2.95 \text{ m}^2$  et d'épaisseur totale 0.12 m. Le plancher est composé de deux parties assemblés par un joint à recouvrement et vissés entre elles.

Le plancher est en condition de laboratoire simplement appuyé sur tous ses bords et placé sur un matériau résilient. La Figure 3 montre le plancher en position dans le laboratoire.





Figure 3 – Plancher positionné en condition de laboratoire

## 5.1 Méthode de mesure

Cinq accéléromètres ont été placés aléatoirement sur le plancher, cinq positions aléatoires d'impact ont été également choisies. La Figure 4 montre les localisations de ces différents points sur le plancher. Un impact est effectué grâce à un marteau d'impact, la force injectée et les accélérations sont enregistrées sur deux secondes.

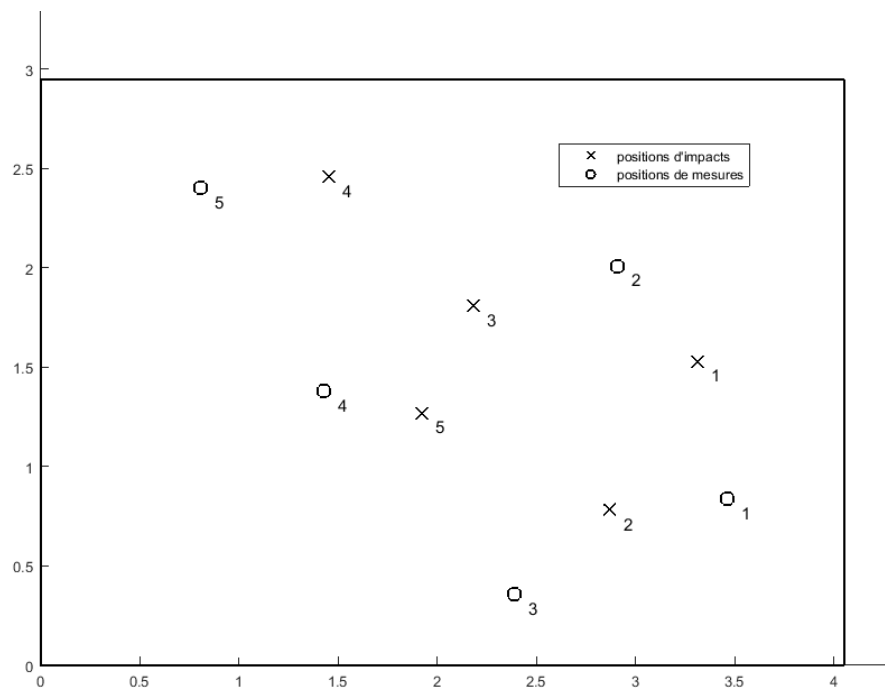


Figure 4 – Répartition des points d'impact et de mesure



## 5.2 Hypothèses

Les caractéristiques mécaniques du plancher n'ont pas pu être mesurées in situ. Des valeurs typiques de lame de bois utilisées pour la fabrication du CLT ont donc été utilisées [13]. Le plancher a ensuite été homogénéisé par la même méthode que précédemment (voir section 3). Les valeurs des paramètres considérés pour les planches élémentaires et pour le plancher homogénéisé sont récapitulées dans le Tableau 4. Les coefficients de Poisson sont toujours considérés comme nuls comme défini dans le modèle d'homogénéisation. Les dimensions du plancher homogénéisé sont les mêmes que celles du plancher réel.

Tableau 4 – Paramètres du plancher homogénéisé

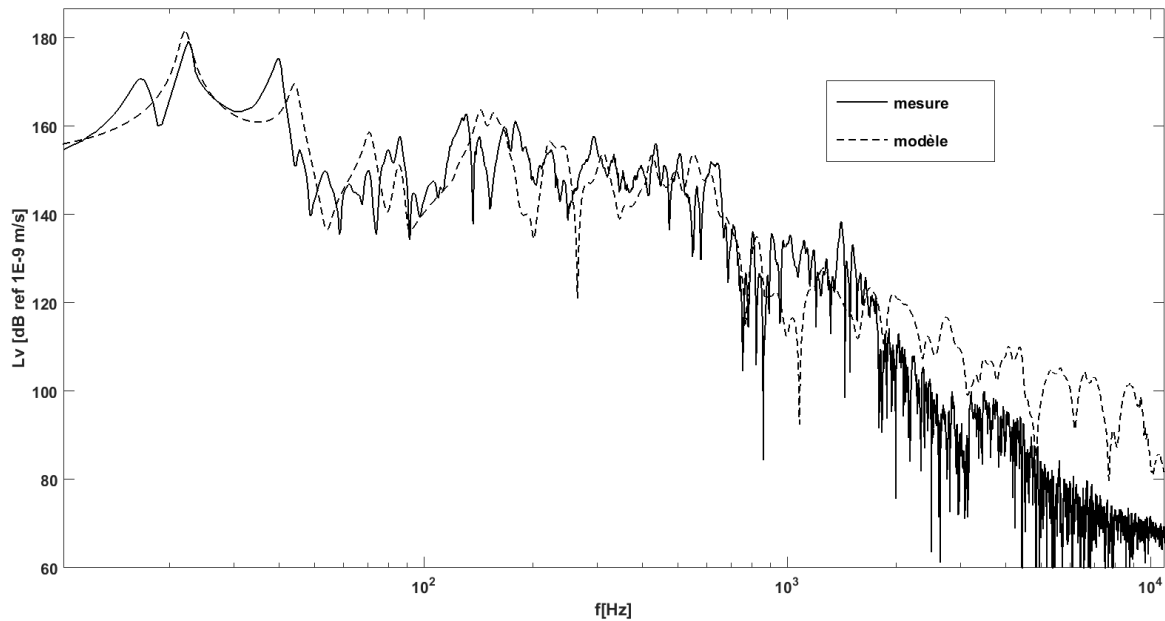
	$E_x$ [GPa]	$E_y$ [GPa]	$G$ [GPa]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
<b>Lame élémentaire</b>	11	0.37	0.69	420
<b>Plancher homogénéisé</b>	10.6	0.764	0.69	420

En l'absence de données mesurées sur un système considéré, un amortissement de 3% a été choisi arbitrairement. La réponse impulsionnelle calculée est convoluée avec la force enregistrée comme indiqué dans l'équation (7). Le modèle nécessite également de connaître la mobilité du plancher au point d'impact. Cette mobilité n'est pas recherchée ici mais une mobilité caractéristique de ce type de plancher pourrait être utilisée. Néanmoins, pour pouvoir comparer les mesures et les simulations, les signaux temporels de vitesse simulés sont normalisés par rapport à la valeur maximale du signal mesuré.

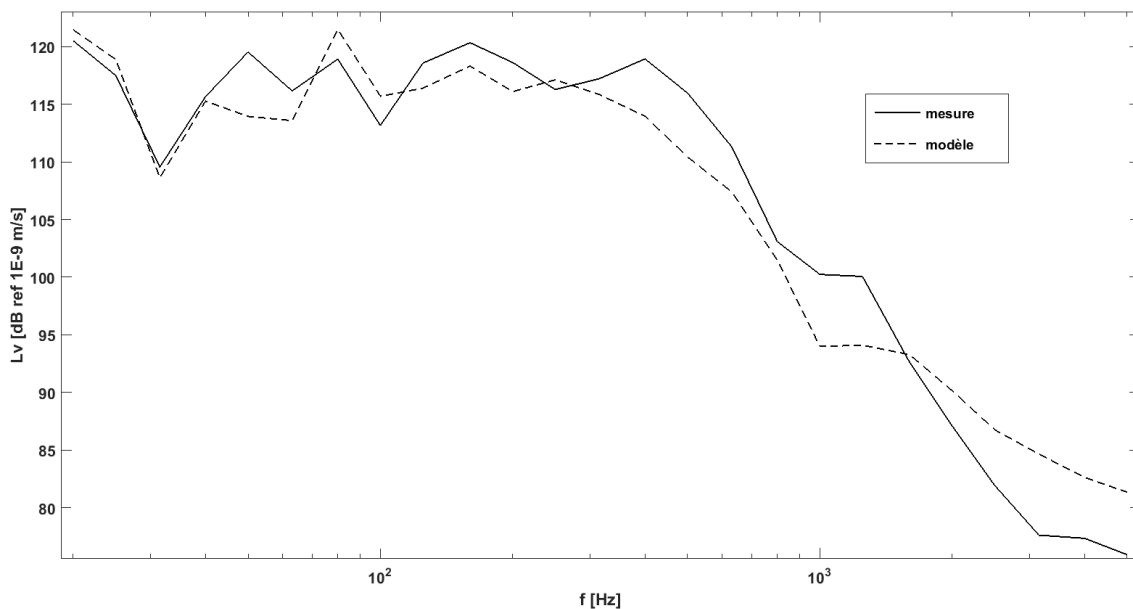
## 5.3 Résultats

La Figure 5 montre la transformée de Fourier du signal de vitesse mesuré et synthétisé pour un couple position d'impact/position de mesure. Le pic présent sur la mesure à 17Hz semble être un artefact de mesure probablement dû au fait que le résilient n'a pas pu être placé de façon satisfaisante sur tous les bords du plancher.

Sur le reste du spectre, les courbes présentent un bon accord. Les premiers modes notamment sont bien reproduits en termes de fréquence et d'amplitude. En moyenne fréquence un nombre important de modes ne sont pas reproduits par le modèle analytique ce phénomène peut être expliqué par l'utilisation des hypothèses de Kirchhoff qui ne prennent pas en compte les ondes de cisaillement. Finalement en haute fréquence le modèle surestime légèrement la réponse, cela est sûrement dû au fait que le facteur d'amortissement du modèle est considéré constant en fréquence, ce qui n'est pas le cas dans la réalité [14].



Les mesures de performances acoustiques des composants de bâtiments sont en général faites en bandes de tiers d'octaves. Pour vérifier si le modèle peut être efficace pour prédire ces performances, une analyse en tiers d'octave est donc effectuée. Le niveau vibratoire est calculé pour chaque bande de tiers d'octave pour chacun des 25 couples de positions d'impact/mesure, la moyenne de ces niveaux est ensuite calculée. Les spectres moyens obtenus sont présentés en Figure 6.



L'observation de ces courbes indique une différence de moins de 10dB pour toutes les bandes de tiers d'octaves. Les plus grands écarts se trouvant dans la bande de 50Hz puis au-dessus de 1600Hz. L'écart dans la bande de 50Hz s'explique par le manque de mode en basse fréquence repéré dans l'analyse en bandes fines. Dans les hautes fréquences, on peut expliquer l'écart qui se creuse entre le modèle et la mesure par une sous-estimation de l'amortissement pour ces fréquences. La précision pourrait ainsi être améliorée en utilisant un amortissement variant en fonction de la fréquence, plus proche de la réalité.

## 6 Discussion

Un modèle simple de vibration de plaque mince a été utilisé pour simuler la réponse vibratoire de deux planchers légers soumis à une excitation mécanique ponctuelle.

Les deux planchers étudiés ayant une structure inhomogène, ils ont été modélisés sous forme d'un Matériau homogène orthotrope équivalent dont les caractéristiques sont obtenues par une méthode d'homogénéisation. Dans les deux études, les fréquences propres des premiers modes ont pu être retrouvées. Néanmoins, la méthode d'homogénéisation a des limites, une fois le plancher homogénéisé il n'est plus possible de distinguer une excitation sur un raidisseur ou entre deux raidisseurs.

La comparaison des spectres mesurés et simulés pour le cas du plancher CLT est satisfaisante, les allures des courbes sont similaires. Certains modes ne sont pas reproduits par le modèle, cela peut être dû aux hypothèses de Kirchhoff qui néglige certains types d'ondes comme les ondes de cisaillement. L'écart entre les courbes se creuse en haute fréquence dû à une mauvaise évaluation de l'amortissement, cependant les niveaux vibratoires à ces fréquences sont beaucoup plus faibles et la gêne sonore proviendrait sûrement des premiers modes plutôt que de ces hautes fréquences.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de la Recherche et du Développement du CSTB ainsi que l'Université de Lund pour le financement de ces travaux.

## Références

- [1]NF EN 12354, Acoustique du bâtiment – Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments, (2000)
- [2]C. Guigou Carter, S. Bailhache, P. Ducruet, Prédiction de la performance acoustique des bâtiments dans les basses fréquences, Congrès français d'acoustique 2016
- [3]W. Scholl, Impact Sound Insulation: The Standard Tapping Machine Shall Learn to Walk! , Building Acoustics, Vol 8, N°4 (2001) 245-256
- [4]F. Ljunggren, C. Simmons, K. Hagberg, Correlation between sound insulation and occupants'perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound, Applied Acoustics Vol 85, (2014) 57–68
- [5]A. Chaigne, C. Lambourg, Time-domain simulation of damped impacted plates.I. Theory and experiments, Journal of the Acoustical Society of America, Vol 109 (2001) 1422-1432

- [6] C. Coguenanff, Robust design of lightweight wood-based systems in linear vibroacoustics, Thèse Université Paris-Est, 2015
- [7] F. Ljunggren, A. Ågren, Potential solutions to improved sound performance of volume based lightweight multi-storey timber buildings, *Applied Acoustics* Vol 72, Issue 4, (2011) 231–240
- [8] S. Lentzen, A. Koopman, Final proposals for prediction of relevant vibration quantities in buildings, COST FP0702, Chapter 1
- [9] A. W. LEISSA, *Vibration of plates*, Washington DC: NASA, 1969
- [10] C. N. J. Stoelinga and R. A. Lufti, Modeling manner of contact in the synthesis of impact sound for perceptual research, *Journal of the acoustical society of america*, vol. 130 EL62 (2011)
- [11] M.E. de Klerk, Improvement of the predictability of low frequency induced vibration response in timber based floor structures, STSM report, Edinburgh Napier University, 2010
- [12] J. Negreira, O. Flodén, D. Bard, Reflection and Transmission Properties of a Wall-Floor Building Element: Comparison between Finite Element Model and Experimental Data, in *Acoustics 2012*, Hong Kong, (2012)
- [13] N. Labonnenote, K.A Malo, Vibration properties of cross laminated timber floors, ICOSA 2010
- [14] S. Schoenwald, B. Zeitler, I. Sabourin, F King, Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems, *Internoise 2013*