

CFA/VISHNO 2016

Caractérisation structurale d'un équipement en laboratoire par méthodes directes et indirectes

S. Bailhache, M. Villot, N. Picard et C. Dépierre
CSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Hères, France
simon.bailhache@cstb.fr



LE MANS

Avec l'évolution des standards énergétiques et le développement des objets connectés, les équipements techniques sont de plus en plus présents dans les bâtiments. Nombre de ces équipements constituent des sources de bruit aérien et/ou structural. La maîtrise de l'environnement sonore nécessite des outils de prévision de ces bruits sur site. La norme européenne EN 12354-5 (actuellement en révision) permet de prévoir le niveau de pression acoustique généré dans un local, à partir des caractéristiques de l'équipement. Cette étude s'intéresse à l'obtention des caractéristiques nécessaires pour prévoir le bruit structural. La norme européenne EN 15657 de caractérisation des bruits structuraux d'équipements a été récemment révisée pour prendre en compte les équipements installés sur des parois légères. Le nouveau projet de norme permet une caractérisation en laboratoire par méthodes directes ou indirectes, ou bien sur site par méthode de substitution. Les résultats (mobilité, force bloquée et vitesse libre équivalentes de l'équipement) peuvent ensuite être utilisés comme données d'entrée dans le modèle de calcul de la norme EN 12354-5. Dans cette étude, la méthode de caractérisation en laboratoire est appliquée à une source structurale de référence. Les grandeurs caractéristiques de la source sont mesurées, d'une part, par méthode directe et, d'autre part, par méthode indirecte à l'aide de plaques réceptrices isolées. Les résultats obtenus sont comparés et discutés.

1 Introduction

Les équipements techniques, de plus en plus nombreux dans les bâtiments, constituent des sources potentielles de bruit pouvant être perçu par les occupants. Si, dans certains cas particuliers comme celui des bureaux ouverts, maintenir le bruit des équipements à un niveau raisonnable peut être mis à profit pour masquer les autres sources sonores, la conception acoustique des bâtiments doit généralement permettre de le minimiser afin d'éviter qu'il soit source de nuisances. Dans les deux cas, il est nécessaire de pouvoir prévoir le plus précisément possible le niveau sonore généré sur site à partir des caractéristiques des équipements et des structures les supportant. Parmi les outils existants, on peut citer la série de normes européennes EN 12354 [1], dont les parties 1 à 4 ont récemment été révisées de façon à prendre en compte les spécificités des bâtiments légers à ossature. La révision de la partie 5 relative aux bruits d'équipements devrait quant à elle débiter en 2016.

Le calcul du bruit généré sur site suivant cette méthode fait notamment appel aux puissances acoustique et structurale de l'équipement comme données d'entrée. La puissance acoustique d'une source sonore est supposée intrinsèque à cette source et sa mesure est relativement bien maîtrisée. En revanche, la puissance structurale est plus délicate à appréhender car elle dépend à la fois des caractéristiques dynamiques de la source et de celles du récepteur (la paroi qui supporte l'équipement).

La norme européenne EN 15657-1 [2] propose une méthode de mesure en laboratoire des caractéristiques de la source, toutefois limitée aux cas où l'équipement est installé sur une paroi lourde. Suite aux récents travaux du groupe CEN/TC126/WG07, cette norme a également été révisée (fin de l'enquête publique en mars 2016) de façon à pouvoir prendre en compte tous types de parois supports, lourdes comme légères. Le nouveau projet de norme prEN 15657 propose deux méthodes de caractérisation en laboratoire : l'une par approche directe, nécessitant de pouvoir suspendre l'équipement, et l'autre par approche indirecte, faisant appel à des plaques réceptrices. La nouvelle norme permet également d'effectuer une caractérisation sur site par méthode de substitution.

Les méthodes de caractérisation proposées sont basées sur une approche par mobilités, selon laquelle le niveau de puissance structurale installée (en dB référencés à 10^{-12} W) peut être estimé de la façon suivante :

$$L_{Winst} \approx 10 \lg \left[\frac{\operatorname{Re}(Y_{R,eq})}{|Y_{S,eq}|^2 + |Y_{R,eq}|^2} \right] + L_{vf,eq} - 60 \quad (1)$$

Où $Y_{R,eq}$ est la mobilité équivalente du récepteur, $Y_{S,eq}$ est la mobilité équivalente de la source et $L_{vf,eq}$ est le niveau de vitesse libre équivalente de la source (en dB référencés à 10^{-9} m/s). La vitesse libre correspond à la vitesse vibratoire aux points de contact lorsque la source est déconnectée du récepteur. L'Eq. (1) est une approximation valable quel que soit le rapport des mobilités de la source et du récepteur.

Dans le cas de parois réceptrices à mobilité faible par rapport à la source, la relation simplifiée suivante peut être utilisée :

$$L_{Winst} \approx 10 \lg [\operatorname{Re}(Y_{R,eq})] + L_{Fb,eq} \quad (2)$$

Où $L_{Fb,eq}$ est le niveau de force bloquée équivalente de la source (en dB réf. 10^{-6} N). La force bloquée, la vitesse libre et la mobilité de la source sont liées par la relation suivante :

$$L_{Fb,eq} = L_{vf,eq} - 10 \lg \left(|Y_{S,eq}|^2 \right) - 60 \quad (3)$$

A l'inverse, dans le cas où la mobilité du récepteur est grande par rapport à celle de la source, l'Eq. (1) peut être simplifiée de la façon suivante :

$$L_{Winst} \approx 10 \lg \left[\frac{\operatorname{Re}(Y_{R,eq})}{|Y_{R,eq}|^2} \right] + L_{vf,eq} - 60 \quad (4)$$

Une caractérisation complète d'un équipement doit donc permettre de déterminer sa mobilité équivalente mais également la force bloquée et la vitesse libre équivalentes, qui représentent son activité pour un régime de fonctionnement donné. Les différentes approches permettant d'estimer ces quantités sont brièvement décrites dans la section suivante. Les méthodes de caractérisation en laboratoire par approche directe et indirecte sont ensuite appliquées à une source structurale de référence. Les résultats en termes de vitesse libre, de force bloquée et de mobilité équivalentes sont présentés et comparés entre eux. L'utilisation de ces caractéristiques de l'équipement est

illustrée par des prévisions de puissance installée considérant deux parois fictives de mobilité connue.

2 Principes de la caractérisation

Le projet de norme prEN 15657 propose plusieurs approches pour obtenir les caractéristiques d'un équipement nécessaires à la prévision de la puissance installée sur site.

2.1 Méthode directe

La méthode dite directe consiste à mesurer la vitesse libre et la mobilité de la source, celle-ci étant déconnectée de toute paroi réceptrice et librement suspendue. La force bloquée est ensuite déduite des deux premières quantités. La caractérisation a donc lieu en 3 étapes :

- L'équipement étant en fonctionnement, des accéléromètres sont positionnés à chacun de ses points de contact et les vitesses vibratoires sont mesurées conformément à la norme ISO 9611 [3]. La vitesse libre équivalente correspond à la somme énergétique des vitesses vibratoires aux différents points de contact ;
- L'équipement étant arrêté, la mobilité ponctuelle est mesurée à chaque point de contact conformément à la norme ISO 7626-1 [4]. Puisque seul le module de la mobilité de la source est nécessaire, le projet de norme prEN 15657 permet de réaliser les mesures directement en tiers d'octave. La mobilité équivalente est prise comme étant la moyenne des mobilités ponctuelles aux différents points de contact ;
- La force bloquée équivalente est obtenue en utilisant l'Eq. (3).

Cette méthode ne considère que la composante normale des vibrations transmises par l'équipement à sa paroi support. Elle fait également l'hypothèse que la mobilité de la source est principalement due aux mobilités ponctuelle aux points de contact, négligeant l'éventuelle contribution des mobilités de transfert.

2.2 Méthode indirecte

Issue des travaux de Gibbs *et al.* [5], la méthode dite indirecte consiste à connecter l'équipement à des plaques réceptrices isolées. La moyenne spatiale de la vitesse vibratoire de la plaque réceptrice sous l'action de la source est estimée en positionnant plusieurs accéléromètres sur sa surface. La puissance structurale injectée dans la plaque réceptrice est déterminée grâce à la relation traduisant l'équilibre énergétique :

$$L_{W_s} = 10 \lg(2\pi f \eta m S) + L_v - 60 \quad (5)$$

Où η est le facteur de perte total de la paroi réceptrice, m est sa masse surfacique, S est sa surface, et L_v est le niveau de vitesse vibratoire moyennée sur sa surface.

Cette détermination de la puissance structurale permet, lorsque l'équipement est connecté à une plaque réceptrice de mobilité $Y_{R,low,eq}$ faible, d'utiliser l'Eq. (2) afin d'estimer la force bloquée équivalente. De la même façon, lorsque l'équipement est installé sur une paroi à mobilité $Y_{R,high,eq}$ élevée, l'Eq. (4) peut être utilisée pour estimer la vitesse

libre équivalente. La mobilité équivalente de la source est ensuite déduite en utilisant l'Eq. (3).

Cette méthode indirecte se base sur la réponse vibratoire de plaques réceptrices, qui peut être due à une excitation selon d'autres composantes que la composante normale en translation. Elle nécessite de disposer de plaques réceptrices dont les mobilités sont très différentes de celle de l'équipement caractérisé, qui est inconnue a priori. La mobilité équivalente des plaques réceptrices étant obtenue à partir de mesures de mobilités ponctuelles aux points de contact, cette méthode néglige également les éventuelles interactions dynamiques entre ces points.

Remarque : la mobilité équivalente étant déterminée à partir des quantités caractérisant l'activité de la source, il peut donc y avoir une estimation différente de cette mobilité pour chaque régime de fonctionnement.

2.3 Méthode de substitution

Dans le cas d'équipements ne pouvant pas facilement être suspendus ou installés sur des plaques réceptrices en laboratoire, le projet de norme permet d'estimer la puissance structurale installée sur site par méthode de substitution.

La paroi est calibrée à l'aide d'une source artificielle (pot vibrant ou marteau d'impact) positionnée au plus près des N points de contact avec l'équipement à caractériser. La puissance structurale injectée est estimée à partir de l'interspectre entre la force et la vitesse vibratoire au point d'excitation. La moyenne spatiale de la vitesse vibratoire de la paroi est estimée en positionnant plusieurs accéléromètres de façon aléatoire sur sa surface. La vitesse de la paroi sous l'action de l'équipement est ensuite mesurée et peut être utilisée pour déduire la puissance structurale installée selon la relation suivante :

$$L_{W,source} = L_{v,source} + 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_i^N 10^{(L_{W,cal,i} - L_{v,cal,i})/10} \right] \quad (6)$$

Où $L_{v,source}$ est le niveau de vitesse vibratoire de la paroi sous l'action de l'équipement, $L_{W,cal,i}$ et $L_{v,cal,i}$ sont respectivement le niveau de puissance injectée et le niveau de vitesse de la paroi lors de la calibration, lorsque la source artificielle excite la paroi au point de contact i .

Si la paroi support est une paroi lourde, sa mobilité aux points de contact peut être mesurée en présence de l'équipement pour déterminer la force bloquée équivalente selon l'Eq. (2).

Cette méthode de substitution constitue également une alternative à l'utilisation de l'Eq. (5) pour déterminer les puissances structurales injectées aux plaques réceptrices dans le cadre de la caractérisation indirecte. Elle permet ainsi de s'affranchir d'une détermination du facteur de perte par mesure du temps de réverbération structural.

3 Application à une source structurale de référence

Les deux méthodes de caractérisation en laboratoire sont appliquées à une source structurale de référence, dont la conception est inspirée d'une source similaire développée dans le cadre de comparaisons inter-laboratoires [6]. La source est composée d'une plaque de polyéthylène excitée par un pot vibrant, lui-même suspendu à une structure

métallique (voir Figure 1). Trois tiges filetées constituent les points de contact avec la paroi support. Un signal aléatoire alimente le pot vibrant. Un capteur de force placé à l'extrémité de la tige permet de vérifier la répétabilité de l'excitation.

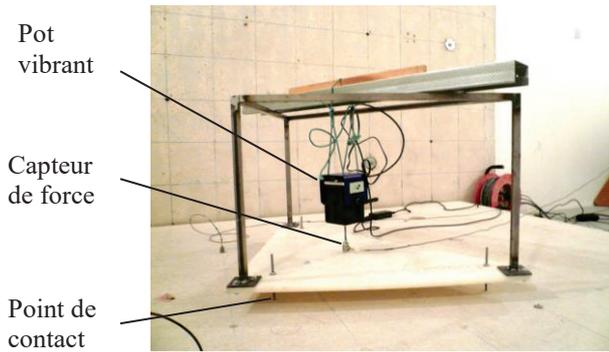


Figure 1 – Source de référence

Cet équipement est tout d'abord suspendu pour être caractérisé selon l'approche directe. Des accéléromètres sont fixés aux tiges filetées par l'intermédiaire de platines afin de mesurer la vitesse libre (voir Figure 2). Les accéléromètres sont ensuite remplacés par des têtes d'impédance, permettant de mesurer les mobilités ponctuelles avec une excitation au marteau.

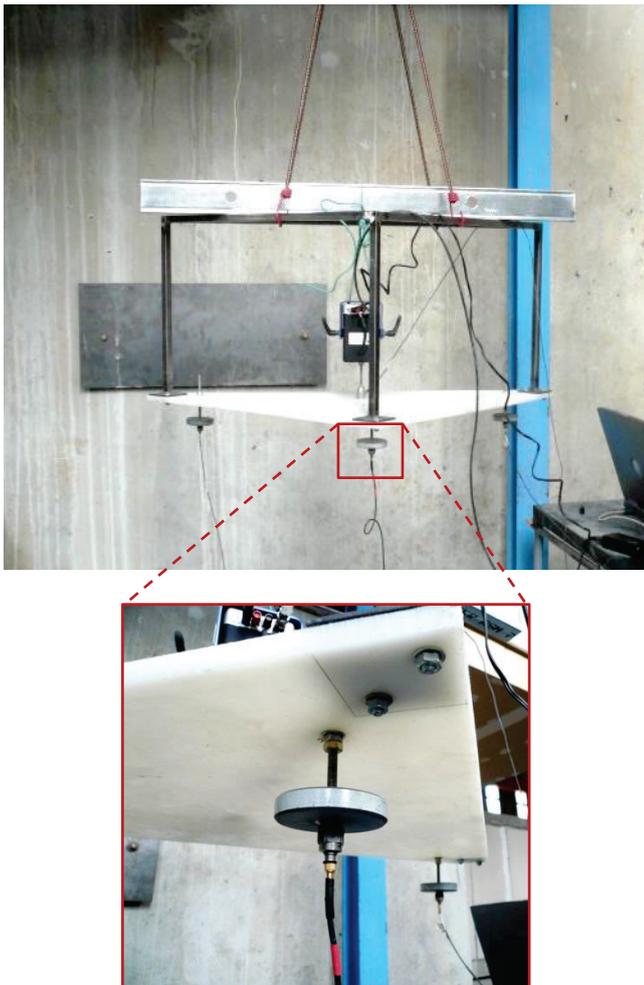


Figure 2 – Dispositif expérimental pour la mesure directe de la vitesse libre équivalente

Dans un second temps, l'approche indirecte est utilisée. L'équipement est tout d'abord installé sur une plaque réceptrice lourde en béton de 10 cm d'épaisseur et de dimensions latérales 2.8 x 2.0 m² (voir Figure 3). Les mobilités de la plaque réceptrice aux points de contact ainsi que son facteur de perte ont été préalablement mesurés, permettant d'estimer la force bloquée équivalente. L'équipement est ensuite monté sur une seconde plaque réceptrice en acier doux d'épaisseur 1.5 mm, de dimensions latérales 2.5 x 1.25 m² et perforée à 40 % (voir Figure 4). La mobilité de la plaque aux points de contact est mesurée en l'absence de l'équipement. La méthode de substitution est utilisée afin de déterminer la puissance structurale injectée par la source, donnée nécessaire au calcul du niveau de vitesse libre équivalente.



Figure 3 – Dispositif expérimental pour la mesure indirecte de la force bloquée équivalente



Figure 4 – Dispositif expérimental pour la mesure indirecte de la vitesse libre équivalente

La Figure 5 représente les niveaux de force bloquée équivalente déterminés selon les deux approches. Des écarts de l'ordre de 5 dB sont observés en moyenne, à l'exception des tiers d'octave 125 et 400 Hz où ces écarts atteignent 15 à 20 dB. De plus, la force bloquée déterminée par l'approche directe fluctue fortement, ce qui n'est pas le cas avec l'approche indirecte. Selon l'approche directe, la

force bloquée est estimée à partir de la mobilité équivalente, elle-même obtenue à partir des mobilités ponctuelles. Le fait de négliger les mobilités de transfert dans le calcul de la mobilité équivalente peut expliquer en partie les écarts observés [7]. Par ailleurs, l'approche indirecte est elle aussi soumise à plusieurs sources d'incertitudes : d'une part dans l'estimation de la moyenne spatiale de la vitesse de la paroi réceptrice à partir d'un nombre réduit de positions d'accéléromètres et, d'autre part, dans la détermination du facteur de perte de la paroi.

La Figure 6 représente les niveaux de vitesse libre équivalente déterminés selon les deux approches. Les deux courbes ont une allure similaire avec des pics importants à 100 et 400 Hz, avec également des écarts de l'ordre de 5 dB en moyenne.

Remarque : aucune donnée n'est disponible pour le tiers d'octave 2000 Hz avec l'approche indirecte, dû à des difficultés à calibrer et à mesurer la mobilité de la paroi réceptrice légère en hautes fréquences.

La Figure 7 représente les mobilités équivalentes de la source déterminées selon les deux approches et les mobilités des deux plaques réceptrices utilisées pour l'approche indirecte. On observe d'une part que les deux estimations de la mobilité équivalente de l'équipement sont assez proches, malgré les écarts parfois importants observés en termes de vitesse libre et de force bloquée.

D'autre part, on remarque que la mobilité de la plaque réceptrice légère est du même ordre de grandeur – environ 10^{-3} m/(N.s) – que celle de la source. Ceci remet en question l'utilisation de l'Eq. (4) pour estimer la vitesse libre équivalente par voie indirecte. En effet, cette formule simplifiée fait l'hypothèse que la plaque réceptrice est bien plus mobile que la source. La vitesse libre équivalente obtenue par approche indirecte est donc probablement sous-estimée. En revanche, la mobilité de la plaque réceptrice lourde, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6}$ m/(Ns), est suffisamment faible pour valider l'estimation indirecte de la force bloquée équivalente en utilisant la relation simplifiée donnée en Eq. (2).

D'après le projet de norme, la plaque réceptrice légère doit avoir une mobilité supérieure ou égale à 10^{-2} m/(N.s). Un exemple de réalisation permettant d'atteindre une mobilité de $2 \cdot 10^{-2}$ m/(N.s) est décrit en annexe. La plaque utilisée dans cette étude a des caractéristiques proches de celle du banc de test décrit dans la norme. Cependant, il n'a pas été possible de se procurer une plaque respectant exactement ces spécifications dans les dimensions voulues. L'épaisseur est donc ici légèrement plus forte (1.5 mm au lieu de 1.0 mm), le diamètre des perforations est plus important (8 mm au lieu de 6 mm) et le taux de perforation est moindre (40 % au lieu de 50 %). Le cumul de ces différences explique probablement l'écart constaté entre les valeurs attendue et mesurée de la mobilité de la plaque réceptrice (rapport 10 environ).

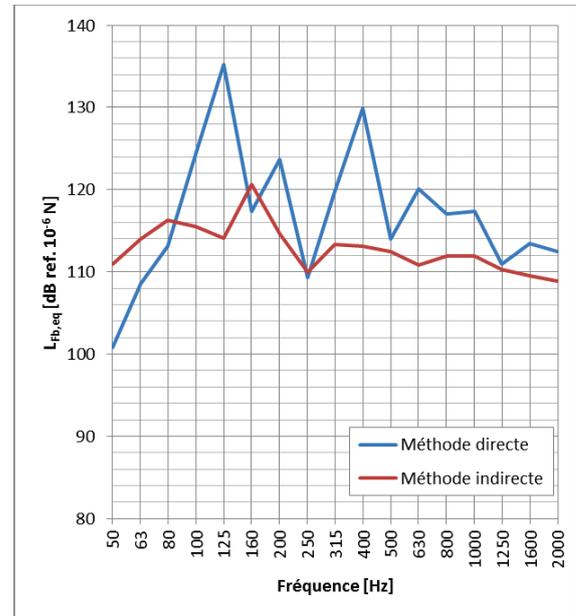


Figure 5 – Force bloquée équivalente de l'équipement

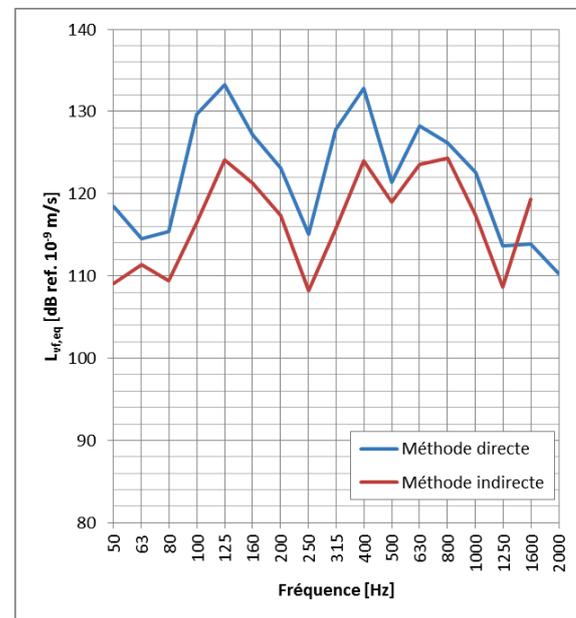


Figure 6 – Vitesse libre équivalente de l'équipement

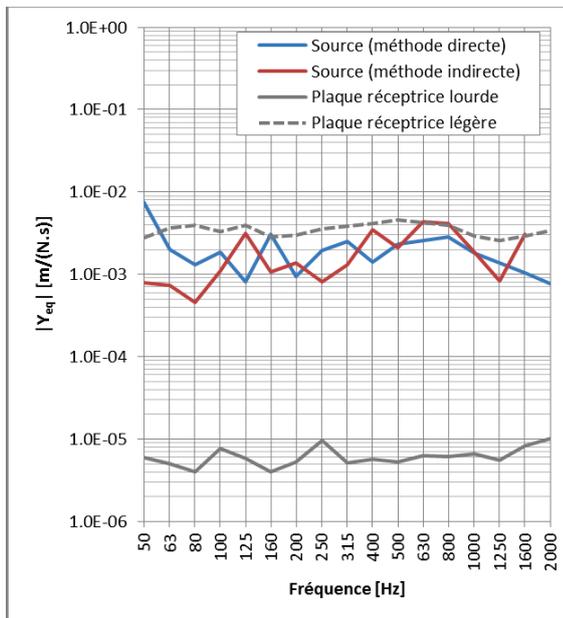


Figure 7 – Mobilités de l'équipement et des plaques réceptrices

4 Prédiction de la puissance sur site

Les caractéristiques de l'équipement peuvent être utilisées pour prévoir le niveau de puissance installée lorsque la source est connectée à une paroi support quelconque, à condition de connaître sa mobilité aux points de contact. Ceci permet la prédiction du bruit solidien généré sur site selon la norme EN 12354-5, ou bien la comparaison de plusieurs équipements en termes de puissance installée pour une même paroi support. Le projet de norme prEN 15657 décrit deux parois de référence dont la mobilité est supposée constante avec la fréquence :

- Une paroi lourde de mobilité $1.25 \cdot 10^{-6} m/(N.s)$, représentative d'un mur en béton de 20 cm d'épaisseur ;
- Une paroi légère de mobilité $10^{-3} m/(N.s)$, représentative d'éléments légers sur ossature bois.

La Figure 8 représente la puissance installée calculée en considérant ces deux parois de référence. Le calcul fait appel à l'Eq. (2) pour la paroi lourde et à l'Eq. (1) pour la paroi légère, en utilisant les caractéristiques de l'équipement obtenues avec les approches directe et indirecte.

La différence de mobilité entre la paroi légère et la paroi lourde se traduit par des écarts d'environ 25 à 30 dB sur la puissance installée.

Par ailleurs, pour une paroi donnée, la puissance calculée est également fortement tributaire des données d'entrée caractéristiques de la source. L'allure des spectres de puissance est semblable à celle des forces bloquées équivalentes obtenues selon les deux approches.

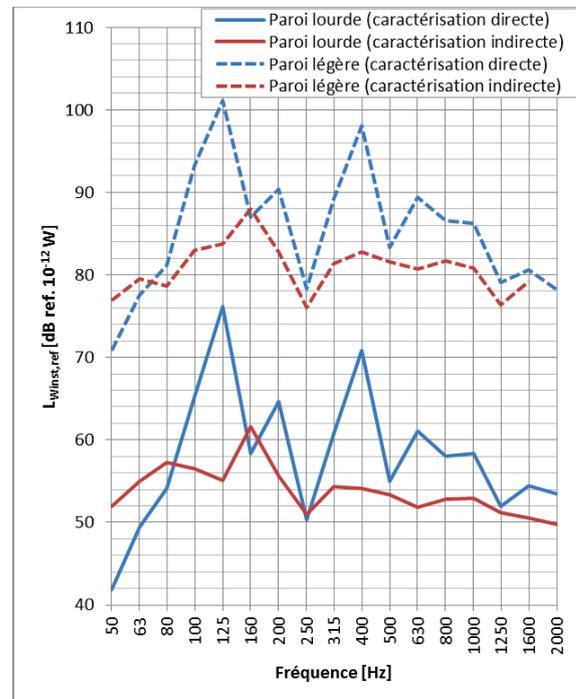


Figure 8 – Puissances structurales injectées dans deux parois fictives de référence

5 Conclusions et perspectives

Le projet de norme prEN 15657 propose deux approches distinctes pour caractériser des sources structurales en laboratoire. Cette étude constitue un premier retour d'expérience quant à l'utilisation de ces méthodes. Une troisième approche permet également la caractérisation d'équipements directement sur site par méthode de substitution. Cet aspect fera l'objet d'une communication ultérieure.

La première approche testée dans cette étude consiste à caractériser directement la source, celle-ci étant déconnectée de toute paroi support. Elle nécessite de pouvoir suspendre l'équipement pour placer des capteurs au niveau de tous ses points de contact. Le temps nécessaire à la caractérisation dépend donc directement du nombre de points de contact.

La seconde approche fait appel à une méthode de plaques réceptrices. La caractérisation étant faite à l'échelle de l'équipement dans sa globalité, cette approche peut s'avérer plus rapide à mettre en œuvre, a fortiori pour un équipement présentant de nombreux points de contact. Cependant, cette approche nécessite de disposer de plaques réceptrices dont les mobilités sont respectivement très élevée et très faible par rapport à celle de l'équipement, qui est inconnue a priori. Pour cette approche indirecte, le projet de norme donne des exemples de bancs d'essais permettant de couvrir une large gamme de mobilités de source. Cependant, au cours de cette étude, il n'a pas été possible d'obtenir une mobilité suffisamment élevée pour la plaque réceptrice légère. Des solutions seront recherchées pour atteindre la mobilité requise par le projet de norme et ainsi étendre la gamme d'équipements pouvant être caractérisés de façon fiable.

Ces travaux ont également mis en évidence des difficultés pratiques dans la calibration et la mesure de mobilités de plaques réceptrices en hautes fréquences. Ceci

constitue une limite supplémentaire à l'application de l'approche indirecte.

L'application de ces méthodes à un même équipement a produit des résultats différents. Les raisons suivantes peuvent expliquer les écarts observés :

- Pour l'approche directe, la limitation à la composante d'excitation en translation dans la direction normale à la paroi support ;
- Pour l'approche indirecte, les incertitudes liées à la mesure de moyenne spatiale de vitesse des plaques réceptrices, l'incertitude sur le facteur de perte de ces plaques, et une mobilité trop faible de la plaque réceptrice légère.

Par ailleurs, dans chacune des deux approches proposées, deux quantités parmi la vitesse libre, la force bloquée et la mobilité équivalentes de la source sont mesurées. La troisième caractéristique de l'équipement est ensuite déduite des deux autres. Une incertitude dans la détermination d'une des caractéristiques se répercute donc sur l'estimation de la troisième.

Les résultats des caractérisations ont été utilisés pour prédire la puissance structurale injectée dans deux parois fictives, l'une représentative d'une paroi lourde et l'autre d'une paroi légère. Les valeurs de puissance obtenues, sensibles à la mobilité de la paroi réceptrice, montrent également la nécessité de caractériser avec précision l'équipement considéré.

Les niveaux de puissance ainsi calculés peuvent ensuite être utilisés comme données d'entrée dans un modèle de prévision du bruit généré sur site. Cet aspect fait l'objet de la norme EN 12354-5, dont la révision doit débiter courant 2016.

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de la Recherche et du Développement du CSTB 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] NF EN 15657-1, *Propriétés acoustiques des éléments de construction et des bâtiments – Mesurage en laboratoire des bruits aériens et structuraux des équipements de bâtiment – Partie 1 : Cas simplifiés ou la mobilité de l'équipement est beaucoup plus élevée que celle du récepteur; prenant comme exemple les baignoires à brassage*, (2013).
- [3] ISO 9611, *Acoustique – Caractérisation des sources de bruit solidien pour estimer le bruit rayonné par les structures auxquelles elles sont fixées – Mesurage de la vitesse aux points de contact des machines à montage élastique*, (1996).
- [4] NF ISO 7626-1, *Vibrations et chocs mécaniques – Détermination expérimentale de la mobilité mécanique – Partie 1 : termes et définitions fondamentaux et spécification des transducteurs*, (2011).
- [5] B. M. Gibbs, N. Qi and A. T. Moorhouse, A practical characterization for vibro-acoustic sources in buildings, *Acta Acustica united with Acustica* **93**, 84-93 (2007).
- [6] J. Scheck, M. Chamaoun, H.-M. Fischer and B. M. Gibbs, Preparation of a round robin on the reception plate method to characterize structure-borne sound sources in buildings, in *Proceedings of Inter-noise*, Lisbon, Portugal, (2010).
- [7] B. M. Gibbs, Uncertainties in predicting structure-borne sound power input into buildings, *Journal of the American Society of America* **133**, 2678-2689 (2013).