

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Mesure et prédiction du bruit de pluie sur des systèmes multicouches

Jean-Baptiste Chéné¹, Catherine Guigou-Carter², Rémy Foret¹, Mikkel Langager Larsen³

¹CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 02, {remy.foret, jean-baptiste.chene}@cstb.fr

²CSTB, 24 Rue Joseph Fourier, 38400 Saint Martin d'Hères, catherine.guigou@cstb.fr

³VELUX, Industrivej 19C, 8752 Østbirk – DK, mikkel.l.larsen@VELUX.com

L'évaluation du bruit généré par la pluie sur une couverture ou un élément de couverture a été normalisée récemment au travers de la norme NF EN ISO 140-18 (mars 2007). Trois ans après sa publication, nous souhaitons faire au travers de cet article une mise en perspective en trois points sur cette caractéristique acoustique. Dans un premier temps, nous nous attacherons à discuter la méthode d'essai en elle-même au travers d'une collaboration expérimentale entre la société VELUX et le CSTB. Ensuite, nous donnerons quelques points de repère en termes de niveau de performance pour différents éléments de couvertures types. Nous conclurons par la présentation d'une méthode de prédiction du niveau de bruit de pluie pour des éléments multicouches.

1 Introduction

Bien que non réglementée en France comme dans la majorité des autres pays, la problématique du bruit généré par la pluie reste cependant une préoccupation majeure pour certains usagers et donc certains industriels. Que ce soit pour des raisons anecdotiques comme la productivité des vaches laitières par temps de pluie sous différents types de couvertures agricoles, ou pour améliorer les conditions de sommeil dans les chambres sous comble en présence de fenêtres de toit, le besoin d'évaluation de ce paramètre ne date pas d'hier. Chaque laboratoire a, dans un premier temps, développé sa propre approche de la problématique : un certain nombre de laboratoires ont utilisé une méthode à base de balles de pingpong pour représenter l'impact de la pluie. Puis un groupe de travail international a travaillé à partir des années 2000 sur une norme d'essai plus appropriée, notamment en ce qui concerne la recherche d'un mode d'excitation plus réaliste. La société VELUX comme le CSTB ont été très actifs dans ce groupe de travail, nos travaux de recherches respectifs ainsi que d'importantes campagnes d'essais ont permis d'affiner la norme NF EN ISO 140-18 [1] qui a finalement été publiée en mars 2007 (pour la version française). Ayant cependant constaté quelques divergences entre nos deux laboratoires (VELUX et CSTB) lors d'une campagne en 2006, nous avons souhaité approfondir nos travaux afin de nous assurer d'une meilleure reproductibilité de la méthode. Le premier chapitre de cet article montrera comment, malgré des laboratoires de conceptions très différentes (chambre semi-anéchoïque / mesures intensimétriques chez VELUX et chambre réverbérante / mesure en champs diffus au CSTB), il est possible, moyennant quelques précisions supplémentaires dans la norme, d'obtenir un niveau satisfaisant de reproductibilité.

Cette mesure étant relativement récente, il n'y a pas encore beaucoup de données dans le domaine, nous présenterons donc dans un second temps quelques éléments de repère sur des produits standards.

Enfin, nous nous attacherons à présenter une approche prédictive de ce phénomène pour des systèmes multicouches. Il s'agit ici d'une approche par matrice de transfert dont la spécificité porte bien entendu, sur le mode

d'excitation spécifique que nécessite d'implémenter la pluie.

2 Discussion sur la norme d'essai ISO 140-18

L'essentiel de ce que nous allons discuter ci-dessous porte sur le moyen de fiabiliser le mode de génération de la pluie. Commençons donc par décrire ce dispositif. Celui-ci doit permettre de générer un type de précipitation définie dans le Tableau 1 ; pour des raisons pratiques, nous avons décidé de ne retenir que le niveau de précipitation « Forte » (meilleure dynamique de mesure, un seul dispositif à gérer et moins de confusion sur le marché).

Type de précipitation	Taux de précipitation mm/h	Diamètre volumétrique moyen des gouttes mm	Vitesse de chute m/s
Intense	15	2,0	4,0
Forte	40	5,0	7,0

Tableau 1 : Paramètres caractéristiques pour la production de pluie artificielle (correspondant au Tableau N°2 de l'ISO 140-18)

Nous suggérons d'ailleurs d'opter pour une définition simple et contrôlable de la notion de « Diamètre volumétrique moyen des gouttes ». Une proposition pourrait être d'assimiler une goutte à une sphère et d'évaluer ainsi le diamètre moyen de celle-ci en mesurant le poids ou le volume d'un nombre de gouttes donné. L'annexe 1 de la norme décrit le dispositif permettant de générer des précipitations conformes au Tableau 1. Le Tableau 2 et la Figure 1 en font ressortir les principales caractéristiques.

Tableau A.1 — Spécifications

Paramètres du réservoir à embase perforée	Précipitation intense	Précipitation forte
1 Diamètre des orifices	0,3 mm à 0,5 mm	1 mm
2 Nombre d'orifices par unité de surface	Approximativement 25 m ⁻²	Approximativement 60 m ⁻²
3 Hauteur de chute	Approximativement 1 m	Approximativement 3,5 m
4 Diamètre volumétrique moyen des gouttes	2 mm	5 mm
5 Répartition granulométrique des gouttes	Uniformité maximale	Uniformité maximale
6 Vitesse de chute à la hauteur de chute	4 m/s	7 m/s
7 Taux de précipitation	15 mm/h	40 mm/h
8 Alimentation en eau	Assurer une hauteur d'eau constante dans le réservoir (50 mm par rapport à la limite de trop-plein)	

Tableau 2 : Spécifications pour le bac à pluie (Tableau N°A.1 et figure N°A.1 de l'ISO 140-18)

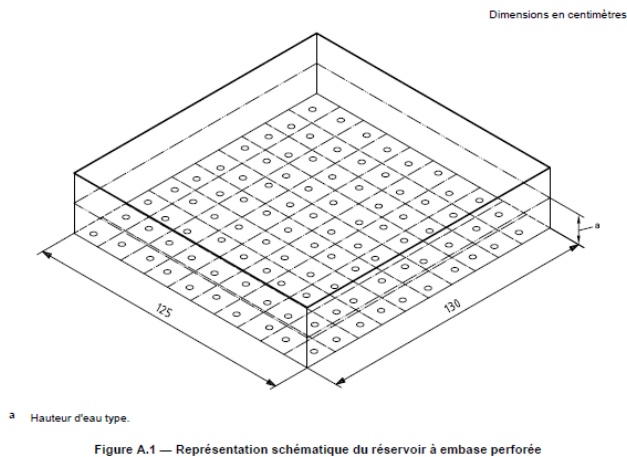


Figure A.1 — Représentation schématique du réservoir à embase perforée

Figure 1 : Bac à pluie (Figure A.1 de l'annexe A de l'ISO 140-18)

Malgré ces spécifications relativement précises, nous avons pu constater lors d'une première campagne de comparaison en 2006 entre les deux bancs d'essais (VELUX et CSTB) que des différences significatives (1 à 5 dB) étaient mesurées (cf. Tableau 1 et Figure 8). Certes les deux bancs d'essais reposent sur des approches différentes (toutes les deux autorisées dans la norme NF EN ISO 140-18), VELUX a opté dans son laboratoire pour une mesure intensimétrique dans une chambre semi-anéchoïque alors que le CSTB travaille avec une chambre réverbérante avec une approche champ diffus. Mais ces différences de moyens et de méthodes ne devraient pas être à l'origine d'écarts aussi significatifs au regard de l'expérience dont on dispose pour d'autres types de mesures (indice d'affaiblissement au bruit aérien par exemple). Les Figure 2 et Figure 3 présentent une photo des laboratoires respectifs de VELUX et du CSTB.

Il a donc été décidé d'investiguer plus précisément le mode de génération de la pluie. VELUX et le CSTB ont travaillé de concert pour trouver une explication et une solution. VELUX a tout d'abord travaillé, dans son laboratoire, sur l'impact d'un bac « fixe » excitant toujours au même endroit la maquette par rapport à un bac mobile permettant de rendre plus aléatoire les points de chute des gouttes. Une photo du dispositif d'essai de VELUX est présentée à la Figure 4 ainsi que les résultats obtenus.



Figure 2 : Vue du banc d'essai VELUX



Figure 3 : Vue du banc d'essai CSTB

Nous pouvons ainsi constater l'influence négligeable de la position d'impact des gouttes, ce qui est probablement lié à la grande densité de gouttes dont les déclenchements sont décorrélés.

On notera aussi que la hauteur de chute des gouttes, est un paramètre important. En effet, cette hauteur de chute peut être associée à la vitesse d'impact des gouttes d'un diamètre donné. La Figure 5, extraite de [2], illustre la vitesse d'une goutte de diamètre donné en fonction de la hauteur de chute. Pour atteindre la vitesse de 7 m/s comme requise dans la norme NF EN ISO 140-18 pour une goutte de 5 mm de diamètre, une hauteur de chute relativement précise, correspondant à 3,5 m (au niveau du centre de la maquette) doit être sélectionnée. On peut remarquer que les gouttes de 5 mm de diamètre n'ont pas atteint leur vitesse limite en chutant de cette hauteur. Finalement, il faut noter que la vitesse d'impact et le diamètre des gouttes peuvent être évalués par une mesure avec un analyseur laser doppler à particules.



Mooving water tank vs. Non mooving water tank

Water Tank	Lia
Mooving	45,6
Mooving	45,5
Fixed Position 1	45,1
Fixed Position 2	45,4
Fixed Position 3	45,6
Fixed Position 4	45,1
Fixed Position 5	46,3
Average of the 5 fixed positions:	45,5

Figure 4 : Bac à pluie mobile dans les deux directions X, Y (Photo source VELUX)

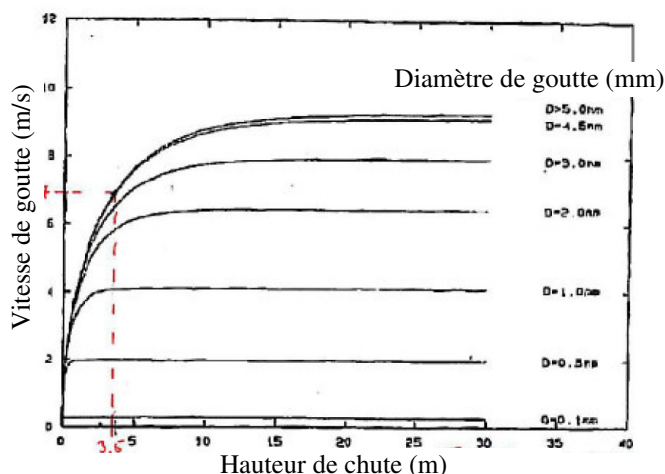


Figure 5 : Abaque présentant, par diamètre de goutte, la vitesse d'impact de celle-ci pour une hauteur de chute donnée

Il a ensuite été observé que le mode de déclenchement d'une goutte sous un plan perforé n'était pas simple à maîtriser (qualité de la perforation d'un millimètre, planéité et horizontalité de la sous face en polycarbonate,...) et générait une dispersion importante du diamètre des gouttes. VELUX a alors proposé d'implanter, à la place de chaque trou, une buse métallique usinable de façon très précise et laissant dépasser un téton de 5 mm de diamètre en sous face permettant un décrochement très propre et répétable de chaque goutte. Cette buse est décrite à la Figure 6 et on en voit l'effet sur le décrochement de la goutte à la Figure 7. On peut ainsi voir une amélioration forte de la reproductibilité de ces essais entre la campagne de 2006 (Tableau 3, Figure 8 et Figure 9) et celle de 2007 (Tableau 5, Figure 10 et Figure 11).

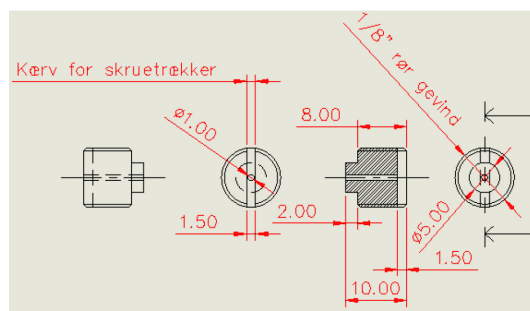


Figure 6 : Description d'une buse métallique



Figure 7 : Décrochement des gouttes en présence de buses individuelles (photo source VELUX)

Laboratoire	Echantillon	Flap open/closed	LiA [dB(A)]	Difference [dB(A)]
VELUX	2006-1	closed	54,3	4
CSTB	2006-1	closed	58,3	
VELUX	2006-1	open	62,0	1,3
CSTB	2006-1	open	63,3	
VELUX	2006-2	closed	50,9	4,1
CSTB	2006-2	closed	55,0	
VELUX	2006-2	open	60,5	2,6
CSTB	2006-2	open	63,1	
VELUX	2006-3	closed	53,8	4,7
CSTB	2006-3	closed	58,5	
VELUX	2006-3	open	60,9	3,7
CSTB	2006-3	open	64,6	

Tableau 3 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB
– Campagne 2006 - sans buses

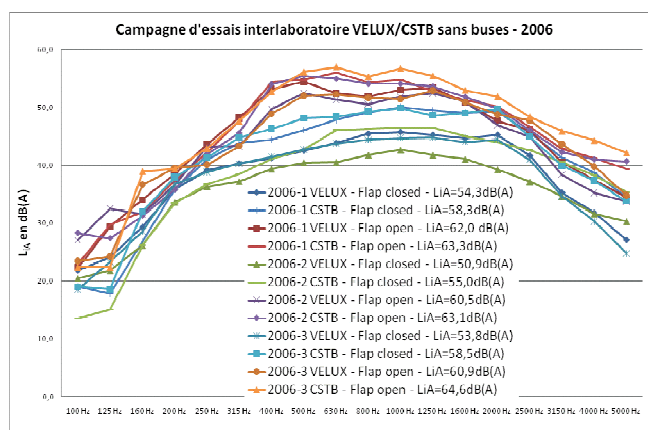
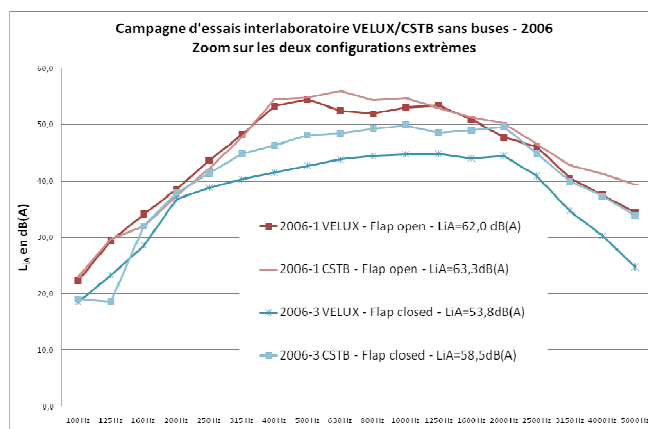


Figure 8 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB –
Campagne 2006 - sans buses



**Figure 9 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB –
Campagne 2006 – Zoom sur les deux configurations
extrêmes - sans buses**

Laboratoire	Echantillon	LiA [dB(A)]	Difference [dB(A)]
VELUX	2007-1	55,0	-0,3
CSTB	2007-1	54,7	
VELUX	2007-2	54,8	-0,8
CSTB	2007-2	54,0	
VELUX	2007-3	54,7	-0,6
CSTB	2007-3	54,1	
VELUX	2007-4	48,6	-0,9
CSTB	2007-4	47,7	
VELUX	2007-5	48,3	-1,2
CSTB	2007-5	47,1	
VELUX	2007-6	48,8	-1,4
CSTB	2007-6	47,4	

Tableau 4 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB
– Campagne 2007 - avec buses

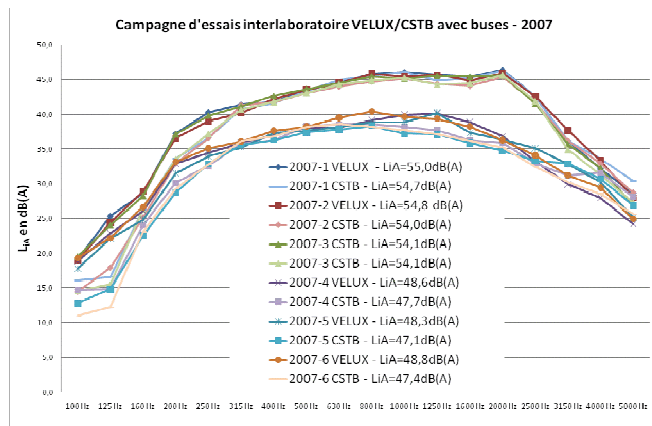


Figure 10 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB – Campagne 2007 – avec buses

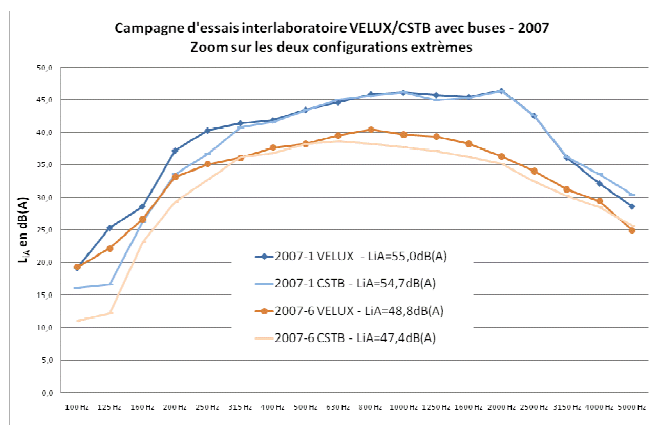


Figure 11 : Comparaison inter-laboratoire VELUX / CSTB – Campagne 2007 – avec buses - Zoom sur les deux configurations extrêmes

Il est intéressant de noter que le meilleur comparatif de la campagne de 2006 en terme de $\Delta L_{iA}(\text{CSTB/VELUX})$, soit le cas 2006-1 flap open correspondant à $\Delta L_{iA}(\text{CSTB/VELUX})$ de 1,3 dB(A), est du même ordre de grandeur que le moins bon comparatif de la campagne de 2007 avec les buses pour le cas 2007-6 correspondant à $\Delta L_{iA}(\text{CSTB/VELUX})$ de 1,4 dB(A).

La campagne de 2007 (Figure 10 et Figure 11) montre aussi des différences assez systématiques en basses fréquences en dessous de 315 Hz, ceci est probablement lié aux différences de laboratoire, notamment en raison de l'utilisation d'une salle de faible volume chez VELUX dont le caractère semi-anéchoïque est difficile à obtenir aux basses fréquences.

Nous proposons ainsi deux évolutions à la norme actuelle afin d'assurer une meilleure répétabilité et une meilleure reproductibilité de cet essai. La première, adopter une définition claire et contrôlable de la notion de diamètre de goutte en parlant de sphère équivalente. La seconde serait d'introduire les buses individuelles pour chacun des trous du bac à pluie afin de mieux maîtriser les paramètres de gouttes.

3 Quelques points de références

Ces premières années de pratique de cette méthode d'évaluation nous ont permis d'acquérir un minimum d'expérience dans le domaine. Nous vous proposons donc,

dans cette section, de donner quelques points de repère sur des systèmes très standards.

Il ne s'agit pas ici d'être exhaustif, mais uniquement de permettre aux acteurs de terrain de mieux appréhender ce phénomène et sa caractérisation suivant la norme NF EN ISO 140-18.

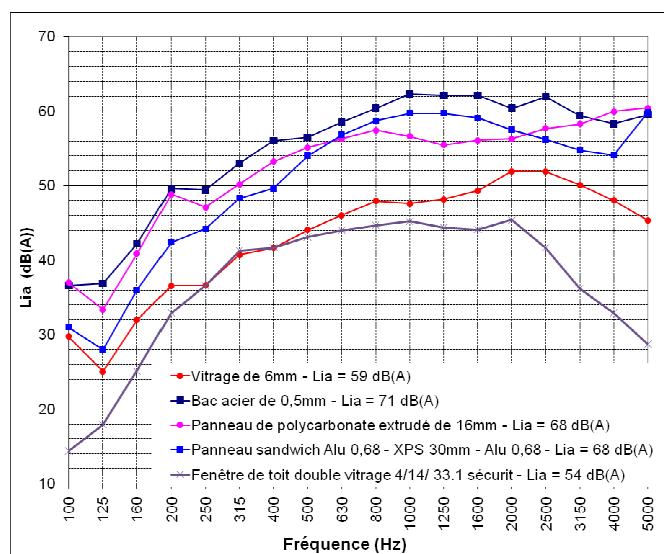


Figure 12 : Quelques exemples de niveau de bruit de pluie sur quelques systèmes

Nous pouvons tout d'abord remarquer au travers du niveau de bruit de pluie de ces différents éléments (Figure 12), l'importance de la masse surfacique sur cette performance. En effet, si l'on compare les deux structures monolithiques, le simple vitrage de 6 mm se distingue très nettement du bac acier de 5 mm. De plus, les deux autres panneaux (Polycarbonate extrudé et panneau sandwich (alu/XPS/alu) ayant à la fois une structure rigide et une faible masse surfacique ont eux aussi un niveau de bruit de pluie assez élevé.

Plusieurs orientations sont possibles pour pouvoir diminuer le niveau de bruit de pluie d'un élément, travailler sur la masse surfacique du produit ou utiliser l'approche masse-ressort-masse. La Section 4 illustrera une approche de ce type sur un panneau sandwich. Une autre possibilité, utilisable dans certains cas, est d'interposer entre le produit et la pluie un élément (très) souple, mais se posent alors des questions de durabilité (UV, ...), d'étanchéité,...

Enfin la fenêtre de toit, est un système plus complexe qu'un simple panneau ; en effet, outre le niveau généré par la pluie sur la partie vitrée, il faut aussi prendre en compte le bruit généré sur les habillages de profils ou les éléments de raccords avec la couverture. C'est notamment en travaillant sur l'ensemble de ces sources de bruit que VELUX a développé une gamme de fenêtres de toit ayant un niveau de bruit de pluie inférieur à 50 dB(A).

4 Approche prédictive du bruit de pluie

L'approche utilisée ici est une méthode par matrice de transfert [3] déjà largement éprouvée pour prédire le comportement acoustique (isolement au bruit aérien, le coefficient d'absorption ou le niveau de bruit d'impacts) des systèmes multicouches. La spécificité a donc été de définir l'excitation adaptée au phénomène de l'impact de la

pluie. La modélisation de la force injectée par la pluie a été proposée précédemment par le CSTB [4-5],

La force d'impact générée par la pluie artificielle permettant de déterminer le spectre de puissance structurale injectée à une structure multicouche a donc déjà été présentée en [4-5]. La formulation est cependant reprise ici brièvement. La force d'impact $F(t)$ générée par une goutte peut s'exprimer comme suit :

$$F(t) = \rho \pi \frac{D^2}{4} V_i^2 \left\{ 1 - \frac{3V_i}{4D} t \right\} \text{ for } 0 \leq t \leq (4D/3V_i) \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'eau, D le diamètre de la goutte d'eau, and V_i la vitesse d'impact de la goutte. Le spectre de puissance de la force d'excitation associée à une goutte de diamètre D est alors :

$$P_{\text{exc}}(\omega) = n \left| \tilde{F}(\omega) \right|^2 T_0 = \frac{10^{-3} R}{3600} \frac{6}{\pi D} \left| \tilde{F}(\omega) \right|^2 T_0 \quad (2)$$

où T_0 est le temps de référence ($T_0=1s$), $\tilde{F}(\omega)$ est le spectre de la force d'impact, soit la transformée de Fourier de la force d'impact donnée dans l'équation (1), et n est le nombre de gouttes tombant sur une unité de surface pendant une unité de temps pour une pluviométrie R (en mm/h). Ce spectre de puissance pour la pluie retenue (correspondant à une pluviométrie de 40 mm/h, un diamètre de goutte moyen de 5 mm et une vitesse de chute de 7 m/s) est montré à la Figure 13.

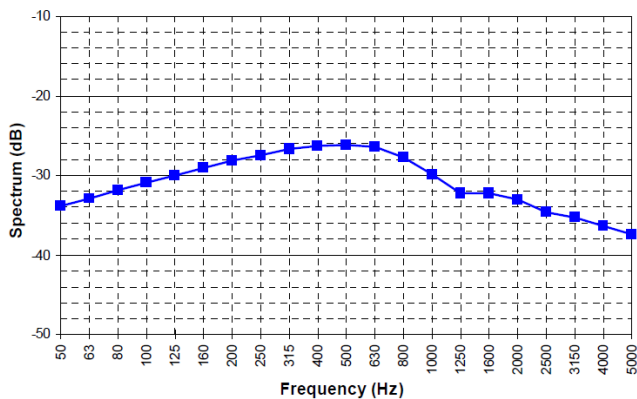


Figure 13 : Spectre de puissance de la pluie normalisée (forte)

Pour une structure flexible excitée par de la pluie, il est nécessaire de prendre en compte l'impédance d'entrée de la structure Z_{struc} et l'impédance de la goutte Z_{drop} . La force d'impact est alors changée comme suit :

$$\tilde{F}_{\text{flex}}(\omega) = \frac{Z_{\text{struc}}}{Z_{\text{struc}} + Z_{\text{drop}}} \tilde{F}(\omega) \text{ with } Z_{\text{drop}} = \rho V_i \pi D^2 / 4 \quad (3)$$

Nous avons ainsi, à l'aide de cette approche prédictive, simulé un panneau sandwich couramment utilisé pour les toitures de vérandas (alu/XPS/alu). Nous avons comparé cette simulation à sa performance mesurée et nous avons ensuite cherché des solutions d'amélioration. La Figure 14 expose les résultats obtenus. Nous pouvons noter que l'apport de masse par l'incorporation d'une masse lourde viscoélastique permet d'obtenir un gain significatif sur l'ensemble du spectre. L'apport d'une couche « souple » (mousse PE ou PSEE) permet de créer un phénomène de masse-ressort-masse qui améliore la performance du système après sa fréquence de résonance, mais la dégrade autour de celle-ci. Ici la fréquence de résonance de ces systèmes étant élevée (>1kHz dans les quatre cas étudiés) l'introduction de cette couche souple a relativement peu d'effets.

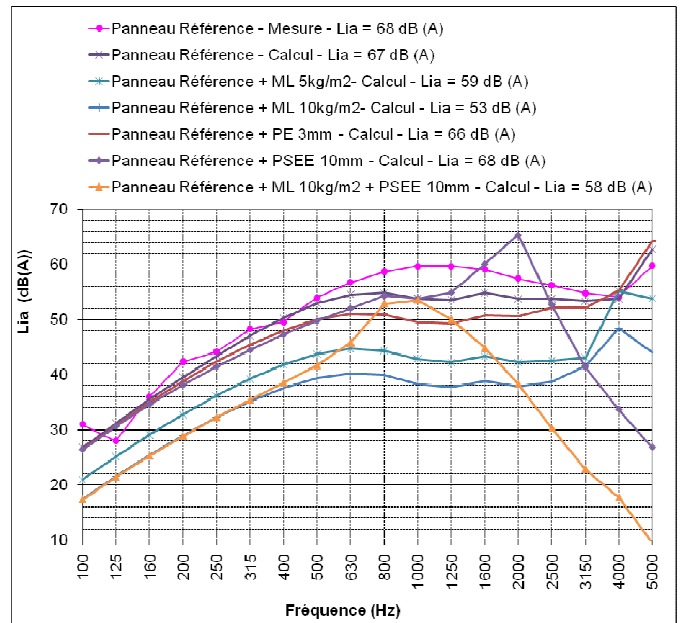


Figure 14 : Comparaison calcul / mesure et recherche de solution d'amélioration sur un panneau sandwich

Cet outil peut donc être utilisé pour aider les industriels à améliorer leur produit par rapport au bruit de pluie.

5 Conclusion

Les dix dernières années ont ainsi vu évoluer de façon très significative la problématique du bruit généré par la pluie sur une toiture ou un élément de toiture. La méthode d'essai en laboratoire donnée par la norme NF EN ISO 140-18, moyennant quelques précisions, permet aujourd'hui une caractérisation fiable et reproductible de ce phénomène. Les industriels du domaine et notamment ceux du panneau de véranda et de la fenêtre de toit disposent à ce jour, pour un grand nombre, de données d'essais. Enfin la démarche expérimentale peut aujourd'hui, dans un certain nombre de cas, être avantageusement complétée par une approche prédictive afin de réduire les délais et les coûts de développement.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement la société VELUX qui nous a permis, au travers de ses campagnes d'essais au CSTB, de faire avancer ce sujet de concert et ce, depuis de nombreuses années.

Références

- [1] NF EN ISO 140-18, « Acoustique - Mesurage de l'isolation acoustique des immeubles et des éléments de construction - Partie 18 : Mesurage en laboratoire du bruit produit par la pluie sur les éléments de construction », (2007).
- [2] J. McLoughlin, D.J. Saunders and R.D. Ford, "Noise generated by simulated rainfall on profiled steel roof structures, *Applied Acoustics*, **42**(3), pp. 239-255 (1994).
- [3] M.L. Munjal, "Response of a multilayered infinite plate to an oblique plane wave by means of transfer

matrices”, *Journal of Sound and Vibration* **162**, pp. 333-343, (1993).

- [4] C. Guigou-Carter and M. Villot, “Study of simulated rainfall noise on multi-layered systems”, Proceedings of EURONOISE 2003, Naples, Italy, 2003.
- [5] C. Guigou-Carter, M. Villot and C. Horlaville, “Simulating and modeling rainfall noise on roofs and glazings” (paper n°RBA-CIB-004-IP), Proceedings of Forum Acusticum 2002, Sevilla, Spain, 2002,