HAL
open science

Nouvelle méthode de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans les locaux industriels

Joël Ducourneau, Adil Faiz, Jacques Chatillon

To cite this version:

Joël Ducourneau, Adil Faiz, Jacques Chatillon. Nouvelle méthode de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans les locaux industriels. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00538360

HAL Id: hal-00538360

https://hal.science/hal-00538360v1

Submitted on 22 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème Congrès Français d'Acoustique
Lyon, 12-16 Avril 2010

Nouvelle méthode de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans les locaux industriels

J. Ducourneau[1], A. Faiz[1], J. Chatillon[2]

[1]Faculté de Pharmacie, Université Henri Poincaré
5, rue Albert Lebrun 54001 Nancy, France, {Joel.Ducourneau, Adil.Faiz}@pharma.uhp-nancy.fr
[2] Institut National de Recherche et Sécurité
Rue du Morvan, CS60027, 54519 Vandœuvre-lès-Nancy, France, Jacques.Chatillon@inrs.fr

Dans les locaux industriels, les parois fréquemment rencontrées possèdent un relief souvent périodique (tôle ondulée, parois perforées ...). Les logiciels prévisionnels de niveaux sonores dans les ateliers de travail nécessitent des caractéristiques acoustiques précises de ces parois comme l'absorption ou la diffusion. Pour répondre à ce type de caractérisation in situ, nous avons développé un système de mesure du coefficient de diffusion acoustique. Le principe de fonctionnement de ce système est basé sur celui développé par Vorländer et Mommertz en champ libre. Il repose sur une méthode de moyennage qui entraine l'atténuation des ondes réfléchies diffuses. Pour palier aux problèmes des échos parasites provenant de la réverbération du local et des sources bruyantes présentes sur le site, nous avons intégré dans le système de mesure une antenne acoustique et une source impulsionnelle. La pondération multipolaire utilisée pour l'antenne permet d'obtenir une directivité avec un lobe principal étroit, constant en fréquence et des atténuations des lobes secondaires pouvant atteindre 30 dB. Cette directivité permet donc de filtrer spatialement les échos parasites. La source impulsionnelle conçue à partir de la réponse impulsionnelle inverse du système d'émission, permet également un fenêtrage temporel et donc une séparation suffisante des différents signaux reçus par l'antenne (ondes réfléchies, échos parasites…). Une campagne de mesure du coefficient de diffusion d'une paroi ondulée pour plusieurs incidences a été effectuée dans un atelier bruyant et a permis de valider ce système de mesure in situ.

1 Introduction

Les mécanismes de diffusion acoustique sont mis en jeu pour expliquer le comportement acoustique absorbant des parois à relief souvent présentes dans les locaux industriels (tôle ondulée, parois perforées ...). Une atténuation du champ de pression acoustique est souvent observée dans des milieux confinés quand un encombrement ou une paroi à relief est aménagé [1]. Etant donné ce comportement, il a été nécessaire de rechercher des lois permettant de calculer l'absorption supplémentaire apportée par le relief en s'intéressant d'abord à la mesure du coefficient de diffusion acoustique.

Depuis ces vingt dernières années, plusieurs méthodes de mesure ont été développées pour étudier d'un côté, les mécanismes de diffusion et de l'autre, pour évaluer les différents types de coefficients de diffusion [2-3]. On peut distinguer plusieurs types de méthode de mesure suivant le type de coefficient de diffusion que l'on souhaite obtenir (coefficient de diffusion, coefficient de diffusion uniforme, ….) en fonction du type de champ acoustique incident : champ libre ou champ diffus [4-5]. Vorländer et Mommertz [6] ont choisi d'utiliser le principe d'atténuation des ondes réfléchies diffuses par processus de moyennage dans des conditions de champ libre pour déterminer expérimentalement le coefficient de diffusion acoustique. Celui-ci est défini dans ce cas comme le rapport entre l'énergie réfléchie à l'extérieur de la zone spéculaire sur l'énergie totale réfléchie :

$$\delta = 1 - \frac{\int_{\Omega_S} E(\Omega)d\Omega}{\int_{\Omega} E(\Omega)d\Omega} \qquad (1)$$

avec Ω_S, l'angle solide correspond à la partie de l'énergie réfléchie spéculaire et Ω, l'angle solide correspond à toute l'énergie réfléchie.

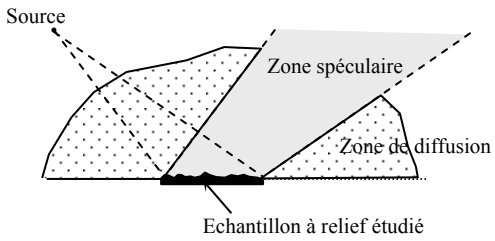


Figure 1 : Illustration de la zone de réflexion spéculaire et diffuse

Afin de pouvoir déterminer à termes le coefficient de diffusion des parois à relief présentes dans les locaux industriels, nous avons choisi dans ce travail d'adapter la méthode de mesure de Vorländer et Mommertz à des milieux confinés réverbérants bruyants. Pour cela, nous avons utilisé une antenne acoustique à directivité constante en fonction de la fréquence [7] comme récepteur et une source impulsionnelle [8]. Notre travail porte sur la

validation expérimentale de cette technique sur un échantillon de paroi ondulée.

2 Méthode de mesure du coefficient de diffusion acoustique en champ libre

La source (haut-parleur) et le récepteur (microphone) sont placés en champ lointain positionnés dans la direction spéculaire. On retrouve une plaque tournante sur laquelle est placé l'échantillon à relief étudié qui permet d'effectuer des mesures pour de multiples orientations.

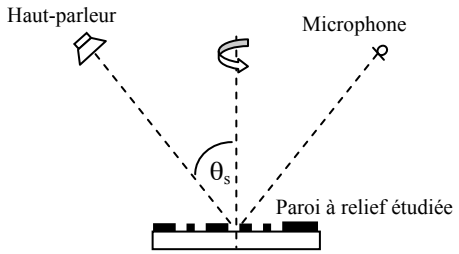


Figure 2 : Principe de la méthode de détermination du coefficient de diffusion en champ libre [6]

La figure 3 montre un exemple d'impulsions réfléchies obtenues pour trois orientations de la surface diffuse. Le signal incident est un burst centré sur le 1/3 d'octave 10 kHz.

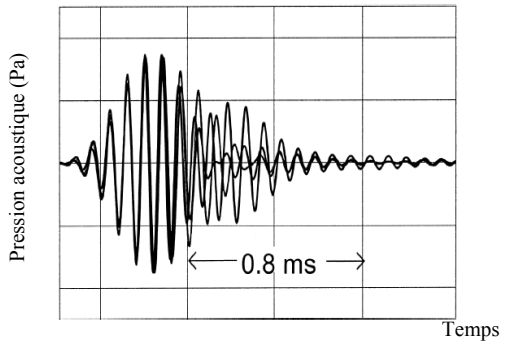


Figure 3 : Impulsions réfléchies pour 3 orientations différentes d'une paroi à relief [6]

On constate sur cette figure que la partie initiale des réponses impulsionnelles sont cohérentes (en phase) tandis que le reste de l'évolution temporelle montre que ces mêmes impulsions ne sont plus en phase. Cette deuxième partie de chaque réponse impulsionnelle est donc attribuée à la composante non spéculaire. Pour un angle d'incidence θ_s de la source et du récepteur et une orientation φ_i, les pressions acoustiques réfléchies $p_{r,\varphi_i}(t,\theta_s)$ peuvent s'écrire comme la superposition d'une composante diffuse $p_{diff,\varphi_i}(t,\theta_s)$ et spéculaire $p_{spec}(t,\theta_s)$:

$$p_{r,\varphi_i}(t,\theta_s) = p_{spec}(t,\theta_s) + p_{diff,\varphi_i}(t,\theta_s) \qquad (2)$$

La pression acoustique spéculaire est obtenue en moyennant un nombre important de pressions acoustiques réfléchies suivant l'angle φ : on considère que la composante spéculaire reste cohérente en fonction de φ contrairement à la composante diffuse qui, une fois moyennée, s'atténue :

$$p_{spec}(t,\theta_s) \cong \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_{r,\varphi_i}(t,\theta_s) \qquad (3)$$

Dans les conditions de champ lointain, l'énergie totale réfléchie moyennée dans la direction spéculaire θ_s peut s'écrire en fonction des transformées de Fourier $p_{r,i}(f,\theta_s)$ des pressions acoustiques temporelles mesurées :

$$E_{tot}(f,\theta_s) = K(f,\theta_s).\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|p_{r,i}(f,\theta_s)\right|^2 \qquad (4)$$

$K(f, \theta_s)$ est une constante dépendante de la puissance acoustique de la source ainsi que des positions géométriques de la source et du récepteur. L'énergie réfléchie spéculaire est également proportionnelle au module au carré de la transformée de Fourier de la pression acoustique spéculaire :

$$E_{spec}(f,\theta_s) = K(f,\theta_s).\left|p_{spec}(f,\theta_s)\right|^2 \qquad (5)$$

En combinant les équations (3), (4) et (5), on obtient un coefficient de diffusion acoustique dans une direction spéculaire θ_s :

$$\delta(f,\theta_s) = \frac{\overbrace{\sum_{i=1}^{n}\left|p_{r,i}(f,\theta_s)\right|^2}^{\text{Energie réfléchie totale}} - \overbrace{\frac{1}{n}\left|\sum_{i=1}^{n} p_{r,i}(f,\theta_s)\right|^2}^{\text{Energie réfléchie spéculaire}}}{\underbrace{\sum_{i=1}^{n}\left|p_{r,i}(f,\theta_s)\right|^2}_{\text{Energie réfléchie totale}}} \qquad (6)$$

avec n >> 1

A partir de ces différents coefficients de diffusion, il est possible de déduire le coefficient de diffusion pour une incidence aléatoire :

$$\delta(f) = \int_0^{\pi/2} \delta(f,\theta_s)\sin(2\theta_s)d\theta_s \qquad (7)$$

Afin de pouvoir utiliser cette méthode de mesure dans des conditions acoustiques défavorables comme celles des ateliers de travail (conditions semi-réverbérantes avec présences de sources pouvant être très bruyantes), nous avons remplacé le microphone récepteur par une antenne directive et la source par une source impulsionnelle. Les propriétés de filtrage spatial de l'antenne ainsi que l'émission très brève des pics d'impulsion de la source ont permis de s'affranchir des échos parasites en provenance d'autres parois présentes dans le local et de fenêtrer ceux qui proviennent de la réflexion diffuse de la paroi à relief étudiée.

3 L'antenne multipolaire et la source impulsionnelle

3.1 Antenne multipolaire

L'antenne réceptrice à directivité constante en fréquence est constituée de 13 capteurs. La pondération utilisée est multipolaire car elle permet d'obtenir des directivités avec un lobe principal étroit, constant en fréquence et des

atténuations des lobes secondaires pouvant atteindre 30 dB Ce dispositif validé expérimentalement contient 4 sous antennes qui utilisent chacune 5 des 13 capteurs dont les espacements sont des multiples de 2,5 cm [7] (voir figure 4).

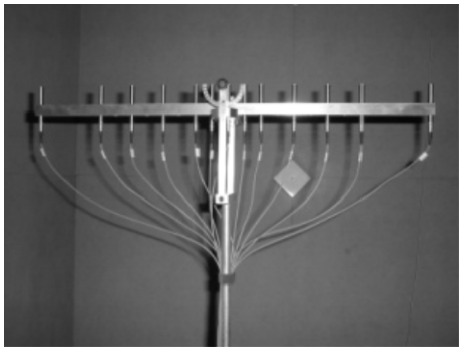


Figure 4 : Antenne acoustique constituée de 13 microphones [7]

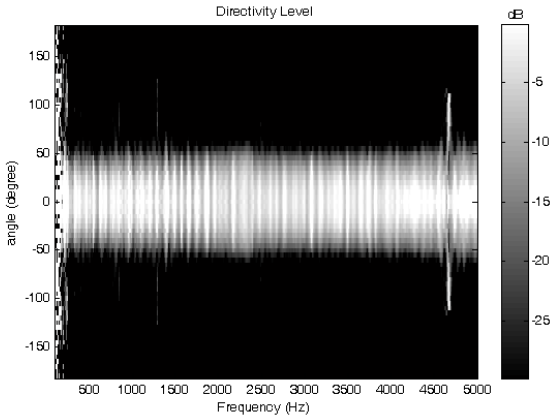


Figure 5 : Diagramme de directivité expérimental de l'antenne multipolaire

La figure 5 montre bien que le lobe de directivité reste constant en fréquence sur une large bande passante comprise entre 150 et 5000 Hz.

3.2 Source impulsionnelle

La source d'impulsion a été conçue à partir de la réponse impulsionnelle inverse d'un système d'émission. Cette technique de filtrage inverse a été utilisée pour calculer le signal source nécessaire pour égaliser la réponse du système d'émission afin d'émettre des impulsions courtes. Le système d'émission contient un égaliseur (Yamaha Egaliseur Graphique GQ 1031 BII), un amplificateur de puisance (APK 2000) et un haut-parleur de 10 cm de diamètre (Pionnier TS E1077). La fonction de transfert H(f) du système d'émission a été mesurée dans des conditions de champ libre avec un signal MLS comme signal source. Celui-ci alors filtré par la réponse impulsionnelle inverse du système d'émission et émis en entrée produit une impulsion très courte en sortie. Il faut souligner que la réponse impulsionnelle inverse du système d'émission possède en basses fréquences des valeurs très élevées car le haut-parleur ne peut rayonner de l'énergie sonore dans ce domaine fréquentiel. Il est nécessaire d'utiliser alors un filtre passe haut (fréquence de coupure fixée à 100 Hz) pour éviter la destruction du haut-parleur soumis à une trop forte amplitude exigée par la réponse impulsionnelle inverse.

La figure 6 montre le pic d'impulsion émis par le système d'émission avec et sans filtrage de la réponse impulsionnelle inverse.

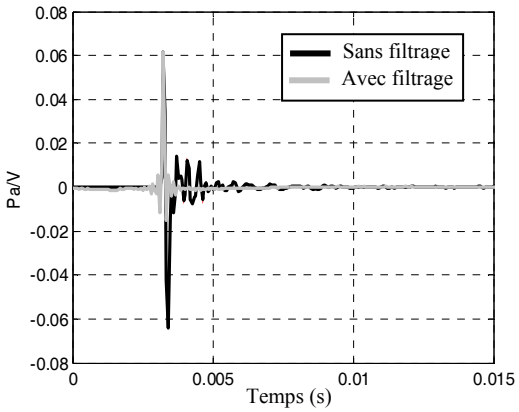


Figure 6 : Réponse impulsionnelle du système d'émission

4 Mesure du coefficient de diffusion acoustique d'un relief ondulé en atelier industriel

4.1 Description du dispositif de mesure

Les mesures du coefficient de diffusion acoustique ont été réalisées dans un atelier industriel bruyant de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS). Le temps de réverbération du local a été mesuré en plusieurs positions dans le local à l'aide d'un pistolet d'alarme et du sonomètre B&K type 2260. Le temps de réverbération moyen par bande d'octave est le suivant :

Octave (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tr (s)	1,6	1,7	2	2	1,8	1,4	0,9

Tableau 1 : Temps de réverbération de l'atelier industriel de l'INRS.

Le dispositif de mesure réalisé pour ces manipulations est un portique représenté sur la figure 7 qui contient la source de type impulsionnelle et l'antenne directive. Le centre acoustique de la source et de l'antenne sont tout deux positionnés d'un point de vue angulaire, dans la direction spéculaire θ pour respecter le principe de la mesure de Vorländer et Mommertz. Cette direction est, bien entendu, ajustable sur le portique de 0° à 90°.

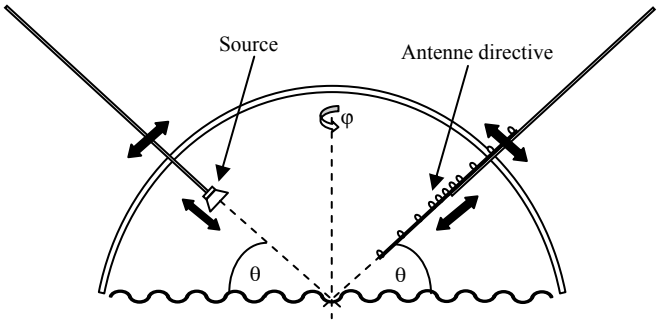


Figure 7 : Schéma de principe du banc de mesure

Il est possible de déplacer aisément le portique autour de l'axe central de la surface diffuse étudiée pour procéder à des acquisitions en fonction de φ.

Enfin, il possible de modifier sur ce dispositif les distances source – paroi diffuse et récepteur – paroi diffuse. Celles-ci ont été fixées à 1,20 m durant toutes les manipulations. La dimension maximale de l'échantillon à relief étudié étant environ de 4,5 m, nous remarquons que ces distances se situent en champ proche et que dans ce cas, nous observerons un profil de pression très discontinu dû au phénomène de diffusion [9]. Cependant, il serait très difficile pour nous d'assurer les conditions de champ lointain car les distances minimales du champ lointain (MFFD) en fonction de la fréquence sont très grandes et dépassent largement celles du local d'essai. Nous avons choisi de discrétiser la variation angulaire de θ et φ par pas de 10°.

L'échantillon à relief étudié est une paroi ondulée décrite sur la figure 8.

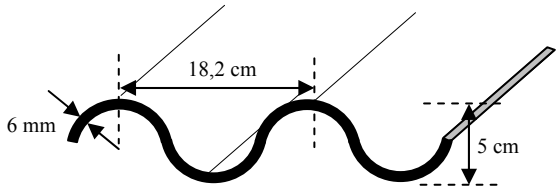


Figure 8 :Profil du relief ondulé étudié

La figure 9 représente la réponse impulsionnelle du signal reçu sur le capteur central de l'antenne sans traitement multipolaire (courbe bleu). Nous distinguons bien le signal incident impulsionnel de la source, l'étendue de l'écho traduisant le phénomène de diffusion de la paroi ondulée ainsi que des oscillations parasites qui suivent cette trainée temporelle et qui proviennent des réflexions parasites du local (réverbération). Nous constatons que la directivité de l'antenne assure un filtrage spatial qui permet d'atténuer fortement les oscillations parasites du signal provenant de la réverbération pour ne conserver que les réflexions diffuses (courbe rouge).

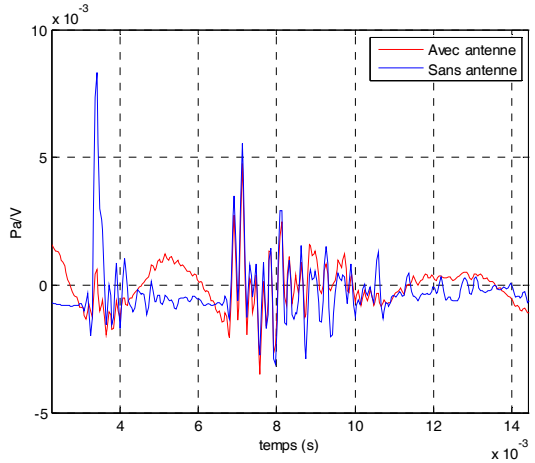


Figure 9 : Réponse impulsionnelle reçue par le capteur central de l'antenne (courbe bleu) et par le macro-capteur de l'antenne après traitement multipolaire (courbe rouge)

Comme expliqué dans le paragraphe 2, la pression acoustique spéculaire est obtenue en moyennant un nombre important de pressions acoustiques réfléchies suivant l'angle φ. La figure 10-b montre la réponse impulsionnelle obtenue pour une incidence spéculaire égale à 40° après superposition de 10 réponses impulsionnelles synchronisées et moyennées correspondantes à chaque valeur de l'angle φ. Nous remarquons bien que la composante spéculaire de cette réponse impulsionnelle émerge par rapport à la réponse impulsionnelle obtenue pour un angle φ=30° (figure 10-a).

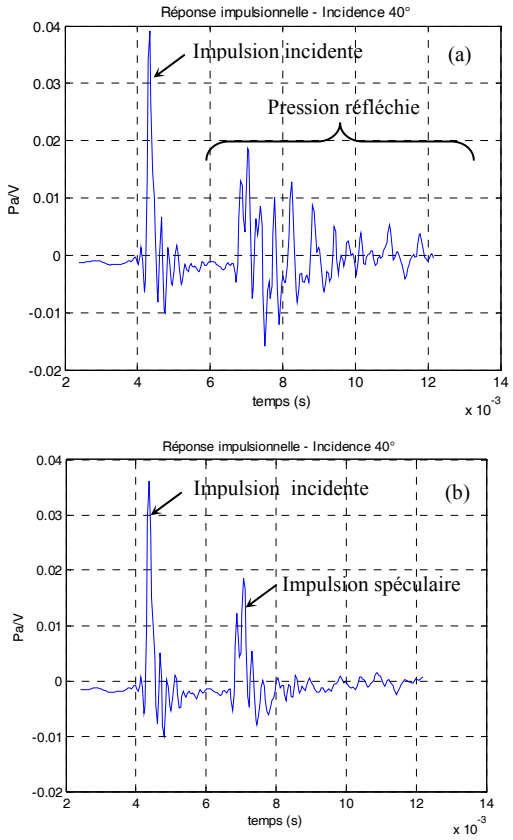


Figure 10 : Réponses impulsionnelles obtenues avec la paroi ondulée pour une incidence θ=40°

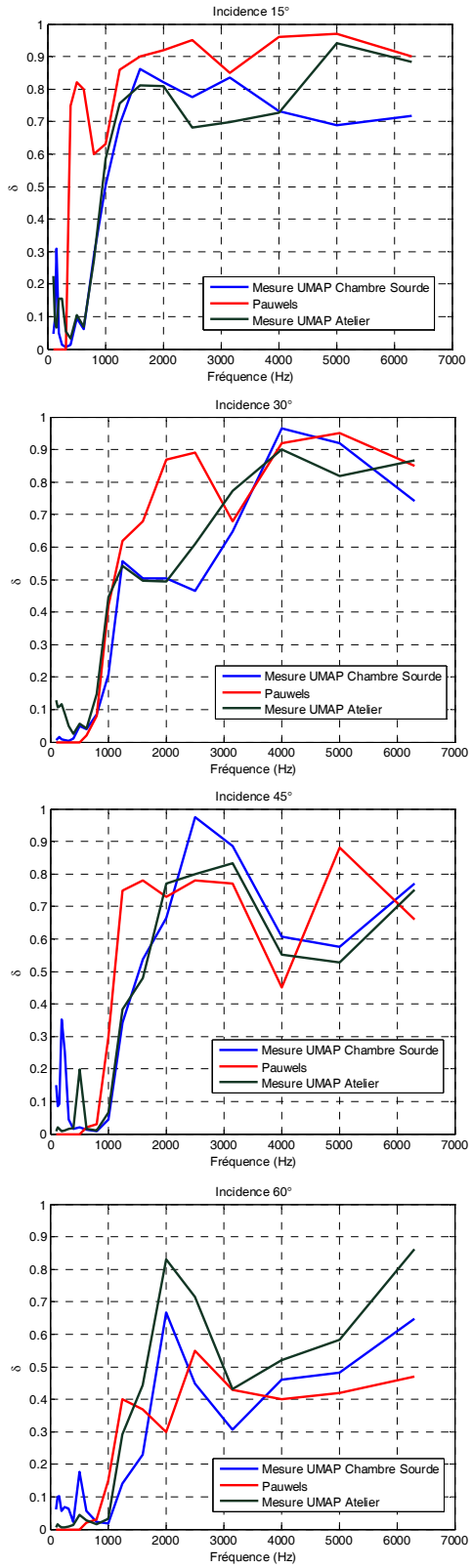
4.2 Résultats

Les graphes de la figure 11 représentent les variations du coefficient de diffusion acoustique mesuré par bandes de tiers d'octave pour la paroi ondulée décrite précédemment. Ces mesures ont été comparées avec celles effectuées également en chambre sourde et aussi avec celles obtenues par Pauwels pour ce même type de profil [10].

Pour des incidences inférieures à 60°, nos mesures sont similaires à celles réalisées par Pauwels. Cependant, nous constatons, pour des incidences au delà de 60°, quelques différences, et plus particulièrement de grandes fluctuations de nos mesures en fonction de la fréquence. En effet, la composante spéculaire devient prépondérante pour de fortes incidences par rapport à la composante diffuse. Dans ce cas, le rapport entre l'énergie spéculaire et l'énergie totale devient égal à 1 et donc très sensible aux bruits de mesure.

Les résultats des mesures effectuées dans l'atelier industriel sont proches de ceux obtenus par Pauwels et ceux obtenus en chambre source. Cela nous permet de valider la méthode de mesure en milieu réverbérant. Il faut noter en plus que certaines de ces mesures ont été très entachées par les bruits parasites générés par des machines particulièrement bruyantes brusquement mises en marche

pendant l'acquisition. L'antenne acoustique directive a permis de filtrer spatialement ces bruits perturbateurs de manière efficace et de séparer ainsi les échos provenant de la réflexion spéculaire et diffuse de la paroi. Lors d'une précédente étude menée en 2007, il a été possible d'effectuer des mesures de coefficient d'absorption acoustique dans des conditions de rapport signal/bruit égal à -10 dB [8]. Il faut noter aussi que l'intercorrélation utilisée pour obtenir la réponse impulsionnelle sur chaque capteur permet de séparer le signal MLS filtré du bruit généré par la machine puisque ceux-ci sont décorellés.



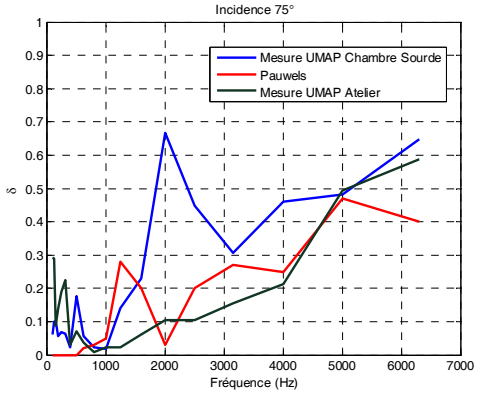


Figure 11 : Coefficients de diffusion acoustique obtenus pour la paroi ondulée respectivement pour θ=15°, θ=30°, θ=45°, θ=60°et θ=75°

5 Conclusion

Ce travail concerne le développement d'un dispositif portable permettant de mesurer in situ le coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans des locaux industriels. Ce dispositif portable est basé sur la méthode développée par Vorländer et Mommertz qui utilise le principe d'atténuation des ondes réfléchies diffuses par processus de moyennage dans des conditions de champ libre. Nous avons, dans le cadre cette étude, adapté cette méthode aux conditions réverbérantes des locaux industriels en insérant une antenne acoustique directive et une source impulsionnelle déjà utilisées pour la mesure de l'absorption acoustique. Les résultats expérimentaux ont permis de tester et de valider ce nouveau dispositif dans un atelier industriel mis à disposition par l'INRS.

Une étude portant sur la relation entre le coefficient de diffusion acoustique mesuré et l'absorption acoustique apparente de la paroi à relief doit maintenant être réalisée. Pour cela, une campagne de mesure en chambre réverbérante doit être effectuée pour évaluer cette absorption apparente au sens de Sabine pour plusieurs surfaces à relief. Il conviendra alors de trouver un lien entre ces coefficients d'absorption apparente et ceux de diffusion mesurés.

Références

[1] Ducourneau J., Planeau V., « Etude de l'influence apportée par des parois épaisses non planes sur le champ acoustique dans un local industriel », *Document de travail INRS, UMAP, NP/01DT-009/JD*, (2001).

[2] Hargreaves T. J., Cox J.T., Lam Y.M., D'Antonio P., "Surface diffusion coefficients for room acoustics: free-field measures", *J. Acous. Soc. Am.* 108 (4), p. 1710-1720, (2000).

[3] Cox T.J., "The optimization of profiled diffusers", *J. Acous. Soc. Am.* 97 (5), p.2928-2936, (1995).

[4] "Characterization and measurement of surface scattering uniformity", AES-4id, *Journal of the Audio Engineering Society* 49 (3), p.148-165, (2001).

[5] "Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room", *ISO 17497*, (2004).

[6] Vorlander M., Mommertz E., “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficient”, *Applied Acoustics* 60, p187 – 199, (2000).

[7] Ducourneau J., Planeau V., Nejade, A. “Design of a multipolar weighting for acoustic antennae”. *Applied Acoustics*, 70, p484-492, (2009).

[8] Ducourneau J., Planeau V., Chatillon J., Nejade, A. “Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop”. *Applied Acoustics*, 70, p710–721, (2009).

[9] De Geetere L., “Analysis and improvement of the experimental techniques to assess the acoustical reflection properties of boundary surfaces”, *PhD, Université Catholique de Leuven*, Belgique, (2004).

[10] Pauwells H., “Diffusie tegenover geluidabsorptie: naar aangepaste experimenten. (Diffusion against sound absorption: towards suitable experiments)”, *Master thesis, Catholic University of Leuven, Faculty of Engineering, Department of Architecture*, Urban Design and Planning, (2001).