

CFA/VISHNO 2016

Validation et limites d'un dispositif de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans les bâtiments

J. Ducourneau^a, A. Faiz^a, K. Rabisse^b et N. Trompette^b

^aLaboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54518 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

^bINRS, Rue du Morvan, 54519 Vandœuvre-Lès-Nancy, France
joel.ducourneau@univ-lorraine.fr



LE MANS

Les parois à relief souvent présentes dans les bâtiments sont à l'origine de la diffusion acoustique des rayons sonores qui se propagent. Des logiciels prévisionnels d'acoustique permettant de tracer des cartographies du champ de pression dans des lieux de travail utilisent les caractéristiques acoustiques comme l'absorption ou la diffusion acoustique de ces parois. Un système de mesure pour déterminer le coefficient de diffusion in situ des parois verticales a été élaboré. La technique de mesure développée à l'origine dans des conditions de champ libre a été adaptée pour éviter les problèmes d'échos parasites venant de la réverbération et des sources bruyantes présentes sur le site. Pour cela, une antenne acoustique multipolaire et une source impulsive permettant respectivement d'effectuer un filtrage spatial et la séparation des échos parasites sont utilisées. Une campagne de mesure afin de valider le dispositif a été menée sur des parois dont le comportement acoustique diffusant est connu en fonction de la fréquence (diffuseurs de Schroeder) et sur un réseau de cavités rectangulaires pour plusieurs angles d'incidence et à plusieurs distances. Ces mesures ont permis d'établir la plage de validité et les limites de ce dispositif.

1 Introduction

Le travail présenté ici concerne la validation d'un système de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois présentes dans les locaux industriels. Ce système développé à l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) a permis dans le cadre d'études antérieures, de déterminer le coefficient de diffusion de parois verticales à relief périodique possédant des cavités rectangulaires pour plusieurs angles d'incidence dans un milieu bruyant et réverbérant. Ces mesures ont permis également de tracer des cartographies du coefficient de diffusion acoustique [1]. La technique de mesure développée à l'origine dans des conditions de champ libre [2] a été adaptée pour éviter les problèmes d'échos parasites venant de la réverbération et des sources bruyantes présentes dans ce type de local. Pour cela, une antenne acoustique multipolaire [3] et une source impulsive permettant respectivement le filtrage spatial et la séparation des échos parasites sont utilisées [4-5]. Plusieurs expérimentations ont montré que la mesure du coefficient de diffusion devenait difficile et erronée lorsque le dispositif est placé trop proche d'une singularité du relief. Elles ont montré également que la structure étudiée doit présenter un degré de diffusion suffisant pour que le dispositif puisse correctement l'évaluer (acquisition d'échos dus au comportement diffusant de la paroi suffisamment aléatoires). Pour ces raisons, la validation du dispositif a été poursuivie en cherchant à caractériser l'évolution du coefficient de diffusion en fonction de la distance au relief pour une paroi dont le coefficient de diffusion est élevé : un diffuseur de Schroeder.

2 Principe de mesure

La technique de mesure du coefficient de diffusion acoustique proposée à l'origine par Vorländer et Mommertz [2] consiste à superposer des réponses impulsionnelles obtenues au-dessus de la paroi diffuse pour plusieurs angles d'incidence du champ acoustique. La paroi à relief étudiée repose sur une table tournante. Les différentes réponses impulsionnelles sont obtenues en faisant tourner cette plateforme, ce qui permet de faire varier l'angle d'incidence φ (voir figure 1). Vorländer et Mommertz ont choisi d'utiliser le principe d'atténuation des ondes réfléchies diffuses par processus de moyennage dans des conditions de champ libre. La source et le récepteur sont placés en champ lointain, positionnés dans la direction spéculaire θ_s .

La pression acoustique spéculaire p_{spec} est obtenue en moyennant selon l'angle φ un nombre important de

pressions acoustiques réfléchies p_{r,φ_i} pour une incidence spéculaire θ_s

: la composante spéculaire reste cohérente en fonction de φ contrairement à la composante diffuse qui, une fois moyennée, s'atténue :

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

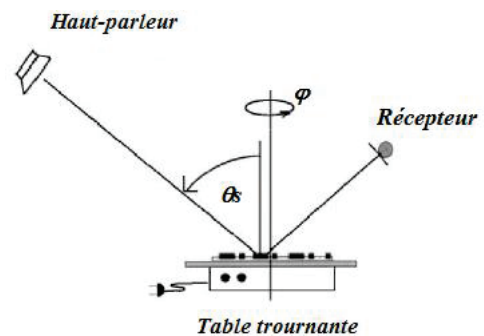


Figure 1 : Principe de la méthode de détermination du coefficient de diffusion en champ libre [2]

A partir de la pression acoustique spéculaire temporelle, il est possible de déterminer l'énergie totale réfléchie moyennée dans la direction spéculaire θ_s et l'énergie réfléchie spéculaire par transformées de Fourier [2]. En combinant ces différentes énergies, on obtient le coefficient de diffusion acoustique δ dans une direction spéculaire θ_s :

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

3 Description du dispositif de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois

Le dispositif contient une antenne multipolaire composée de 15 capteurs et une source impulsionnelle. Un filtrage spatial et temporel assuré respectivement par l'antenne et une fenêtre de type Blackman-Harris (voir figure 2) permet d'isoler les échos réfléchis en provenance de la paroi étudiée des échos parasites issus des conditions

bruyantes et réverbérantes du local industriel pour les tiers d'octave 100 Hz à 5000 Hz [1]. L'antenne et la source sont fixées chacune sur une tige rigide pouvant être déplacée selon l'angle d'incidence spéculaire θ_s (variable de 10° à 80°) sur deux grands arceaux semi-circulaires (voir figure 3). Un plateau rotatif permet de faire pivoter selon l'angle φ l'antenne et la source impulsionnelle très commodément autour du point de mesure (voir figure 4).

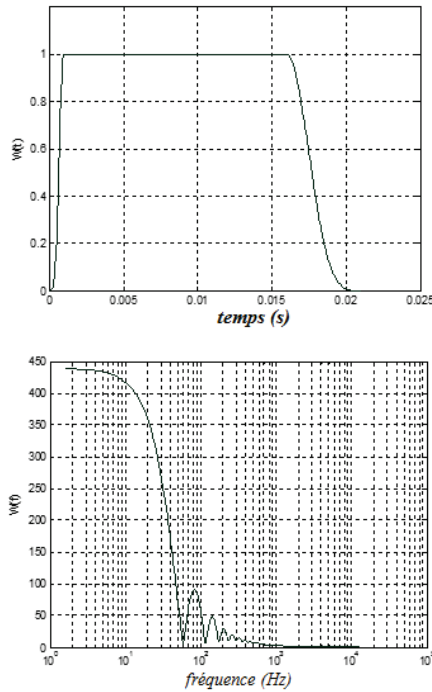


Figure 2 : Fenêtre d'observation de Backmann-Harris [1]

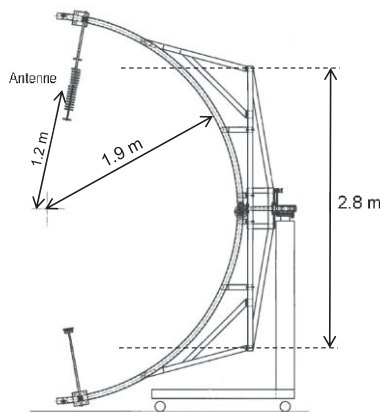


Figure 3 : Schéma du dispositif de mesure [1]

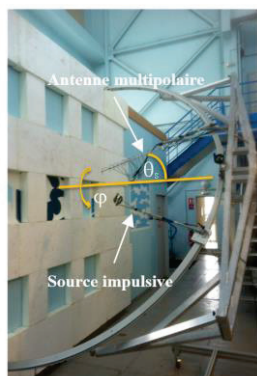


Figure 4 : Photo du dispositif de mesure

3.1 Développement d'une interface d'acquisition et de traitement

Une interface d'acquisition et de traitement afin d'automatiser la mesure et son dépouillement pour la détermination du coefficient de diffusion a été réalisée sous Matlab (voir figure 5).

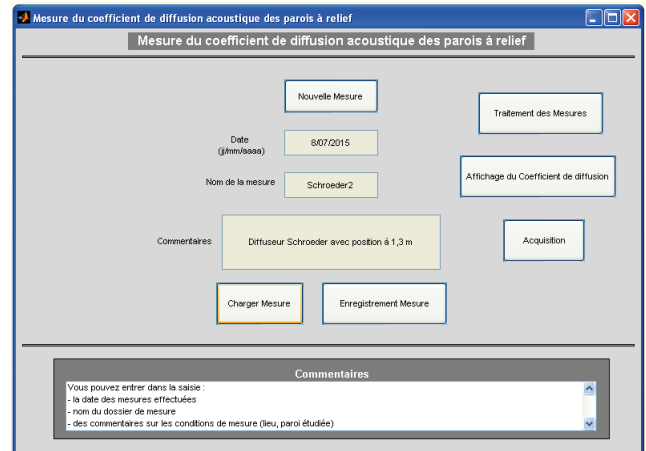


Figure 5 : Interface de saisie d'une mesure

Le système d'acquisition du dispositif de mesure contient deux NetdB de la société 01dB. Ce système est pilotable à l'aide d'une librairie de programmes écrits sous Matlab et des drivers fournis par la société. Des programmes permettent entre autres, de piloter la sortie source, de lancer et stopper l'acquisition, de recueillir les signaux en sortie des capteurs de l'antenne pour plusieurs angle d'incidence φ (voir figure 6).

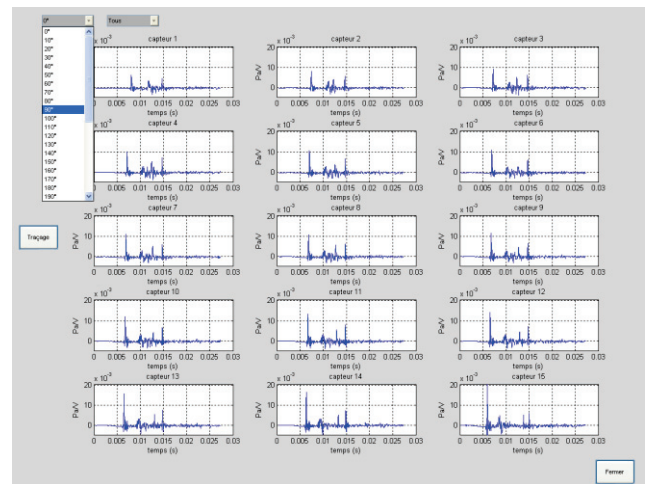


Figure 6 : Les réponses impulsionnelles pour l'ensemble des capteurs de l'antenne pour un angle de rotation φ_i

Après traitement d'antenne, le coefficient de diffusion est déterminé en fonction de l'angle spéculaire par bandes d'octave et de tiers d'octave (voir figure 7).

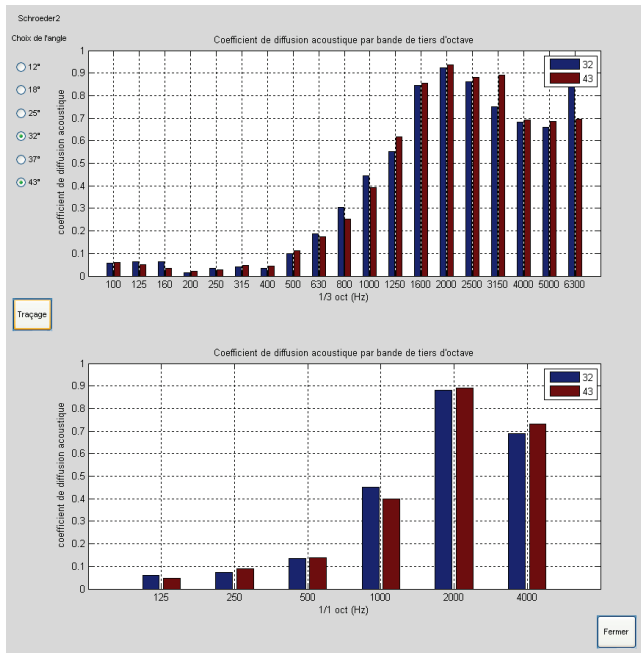


Figure 7 : Exemple de coefficient de diffusion acoustique pour plusieurs angles spéculaires

3.2 Limites du dispositif de mesure

Jusqu'ici les mesures étaient effectuées à une distance d constante de la paroi étudiée. Afin de pouvoir insonifier une plus grande surface de cette paroi et d'étudier la variation du coefficient de diffusion en fonction de la distance, deux nouveaux axes de rotation au niveau du point de fixation de la tige de l'antenne réceptrice et de la source respectivement ont été fabriqués et montés. Il est ainsi possible de reculer le dispositif tout en conservant le même angle spéculaire d'émission et de réception θ_s (voir figure 8).

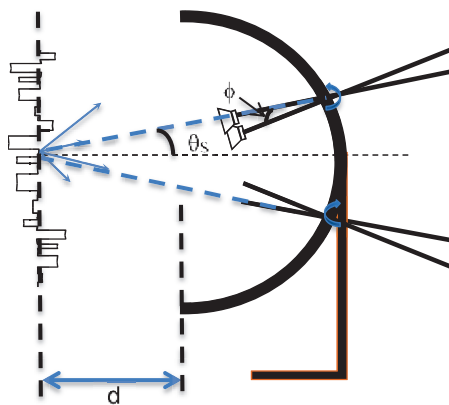


Figure 8 : Nouvel axe de rotation au point de fixation de la tige de l'antenne réceptrice

Cependant, comme le montre la figure 9 qui représente la variation théorique de l'angle spéculaire θ_s et celle de l'angle de déviation ϕ des deux axes de rotation en fonction de la distance, la plage d'angles spéculaires θ_s étalée initialement de 10° à 80° se réduit fortement dès que la distance est grande : au-delà de 2,5 m la dynamique de θ_s est réduite de moitié : de 5° à 30° . Loin de la paroi étudiée, l'incidence spéculaire sera faible et de ce fait les mesures ne pourront pas être effectuées pour des incidences rasantes

ce qui représente une limite du dispositif. Pour prétendre à une caractérisation acoustique correcte de la paroi étudiée, il faudra rester à une distance inférieure à 2,5 m et par conséquent proche de la paroi.

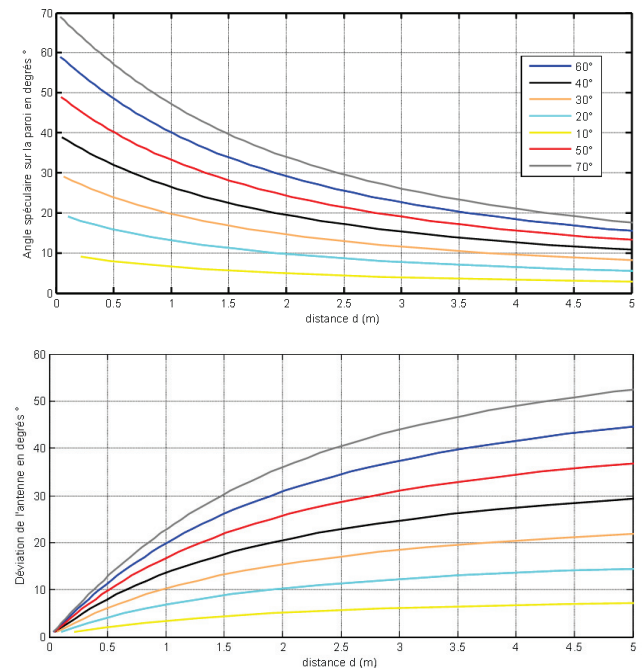


Figure 9 : la variation théorique de l'angle spéculaire θ_s et celle de l'angle de déviation ϕ du nouvel axe de rotation en fonction de la distance

Dans la suite de l'étude, nous nous placerons à une distance $d = 0,3 \text{ m} - 1,3 \text{ m}$ et $2,3 \text{ m}$ respectivement.

4 Mesure du coefficient de diffusion acoustique d'un diffuseur de Schroeder

4.1 Conditions de mesure

Une campagne de mesure a été menée dans un hall réverbérant de l'INRS dont les conditions acoustiques sont données dans le tableau 1. On remarque que le temps de réverbération est relativement élevé ($T_{\text{max}} = 1,42 \text{ s}$ pour l'octave 1000 Hz). Le niveau équivalent linéaire du bruit de fond intégré sur 30 secondes a également été mesuré par bandes d'octave. Il en résulte un niveau équivalent pondéré A assez faible ($37,6 \text{ dB(A)}$).

Octave (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Tr (s)	2,14	1,44	1,40	1,42	1,40	1,15	0,75
$L_{\text{eq},30\text{s}}$ (Lin)	49	40,2	26,4	22,8	18,4	14,1	13,1

Tableau 1 : Mesure du temps de réverbération et du niveau équivalent du hall

4.2 Mesure du coefficient de diffusion acoustique d'un mur plan

Une première série de mesure a été effectuée sur le mur plan réfléchissant du hall afin de vérifier que le dispositif

mesure bien un coefficient de diffusion logiquement faible d'une surface plane. Les mesures ont été réalisées à 1,3 m du mur pour $\theta_s = 25^\circ$ et 35° respectivement (voir figure 10). On constate que ce coefficient reste faible sur la majeure partie du spectre. Son élévation en hautes fréquences est due à la technique de mesure c'est-à-dire à la discrétisation angulaire selon l'angle φ . Avec notre dispositif, il n'est pas possible de procéder à une discrétisation plus fine que 10° , or si le principe de moyennage n'a pas été réalisé avec un nombre suffisant de pressions acoustiques réfléchies temporelles selon l'angle de rotation φ , des oscillations parasites rapides autour du pic d'impulsion spéculaire peuvent subvenir et donc engendrer des erreurs dans le domaine des hautes fréquences. La norme ISO 17497 [6, 7] fixe d'ailleurs une limite à ne pas dépasser en fonction de la fréquence pour garantir, par cette méthode de moyennage, une précision des valeurs du coefficient de diffusion.

expérimentaux. Nos mesures ont été réalisées à 1,3 m du diffuseur (composé de 6 blocsets pour plusieurs angles d'incidence (voir figure 12). Nous remarquons une bonne concordance entre nos résultats expérimentaux et ceux issus de la littérature scientifique.

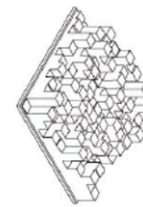
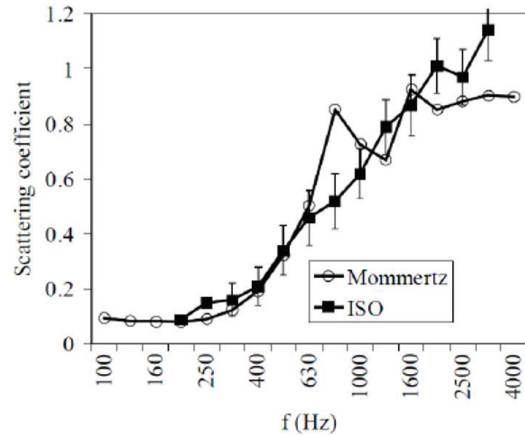


Figure 11 : Coefficient de diffusion acoustique du diffuseur de Schroeder pour plusieurs angles spéculaires [8]

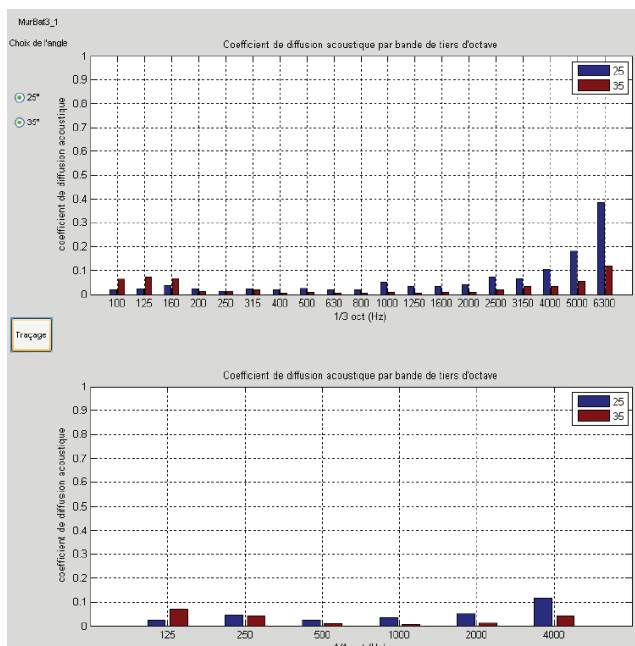


Figure 10 : Coefficient de diffusion acoustique mesuré du mur plan

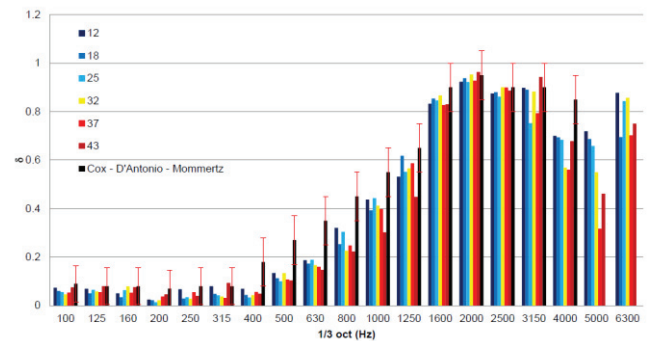


Figure 12 : Coefficient de diffusion acoustique du diffuseur de Schroeder mesuré pour plusieurs angles spéculaires mesuré à 1,3 m

4.3 Mesure du coefficient de diffusion acoustique d'un diffuseur de Schroeder

Le diffuseur de Schroeder étudié possède 144 cellules dont la profondeur répond à une séquence mathématique fondée sur la racine primitive d'un nombre premier. Sa plage fréquentielle d'application s'étend de 800 Hz à 4000 Hz. Les dimensions du diffuseur sont $60 \times 60 \text{ cm}^2$. 6 diffuseurs ont été accolés pour donner une surface totale diffusante de $120 \times 180 \text{ cm}^2$. De nombreux auteurs ont étudié ce type de diffuseur et ont publié des résultats de mesures du coefficient de diffusion acoustique [8] (voir figure 11). Ces mesures ont été réalisées pour plusieurs angles d'incidence et selon plusieurs méthodes : celle de Mommertz sur laquelle repose la technique de mesure de notre dispositif et celle de l'ISO dans une salle réverbérante. Les résultats bibliographiques sont proches quelle que soit la technique de mesure et l'angle d'incidence. Nous avons tracé par bandes de tiers d'octave la moyenne ainsi que l'écart-type de ces valeurs et nous les avons comparés à nos résultats

Le caractère acoustique très diffusant du diffuseur montre que quel que soit l'angle d'incidence spéculaire, le coefficient de diffusion reste constant. Il est élevé dans la même zone fréquentielle 1000 Hz – 4000 Hz. Cette plage de fréquence correspond aux longueurs d'onde des dimensions caractéristiques des cellules du diffuseur, c'est-à-dire aux fréquences où la diffusion est maximale : $f \approx c/(2.h)$ pour h compris entre 4 cm et 13 cm et pour $f \approx c/(2.a)$ pour $a = 4,5 \text{ cm}$, soit environ de 1250 Hz à 4000 Hz (voir figure 13).

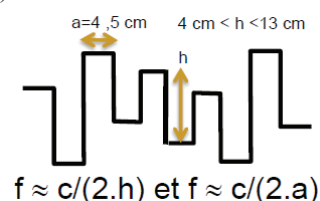


Figure 13 : Dimensions caractéristiques du diffuseur de Schroeder

Nous remarquons aussi à cette distance que l'angle d'incidence θ_s maximal pour lequel les mesures peuvent être réalisées ne peut dépasser 43° . D'autres mesures ont été réalisées à $d = 0,3$ m et $d = 2,3$ m (voir figure 14 et 15). Nous n'avons pas dépassé 43° d'angle d'incidence spéculaire volontairement pour rester comparatif.

Il a été également difficile d'ajuster avec précision les nouveaux angles de rotation ϕ des tiges de l'antenne et de la source pour conserver précisément les mêmes angles spéculaires. C'est la raison pour laquelle les résultats sont uniquement comparables pour :

- $\theta_s = 17^\circ$ pour $d = 0,3$ m et $\theta_s = 18^\circ$ pour $d = 1,3$ m,
- $\theta_s = 27^\circ$ pour $d = 0,3$ m, $\theta_s = 25^\circ$ pour $d = 1,3$ m et $\theta_s = 28^\circ$ pour $d = 2,3$ m,
- $\theta_s = 37^\circ$ pour $d = 0,3$ m, $\theta_s = 37^\circ$ pour $d = 1,3$ m et $\theta_s = 35^\circ$ pour $d = 2,3$ m,
- $\theta_s = 43^\circ$ pour $d = 0,3$ m et $\theta_s = 43^\circ$ pour $d = 1,3$ m,

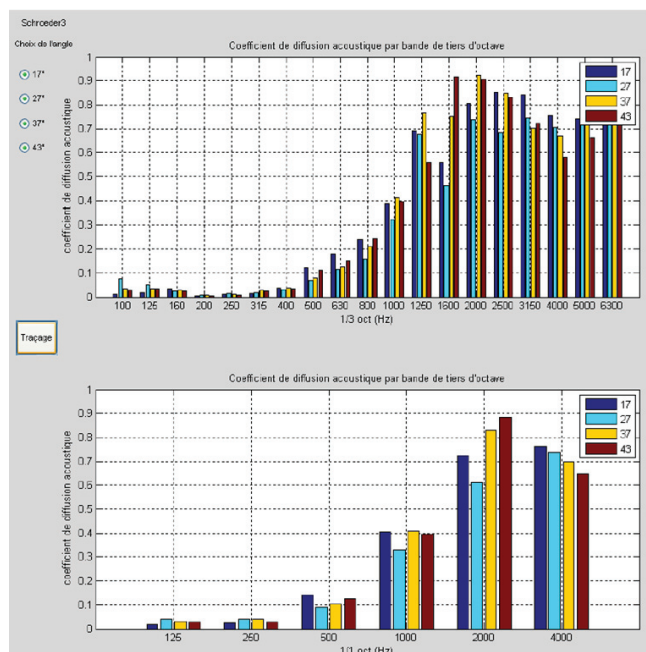


Figure 14 : Coefficient de diffusion acoustique mesuré à 0,3 m du diffuseur de Schroeder pour plusieurs angles spéculaires

Nous remarquons que le caractère très diffusant du diffuseur permet au dispositif d'évaluer correctement son coefficient de diffusion même à courte distance (voir figure 14). Par contre on constate qu'à des distances plus importantes, l'évaluation du coefficient de diffusion se dégrade : on voit apparaître autour du tiers d'octave 315 Hz une élévation anormale du coefficient de diffusion (voir figure 15). A grande distance, il convient de modifier l'angle de l'axe de rotation ϕ pour conserver le même angle spéculaire θ_s et de ce fait un écho parasite en provenance du sol apparaît dans le lobe principal de l'antenne et vient perturber les réponses impulsionnelles. Cet écho apparaît dans la partie diffuse des échos réfléchis. Etant spéculaire, il ne disparaît pas par procédure de moyennage. Il convient donc de ne pas réaliser des mesures à des distances trop éloignées. Nous rappelons ici qu'au-delà de 2,5 m de distance, la dynamique de θ_s est également réduite (5° à 30°).

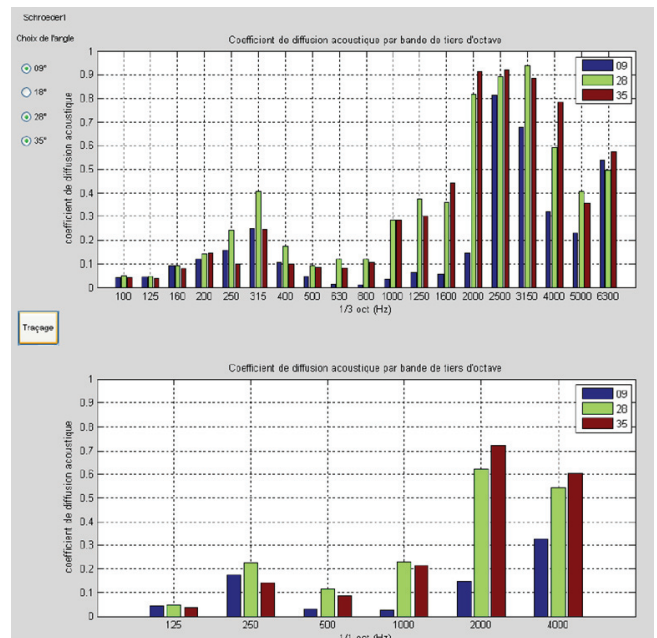


Figure 15 : Coefficient de diffusion acoustique mesuré à 2,3 m du diffuseur de Schroeder pour plusieurs angles spéculaires

D'autres mesures du coefficient de diffusion ont été effectuées au-dessus d'un seul panneau de diffuseur de Schroeder de dimension 60×60 cm² à plusieurs distances $d = 0,3$ m et $d = 1,3$ m. Pour chacune de ces distances, un seul angle spéculaire $\theta_s = 27^\circ$ a été étudié. Les résultats montrent logiquement que le coefficient de diffusion acoustique diminue dans la plage fréquentielle correspondant aux longueurs d'onde des dimensions caractéristiques des cellules du diffuseur. Du fait que la surface diffusante insonifiée a été divisée par 6, le nombre d'échos réfléchis aléatoires a diminué : la réponse impulsionnelle résultante de la procédure de moyennage contient donc une partie réfléchie diffuse moins atténuée. La paroi est par conséquent considérée comme moins diffusante (Voir figure 16 (a)). Si on s'éloigne de la paroi, l'antenne réceptrice a encore moins de chance de capter des échos réfléchis aléatoires : le coefficient de diffusion diminue notablement (Voir figure 16 (b)). A cette même distance, le coefficient de diffusion pour 6 panneaux de diffuseur de Schroeder est nettement plus élevé (voir figure 12).

5 Conclusion

Ce travail fait suite à une étude concernant la mesure du coefficient de diffusion au-dessus d'une singularité du relief. Nous avons constaté que la paroi étudiée doit présenter un degré de diffusion suffisant pour que le dispositif puisse correctement l'évaluer (acquisition d'échos dus au comportement diffusant de la paroi suffisamment aléatoires). Pour ces raisons, une campagne de mesure a été effectuée au-dessus de diffuseurs de Schroeder. Nous avons constaté de par la comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature, que la méthode de mesure du dispositif est adaptée. En effet, les échos réfléchis captés par l'antenne réceptrice sont, pour ce type de parois, suffisamment nombreux et aléatoires pour laisser émerger l'écho spéculaire de l'ensemble des échos réfléchis.

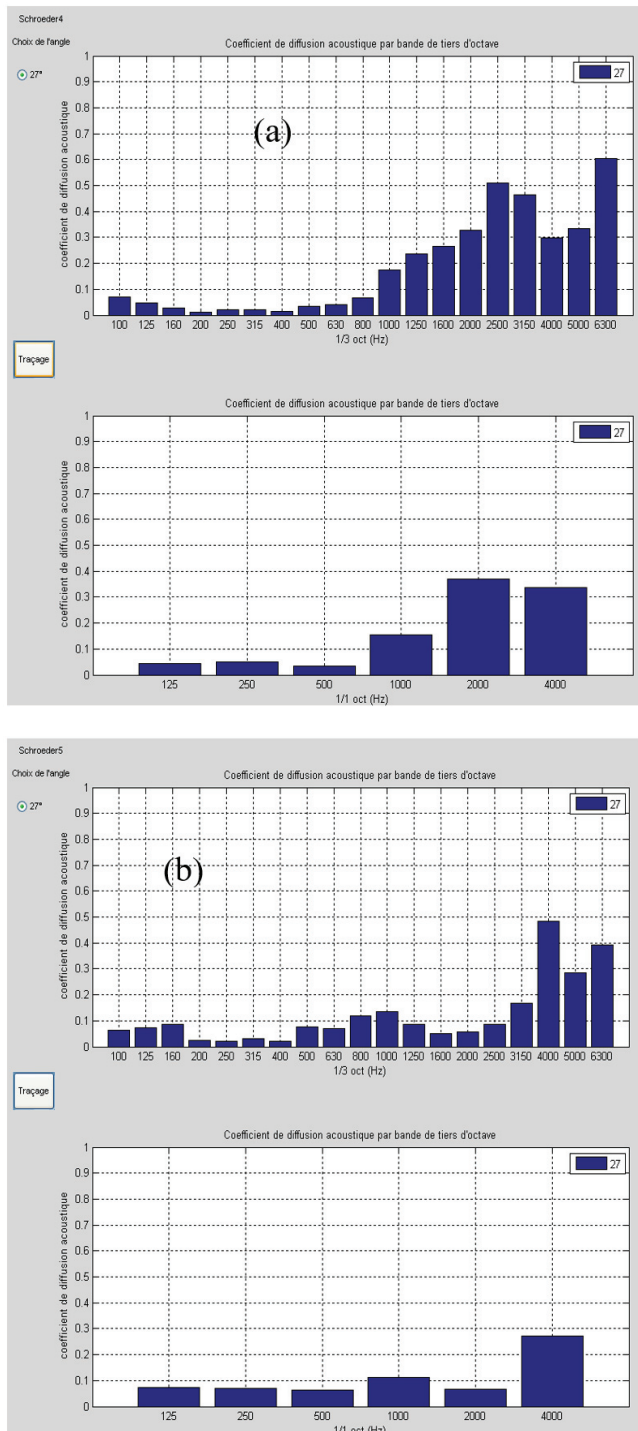


Figure 16 : Coefficient de diffusion acoustique mesuré à 0,3 m (a) et 1,3 m (b) pour un seul panneau de diffuseur de Schroeder pour $\theta_s = 27^\circ$

Deux nouveaux axes de rotation au niveau du point de fixation de la tige de l'antenne réceptrice et de la source respectivement ont été montés pour permettre une mesure en fonction de la distance tout en conservant le même angle spéculaire d'émission et de réception. Les mesures ont montré que pour des distances supérieures à 2,5 m, la plage des angles d'incidence est très limitée. Il convient donc de ne pas réaliser des mesures trop éloignées : 1,3 m semble être une distance correcte qui permet à la fois d'éviter cet écho parasite en provenance du sol et d'étudier la diffusion acoustique sur une plage d'angle d'incidence comprise entre 5° et 50° .

Une nouvelle campagne de mesure au-dessus de diffuseurs de Schroeder basses fréquences est en cours. Le but est de

vérifier si le dispositif est sensible à ce décalage fréquentiel au niveau de la mesure. Cette campagne de mesure permettra de terminer la procédure de validation du dispositif en fixant ainsi les limites en fréquence. Pour cela, un prototype de diffuseur de Schroeder en cours de réalisation : il contient 169 cellules carrées de 10 cm de largeur chacune dont la profondeur varie de 0 à 79,5 cm afin de couvrir un domaine fréquentiel de 200 à 1700 Hz (voir figure 17).

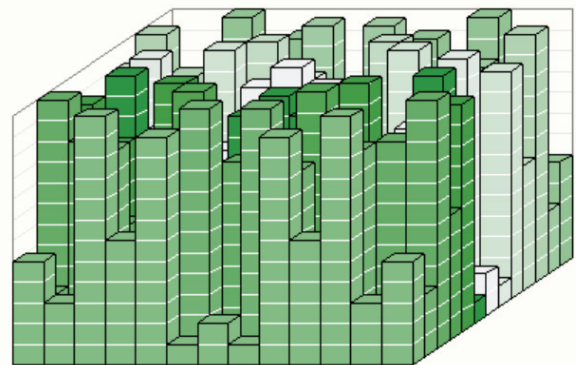


Figure 17 : Prototype du diffuseur de Schroeder basses fréquences

Références

- [1] J. Ducourneau, A. Faiz, A. Khanfir, J. Chatillon, New device for measuring mapping of sound scattering coefficients of vertical uneven surfaces in a reverberant in a reverberant workplace, *Applied Acoustics* Vol : 90, (2015)
- [2] M. Vorlander, E. Mommertz, Definition and measurement of random-incidence scattering coefficient, *Applied Acoustics*, **60**, 187 – 199 (2000)
- [3] J. Ducourneau, V. Planeau, A. Nejade, Design of a multipolar weighting for acoustic antennae, *Applied Acoustics* **70**, 484-49 (2009)
- [4] J. Ducourneau, A. Faiz and J. Chatillon, Measurement of sound diffusion coefficients of a sinusoidal surface in a reverberant workshop, *InterNoise*. 2010, Lisbonne Portugal (2010)
- [5] J. Ducourneau, A. Faiz, A Khanfir and J. Chatillon,- Measuring sound scattering coefficients of uneven surfaces in a reverberant workplace - principle and validation of the method, *Applied Acoustics* **74**, 653-660 (2013)
- [6] ISO 17497, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, (2004)
- [7] L. de Geetere, Analysis and improvement of the experimental techniques to assess the acoustical reflection properties of boundary surfaces, PhD, Université Catholique de Leuven, Belgique, (2004)
- [8] T.J Cox, P. D'Antonio, *Acoustics absorbers and diffusers Theory, Design and application*, Spon Press, 2004