Mesure du coefficient de diffusion d'objets encombrants présents dans les locaux industriels

Measurement of sound diffusion coefficients of scattering furnishing volumes present in workplaces

Adil Faiz, Joël Ducourneau

Université de Lorraine Faculté de Pharmacie 5, rue Albert Lebrun 54001 Nancy

E-mail: adil.faiz@pharma.uhp-nancy.fr joel.ducourneau@pharma.uhp-nancy.fr

Adel Khanfir, Jacques Chatillon

Institut national de recherche et sécurité (INRS) Avenue de Bourgogne 54501 Vandœuvre-lès-Nancy E-mail : adel.khanfir@inrs.fr jacques.chatillon@inrs.fr

Résumé

Les obiets encombrants qui diffusent le son (les bureaux, les chaises, les armoires, ...) sont souvent présents dans les ateliers de travail. Des logiciels prévisionnels d'acoustique comme Ray+ permettant de tracer des cartographies du champ acoustique dans des lieux de travail utilisent les caractéristiques acoustiques comme l'absorption ou la diffusion acoustiques des parois à relief. Dans ce travail, nous avons utilisé un système de mesure pour déterminer le coefficient de diffusion in situ d'ameublement et de personnes. La technique de mesure est basée sur celle développée par Vorländer et Mommertz fonctionnant à l'origine dans des conditions de champ libre. Pour éviter les problèmes d'échos parasites venant de la réverbération et des sources bruyantes présentes sur le site, nous avons utilisé un système d'émission/ réception particulier. Une antenne acoustique utilisant la pondération multipolaire permet le filtrage spatial de l'écho parasite et une source impulsive permet l'utilisation d'une large fenêtre temporelle, aboutissant à la séparation des différents signaux reçus par l'antenne. Des mesures du coefficient de diffusion d'un bureau, d'une ou plusieurs chaises, d'une ou plusieurs personnes assises, des armoires, des parois contenant une ou plusieurs cavités, etc, ont été effectuées pour plusieurs angles d'incidence. Ces mesures permettent de constituer une première base de données du coefficient de diffusion par octave des structures diffusantes présentes dans des lieux de travail.

Abstract

Scattering furniture (office, chair, persons...) are often present in workplaces or in wall facings. Predictive software tools like Ray+ for mapping the acoustic pressure field in workplaces employ acoustic characteristics such as the absorption or diffusion of scattering wall facings or furnishing volume. In this work, we developed a measurement system for determining the in situ sound diffusion coefficient of scattering furniture. The measurement technical is based on Vorländer and Mommertz method originally operating in free-field conditions. In order to overcome problems of parasite echoes coming from reverberation of the other inner-walls of the building and from noisy sources present on the site, we used a dedicated emission/reception system: an acoustic array using multipolar weighting which allows spatial filtering of the parasite echo and an impulsive sound source enables the use of a broad temporal window, resulting in adequate time separation of the different signals received by the antenna. Measurements of sound diffusion coefficient of an office, one or several sat persons, cupboards, panels containing one or several cavities, etc. have been carried out for several incidence angles in a noisy workplace. These measures allow constituting a first database of sound diffusion coefficient per octave of scattering furniture in workplaces.

Unité mixte acoustique des parois (UMAP) s'intéresse depuis sa création en 2001 à la caractérisation acoustique des parois rencontrées dans les locaux industriels. Les logiciels d'acoustique comme Ray+ [1, 2] qu'utilisent l'Institut national de recherche et sécurité (INRS) et les Centres de mesures physiques (CMP) des Caisses d'assurance Retraite et de la santé au travail (CARSAT, ex CRAM) nécessitent les coefficients de réflexion acoustique moyens associés à chaque paroi du local afin de prévoir les niveaux sonores dans les ateliers de travail.

Les locaux industriels contiennent souvent des volumes encombrants comme des meubles (armoire, chaise, bureau, ...), des machines bruyantes ou des personnes. Les parois en tôle ondulée ou en bardages perforés qui délimitent les locaux, peuvent également présenter des reliefs que l'on qualifie de périodiques ou d'apériodiques. Ces volumes ou reliefs engendrent de la diffusion acoustique et un des objectifs du travail mené ici a été d'élaborer une première base de données du coefficient de diffusion acoustique de ces parois et de ces volumes.

Cette base de données a été réalisée à l'aide d'un dispositif de mesure du coefficient de diffusion développé au sein de l'UMAP. Son principe de mesure est basé sur la méthode de M. Vorländer et E. Mommertz [3] qui s'applique à l'origine dans des conditions de champ libre. Cette méthode est basée sur un processus de moyennage de la pression acoustique réfléchie totale au-dessus de la structure diffusante.

Cette méthode a été adaptée, testée et validée pour mesurer le coefficient de diffusion acoustique de parois à relief sur site industriel donc dans des conditions réverbérantes et en présence de sources parasites puissantes [4]. L'utilisation d'une antenne acoustique développée lors d'études précédentes [5] permet de filtrer spatialement les échos dus à la réverbération et ceux en provenance des sources parasites. Ce dispositif a prouvé son intérêt pour de telles mesures en chambre semi-anéchoïque mais surtout dans un atelier de travail réverbérant [4].

Mesure du coefficient de diffusion acoustique

Définition

La diffusion acoustique peut être étudiée pour plusieurs incidences du champ sonore insonifiant une paroi à relief. Pour chaque incidence, il existe une zone de réflexion dite spéculaire, soit la région de l'espace (ou l'angle solide) où la source image obtenue par réflexion est visible à travers la surface diffusante. La définition la plus courante du coefficient de diffusion δ est le rapport entre l'énergie réfléchie à l'extérieur de cette zone spéculaire sur l'énergie totale réfléchie :

$$\delta = 1 - \frac{\int\limits_{\Omega_5} E(\Omega) d\Omega}{\int\limits_{\Omega} E(\Omega) d\Omega}$$
(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.

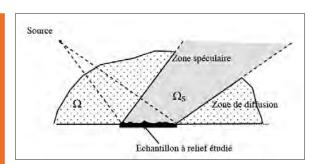


Fig. 1 : Illustration de la zone de réflexion spéculaire et diffuse Illustration of the specular and scattering zone

Afin de pouvoir déterminer le coefficient de diffusion des parois à relief et des volumes présents dans les locaux industriels, nous avons choisi d'adapter la méthode de mesure de Vorländer et Mommertz [3] à des milieux confinés réverbérants bruyants. Pour cela, nous avons utilisé une antenne acoustique à directivité constante en fonction de la fréquence [5, 6] comme récepteur et une source impulsionnelle [4].

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 utilise une plaque tournante sur laquelle est placé l'échantillon à relief étudié qui permet d'effectuer des mesures pour de multiples orientations (Figure 2).

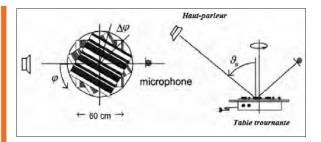


Fig. 2 : Principe de la méthode de détermination du coefficient de diffusion en champ libre [3]

Principle of the method to determine the freefield scattering coefficient [3]

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.

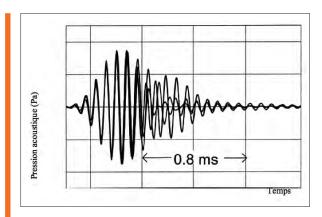


Fig. 3 : Impulsions réfléchies pour 3 orientations différentes d'une paroi à relief [3] Reflected impulses for three different orientations of an irregular surface [3]

On constate sur cette figure que dans la partie initiale, les 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 $p_{r,\phi_i}(t,\theta_s)$ peuvent s'écrire comme la superposition d'une composante diffuse $p_{diff,\phi_i}(t,\theta_s)$ et spéculaire $p_{spec}(t,\theta_s)$ soit :

$$p_{r,\phi_s}(t,\theta_s) = p_{spec}(t,\theta_s) + p_{diff,\phi_s}(t,\theta_s)$$
(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 :

$$p_{\text{spec}}(t, \theta_{\text{s}}) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} p_{r, \phi_{i}}(t, \theta_{\text{s}})$$
(3)

Dans les conditions de champ lointain, l'énergie totale réfléchie moyennée dans la direction spéculaire θ_s peut

2

s'écrire en fonction des transformées de Fourier $p_ri(f, \theta_s)$ des pressions acoustiques temporelles mesurées :

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

K(f,θ_s) est une constante dépendant 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 carré de la transformée de Fourier de la pression acoustique spéculaire :

$$E_{\text{spec}}(f, \theta_{\text{s}}) = K(f, \theta_{\text{s}}) \cdot \left| p_{\text{spec}}(f, \theta_{\text{s}}) \right|^{2}$$
 (5)

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

$$\delta(f, \theta_s) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| p_{r,i}(f, \theta_s) \right|^2 - \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^{n} p_{r,i}(f, \theta_s) \right|^2}{\sum_{i=1}^{n} \left| p_{r,i}(f, \theta_s) \right|^2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| p_{r,i}(f, \theta_s) \right|^2}{\sum_{i=1}^{n} \left| p_{r,i}(f, \theta_s) \right|^2}$$
(6)

avec n >> 1

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

$$\delta(f) = \int_{0}^{\pi/2} \delta(f, \theta_{s}) \sin(2\theta_{s}) d\theta_{s}$$
 (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.

L'antenne multipolaire et la source impulsionnelle

L'inconvénient de la méthode de Vorländer et Mommertz est qu'elle n'est pas utilisable dans un milieu réverbérant. La méthode développée par l'UMAP est basée sur celle utilisée pour déterminer le coefficient d'absorption acoustique des revêtements plans présents dans les locaux industriels [4]. Cette méthode utilise une antenne réceptrice à directivité constante en fréquence contenant 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. Le système récepteur contient 4 sous antennes qui utilisent chacune 5 des 13 capteurs dont les espacements sont des multiples de 2,5 cm [5].

La source d'impulsion a été conçue à partir de la réponse impulsionnelle inverse d'un système d'émission [4]. 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 GO 1031 BII), un amplificateur de puissance (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 doit rester de faible niveau en basses fréquences car le haut-parleur ne peut rayonner de l'énergie sonore dans ce domaine fréquentiel. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser 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.

Les systèmes d'émission et de réception (source + antenne) sont placés sur un portique. Il est possible de déplacer aisément ce portique autour de l'axe central de la surface diffuse étudiée pour procéder à des acquisitions en fonction de φ (Figure 4).

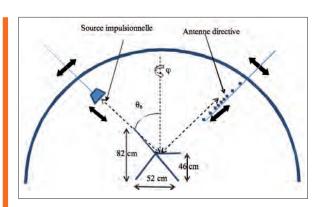


Fig. 4 : Schéma de principe du banc de mesure Schematic of the principle of the measurement system

Mesure du coefficient de diffusion

Les différents objets étudiés

Les volumes étudiés sont :

Config 1	une armoire
Config 2	une table
Config 3	une chaise
Config 4	une table + trois chaises
Config 5	une table + trois chaises + un ordinateur
Config 6	une personne
Config 7	quatre chaises
Config 8	quatre personnes

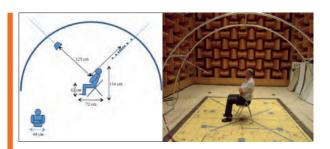


Fig. 5 : Dispositif expérimental pour la mesure du coefficient de diffusion d'une personne Experimental system to measure the scattering coefficient of a person



Fig. 7 : Dispositif expérimental pour la mesure du coefficient de diffusion de quatre personnes Experimental system for measuring the scattering coefficient of four people

Ces volumes ont des formes différentes et l'objectif est de comparer le coefficient de diffusion d'une configuration (ex : une personne) avec le coefficient de diffusion de la même configuration combinée (ex : 4 personnes). Autre exemple : une chaise avec quatre chaises, une table avec une table + trois chaises + un ordinateur. Seuls quelques résultats de configurations sont présentés dans les figures qui suivent.

La figure 5 montre le dispositif expérimental de mesure du coefficient de diffusion acoustique d'une personne assise de volume 134 \times 72 \times 62 cm³. La mesure a été effectuée pour des angles θ_S compris entre 30° et 80°.

Dans la configuration d'une personne, le coefficient de diffusion est important à partir de l'octave 3 kHz, son maximum est atteint pour l'angle $\theta_s = 10^\circ$ à f = 5 kHz.

Pour la configuration contenant les 4 personnes (figure 8), le coefficient de diffusion est important plus tôt à partir de l'octave 500 Hz, et son maximum (~ 0,9) est atteint également pour l'angle 10°. La figure 9 présente la comparaison entre le coefficient de diffusion acoustique pour une personne et pour quatre personnes. Nous constatons que plus le nombre augmente, plus le coefficient de diffusion est important. Cela peut se traduire par un relief plus complexe, plus tortueux qui engendre donc plus de diffusion. Le coefficient de diffusion est guasiment doublé lorsque le nombre de personnes devient important. Nous avons constaté les mêmes résultats lorsque nous avons mesuré le coefficient de diffusion au-dessus d'une chaise, et que nous l'avons comparé avec celui de 4 chaises (Figure 10) ou bien 3 chaises + une table + un ordinateur (Figure 11).

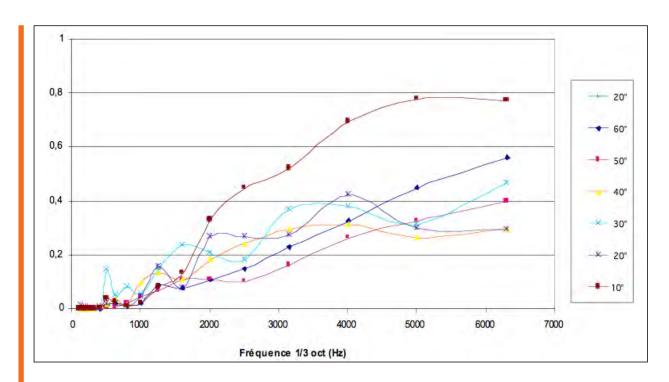


Fig. 6 : Coefficient de diffusion acoustique d'une personne assise (config7) de volume (134 × 72 × 62) cm³ Sound scattering coefficient of a seated person (config7) with a volume of 134 × 72 × 62 cm³

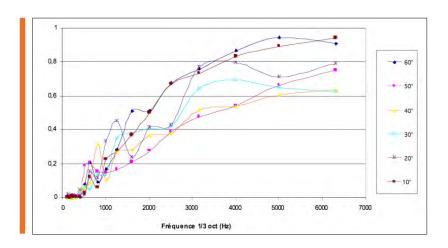


Fig. 8 : Coefficient de diffusion acoustique de quatre personnes Sound scattering coefficient of four people

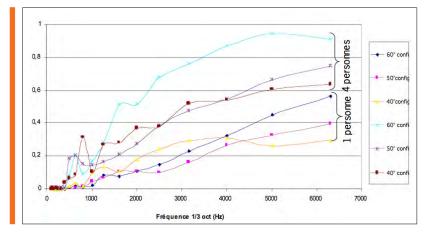


Fig. 9: Comparaison entre le coefficient de diffusion acoustique d'une personne et celui de quatre personnes
Comparison of the sound
scattering coefficient of a
person and that of four people

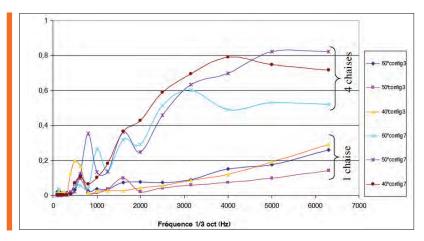


Fig. 10: Comparaison entre le coefficient de diffusion acoustique d'une chaise et celui de quatre chaises Comparison of the sound scattering coefficient of a chair and that of four chairs

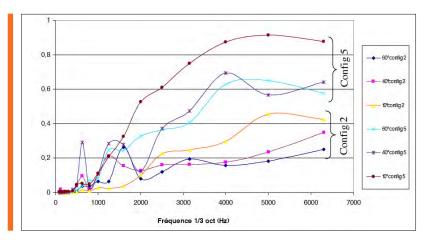


Figure 11 : Comparaison entre le coefficient de diffusion acoustique d'une table et celui d'une table + trois chaises + ordinateur Comparison of the sound scattering coefficient of a table and that of table + three chairs + computer

3

Base de données du coefficient de diffusion acoustique

L'ensemble de ces mesures ont permis d'établir la première base de données du coefficient de diffusion global des objets, des personnes présentes dans des locaux industriels par bandes d'octave (Tableau 1).

Configuration	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
1 armoire	0,019	0,012	0,056	0,066	0,101	0,151
1 chaise	0,021	0,017	0,085	0,015	0,031	0,097
4 chaises	0,007	0,002	0,040	0,075	0,200	0,441
1 table	0,013	0,009	0,053	0,060	0,081	0,147
1 table +3 chaises	0,014	0,008	0,035	0,076	0,149	0,311
1 table +3 chaises +PC	0,003	0,004	0,045	0,077	0,210	0,431
1 personne	0,003	0,002	0,031	0,043	0,131	0,251
4 personnes	0,008	0,006	0,064	0,122	0,275	0,473

Tabl. 1 : Coefficient de diffusion acoustique des structures diffusantes étudiées

Sound scattering coefficient of the scattering structures studied

Nous avons volontairement laissé dans ce tableau des valeurs avec 3 décimales après la virgule pour montrer la faible diffusion engendrée par certaines structures diffusantes à certaines octaves. Nous convenons bien que ces valeurs ne peuvent pas être aussi précises vu que l'incertitude de mesurage, même si elle n'a pas été évaluée, doit être plus élevée que les précisions affichées dans le tableau 1. Des coefficients de diffusion à deux chiffres après la virgule seront retenus par la suite pour être utilisés dans les logiciels prévisionnels d'acoustique.

En dessous de 500 Hz, ce coefficient est faible pour cette catégorie des structures étudiées (personnes, chaise, table, armoire). En effet, la diffusion engendrée est faible du fait que le relief responsable de la diffusion n'est pas très important ou que l'essentiel de la réflexion acoustique est spéculaire comme dit précédemment dans le cas de la table ou l'armoire. Par contre au-delà de 1 kHz, ce coefficient devient plus important. Ce coefficient global confirme que la diffusion augmente avec la fréquence et lorsque la structure présente un relief plus complexe engendrant plus de tortuosité comme par exemple la configuration contenant une table + trois chaises.

Conclusion

Ce travail présente la première base de données du coefficient de diffusion acoustique de structures à relief présentes dans les locaux industriels (ameublement, personnes présentes à l'intérieur).

Cette campagne de mesure a été réalisée à l'aide du dispositif portable permettant de mesurer in situ le coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans des locaux industriels. Ce dispositif portable basé sur la méthode développée par Vorländer et Mommertz a été adapté aux conditions réverbérantes des locaux industriels en utilisant une antenne acoustique directive et une source impulsionnelle déjà utilisées pour la mesure de l'absorption acoustique

Ces mesures ont été menées dans la chambre semianéchoïque de l'INRS et elles ont permis d'observer logiquement :

- une forte diffusion engendrée par un relief de plus en plus complexe,
- une faible diffusion sur des ameublements comprenant une grande surface plane comme une armoire,
- une diffusion de plus en plus importante avec la fréquence quelle que soit la structure à relief étudiée,
- une diffusion plus élevée en incidence normale, plus faible en incidence rasante.

Le coefficient de diffusion acoustique respectif global puis plus précisément, en fonction de l'angle d'incidence de ces volumes, seront à termes, intégrés dans les logiciels prévisionnels du champ sonore (Ray +).

Références bibliographiques

- [1]. A.M. Ondet. and J.-L. Barbry, Prévision des niveaux sonores dans les locaux industriels encombrés à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle RAYSCAT, e.t.l. Cahiers de notes documentaires n°142, Editor. 1991.
- [2]. A.M. Ondet. and J.-L. Barbry, Modelling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. Journal of the Acoustical Society of America, 1989. 85: p. 787–796.
- [3]. M. Vörlander. and E. Mommertz, Definition and measurement of random-incidence scattering coefficient. Applied Acoustics, 2000. 60: p. 187 199.
- [4]. J. Ducourneau, A. Faïz, and J. Chatillon. Measurement of sound scattering coefficients of a sinusoidal surface in a reverberant workshop. In InterNoise. 2010 juin Lisbonne Portugal
- [5]. J. Ducourneau, V. Planeau, and A. Néjade, Design of a multipolar weighting for acoustic antennae. Applied Acoustics, 2009. 70: p. 484–492.
- [6]. J. Ducourneau et al., Prediction of the acoustic pressure above periodically uneven facings in industrial workplaces. Journal of Sound and Vibration, 2010. 329: p. 2276–2290.