

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Retour d'expérience sur la mise en application de la norme ISO-17497-1

Isabelle Schmich¹

¹Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Batiment, 24 Rue Joseph Fourier 38400 Saint Martin D'Hères
isabelle.schmich@cstb.fr

La diffusion acoustique est un phénomène physique majeur influant sur la qualité des salles des spectacles. La norme ISO 17497-1 concerne la mesure du coefficient de dispersion. Publiée en 2004, elle propose une méthode de mesure en laboratoire permettant d'estimer les propriétés diffusantes d'un matériau. La mesure du coefficient de dispersion en incidence aléatoire est réalisé en chambre réverbérante.

Le CSTB a mis en place un banc de mesure selon la norme. Plusieurs diffuseurs de forme sinusoïdale, MLS, QRD ou hémisphérique, ont été testés. Les résultats ont été comparés avec ceux d'autres laboratoires. Les difficultés rencontrées, notamment les effets de bords, et leurs résolutions seront présentées.

1 Introduction

La prise en compte de la diffusion dans les outils de simulation d'acoustique des salles est aujourd'hui très approximative par manque de connaissance des propriétés diffusantes de différents matériaux et formes de construction.

La norme ISO-17497-1 [1], publiée en 2004, propose une méthode de caractérisation de la dispersion en incidence aléatoire qui peut par la suite être éventuellement introduite dans un logiciel de simulation acoustique.

Le coefficient de dispersion en incidence aléatoire est défini sous condition d'un champ diffus tel que :

$$s = \frac{E_d}{E_{réfléchie}} \quad (1)$$

2 La méthode ISO

La norme ISO 17497-1 [1] prévoit l'utilisation d'une table tournante, placée dans la salle réverbérante, afin de pouvoir entreposer et faire tourner l'échantillon diffusant. Le coefficient de dispersion du diffuseur est, d'après l'équation (1), égal à :

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (2)$$

La norme prévoit la mesure de quatre durées de réverbération décrites dans la Table 1 et définies par la suite.

	plateau fixe	plateau en rotation
sans échantillon	T1	T3
échantillon posé sur le plateau	T2	T4

Table 1 : Description des durées de réverbération utilisées dans la norme

3 Le banc d'essai du CSTB

Le matériel

Les mesures ont été réalisées dans la salle réverbérante du CSTB Grenoble.

Le plateau tournant d'une surface de 10 m² (diamètre : 3.6m) est constitué de panneaux en bois, découpés en cercle et montés sur des roulettes. La rotation du plateau tournant se faisait manuellement dans un premier temps puis a été motorisée afin de réduire la durée de la mesure. Pendant que le plateau tournant effectue un tour complet, la réponse de la salle est enregistrée en émettant plusieurs signaux MLS d'ordre 15 à la suite. La durée totale de la mesure est au minimum, égale à une révolution complète du plateau.

La capsule du microphone est un demi-pouce B&K 4190. La source utilisée est une enceinte deux voies GENELEC à haut rendement (110 dB à un mètre).

Le protocole de mesure

La durée de réverbération de la salle est obtenue en moyennant les six durées de réverbération mesurées pour différentes positions de microphones et de haut-parleurs. Deux positions de sources et trois positions de microphones ont été utilisées. Pour chaque mesure, il est important de noter la température et le taux d'humidité de l'air.

Les durées de réverbération sont calculées par tiers d'octave, les fréquences centrales allant de 100 à 5000 Hertz.

4 Diffuseurs testés et résultats

Diffuseur 2D de type MLS

Ce diffuseur est constitué de deux séquences MLS d'ordre N=15 {1,0,1,1,0,0,1,0,0,1,1,1,0,0} réalisées à partir de tasseaux de bois dont la section est constante dans une direction (cf. Figure 1).



Figure 1 : Diffuseur 2D MLS d'ordre 15

A titre de comparaison la courbe du coefficient de dispersion mesuré par un diffuseur ressemblant (cf. Figure 2) à celui du MLS a été tracée dans la Figure 3.



Figure 2 : Diffuseur mesuré par De Geetere [2]

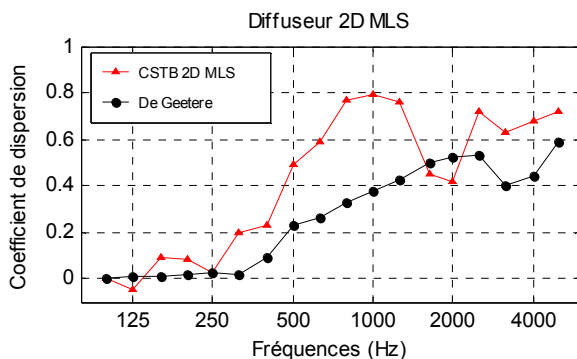


Figure 3 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur MLS du CSTB et par De Geetere [2].

L'allure de la courbe du coefficient de dispersion montre que l'efficacité de la diffusion se concentre autour de deux fréquences. On observe une diffusion maximum à environ 1000 Hz soit une longueur d'onde de 34 centimètres. Cela correspond à quatre tasseaux accolés c'est à dire 32 centimètres. La présence d'un deuxième maximum semble correspondre à la profondeur des puits soit 10,5 cm. En effet, la bande de tiers d'octave correspondante, confirmée par la courbe, est d'environ 3265 Hz.

Pour le diffuseur mesuré par De Geetere on observe aussi une diffusion maximum, même si elle se trouve à des plus hautes fréquences. Cela est probablement provoqué par l'épaisseur plus faible des tasseaux.

Diffuseur 2D de type sinusoïdal

Ce diffuseur a été réalisé à partir d'une plaque ondulée en fibre-ciment pour couvrir les toitures. La Figure 5 présente le profil d'une de ces plaques.

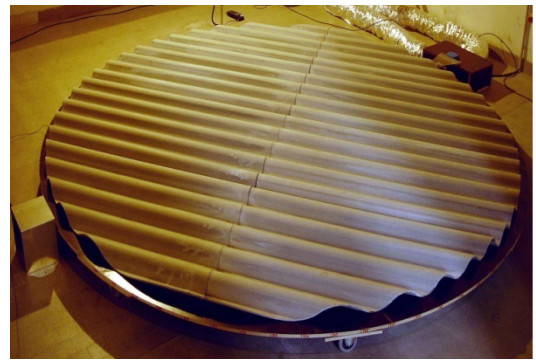


Figure 4 : Diffuseur 2D sinusoïdal

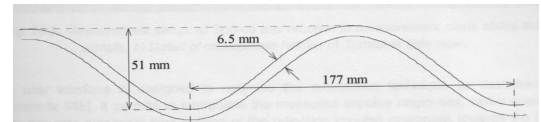


Figure 5 : Vue en coupe d'une plaque ondulée en fibre-ciment.

Le coefficient de dispersion du diffuseur sinusoïdal est comparé aux résultats mesurés par De Geetere [2]. Les courbes sont confrontées dans la Figure 6 ci-dessous.

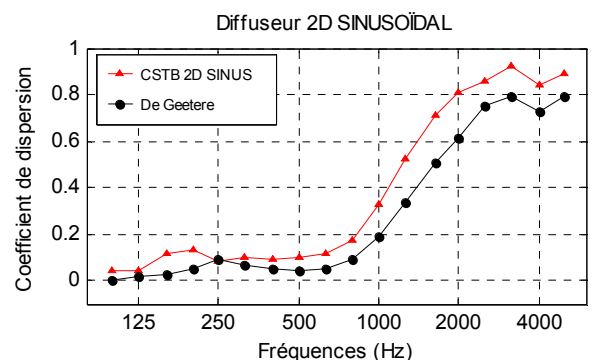


Figure 6 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur sinusoïdal mesuré par De Geetere [2] et au CSTB.

Les ressemblances sont fortes mais on observe néanmoins que le coefficient de dispersion est plus élevé pour l'échantillon mesuré au CSTB d'environ 0.1. Les matériaux qui ont été utilisés au CSTB pour construire le diffuseur sinusoïdal ont été choisis par rapport aux informations que nous avons sur les mesures effectuées par De Geetere [2]. Les matériaux utilisés sont donc sensés être les mêmes. Mais le nombre d'onde caractérisant les dimensions diffère d'une tôle à l'autre, ce qui peut expliquer en partie ces différences.

Diffuseur 3D de type QRD

Le diffuseur 3D est un QRD bidimensionnel d'ordre 10 de largeur de puits 24 cm et de profondeur maximale 30 cm.

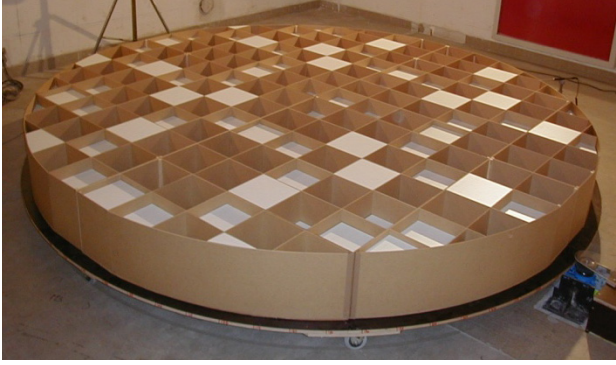


Figure 7 : Diffuseur 3D QRD circulaire sur le plateau tournant

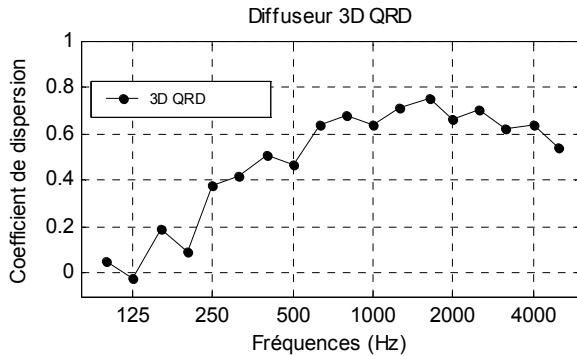


Figure 8 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur 3D QRD.

On peut observer que le diffuseur 3D QRD a de bonnes propriétés diffusantes sur une bande de fréquences assez large, notamment en moyennes et basses fréquences.

Diffuseur 3D de type hémisphérique

Les diffuseurs hémisphériques testés au CSTB sont constitués de demi-sphères en polystyrène d'un diamètre donné, placées de façon aléatoire sur le plateau tournant de la salle réverbérante.



Figure 9 : Diffuseur hémisphérique avec des demi-sphères d'un diamètre de 25cm et un taux de couverture de 50%

Nous disposons de demi-sphères de 15cm, 20cm et 25cm en polystyrène que nous avons alourdies avec du plâtre afin de limiter l'absorption et surtout de descendre la fréquence d'absorption du polystyrène (cf. Figures 13 et 14).

Ce type de diffuseur a déjà été testé, mais seulement à partir de mesures à échelle réduite aux 1/10ème et 1/5ème par Jeon [3] et Vorländer [4] respectivement.



Figure 10 : Intérieurs plâtrés des demi-sphères

Les courbes de coefficient de dispersion obtenues sont tracées sur les Figure 11, Figure 12 et Figure 13 en fonction de la taille des demi-sphères et du taux de recouvrement du plateau (en %).

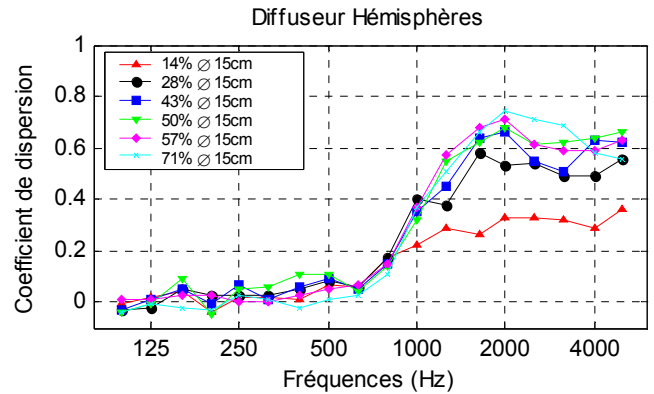


Figure 11 : coefficient de dispersion en fonction du taux de recouvrement du plateau obtenu pour le diffuseur hémisphérique de 15cm de diamètre

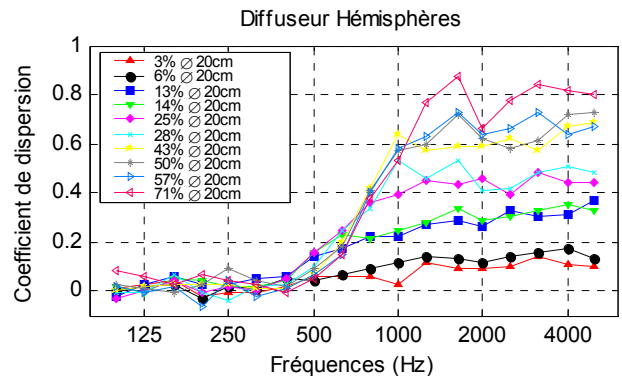


Figure 12 : coefficient de dispersion en fonction du taux de recouvrement du plateau obtenu pour les demi-sphères de 20cm de diamètre

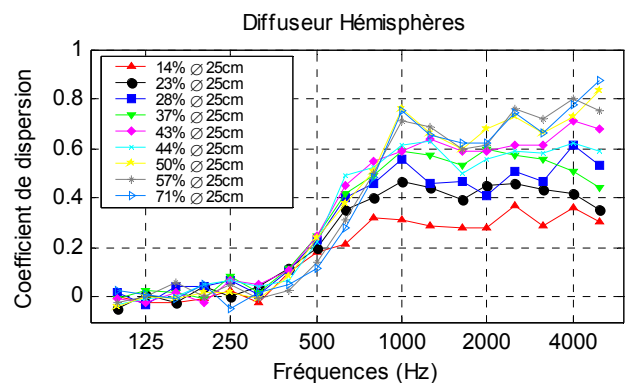


Figure 13 : coefficient de dispersion en fonction du taux de recouvrement du plateau obtenu pour les demi-sphères de 25cm de diamètre

Le coefficient de diffusion est nul jusqu'à une certaine fréquence que l'on appelle 'fréquence de coupure f_c '.

Cette fréquence f_c augmente quand le diamètre des demi-sphères diminue (cf. Figure 14). Le Tableau 2 donne les valeurs expérimentales de f_c .

Diamètre demi-sphères	f_c
15 cm	630 Hz
20 cm	400 Hz
25 cm	315 Hz

Tableau 2

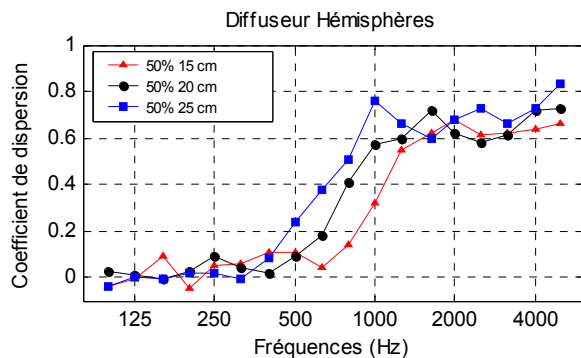


Figure 14 : coefficient de dispersion pour les trois diamètres de demi-sphères (15cm, 20cm et 25cm) avec un taux de recouvrement du plateau de 50%.

Par ailleurs, on peut également remarquer qu'avec un taux de recouvrement du plateau de 50%, la taille des demi-sphères intervient peu dans la valeur du maximum du coefficient de dispersion.

La comparaison des résultats pour les diffuseurs hémisphérique du CSTB et Jeon [3] (Echelle 1 :10) sur la Figure 15 montre une bonne concordance.

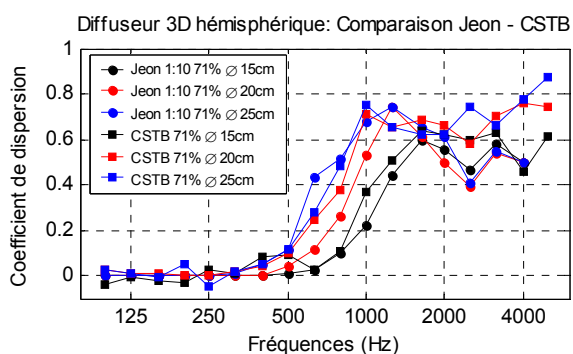


Figure 15 : coefficient de dispersion de Jeon (échelle 1:10) et CSTB pour les trois diamètres de demi-sphères (15cm, 20cm et 25cm) avec un taux de recouvrement du plateau de 71% les demi-sphères de 20cm de diamètre

Les résultats présentés ci après visent à analyser l'influence du taux de recouvrement du plateau sur la valeur du coefficient de dispersion.

Pour cela nous observons l'évolution du coefficient de dispersion moyen en fonction du taux de recouvrement à taille de demi-sphère identique sur la Figure 16. La moyenne est effectuée de 0.5 à 4 kHz [4].

Ce coefficient de dispersion moyenné n'est pas vraiment pertinent puisque la fréquence de coupure f_c est différente selon la taille des demi-sphères (cf. Tableau 2). Cependant,

afin de pouvoir effectuer une comparaison des résultats avec d'autres laboratoires, nous avons conservé ce coefficient moyen au détriment d'un coefficient moyen « filtré » qui semble plus pertinent pour évaluer l'influence du taux de couverture.

On observe sur la Figure 16 que l'efficacité du diffuseur hémisphérique est maximale pour un taux de recouvrement entre 50 et 70%.

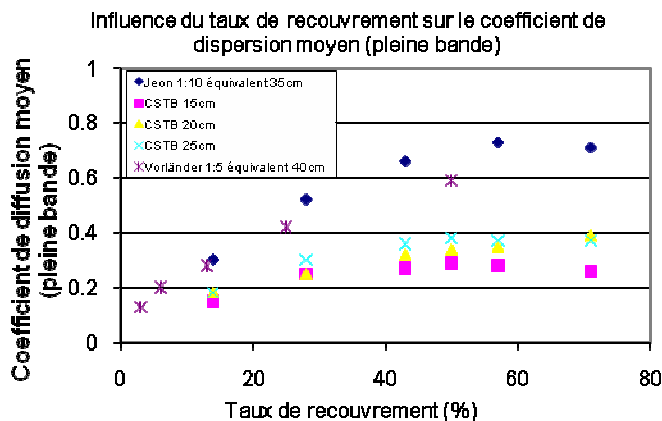


Figure 16 : Coefficients de dispersion moyens pour les différentes tailles de demi-sphères, obtenus en moyennant les valeurs par tiers de bande d'octave sur toute la bande de fréquence, en fonction du taux de recouvrement des demi-sphères sur le plateau.

Diffuseur LAFARGE PREGYBEL

Nous avons eu la possibilité de tester des produits du commerce, notamment les produits utilisés pour les plafonds comme LAFARGE PREGYBEL C10N8 et L5 80 (cf. Figure 17 et Figure 18).



Figure 17 : Diffuseur LAFARGE PREGYBEL C10N8

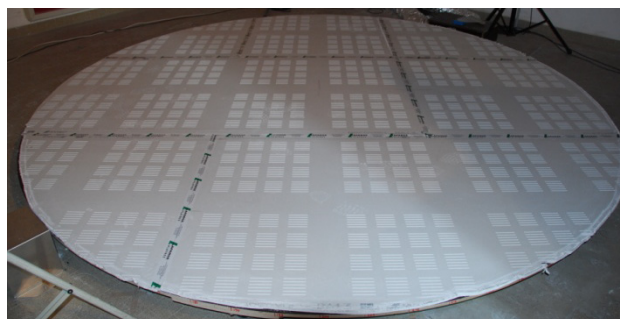


Figure 18 : Diffuseur LAFARGE PREGYBEL L5 80

Le résultat (cf. Figure 19) montre que le coefficient de dispersion est non nul à partir d'environ 2000Hz, ce qui est un peu trop élevé pour être efficace pour p.ex. diminuer l'intelligibilité d'une conversation. Afin d'augmenter les performances de ces produits, il faudrait augmenter le profil, notamment la profondeur des cavités.

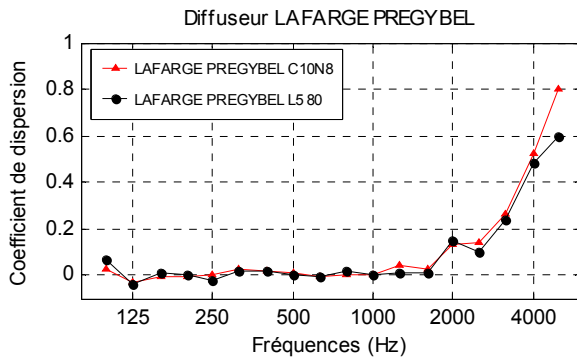


Figure 19 : Coefficient de dispersion pour les diffuseurs LAFARGE PREGYBEL C10N8 et L5 80.

5 Problèmes rencontrés et solutions

Rotation manuelle / rotation motorisée

Lors de la conception du banc de mesure, la rotation du plateau a été prévue de façon manuelle. La durée d'une mesure étant très longue (rotation du plateau de 5° entre chaque mesure), les valeurs pour le plateau de référence étaient souvent au dessus de la limite ISO pour les hautes fréquences [1]. Afin d'accélérer les mesures et de s'affranchir du problème de limite du plateau de référence le banc de mesure a été motorisé.

La Figure 20 ci dessous présente les résultats obtenus pour le diffuseur MLS par rotation manuelle et rotation motorisée du plateau tournant.

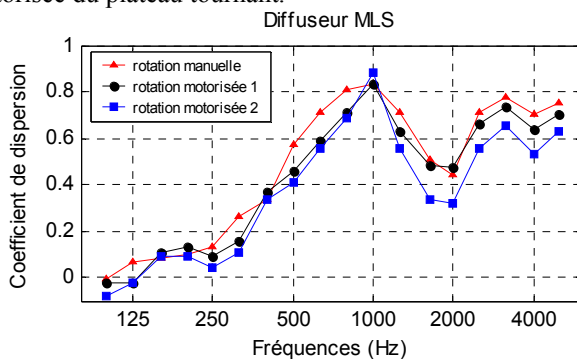


Figure 20 : Coefficient de dispersion comparé entre la rotation manuelle et motorisée

On observe une légère différence avec les mesures motorisées. Ceci est probablement du qu'on ne fait qu'une seule rotation du plateau motorisée.

Nombre de tour de rotation du plateau

L'influence du nombre de tours de plateau a été testée sur deux diffuseurs 2D : MLS et sinusoïdal.

On remarque qu'avec la méthode de mesure manuelle, la courbe est lissée alors qu'avec la mesure motorisée un pic apparaît autour de 1000Hz.

Les résultats de mesure pour le diffuseur MLS et sinusoïdal présentés sur la Figure 21 et Figure 22 respectivement, permettent de déduire qu'à partir de 2 tours les résultats de mesure semblent devenir reproductibles.

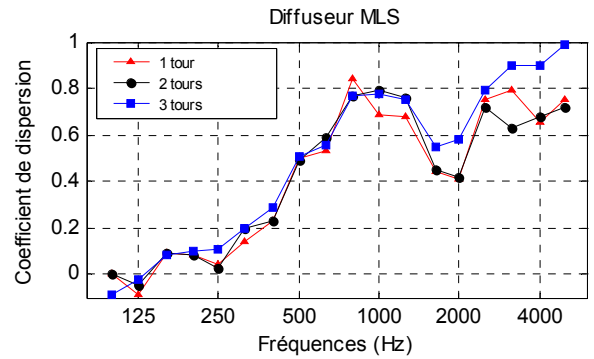


Figure 21 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur MLS en fonction du nombre de tours du plateau de rotation.

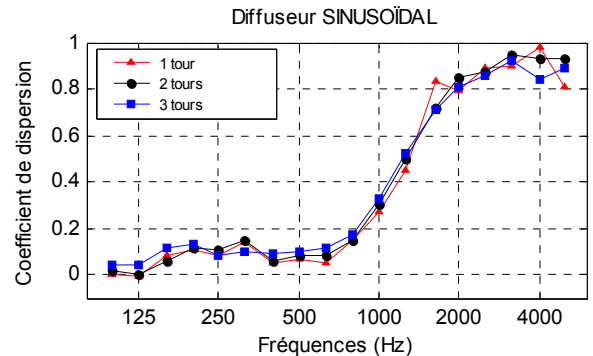


Figure 22 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur sinusoïdal en fonction du nombre de tours du plateau de rotation.

Effets de bord

Les courbes de coefficient de diffusion obtenues précédemment sur le diffuseur QRD montraient un pic pour la bande de fréquence 250 Hz (cf. Figure 23). Les résultats de la mesure du coefficient de dispersion ne sont fiables que lorsque l'épaisseur de l'échantillon est faible par rapport au diamètre (c'est-à-dire lorsque $h \leq d/16$, où d est le diamètre et h la hauteur) [1]. Ici, $h = 0.3$ m donc $16 \cdot h = 4.8$ m alors que le diamètre n'est que de 3.6 m.

Par ailleurs, des phénomènes d'effets de bord peuvent apparaître en raison de la hauteur des bords du diffuseur, entraînant des mesures de coefficients de diffusion $s > 1$ [1].

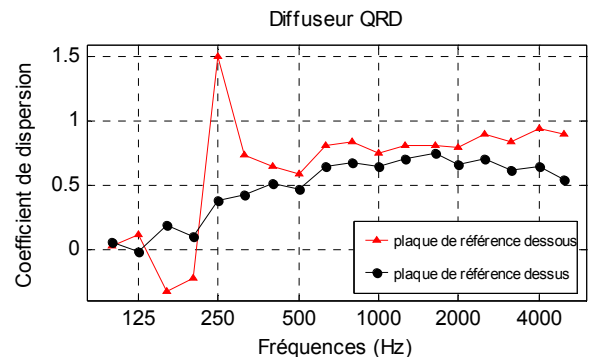


Figure 23 : Coefficient de dispersion pour le diffuseur QRD avec la plaque de référence en dessous et au dessus du diffuseur.

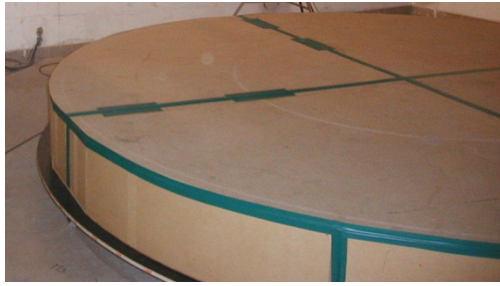


Figure 24 : Diffuseur 3D QRD recouvert d'une plaque de référence.

Afin de réduire ces effets de bord, pour le diffuseur 3D QRD une plaque de référence a été positionnée au dessus du diffuseur (cf. Figure 24) [5]. Les mesures effectuées avec cette configuration permettent d'obtenir des résultats plus cohérents comme le montre la Figure 23.

Conditions du champ acoustique

Lors de différentes mesures, il a été constaté que le résultat pour le coefficient de dispersion est très sensible des variations de température et d'humidité relative. Notamment, il faut prendre en compte un certain temps de stabilisation du champ acoustique après chaque présence humaine à l'intérieur de la salle réverbérante.

6 Conclusion

Un banc de mesure du coefficient de dispersion selon la norme ISO 17497-1 a été mis en place au CSTB. Les mesures sur différents diffuseurs de forme sinusoïdale, MLS, QRD, hémisphérique ou produits du commerce ont permis de valider ce banc de mesure et de comparer les résultats obtenus avec ceux des autres équipes de recherches dans ce domaine. Les difficultés rencontrées et les solutions adoptées ont été précisées.

Un futur travail consistera d'effectuer la comparaison des résultats de mesure avec les prévisions calculées par méthodes numériques.

Remerciements

Je tiens à remercier tous les étudiants qui ont permis d'avancer ce domaine de recherche : Damien Parmentier, Tomas Charrel, Jean Despax, Nolwenn Courtas et Eloïse Vidal.

Merci à Cyrille Demanet de Lafarge plâtre pour avoir fait confiance au CSTB pour effectuer les mesures de diffusion sur ces échantillons et l'autorisation de publier les résultats de mesure.

Références

- [1] ISO 17497-1, "Acoustics – Measurement of the sound scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room", (2004).
- [2] De Geetere L., Vermeir G., "Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room", *Proceedings of the ICA Seville*, (2002).

- [3] Jeon J.Y., Lee S.C., Vorländer M., "Development of scattering surfaces for concert halls", *Applied Acoustics* 65, 341-355, (2004).
- [4] Vorländer M., Mommertz E., "Definition and Measurement of Random-incidence Scattering Coefficients", *Applied Acoustics* 60, 187-199, (2000).
- [5] Embrechts J.J., communication personnelle
- [6] Trevor J. Cox and Peter D'Antonio, "Acoustic Absorber and Diffusers, Theory, Design and Application", *Spon Press*, 87-127, 233-275, (2004).