

Modélisation des réflexions diffuses en acoustique des salles : état de la question

Jean-Jacques Embrechts^a

^a Département d'Electricité, Electronique et Informatique, Université de Liège, bât. B28, B-4000 Liège 1, Belgique

RESUME

Les réflexions diffuses en acoustique des salles sont générées par les dimensions finies des surfaces (en basse fréquence) et par leur profil de rugosité (en haute fréquence). Deux techniques de mesures sont actuellement en cours d'évaluation et de normalisation. Parmi celles-ci, la mesure du coefficient de « dispersion » ISO permet d'alimenter les logiciels de simulation, afin de tenir compte de l'effet des surfaces diffusantes. En particulier, les améliorations apportées à la technique des rayons sonores sont décrites et commentées.

I. INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de rappeler les propriétés fondamentales des réflexions diffuses, de décrire leur influence en acoustique des salles et de présenter brièvement les progrès réalisés dans les domaines de la mesure et (surtout) de la modélisation des caractéristiques de diffusion acoustique des surfaces.

II. NATURE ET PROPRIETES DES REFLEXIONS DIFFUSES

Une onde acoustique incidente sur une surface plane, rigide et infinie, est réfléchiée de manière spéculaire (selon la loi de Descartes de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion). Si la surface plane est de taille finie, l'énergie réfléchiée n'est plus concentrée dans une seule direction, mais elle est diffusée ou dispersée (« scattered ») dans plusieurs lobes plus ou moins larges, dont le principal entoure la direction spéculaire.

Les dimensions finies des surfaces créent donc de la diffusion : cet effet de bord, attribué à la diffraction des ondes, dépend de la fréquence. La diffusion augmente si le rapport entre la dimension caractéristique de la surface et la longueur d'onde diminue.

Ce type de réflexion diffuse n'est pas celui qui nous intéresse ici. Il fait cependant partie intégrante du phénomène de diffusion par une surface, que ce soit dans une salle réelle ou en laboratoire, puisque, par nature, les surfaces y sont toujours de taille finie.

La réflexion diffuse qui nous intéresse ici est celle créée par le profil irrégulier ou la rugosité de la surface. Cette diffusion résulte des ondes réfléchies individuellement par chaque élément de surface, qui peuvent interférer dans une certaine mesure, et qui génèrent à grande distance une répartition de l'énergie dans toutes les directions.

Cette composante diffuse se superpose à la composante spéculaire, liée au plan moyen de la surface. Plus la

rugosité augmente (en amplitude), plus la composante spéculaire s'atténue, en valeur absolue et en valeur relative par rapport à la composante diffuse (qui elle-même a tendance à s'élargir). Le coefficient de « dispersion » ISO mesure cette évolution puisque, par définition, il est égal au rapport entre l'énergie réfléchiée de manière non-spéculaire et l'énergie totale réfléchiée.

Le critère de Rayleigh est une relation simple qui peut nous renseigner sur le caractère plus ou moins diffusant d'une surface. D'après ce dernier, une surface diffuse de manière significative si :

$$kh \cos \theta_{inc} > \pi / 4 \quad \text{ou} \quad f > 42.5 / h \cos \theta_{inc} \quad (1)$$

où "h" est une mesure caractéristique de la hauteur du profil de rugosité. Pour une surface donnée, le phénomène de diffusion par réflexion est donc principalement actif à haute fréquence, pour ce qui concerne la composante due à la rugosité. Attention, la tendance est inverse pour l'effet de bord.

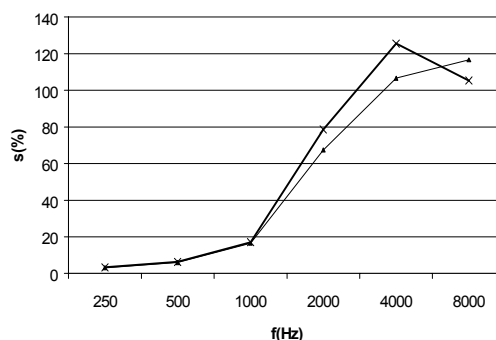


Figure 1. Résultats de deux mesures du coefficient de « dispersion » ISO pour une même surface à profil sinusoïdal (hauteur quadratique moyenne=2.03cm)

L'application du critère de Rayleigh aux résultats de la figure 1, en prenant pour « h » le double de la hauteur quadratique moyenne et un cosinus moyen de 0.5 (incidence diffuse), donne $f > 2000\text{Hz}$, ce qui

correspond approximativement à la limite fréquentielle suggérée par la figure. Une autre étude [1] réalisée sur des surfaces gaussiennes (modélisation, cette fois) a révélé une diffusion importante à partir de $\sigma \cos \theta_{inc} > 0.1\lambda$, ce qui correspond de nouveau à l'ordre de grandeur du critère de Rayleigh.

III. REFLEXIONS DIFFUSES ET ACOUSTIQUE DES SALLES

Il est aujourd'hui prouvé que les réflexions diffuses ont une influence significative sur la répartition du champ sonore dans une salle, ainsi que sur sa réverbération. Les effets suivants ont été décrits et commentés dans la littérature [2,3,4,5] :

- la diffusion par réflexion augmente le caractère linéaire de la courbe de réverbération et diminue (à absorption égale) le temps de réverbération;
- la décroissance du niveau sonore en fonction de la distance à la source est plus rapide lorsque certaines surfaces diffusent, surtout dans les grandes salles disproportionnées;
- des réflexions latérales diffuses permettent d'obtenir, dans les grandes salles, une bonne « impression d'espace » (spaciousness) sans créer d'échos francs ;
- de manière générale, les réflexions diffuses diminuent le risque d'échos très retardés et très énergétiques, à absorption égale, ainsi que le risque du filtrage en peigne qui accompagne les premières réflexions [5] ;
- elles réduisent le risque de "mauvaises positions de sièges" dans l'audience et rendent moins critique l'angle des parois entre elles [5] .

Plusieurs auteurs soulignent en outre l'importance de prendre en compte les réflexions diffuses dans les simulations par auralization [5,6]. Il est en effet prouvé que leur impact est significatif [7].

IV. LES DIFFUSEURS ET LEUR MESURE

Créer de la diffusion par réflexion consiste à définir, pour certaines surfaces, un profil de rugosité, dont l'amplitude (la hauteur) est suffisamment grande par rapport à la longueur d'onde.

En acoustique des salles, il n'y a pas encore de réponse systématique à la question : quelle surface faut-il couvrir pour obtenir une diffusion suffisante ? (comme cela est le cas pour les matériaux absorbants). L'emploi des surfaces diffusantes est donc, aujourd'hui encore, fortement influencé par l'expérience de l'acousticien.

Les surfaces diffusantes utilisées en acoustique des salles peuvent être des éléments architecturaux décoratifs : alignements de statues, colonnes, plâtrages

rainurés selon un certain profil, ensembles de panneaux réflecteurs différemment orientés, etc... Tout élément contribuant à la non-planéité d'une paroi crée de la diffusion, dans des proportions plus ou moins significatives. Rappelons également que la taille finie des objets, ou des surfaces, est aussi à l'origine de diffusion par « effet de bord ».

Mais il est aussi possible de concevoir des surfaces dont le rôle sera de diffuser l'onde acoustique incidente dans un angle solide le plus large possible, ainsi que dans la bande de fréquence la plus étendue. On parlera alors plus spécifiquement de « diffuseurs ».

Les travaux pionniers de Schroeder [8] ont conduit au développement d'une classe importante de diffuseurs, dont le profil de surface est basé sur la théorie des nombres (maximum length sequence, quadratic residue, etc...). Il s'agit de surfaces réfléchissantes, dont le relief est constitué d'une succession de « puits » dont les profondeurs répondent à une suite (de nombres) périodique, mais pseudo-aléatoire. Les différences de phase ainsi introduites par les ondes se réfléchissant dans chaque puits créent une diffusion de l'énergie **contrôlée** par la séquence de nombres.

Nous renvoyons le lecteur intéressé par l'évolution des diffuseurs au double article de D'Antonio et Cox [9,10].

Comment caractériser et mesurer le « pouvoir diffusant » d'une surface ? Deux techniques de mesure sont à présent en cours d'évaluation et de normalisation : l'une par l'AES (Audio Engineering Soc.) et l'autre par l'ISO (Int. Org. for Standardization).

La première (AES-4id-2001 : Characterization and measurement of surface scattering uniformity) s'intéresse à la mesure en chambre sourde de la répartition spatiale de l'énergie acoustique réfléchie par un diffuseur : la réponse « polaire ». On tire de cette réponse le coefficient de diffusion directionnel d_θ , pour une onde d'angle d'incidence θ , et le coefficient de diffusion d pour une incidence diffuse. Ce coefficient est une image de l'**uniformité** de la réponse polaire.

La seconde technique (ISO/DIS 17497-1 : Measurement of the sound scattering properties of surfaces. Part 1 : Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room) définit le coefficient de « scattering » s comme étant la proportion d'énergie réfléchie de manière diffuse (le complémentaire de la proportion d'énergie réfléchie spéculairement). Le document propose en outre une méthode de mesure de ce coefficient.

En tant que francophones, nous nous trouvons là devant une première difficulté de vocabulaire. En effet, la traduction du coefficient AES (diffusion coefficient)

donne clairement « coefficient de diffusion ». Celle du coefficient ISO (scattering coefficient) se devait d'être différente : on a proposé « coefficient de dispersion », ce qui peut sembler insatisfaisant. A l'heure où ces lignes sont écrites, la traduction française n'est encore qu'une proposition : elle sera donc mentionnée par la suite entre guillemets.

En tous cas, c'est bien ce coefficient ISO (et non l'autre !) qui intéresse avant tout les concepteurs et utilisateurs de logiciels d'acoustique des salles, pour les raisons qui apparaîtront ci-après.

V. MODELISATION DES REFLEXIONS DIFFUSES EN ACOUSTIQUE DES SALLES

Plusieurs logiciels d'acoustique des salles permettent de tenir compte de la diffusion par réflexion. La donnée nécessaire est en général le coefficient de « dispersion » ISO, mesuré en champ diffus. Chaque surface dans le modèle de la salle est décrite par son coefficient d'absorption **et** son coefficient de « dispersion » : les deux dépendent de la fréquence.

Les modèles de propagation acoustique tiennent compte, au prix d'une complexité accrue, de la diffusion par les surfaces, en intégrant cette donnée supplémentaire qu'est le coefficient de « dispersion » ISO. Dans la suite, on s'attachera principalement à décrire comment la technique des rayons sonores (ou des particules sonores) peut s'accommoder de cette difficulté supplémentaire. Le lecteur intéressé par d'autres techniques pourra consulter, entre autres, les articles suivants : cone or beam tracing [6,11], combinaisons images/rayons sonores [3], décroissance théorique exponentielle de l'énergie diffusée [3,12].

Pour rappel, la technique des rayons sonores consiste à lancer plusieurs rayons au départ d'une source ponctuelle et dans des directions d'émission toutes différentes. Chaque rayon transporte une partie de l'énergie de la source. Lorsque toutes les surfaces sont non-diffusantes, un rayon tombant sur l'une d'elles poursuit sa course dans la direction de réflexion spéculaire, en abandonnant au passage une partie de son énergie correspondant au coefficient d'absorption de cette surface.

Si le rayon sonore atteint une surface partiellement diffusante (c-à-d générant par réflexion une composante spéculaire **et** une composante diffuse), deux questions sont alors posées :

- le rayon sera-t-il réfléchi de manière spéculaire ou diffuse ?
- dans ce dernier cas, quelle sera la direction de réflexion du rayon ?

La plupart des techniques de rayons sonores utilisent en effet la règle d'un seul rayon réfléchi pour un rayon incident. Ce n'est alors que statistiquement (après qu'un très grand nombre de rayons soient lancés) que la diffusion d'une surface est modélisée. Ce procédé est souvent plus économique que celui consistant à générer une « gerbe » de plusieurs rayons à chaque réflexion diffuse.

C'est le coefficient ISO de « dispersion » qui décidera si un rayon est réfléchi de manière spéculaire ou diffuse. Rappelons que ce coefficient détermine la proportion d'énergie réfléchie de manière diffuse (par rapport à l'énergie réfléchie totale). Typiquement [13], un nombre aléatoire est généré par l'algorithme entre 0 et 1, avec une loi de probabilité uniforme. Si ce nombre est inférieur au coefficient de « dispersion », alors le rayon est réfléchi de manière diffuse. Sinon, il est renvoyé dans la direction spéculaire. Dans les deux cas, il perd une fraction α de son énergie (α =coefficient d'absorption).

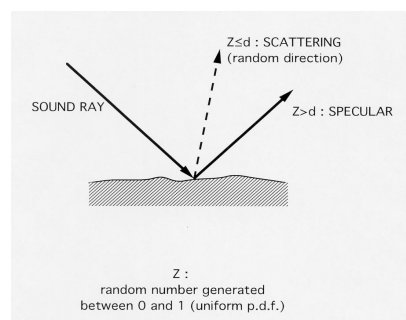


Figure 2. Réflexion diffuse et réflexion spéculaire dans une technique de rayons sonores.

Dans le cas d'une réflexion diffuse, il faut ensuite décider dans quelle direction le rayon sonore incident sera dévié. C'est la génération aléatoire de deux angles (azimut, élévation) qui définit la direction de réflexion. La loi de probabilité permettant de tirer ces angles au hasard doit s'appuyer sur la loi de répartition angulaire de l'énergie diffusée, au départ de la surface [13].

C'est ici qu'interviennent les nouvelles techniques de mesure de la diffusion (exemple : recommandation AES-4id-2001). Jusqu'à présent, la plupart des logiciels (pour des raisons de simplicité et en l'absence de données fiables) ont adopté une répartition angulaire de l'énergie répondant à la loi de Lambert :

$$I_{rel} = \frac{1}{\pi} \cos \theta \quad (2)$$

où I_{rel} est la puissance (relative) diffusée par unité d'angle solide et θ , l'angle de réflexion par rapport à la normale « macroscopique » (la direction perpendiculaire au plan moyen de la surface). Certains travaux de simulation [14] ont montré que la répartition angulaire relative de l'énergie diffusée avait peu d'impact sur les

paramètres acoustiques **calculés** : seul compte le rapport énergétique entre les composantes diffuse et spéculaire. Dès lors, selon eux, autant choisir la loi de répartition la plus simple.

D'autres voix s'élèvent contre cette hypothèse simplificatrice, d'autant plus que la mesure du coefficient de diffusion AES (récemment normalisée) donne une information assez complète sur la répartition spatiale de l'énergie diffusée. Dès lors, pourquoi ne pas utiliser cette information dans les logiciels de simulation ? Il faut cependant savoir que cette décision n'est pas sans influence sur la complexité des modèles :

- du point de vue des données, comment organiser de manière précise (et protégée ?) le transfert des réponses polaires de diffusion depuis le laboratoire (ou le constructeur) vers les utilisateurs d'un logiciel donné ? Se pose ici le problème du format du fichier de données qui reste à définir ;
- du point de vue de l'algorithme, il faut mettre au point un processus stochastique de génération de directions aléatoires, basé sur une loi de probabilité a priori quelconque.

Ces problèmes devraient être prochainement abordés par la communauté scientifique.

Un autre problème spécifique à la modélisation de la réflexion diffuse est la dépendance du coefficient de « dispersion » en fonction de la fréquence. En effet, comme le processus de re-direction des rayons sonores dépend de la valeur de ce coefficient, cela suggère que l'algorithme entier devrait être répété pour chaque bande de fréquence considérée. **Un exemple** : soit un rayon atteignant une surface diffusante, dont le coefficient de « dispersion » est donné par la figure 1. L'algorithme génère un nombre aléatoire égal à 0.356. Pour les basses fréquences (250-500 Hz), cette valeur est supérieure au coefficient de « dispersion » : le rayon sonore devrait être réfléchi dans la direction spéculaire. Mais pour les hautes fréquences (> 1 kHz), un rayon diffus devrait être généré. Il y a donc impossibilité de poursuivre le trajet du rayon en satisfaisant à la fois les deux exigences.

Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une modification de l'algorithme [13] qui permet de traiter toutes les bandes de fréquence en une seule itération. En bref, le choix entre rayon spéculaire ou diffus est basé sur un coefficient de séparation β indépendant de la fréquence. Celui-ci n'est pas un paramètre acoustique de la surface, mais un paramètre de calcul. Il est montré dans [13] qu'une compensation énergétique du rayon, fonction de la fréquence, conduit aux mêmes résultats (statistiquement) que l'algorithme de base. Il est également montré que ce coefficient β peut s'adapter à l'histoire du rayon, de réflexion en réflexion, de manière à optimiser le temps de calcul et la précision statistique du lancer de rayon.

Abordons enfin le problème des données caractérisant une surface dans un logiciel d'acoustique des salles. Ce problème, déjà important pour le coefficient d'absorption, est encore plus aigu pour le coefficient de « dispersion », puisque très peu de résultats mesurés sont aujourd'hui disponibles. La publication prochaine de la norme ISO 17497-1 devrait cependant favoriser la mise au point de bases de données de surfaces diffusantes mentionnant leurs caractéristiques de diffusion (et que faire des valeurs de $s > 1$: voir fig. 1 ?).

Il faut cependant remarquer que le coefficient de « dispersion » ISO ne prend pas toujours en compte l'effet de bord (cela dépend de l'échantillon choisi), et qu'il n'est donc pas évident a priori de modéliser correctement la diffusion en basse fréquence. D'autres études sont encore nécessaires, donc, avant d'en arriver à une modélisation correcte.

Nous terminerons ce tour d'horizon en signalant l'expérience menée par l'institut Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Braunschweig) [15], qui organise une comparaison anonyme de logiciels d'acoustique des salles. La phase du test actuellement en cours fait précisément intervenir des données propres à la diffusion des surfaces, obtenues soit par mesure (en laboratoire), soit par estimation (sur base du profil de rugosité de la surface).

RÉFÉRENCES

1. J.J. Embrechts, *Acustica-acta acustica* **87**, 482-494 (2001).
2. M. Hodgson, *J. Acoust. Soc. Am.* **89** (2), 765-771 (1991).
3. Y.W. Lam, *J. Acoust. Soc. Am.* **100** (4), Pt. 1, 2181-2192 (1996).
4. H. Kuttruff, *Room Acoustics 3rd ed.*, Elsevier, Barking (Essex), (1991).
5. B.-I. Dalenbäck, M. Kleiner and P. Svensson, *J. Audio Eng. Soc.*, **42** (10), 793-806 (1993).
6. U.M. Stephenson, *Acustica-acta acustica* **82**, 517-525 (1996).
7. R.R. Torres, M. Kleiner and B.-I. Dalenbäck, *Acustica-acta acustica* **86** (6), 917-925 (2000).
8. M.R. Schroeder, *J. Acoust. Soc. Am.* **57**, 149-150 (1975).
9. P. D'Antonio and T. Cox, *J. Audio Eng. Soc.*, **46** (11), 955-976 (1998).
10. P. D'Antonio and T. Cox, *J. Audio Eng. Soc.*, **46** (12), 1075-1091 (1998).
11. B.-I. Dalenbäck, *J. Acoust. Soc. Am.* **100** (2) Pt. 1, 899-909 (1996).
12. H. Kuttruff, *J. Acoust. Soc. Am.* **98** (1), 288-293 (1995).
13. J.J. Embrechts, *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (4), 2068-2081 (2000).
14. R. Heinz, *Acustica-acta acustica* **82**, 82-90 (1996)
15. http://www.ptb.de/en/org/1/14/1401/_index.htm