

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Application d'un modèle numérique de propagation sonore en milieu  
confiné délimité par des parois à relief géométrique**

K. Rabisse<sup>a</sup>, J. Ducourneau<sup>b</sup>, A. Faiz<sup>b</sup> et N. Trompette<sup>a</sup>

<sup>a</sup>INRS, 1, rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandoeuvre Les Nancy, France

<sup>b</sup>LEMETA, 2, avenue de la Forêt de Haye, 54518 Vandoeuvre Les Nancy, France

joel.ducourneau@univ-lorraine.fr

Les modèles de propagation acoustique utilisés pour caractériser les locaux doivent, encore aujourd'hui, effectuer des compromis en termes de précision des résultats, de volume de domaine simulable ou de fréquence maximale d'étude quand une cartographie du champ de pression doit être tracée par exemple. Pour répondre à ces limitations, nous avons développé un modèle numérique permettant de simuler la propagation en milieu confiné tout en prenant en compte le relief géométrique ainsi que l'impédance acoustique variable en fréquence pouvant caractériser les parois du local. Pour ce faire, nous avons combiné la méthode de décomposition rectangulaire adaptative (ARD) pour la partie propagation et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) pour la partie caractérisation acoustique des parois. Le modèle théorique développé a permis de tracer des réponses impulsionnelles en différents points de réception dans un local expérimental dont les parois modulables présentaient différentes caractéristiques acoustiques. Les réponses impulsionnelles expérimentales et théoriques obtenues ont permis d'estimer un coefficient d'absorption acoustique apparent  $\alpha_{app}$  de différentes surfaces à relief étudiées et placées sur certaines de ces parois. Le but de cette estimation est d'observer s'il est possible de remplacer une paroi à relief géométrique par une paroi plane équivalente caractérisée par un coefficient  $\alpha_{app}$  afin d'obtenir des résultats similaires en termes de temps de réverbération, par exemple.

## 1 Introduction

L'étude du comportement acoustique dans une salle nécessite la prise en compte précise des caractéristiques acoustiques et géométriques du milieu de propagation. En effet, le relief géométrique présent sur les parois peut engendrer une modification significative de la propagation des ondes.

Le but de ce papier est de présenter l'application de notre modèle numérique de simulation de propagation du son en milieu confiné délimité par des parois à relief géométriques caractérisées par une impédance acoustique variable en fréquence. Ce modèle a été développé à partir de deux méthodes numériques : la méthode de décomposition rectangulaire adaptative (ARD) [1]–[3] et la méthode de différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [4]–[8]. Le modèle ainsi développé a été mis en comparaison avec des mesures dans un local expérimental délimité par des parois mobiles avec différentes caractéristiques acoustiques. Des formes à relief géométriques ont ensuite été ajoutées à ces parois, afin de savoir si un relief pouvait être simplement caractérisé par un coefficient d'absorption acoustique apparent  $\alpha_{app}$ . Les résultats expérimentaux et ceux issus du modèle ont ainsi pu être comparés.

## 2 Modèle numérique

Le modèle numérique développé pour cette étude vise à combiner la méthode ARD avec la méthode FDTD.

La méthode ARD permet de simuler la propagation en milieu confiné en décomposant le milieu de propagation en partitions rectangulaires. Cette décomposition permet de traiter la propagation dans chaque partition par synthèse modale [1]. L'avantage de cette méthode est de pouvoir simuler la propagation dans des volumes importants (cathédrale, par exemple) tout en conservant un temps de calcul relativement faible en comparaison à la méthode FDTD. Néanmoins, cette méthode est limitée en ce qui concerne la modélisation des parois délimitant le domaine de propagation. En effet, Morales et al. [3] précisent que la méthode ARD ne permet de simuler que des parois planes caractérisées par une impédance acoustique constante en fréquence.

Afin de pallier à cette limitation, nous avons choisi d'intégrer la méthode FDTD dans le modèle numérique. Kowalczyk et van Walstijn [7], [8] ont développé une méthode permettant de modéliser des parois à relief géométriques caractérisées par une impédance variable en fréquence à l'aide de filtres d'impédance numérique (DIF).

La combinaison des deux méthodes a été rendu possible par l'ajout de couches absorbantes parfaitement adaptées (PML) à l'intérieur même des partitions rectangulaires. Cette intégration permet d'appliquer librement le calcul par différences finies et de modéliser des parois complexes.

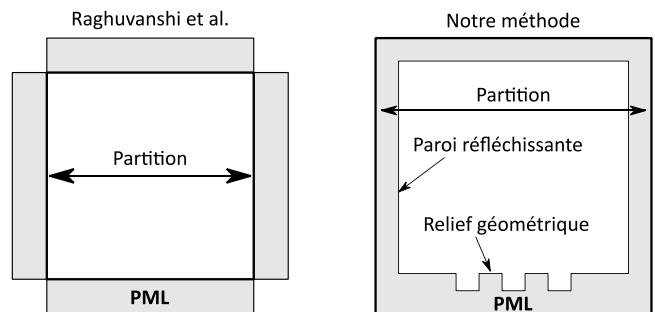


Figure 1 : Représentation schématique du modèle numérique développé par Raghuvanshi et al. [1] et de notre modèle.

La Figure 1 illustre schématiquement notre modèle avec, au sein d'une partition, la PML et les parois définies par la méthode FDTD. Ce modèle a déjà fait l'objet d'une description mathématique détaillée ainsi que de plusieurs étapes de validation [9]. Ces validations ont montré que notre modèle permet de simuler l'influence de surfaces à relief géométrique caractérisées par une impédance acoustique variable en fréquence tout en minimisant grandement l'effet de la dispersion numérique inhérente à la méthode FDTD.

## 3 Caractérisation de parois à relief géométrique dans un local aux caractéristiques modulables

### 3.1 Protocole expérimental

La campagne de mesure décrite dans cette partie s'est déroulée dans un local expérimental situé sur le site de

l'INRS. Le local, baptisé « salle d'écoute », présente la particularité d'avoir des caractéristiques acoustiques modulables. En effet, des panneaux mobiles recouvrent les quatre parois verticales de cette salle rectangulaire. Chaque paroi possède trois types de panneaux :

- Un panneau en bois plein,
- Un panneau constitué de laine minérale recouverte d'un voile métallique perforé,
- Un panneau de bois perforé recouvrant une laine minérale.

Ces panneaux peuvent être déplacés le long de glissières situées au sol et au plafond.

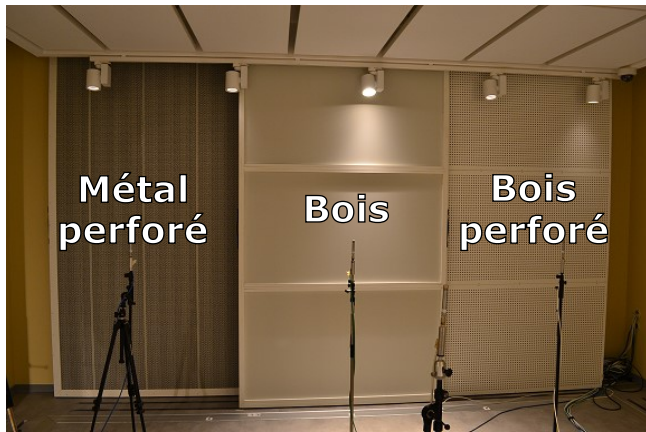


Figure 2 : Les différents panneaux présents dans la salle d'écoute.

La Figure 2 montre les trois différents panneaux déployés sur une paroi. Le plafond est recouvert de panneaux de laine minérale. Ces panneaux, montés sur des crochets, sont facilement démontables afin de pouvoir moduler finement la réverbération dans le local.

Pour cette étude nous considérerons trois configurations de panneaux (la position des panneaux étant la même sur les quatre parois du local) :

- Configuration 1 : Seuls les panneaux de bois sont visibles, les deux autres sont positionnés derrière celui-ci,
- Configuration 2 : le panneau de bois et le panneau de bois perforé sont visibles,
- Configuration 3 : les trois panneaux sont déployés, comme le montre la Figure 2.

La configuration 1 est, par conséquent, la plus réverbérante et la configuration 3 est la plus absorbante.

En plus du relief géométrique déjà présent au niveau des parois dû à la présence des panneaux, nous avons souhaité étudier l'influence de deux différents reliefs géométriques sur la propagation acoustique dans le local. Le relief 1 est composé de deux rainures de 0,50 m de hauteur et le relief 2 est composé de cinq rainures de 0,25 m de hauteur. Ces reliefs sont constitués de blocs de polystyrène de 0,10 m d'épaisseur.



Figure 3 : Les deux différents reliefs étudiés.

Le protocole expérimental consiste à mesurer la réponse impulsionnelle (RI) du local pour différents points d'émission et de réception : deux positions « source » et neuf positions « récepteur », soit 18 réponses impulsionnelles. Les mesures ont été effectuées pour les 3 configurations et les deux reliefs.

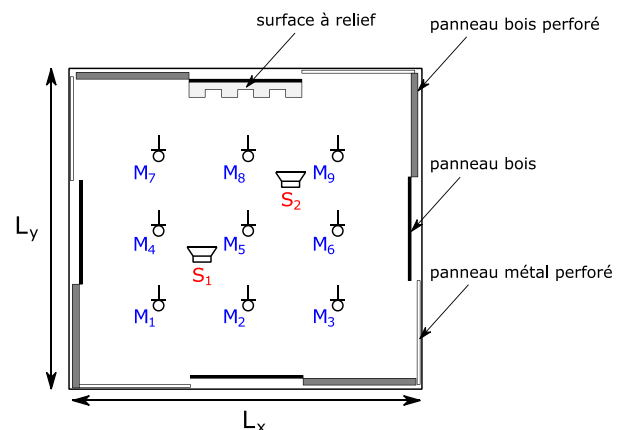


Figure 4 : Schéma du protocole expérimental

La Figure 4 est une représentation schématique du protocole expérimental. Les dimensions de la salle d'écoute sont  $5,91 \times 5,37 \times 2,68 \text{ m}^3$ . Pour cette campagne de mesure, deux positions de sources  $S_1$  et  $S_2$  aux coordonnées respectives  $(2,25; 2,25; 0,90) \text{ m}$  et  $(3,75; 3,50; 0,90) \text{ m}$  sont utilisées. Les coordonnées des microphones vont de  $M_1 = (1,50; 1,50; 1,40) \text{ m}$  à  $M_9 = (4,50; 4,00; 1,40) \text{ m}$  avec une distance inter-microphonique de 1,50 m selon l'axe x et de 1,25 m selon l'axe y. Les panneaux mobiles placés le long de l'axe x mesurent 2,00 m de largeur et ceux le long de l'axe y ont une largeur de 1,80 m.

La chaîne d'émission est composée d'un générateur de bruit Brüel & Kjør, d'un amplificateur Power, d'un égaliseur graphique Yamaha et d'une source sonore composée d'une chambre de compression JBL 2446H prolongée d'un tube (monopole). La chaîne de réception est constituée de neuf microphones  $\frac{1}{2}$  " Brüel & Kjør type

4188 montés sur des préamplificateurs Brüel & Kjær type 2671 et reliés à la carte d'acquisition NetdB de la société 01dB. L'acquisition et le traitement des mesures se fait par ordinateur, via un programme MATLAB.

### 3.2 Mesure des réponses impulsionnelles

Des mesures de temps de réverbération (TR) ainsi que certaines données constructeurs des matériaux utilisés dans la salle ont permis de définir les caractéristiques acoustiques des différentes parois du local. En connaissant les dimensions de la salle d'écoute et les caractéristiques acoustiques des différents matériaux, il est possible de simuler la propagation avec notre modèle numérique. Pour les simulations qui vont suivre, nous choisissons un pas spatial  $\Delta h = 0,05$  m qui induit une fréquence maximale simulée  $f_{\max} = 2200$  Hz. Les valeurs d'absorption estimées des matériaux permettent de simuler des DIF pour chaque paroi. La première étape de cette section consiste à simuler la propagation sonore dans la salle d'écoute pour les trois configurations et les différentes positions de source et de récepteur illustrées en Figure 4.

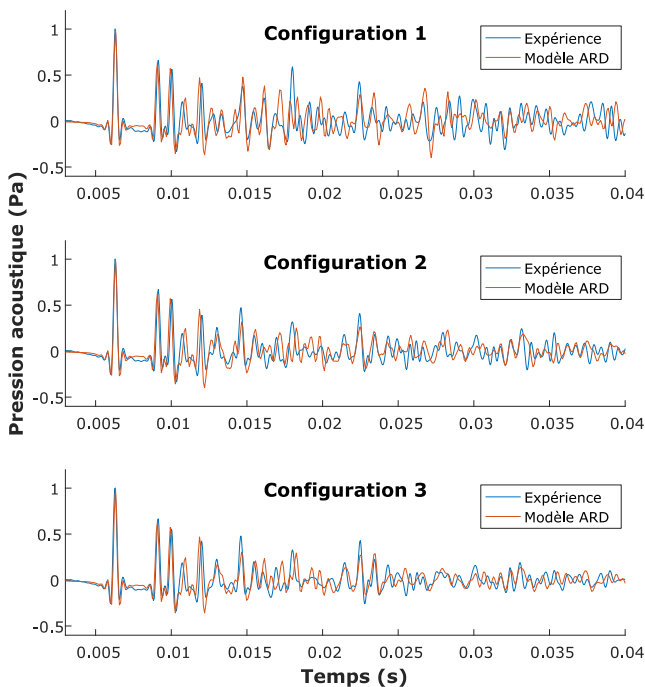


Figure 5 : RI expérimentales et théoriques pour les trois configurations de panneaux. Source en position S2 et microphone en position M3.

La Figure 5 illustre les premières millisecondes des RI expérimentales et théoriques obtenues dans les trois configurations de panneaux. Les RI présentées sur cette figure ont la même position de source et de microphone, respectivement  $S_2$  et  $M_3$ . Les coordonnées de ce microphone sont  $M_3 = (4,50; 1,50; 1,40)$  m. La Figure 5 montre une similarité importante entre les résultats théoriques et expérimentaux, en particulier sur les premières réflexions. Le temps d'arrivée et l'amplitude de ces réflexions précoces présentent une concordance forte, malgré les quelques approximations faites dans notre modèle. Les RI obtenues dans cette phase seront celles de référence pour les comparaisons suivantes.

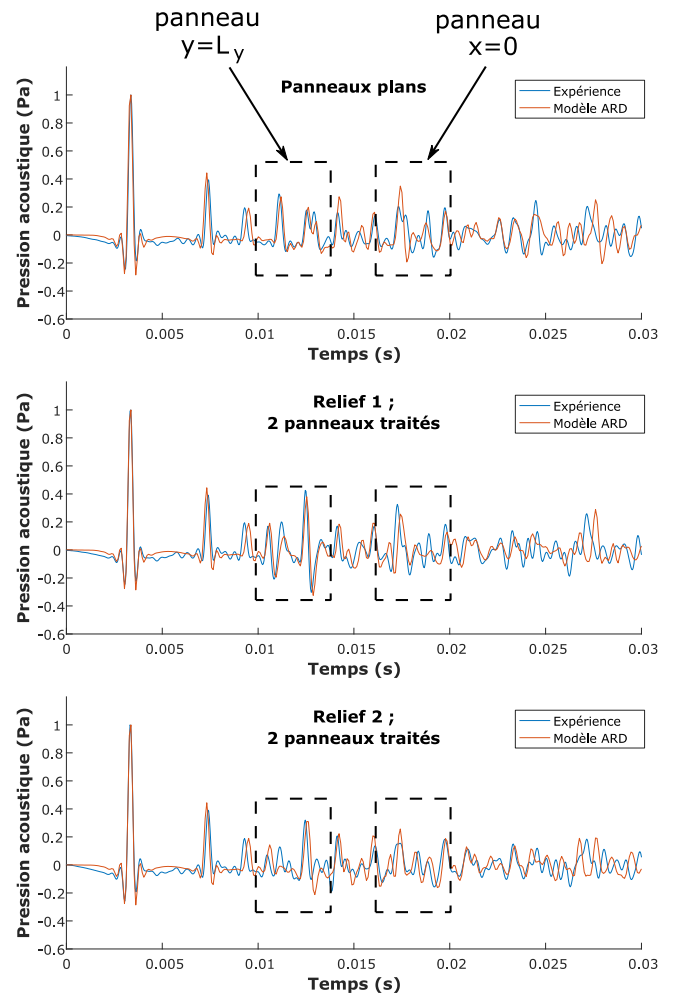


Figure 6 : RI expérimentales et théoriques. Référence, sans relief (haut) ; Relief 1 appliqué sur deux panneaux (centre) ; Relief 2 appliqué sur deux panneaux (bas).

La Figure 6 présente les RI théoriques et expérimentales de référence (panneaux plans) ainsi que celles des deux reliefs présentés en Figure 3. Ces RI correspondent à la position de source  $S_2$  et la position de microphone  $M_5$  dont les coordonnées sont  $M_5 = (3,00; 2,75; 1,40)$  m. Les reliefs sont positionnés sur les panneaux de bois au niveau des parois en  $y=L_y$  et  $x=0$ . Sur les premières millisecondes des RI il est possible d'observer l'effet de chaque relief. L'effet du relief situé sur la paroi en  $y=L_y$  apparaît juste après 0,01 s tandis que celui placé sur l'autre paroi apparaît à environ 0,017 s. Les reliefs ont chacun un effet assez différent sur l'onde réfléchie, néanmoins, les RI simulées montrent une bonne concordance en ce qui concerne la réflexion sur les parois à relief.

### 3.3 Estimation du coefficient d'absorption acoustique apparent

Après avoir simulé la propagation sonore dans la salle d'écoute, nous avons souhaité estimer expérimentalement et théoriquement un coefficient d'absorption acoustique apparent pour chaque surface à relief étudiée. Pour ce faire, nous avons estimé le temps de réverbération à partir des différentes RI afin de déterminer le coefficient d'absorption acoustique apparent de chaque surface à relief. Afin d'estimer ce coefficient, nous partons de l'expression du temps de réverbération décrit par Millington [10]. Cette expression nous permet d'exprimer l'équation suivante :

$$\alpha_{\text{app}}(f) = 1 - e^{-\frac{\alpha_{M_1}(f) - \alpha_{M_2}(f) - \ln(1 - \alpha_{\text{pb}}(f))}{S_{\text{rel}}}}, \quad (1)$$

où  $\alpha_{\text{app}}$  et  $S_{\text{rel}}$  sont le coefficient d'absorption acoustique apparent et la surface du relief étudié ( $\text{m}^2$ ).  $\alpha_{M_1}$  et  $\alpha_{M_2}$  sont les coefficients d'absorption moyens de Millington dans la salle d'écoute, respectivement sans et avec la surface à relief. Le coefficient d'absorption  $\alpha_{\text{pb}}$  est celui du panneau de bois sur lequel est placé le relief. Nous avons cherché la configuration permettant la meilleure estimation du coefficient d'absorption acoustique. La configuration 2 s'est révélée être la condition permettant d'obtenir une valeur cohérente possédant l'écart-type le plus faible [9]. De plus, plus le nombre de panneaux traités par le relief est important, plus l'écart-type diminue.

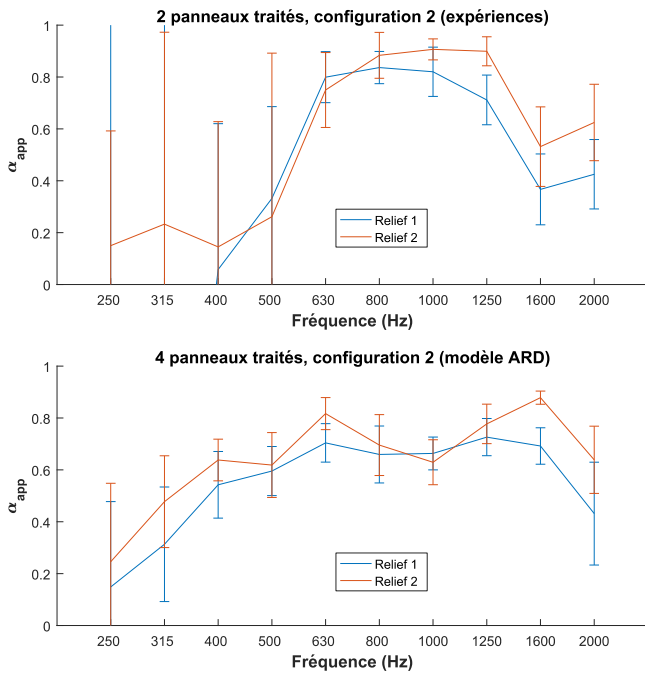


Figure 7 : Coefficient d'absorption acoustique apparent par bande de tiers d'octave des deux reliefs en configuration 2. Expériences (haut) ; modèle (bas).

La Figure 7 présente les coefficients d'absorption acoustique apparents des reliefs étudiés, par bandes de tiers d'octave, obtenus par la mesure et par les simulations. Tout d'abord, dans le cas des expériences, les coefficients estimés pour les trois premières bandes fréquentielles (jusqu'à 400 Hz) présentent tous des écarts-types très importants. Cette grande dispersion rend les résultats dans ces bandes de fréquence inexploitable. Cela est dû en partie à la source sonore qui n'émet pas suffisamment d'énergie en basses fréquences pour pouvoir estimer précisément le coefficient d'absorption  $\alpha_{\text{app}}$ . À partir de la bande de tiers d'octave 630 Hz, les coefficients estimés sont très importants et tendent vers 0,9 jusqu'à 1250 Hz. En ce qui concerne les résultats théoriques, les écarts-types des coefficients  $\alpha_{\text{app}}$  estimés restent relativement faibles sur les différentes bandes de fréquences étudiées. Néanmoins, l'écart-type augmente significativement dans la bande d'octave 2000 Hz à cause de la limite haute de la bande passante du modèle.

### 3.4 Application du coefficient d'absorption acoustique apparent

Pour valider le comportement absorbant du relief, le modèle a été utilisé pour simuler le temps de réverbération dans la salle d'écoute en présence de panneaux traités par une surface à relief. Les surfaces à relief ont ensuite été remplacées par des panneaux plans caractérisés par un coefficient d'absorption apparent. Le but est de déterminer si une surface à relief peut être modélisée par une surface plane équivalente. Pour cela, trois configurations ont été étudiées dans le local : local) :

- Quatre panneaux plans réfléchissants,
- Quatre panneaux traités par une surface à relief,
- Quatre panneaux plans absorbants, caractérisés par le coefficient d'absorption  $\alpha_{\text{app}}$  estimé en section 3.3.

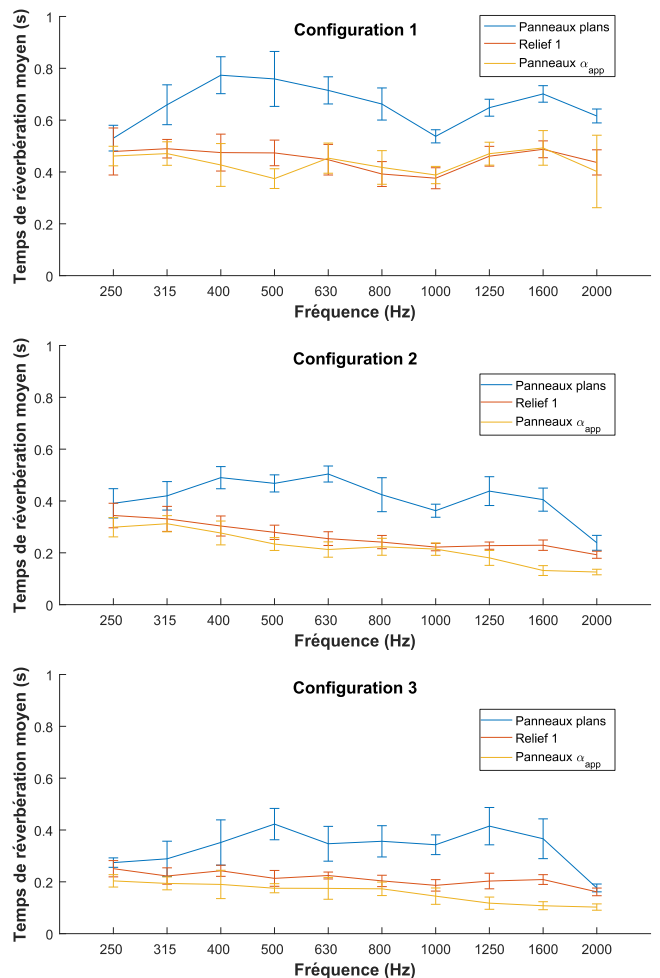


Figure 8 : TR simulés dans la salle d'écoute avec quatre panneaux plans (bleu), traités avec le Relief 1 (orange) ou plans et caractérisés par le coefficient  $\alpha_{\text{app}}$  (jaune) pour les trois configurations.

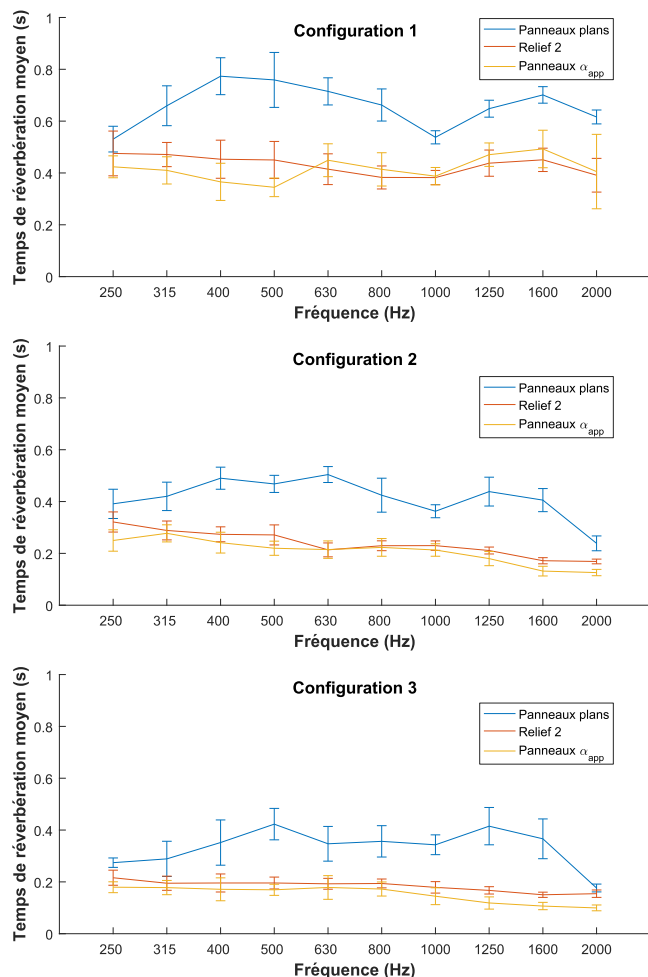


Figure 9 : TR simulés dans la salle d'écoute avec quatre panneaux plans (bleu), traités avec le Relief 2 (orange) ou plans et caractérisés par le coefficient  $\alpha_{app}$  (jaune) pour les trois configurations.

Les Figures 8 et 9 illustrent les temps de réverbération obtenus pour les deux cas présentés précédemment et dans les trois différentes configurations. De manière générale, les TR obtenus avec les surfaces planes absorbantes équivalentes (courbes jaunes) sont relativement proches mais légèrement inférieurs à ceux obtenus avec les surfaces à relief. La surface plane absorbante engendre ainsi une absorption légèrement plus importante que celle estimée avec la surface à relief.

Tableau 1 : RMSE et MAPE entre les TR théoriques obtenus avec les surfaces à relief et ceux obtenus avec les panneaux plans absorbants équivalents.

		Config. 1	Config. 2	Config. 3
Relief 1	RMSE	0,04	0,05	0,06
	MAPE	6,1	16,9	25,7
Relief 2	RMSE	0,06	0,04	0,03
	MAPE	10,5	13,1	18,2

Le Tableau 1 présente l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage

(MAPE) entre les temps de réverbération obtenus avec le modèle pour les surfaces à relief et pour les panneaux plans absorbants équivalents. La MAPE est calculée en prenant pour référence le temps de réverbération obtenu en présence des surfaces à relief. Les valeurs de RMSE du Tableau 1 montrent tout d'abord, que l'erreur entre les deux courbes reste faible et constante pour toutes les configurations et tous les reliefs sur l'ensemble du spectre.

Néanmoins, le temps de réverbération dépend de la configuration. Par conséquent, même si cette erreur reste globalement faible, elle n'a pas le même poids en fonction de la configuration considérée. La MAPE montre que l'erreur reste faible dans le cas de la configuration 1 mais qu'elle augmente, jusqu'à atteindre 25,7% dans le cas le plus défavorable de la configuration 3.

Les résultats de cette section montrent que, dans le cas de cette salle d'écoute, il est possible de caractériser les surfaces à relief par un coefficient d'absorption acoustique apparent. Le remplacement de ces surfaces à relief par des surfaces planes équivalentes a montré une diminution du temps de réverbération similaire dans les deux cas malgré une erreur qui peut être significative dans les conditions les moins réverbérantes.

## 4 Conclusion

Le modèle numérique développé permet de pallier aux limitations actuelles de la méthode ARD. En effet, en intégrant les filtres d'impédance numériques décrits notamment par Kowalczyk et van Waltijn [7], [8], il est possible de simuler dans une partition de la méthode ARD des parois à relief géométriques caractérisées par une impédance acoustique variable en fréquence.

Afin d'appliquer le modèle ainsi développé, nous avons souhaité étudier et caractériser différentes parois à relief dans un local expérimental aux caractéristiques acoustiques modulables. Deux types de reliefs géométriques ont été étudiés dans trois configurations de salle plus ou moins réverbérantes. Les résultats entre expériences et simulations ont présentés une concordance générale assez bonne. Cela a pu nous mener à l'estimation d'un coefficient d'absorption acoustique apparent  $\alpha_{app}$  pour ces deux reliefs. L'application de ce coefficient a permis de montrer qu'il est possible, dans les conditions étudiées ici, d'assimiler des parois à relief géométriques à des parois planes absorbantes équivalentes. Néanmoins, les parois planes induisent, globalement, une légère surestimation de l'absorption en comparaison avec la paroi à relief considérée.

Ces résultats permettent de se demander si une telle concordance peut être retrouvée pour d'autres types de relief ou dans d'autres locaux. C'est pourquoi il semblerait intéressant de poursuivre ces expérimentations dans d'autres conditions : relief non périodique, relief plus épais, local plus grand, plus réverbérant, ...

## Références

- [1] N. Raghuvanshi, R. Narain, and M. C. Lin, “Efficient and accurate sound propagation using adaptive rectangular decomposition,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 15, no. 5, pp. 789–801, Sep. 2009.
- [2] R. Mehra, N. Raghuvanshi, L. Savioja, M. C. Lin, and D. Manocha, “An efficient GPU-based time domain solver for the acoustic wave equation,” *Appl. Acoust.*, vol. 73, no. 2, pp. 83–94, Feb. 2012.
- [3] N. Morales, V. Chavda, R. Mehra, and D. Manocha, “MPARD: A high-frequency wave-based acoustic solver for very large compute clusters,” *Appl. Acoust.*, vol. 121, pp. 82–94, Jun. 2017.
- [4] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, May 1966.
- [5] T. Yokota, S. Sakamoto, and H. Tachibana, “Visualization of sound propagation and scattering in rooms,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 40–46, 2002.
- [6] T. Yokota, S. Sakamoto, and H. Tachibana, “Sound field simulation method by combining finite difference time domain calculation and multi-channel reproduction technique,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 15–23, 2004.
- [7] K. Kowalczyk and M. van Walstijn, “Modeling Frequency-Dependent Boundaries as Digital Impedance Filters in FDTD and K-DWM Room Acoustics Simulations,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 56, no. 7/8, pp. 569–583, Aug. 2008.
- [8] K. Kowalczyk and M. van Walstijn, “Room Acoustics Simulation Using 3-D Compact Explicit FDTD Schemes,” *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 19, no. 1, pp. 34–46, Jan. 2011.
- [9] K. Rabisse, “Développement d’un modèle numérique de propagation acoustique dans un local délimité par des parois à relief géométrique,” Université de Lorraine, Nancy, 2017.
- [10] G. Millington, “A modified formula for reverberation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 4, no. 1A, pp. 69–82, Jul. 1932.