



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Simulations d'un dispositif de semi-anéchoïcité active

C. Pinhède ^a, M. Allado ^b, R. Boulandet ^b, R. Cote ^a, E. Friot ^a, P. Herzog ^c

^a CNRS - LMA, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille, France

^b HEPIA, HES-SO, Rue de la Prairie 4, 1202 Genève, Suisse

^c ARTEAC-LAB, Place de l'Innovation, 8 allées Léon Gambetta, 13001 Marseille, France,



Les salles semi-anéchoïques sont utilisées en recherche et pour la caractérisation acoustique de produits industriels. La réalisation de ces salles implique actuellement des infrastructures lourdes et des revêtements absorbants onéreux. L'objectif du projet Dôme Anti-Diffraction Acoustique (DADA) est de montrer qu'il est possible de réaliser une salle semi-anéchoïque à moindre coût, en complétant un revêtement passif par une technologie active. Ce projet vise à réaliser un démonstrateur fonctionnel grandeur nature qui serait aussi un jalon important avant la réalisation de la salle anéchoïque active du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. De premiers travaux ont permis une première démonstration d'anéchoïcité active consistant à rendre invisible acoustiquement, dans la bande de fréquence 80-200 Hz, la paroi réfléchissante d'une salle semi-anéchoïque à partir d'un réseau de neuf sources anti-bruit et seize microphones. Ces résultats valident aussi une approche novatrice qui consiste à contrôler la pression acoustique à proximité des parois pour obtenir une annulation de la pression dans le volume de mesure. Cette approche comporte plusieurs avantages - notamment celui d'éviter de placer des microphones (et leur supports) dans le volume de mesure, ainsi totalement libéré pour les besoins expérimentaux. Le projet DADA proposé ici s'appuie sur ces résultats mais avec une complexité significativement accrue car il s'agit d'effacer l'effet de cinq parois. La présentation rappellera la méthode d'anéchoïcité active développée au LMA et présentera les premiers résultats de simulation de contrôle du champ réfléchi par cinq parois.

1 Introduction

Le principe de l'anéchoïcité active consiste à annuler, à l'aide d'un système actif, les réflexions acoustiques des parois d'une salle. La stratégie de contrôle du champ acoustique diffracté par les parois s'appuie sur le fait qu'un même opérateur linéaire permet de relier le champ acoustique total proche des parois au champ diffracté par ces parois quel que soit le champ acoustique direct [1, 2, 3]. Cet « opérateur de diffraction » peut être identifié à partir de mesures préalables pour un champ direct connu ; il sera ensuite utilisé pour calculer le champ acoustique diffracté d'un champ direct inconnu. Un réseau d'actionneurs permet de minimiser ce champ acoustique diffracté comme s'il s'agissait d'un champ acoustique total « ordinaire » capté par des microphones.

Un travail de doctorat récent [4, 5] a permis de rendre peu visible acoustiquement, dans la bande de fréquence 80-200 Hz, la paroi réfléchissante d'une salle semi-anéchoïque. Le projet DADA proposé ici s'appuie sur ces résultats mais vise une situation plus réaliste et plus proche de l'application car il s'agit d'effacer l'effet acoustique de cinq parois. L'objectif du projet est de réaliser un démonstrateur fonctionnel aux dimensions ($L=4,5\text{m}$; $P=3,65\text{m}$; $H=3\text{m}$) compatibles avec des applications industrielles. La figure 1 décrit le principe du démonstrateur à réaliser.

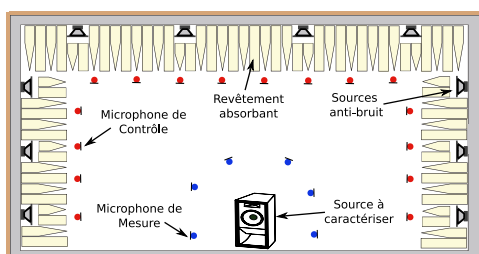


Figure 1 : schéma d'une salle semi-anéchoïque à technologie active

FIGURE 1 – Schéma d'une salle semi-anéchoïque à technologie active.

2 La stratégie de contrôle du champ diffracté appliquée à la semi-anéchoïcité active

Le but de la stratégie est de transformer par contrôle actif une salle avec un sol réfléchissant Γ' en une salle semi-anéchoïque à basse fréquence, voir Figure 2. Pour cela, des sources sont installées derrière une surface de microphones Γ sur laquelle le champ diffracté par les murs sera estimé et contrôlé.

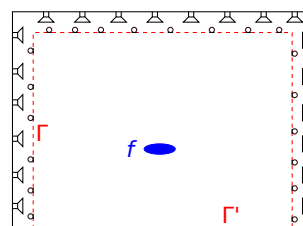


FIGURE 2 – Croquis d'une salle semi-anéchoïque à technologie active.

Le principal élément nouveau est que l'installation des microphones près des parois réfléchissantes place naturellement ces microphones à proximité de ventres des premiers modes acoustiques, leur évitant d'être placés dans les conditions de Dirichlet homogène qui rendent inefficace la stratégie de contrôle. Il est envisagé une phase de mise au point par ajout de quelques microphones supplémentaires sensibles aux éventuels modes indiscernables par ailleurs.

2.1 Formulation intégrale de la pression diffractée

La pression acoustique à la pulsation ω dans le volume peut s'écrire, pour une distribution de sources f dans le volume (cf. e.g. [6, p. 321]), avec G une quelconque fonction

de Green pour l'équation d'Helmholtz :

$$p_{tot}(\mathbf{r}, \omega) = \int_V f(\mathbf{r}_0, \omega) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) dV_0 + \int_{\Gamma+\Gamma'} \left[G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} p(\mathbf{r}_0, \omega) - p(\mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) \right] d\Gamma_0 \quad (1)$$

Si \hat{G} est en particulier une fonction qui vérifie les conditions aux limites acoustiques sur Γ' , alors l'intégrale de surface s'annule sur Γ' et on peut définir les champs direct et diffracté par les murs derrière Γ respectivement par :

$$p_{dir}(\mathbf{r}, \omega) = \int_V f(\mathbf{r}_0, \omega) \hat{G}(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) dV_0 \quad (2)$$

$$p_{sca}(\mathbf{r}, \omega) = \int_{\Gamma} \hat{G}(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} p(\mathbf{r}_0, \omega) - p(\mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} \hat{G}(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0, \omega) d\Gamma_0 \quad (3)$$

Le champ diffracté par les murs est une fonction linéaire de la pression totale sur Γ et de son gradient normal. Cette fonction est indépendante des sources présentes dans le volume.

2.2 Substitution du terme de gradient normal

Le contrôle actif exploite préférentiellement des mesures de pression acoustique plus faciles à obtenir avec précision que de gradient de pression. Dans le cas où les murs sont à réaction localisée, décrite par l'admittance spécifique de paroi β , et que les microphones sont disposés sur les murs, alors sur Γ :

$$\frac{\partial}{\partial n_0} p(\mathbf{r}_0, \omega) = -ik\beta p(\mathbf{r}_0, \omega) \quad (4)$$

La pression diffractée s'écrit alors comme une intégrale de surface sur la pression seule. Par discrétisation, en disposant en pratique plus de deux capteurs de pression par longueur d'onde sur Γ , cette intégrale peut être approchée par une somme discrète :

$$p_{sca}(\mathbf{r}, \omega) \approx \sum_k g_k(\mathbf{r}, \omega) p_k(\mathbf{r}_k, \omega) \quad (5)$$

Le point crucial de cette représentation est que les filtres $g_k(\mathbf{r})$ sont indépendants des sources de bruit dans le volume. Cette approximation 5 est souvent valide mais il est difficile d'établir à quelles conditions exactes (cf. [3]). Dans le cas du DADA, elle n'est en particulier pas valide aux fréquences "singulières" correspondant aux résonances du problème aux limites $p = 0$ sur Γ . Pour rendre l'approximation valide à ces fréquences, il peut suffire de déplacer ou d'ajouter quelques microphones (cf. § 4.2).

2.3 Identification des filtres de diffraction et contrôle

Pour accéder, par identification préalable au contrôle, aux coefficients de l'approximation ci-dessus, il suffit de

connaître les champs diffracté (ou direct) et total pour un certain nombre de distributions de sources et de résoudre le problème inverse linéaire associé. Une idée pour cela consiste à déplacer dans le volume une "source de référence", de rayonnement connu, pour générer les données nécessaires (cf. [5]) en tenant compte du champ image généré par le sol.

Ensuite, pour un contrôle du champ diffracté en temps réel, utiliser un algorithme de type *Filtered-Error LMS* (cf. [7, p. 251]) permettra même d'intégrer le filtrage des pressions sur Γ aux calculs nécessaires sans sur-coût numérique.

3 Simulations du DADA

Ce paragraphe présente la modélisation analytique du Dôme Anti-Diffraction Actif avec des parois faiblement absorbantes.

3.1 Modélisation analytique

Les sources primaire et secondaires sont assimilées à des monopôles acoustiques. La matrice de transfert entre le débit des sources et la pression dans la cavité est calculée à partir de l'expression connue de la fonction de Green en cavité rigide dans laquelle des « taux d'amortissement modaux » ξ_n sont introduits pour prendre en compte l'effet de l'absorbant. La fonction de Green acoustique G issue initialement d'un modèle de cavité V à bords rigides s'exprime sous la forme d'une série de modes amortis :

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\psi_n'(\mathbf{r}) \psi_n(\mathbf{r}_0)}{(k_n^2 + 2j\xi_n k_n k - k^2) \int_V \psi_n^2 dV} \quad (6)$$

où les ψ_n sont des modes propres et $f_n = \frac{c}{2\pi} k_n$, avec c la célérité du son, les fréquences de résonance de la cavité. En cavité rectangulaire (2D) ou parallélépipédique (3D) les modes propres sont des produits de fonction *cos* des variables d'espace. De cette façon la fonction de Green prend une valeur finie aux fréquences de résonance. Les taux d'amortissement à utiliser pour une cavité donnée peuvent être tirés d'une Modélisation par Elements Finis (MEF) de la cavité revêtue de matériau absorbant.

Avec cette fonction de Green, la pression p produite à chaque pulsation ω en un point \mathbf{r} de la cavité par un monopôle injectant un volume q (i.e., en son pur, de débit sortant $\dot{q} = j\omega q$) au point \mathbf{r}_0 s'écrit finalement, ρ désignant la masse volumique du fluide :

$$p(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\rho c^2 \omega^2 q \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\psi_n'(\mathbf{r}) \psi_n(\mathbf{r}_0)}{(\omega_n^2 + 2j\xi_n \omega_n \omega - \omega^2) \int_V \psi_n^2 dV} \quad (7)$$

On peut ainsi calculer en tout point de la salle la pression générée par une source assimilée à un monopôle.

3.2 Contrôle de la pression diffractée

Soit p_d le champ diffracté par les parois supérieures de la salle aux points de minimisation lorsque la source primaire est en fonctionnement. Soit \mathbf{H} la matrice de transfert

entre les sources secondaires et la pression aux points de minimisation. Le vecteur \mathbf{u} des commandes, à fournir aux sources secondaires pour le contrôle, doit minimiser à chaque fréquence le critère :

$$J = \|\mathbf{p}_d + \mathbf{H}\mathbf{u}\|^2 \tag{8}$$

3.3 Configuration de la simulation

Dans une cavité rigide de dimensions 4,5m (x 3,65m) x 3m, 102 modes sont présents avec une fréquence de résonance inférieure à 500 Hz en 2D et 802 en 3D. Les simulations 2D présentées ci-dessous ont été réalisées sur la plage 20-400 Hz avec 102 modes. Les taux d'amortissement modaux sont issus d'une MEF 2D pour la cavité avec un coefficient d'absorption de 2% pour les 3 bords supérieurs; ces taux rendent compte de la dissymétrie de l'absorption.

4 Résultats des simulations 2D

Les simulations sont réalisées sur un ensemble de points de visualisation espacés régulièrement de 0,1 m sur toute la surface de la cavité. Le contrôle de la pression diffractée est effectué sur des points de minimisation. Les résultats de contrôle sont évalués aux points d'observation représentant la zone de mesure; la réduction du champ diffracté sur tous ces points est utilisée comme indicateur commun à toutes les stratégies de contrôle. Les sources secondaires sont des monopôles placés à intervalles réguliers sur les murs et le plafond. La source primaire est une source dipolaire (2 monopôles en opposition de phase séparés de 0,1 m) centrée au milieu du sol.

4.1 Contrôle de la pression diffractée dans la zone de mesure

La figure 3 présente la géométrie du dispositif de contrôle simulé. Dans cette stratégie de contrôle, les positions des points de minimisation et d'observation sont coïncidentes.

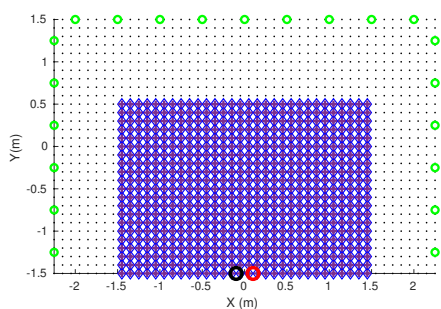


FIGURE 3 – Configuration du dispositif de contrôle dans la zone de mesure. Sources primaire (o o), secondaires (○); points de minimisation (+), d'observation (◇).

Trois configurations de sources secondaires, avec un espacement toujours identique entre les sources, sont

réalisées pour un même niveau de source primaire donné.

La figure 4 montre la réduction du champ diffracté obtenue dans la zone de mesure en fonction du nombre de sources utilisées pour le contrôle. Les courbes représentent,

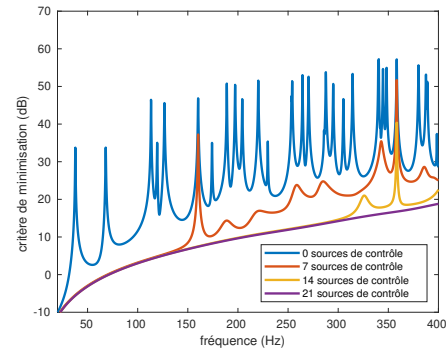


FIGURE 4 – Niveau de la pression diffractée aux points d'observation pour différents nombres de sources secondaires.

en fonction de la fréquence, la valeur moyenne quadratique du critère de minimisation sur l'ensemble des 630 points d'observation. Jusqu'à 150 Hz, les 3 configurations de contrôle permettent une atténuation comparable. A partir de 200 Hz, l'atténuation obtenue avec 7 sources se réduit, le nombre de degrés de liberté du contrôle n'est manifestement plus suffisant pour un contrôle efficace. Par ailleurs, des accidents apparaissent dans les atténuations obtenues avec 7 et 14 sources. Chaque accident est vraisemblablement dû à un mauvais couplage des sources avec le ou les modes qui imposent la pression aux fréquences concernées. Rompre les symétries des positions des sources devrait suffire à restaurer une contrôlabilité suffisante à ces fréquences singulières.

Les figures 5 et 6 représentent une carte des niveaux de pression diffractée aux points de visualisation, avec et sans contrôle à une fréquence de résonance.

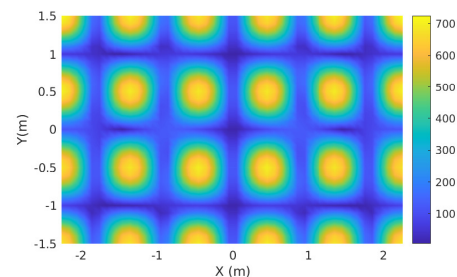


FIGURE 5 – Carte de la pression diffractée sans contrôle aux points de visualisation à 254,1 Hz.

Sans contrôle, la carte de pression est très proche du mode 5.3 (cf. Fig. 5). Avec le contrôle, la pression diffractée est annulée dans la zone de mesure et reste seulement

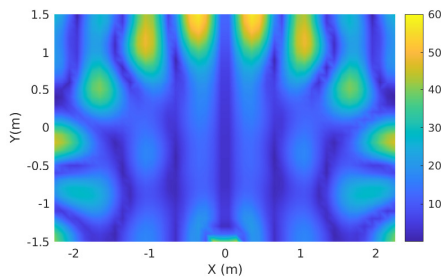


FIGURE 6 – Carte de la pression diffractée avec contrôle aux points de visualisation à 254,1 Hz.

dégradée à proximité des parois (cf. Fig. 6).

4.2 Contrôle de la pression diffractée au niveau des parois

La stratégie de contrôle consiste à annuler la pression diffractée proche des parois que l'on cherche à rendre invisible. La figure 7 présente la configuration du dispositif de contrôle qui est réduit à un filet de 28 points de minimisation situés à 0.5 cm des parois.

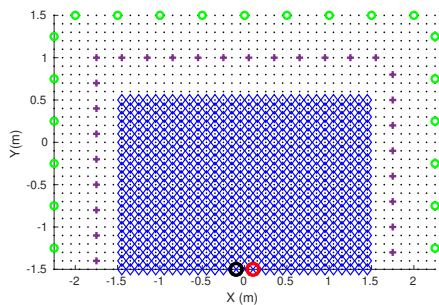


FIGURE 7 – Configuration du dispositif de contrôle en paroi. Sources primaire (o), secondaires (o); points de minimisation (+), d'observation (o).

La figure 8 présente les niveaux de la pression diffractée aux points de minimisation pour différent nombre de sources secondaires. La réduction de la pression diffractée s'améliore avec le nombre de sources. Les accidents aux fréquences 160,3 Hz et 358,3 Hz sont identiques à ceux observées pour un contrôle dans la zone de mesure (cf. Fig. 4).

La figure 9 présente les niveaux de la pression diffractée aux points d'observation. Les performances du contrôle en paroi sont comparables à celles obtenues dans la zone de mesure à l'exception d'accidents supplémentaires. Le contrôle de la pression sur une ligne ne permet pas d'annuler la pression dans la surface aux fréquences de résonance du problème aux limites $p = 0$ sur Γ . D'un point de vue théorique le problème aux limites admet une infinité de

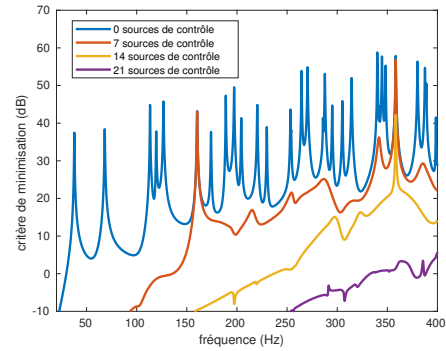


FIGURE 8 – Niveau de la pression diffractée aux points de minimisation pour différents nombres de sources secondaires.

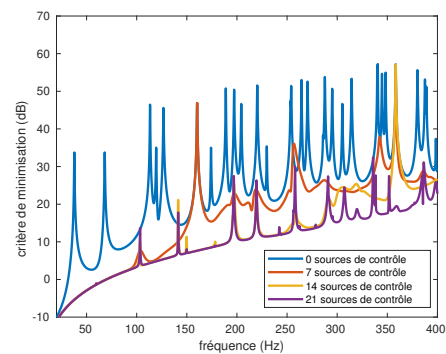


FIGURE 9 – Niveau de la pression diffractée aux points d'observation pour différents nombres de sources secondaires.

solutions à ces fréquences.

Tout en gardant le même nombre de points de minimisation, mais placés en alternance aux distances 0,4 et 0,6 m de la paroi, la figure 10 présente, aux points d'observation, les résultats de contrôle. La dissymétrie des

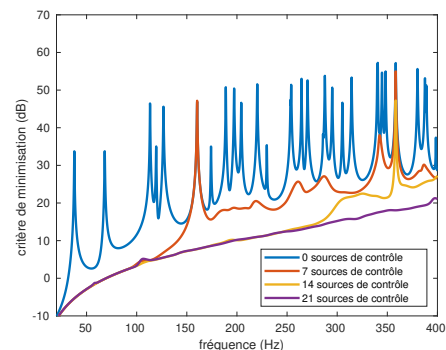


FIGURE 10 – Niveau de la pression diffractée aux points d'observation pour différents nombres de sources secondaires.

points de minimisation permet une bonne atténuation des

accidents liés aux singularités du problème de contrôle (cf. 2.2).

La figure 11 représente une carte des niveaux de pression diffractée aux points de visualisation avec le contrôle en paroi à 254,1 Hz. La réduction de la pression diffractée

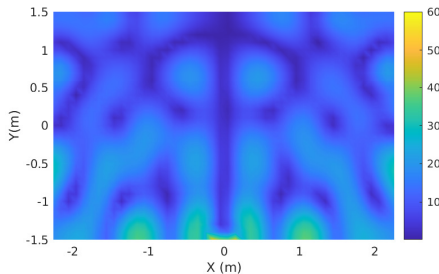


FIGURE 11 – Niveau de la pression diffractée avec contrôle aux points de visualisation à 254,1 Hz.

est globalement obtenue sur toute la surface avec quelques légères dégradations au niveau du sol.

Contrairement au contrôle de la pression diffractée dans la zone de mesure (cf. Fig.6), le contrôle en paroi permet d’annuler globalement la pression diffractée.

5 Contrôle en paroi de la pression diffractée estimée

Dans les stratégies présentées précédemment, le contrôle était réalisé pour une pression diffractée exacte, obtenue directement par la simulation. Dans ce cas, la pression diffractée est estimée à partir des filtres de diffraction identifiés selon la procédure décrite au paragraphe 2.3. La figure 12 présente la configuration de contrôle de la pression diffractée estimée aux points de minimisation. Les positions

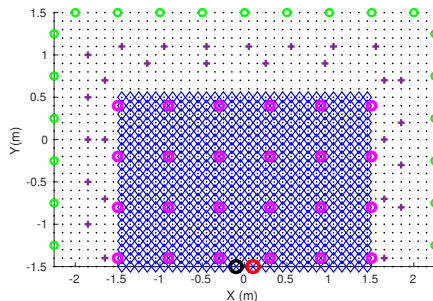


FIGURE 12 – Configuration du dispositif de contrôle. Sources primaire (○), secondaires (○), d’identification (○); points de minimisation (+), d’observation (◇).

de la source d’identification du filtre de diffraction sont représentées par des cercles magenta.

La figure 13 présente la comparaison entre les niveaux de pressions diffractée exacte et estimée, sur l’ensemble des points de minimisation. Les résultats montrent que l’identification du filtre de diffraction est correcte et permet d’estimer convenablement la pression diffractée aux points de minimisation.

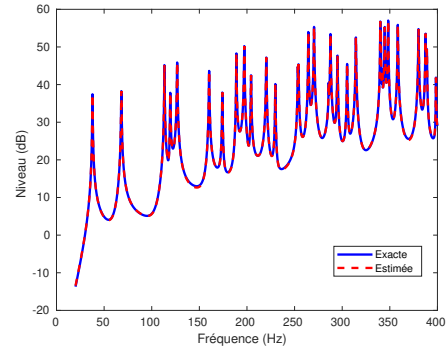


FIGURE 13 – Comparaison des niveaux de pressions diffractée exacte et estimée sur l’ensemble des points de minimisation.

Les résultats avec et sans contrôle sont présentés à la figure 14. Les courbes représentent la valeur moyenne quadratique des pressions totales sur l’ensemble des points d’observation normalisée par la pression directe de la source primaire; le niveau 0 dB correspond à la pression directe de la source primaire.

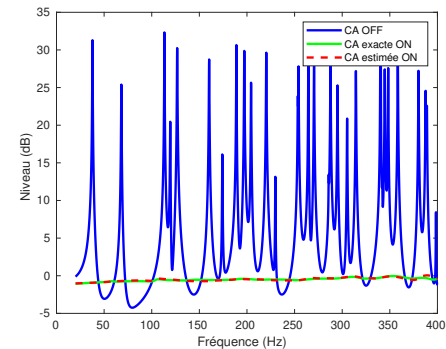


FIGURE 14 – Niveau de pression totale aux points d’observation normalisée par la pression directe.

Les résultats de contrôle sont satisfaisants avec le contrôle de pression diffractée estimée.

6 Modélisation par Eléments Finis 3D

La MEF fournit les taux d’amortissements modaux incorporés au modèle analytique utilisé pour les premières simulations de contrôle. Elle permet aussi de mieux représenter le champ proche d’une source réelle (enceinte)

et l'effet d'un matériau absorbant donné.

La salle a été modélisée dans COMSOL Multiphysics 5.6 comme un parallélépipède rectangle de dimension $4.5 \times 3.65 \times 3 \text{ m}^3$ en utilisant la physique *pressure acoustics*, *frequency domain*. Sur toutes les parois est appliquée une condition d'impédance de valeur 8.10^4 Pa.s/m . Le maillage est contrôlé par la physique du modèle en prenant en compte la longueur d'onde maximum de la simulation.

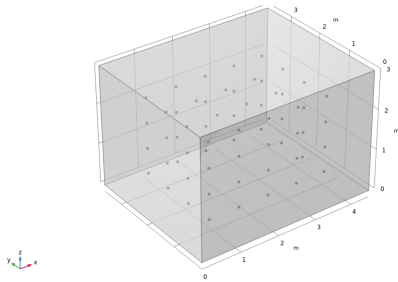


FIGURE 15 – Emplacement des 62 points de minimisation.

La figure 15 montre la salle modélisée et les positions des 62 points de minimisation uniformément répartis sur une surface fermée entourant le volume de contrôle. Avant d'appliquer le contrôle, la phase d'identification nécessite de calculer tous les transferts entre les points de minimisation et les sources d'identification situées dans le volume de contrôle (cf. Fig. 16).

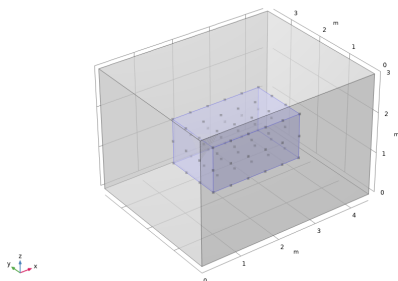


FIGURE 16 – Emplacement des 72 sources d'identification distribuées à l'intérieur du volume de contrôle (en bleu).

Pour automatiser les simulations, nous avons utilisé COMSOL Livelink for Matlab. Les sources d'identification dans le volume de mesure sont modélisés par des monopôles de débit $q_0 = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ et sont activées successivement pour calculer les fonctions de transfert entre chaque source et tous les points de minimisation. Les simulations ont été réalisées sur la plage de fréquence 20-200 Hz par pas de 1 Hz et enregistrées dans une matrice de dimensions $62 \times 181 \times 72$. La figure 17 illustre les niveaux de pression calculés en plusieurs points de minimisation lorsque la salle est excitée par l'un des monopôles.

Les simulations du contrôle de la pression diffractée estimée sont actuellement en cours de programmation.

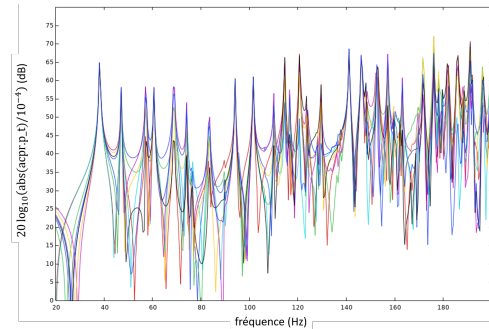


FIGURE 17 – Niveau de pression aux 8 points de minimisation situés dans le plan vertical en $x = 0.7 \text{ m}$.

7 Conclusion

Un modèle analytique 2D a permis de montrer le potentiel d'un contrôle actif du champ diffracté en paroi via l'identification préalable de filtres de diffraction et la dissymétrisation des positions de point de minimisation. Une MEF 3D permettra de valider plus précisément un dispositif actif optimisé. La réalisation du démonstrateur est lancée en parallèle au LMA.

Références

- [1] Emmanuel Friot, Régine Guillermin, and Muriel Waininger. Active control of scattered acoustic radiation : a real-time implementation for a three-dimensional object. *Acta Acustica united with Acustica*, 92 :278–288, 2006. Publisher : Hirzel Verlag.
- [2] Emmanuel Friot. Control of low-frequency wall reflections in an anechoic room. In *ACTIVE 2006*, pages CD-ROM (9 pages), Australia, 2006. Australian Acoustical Society.
- [3] D. Habault, E. Friot, Philippe Herzog, and C. Pinhède. Active control in an anechoic room : Theory and first simulations. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(3) :369–378, May 2017. Publisher : Hirzel Verlag.
- [4] Cédric Pinhède. *Contrôle actif aux basses fréquences du champ diffracté en salle semi-anechoïque*. PhD thesis, Aix-Marseille Université, 2019.
- [5] C. Pinhède, D. Habault, E. Friot, and Ph. Herzog. Active control of the field scattered by the rigid wall of a semi-anechoic room—Simulations and full-scale off-line experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 506 :116134, August 2021.
- [6] Philip McCord Morse and K. Uno Ingard. *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1986. Google-Books-ID : KIL4MV9IE5kC.
- [7] S.J. Elliott. *Signal Processing for Active Control*. January 2001.