

# CFA/VISHNO 2016

## Contrôle actif/passif de salle anéchoïque

C. Pinhede, E. Friot, D. Habault et P. Herzog

LMA - CNRS, 4 impasse Nikola Tesla CS 40006, 13453 Marseille Cedex 13, France  
pinhede@lma.cnrs-mrs.fr



LE MANS

Depuis plusieurs années se développe un intérêt croissant pour la caractérisation des sources basse fréquence qui sont de plus en plus répandues notamment dans les zones urbaines. L'analyse du rayonnement de ces sources doit souvent être réalisée dans une salle anéchoïque afin de les isoler de leur environnement. Or, toutes ces salles possèdent une fréquence de coupure, souvent entre 80 et 100 Hz, en dessous de laquelle les mesures ne sont plus anéchoïques. Une autre difficulté des mesures aux basses fréquences est due aux dimensions des salles anéchoïques qui imposent de travailler en champ proche. L'approche présentée consiste à tirer parti de la complémentarité entre les matériaux absorbants et les techniques de contrôle actif de bruit, qui ont de très bonnes performances dans les basses fréquences. Ceci permet de concevoir des solutions hybrides combinant une couche absorbante et un ensemble de microphones-sources-contrôleurs. Cette technique est centrée sur le critère d'anéchoïcité, et non d'absorption, afin de respecter la forme spatiale des fronts d'ondes. Elle consiste à contrôler la pression diffractée par les parois de la salle. Nous présentons des résultats de simulation de contrôle actif du champ diffracté et des résultats expérimentaux obtenus pour diverses configurations de salle anéchoïque (échelle réduite et échelle 1). L'objectif de cette présentation est de comparer les performances d'une mesure normalisée entre une salle anéchoïque classique et une salle équipée d'un système de contrôle actif.

## 1 Introduction

De nombreux problèmes d'acoustique sont étudiés expérimentalement dans une salle anéchoïque sensée émuler l'environnement infini ou les conditions de Sommerfeld posées dans les modèles correspondants. Une telle salle est également requise par certaines normes pour la métrologie légale (par exemple [1]). La réalisation d'une salle anéchoïque est le plus souvent basée sur le concept d'une « boîte dans la boîte » dont les parois internes sont tapissées de dièdres absorbants. Le dimensionnement de ces dièdres est fait en présumant une fréquence minimale au-dessus de laquelle les mesures sont acceptables, appelée « fréquence de coupure ». Les mesures aux basses fréquences nécessitent alors des épaisseurs importantes de revêtement, ce qui pose des problèmes de réalisation [2] et réduit considérablement le volume utile de la salle. Peu de salles sont donc conçues pour des mesures aux très basses fréquences (typiquement en-dessous de 100Hz), et les performances des salles existantes sont souvent limitées à des objectifs aussi raisonnables que possible.

Ceci peut être illustré par la mesure d'une source acoustique de référence dans une de ces salles. Nous présentons par exemple ici celle de la source omnidirectionnelle B&K 4292L dans une salle semi-anéchoïque du LMA, dont les dimensions sont :  $X = 9,15m$ ,  $Y = 4,6m$  et  $Z = 4,05m$ , la paroi rigide étant dans le plan  $YZ$  à  $X = 0$ . Cette source a la forme d'un dodécaèdre régulier d'environ 40cm de diamètre comportant 12 haut-parleurs montés en série (un par face). Pour caractériser cette source nous avons fixé un microphone (GRAS modèle 40AF) sur sa structure, à 30cm de distance d'une des faces. Cet ensemble, correspondant à une mesure en champ assez proche, a été placé à  $X = 4,50m$  de la paroi rigide de la salle, le trajet direct « source-microphone » étant parallèle à cette paroi.

La figure 1 illustre les fluctuations de la pression mesurée par le microphone proche lorsque l'ensemble « source+microphone » se déplace parallèlement à la paroi rigide de la salle semi-anéchoïque. La réponse fait clairement apparaître une ondulation de plus de 2dB, reflet du filtrage en peigne lié à l'interférence entre la source et la source-image, avec un délai lié à la position relative de la source, du microphone et de la paroi. Le déplacement représenté ici ne modifie pas cette géométrie, et reflète donc l'effet des parois « absorbantes », effet qui devrait être négligeable pour toutes

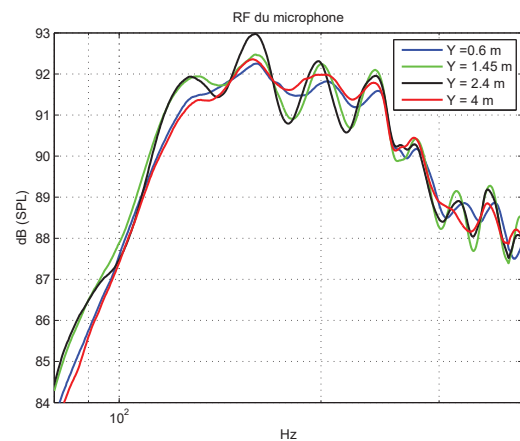


FIGURE 1 – Variations de pression lorsque l'ensemble « source+microphone » est déplacé parallèlement au mur rigide d'une salle semi-anéchoïque

les fréquences supérieures à la fréquence de coupure de la salle (environ 80Hz ici). Ces résultats montrent une bonne symétrie par rapport à l'axe de la salle, ce qui est conforme à la situation mesurée. Les écarts observés entre les mesures aux différentes positions sont au maximum de l'ordre de 1,5dB, ce qui est compatible avec la norme en vigueur [1] mais pas forcément négligeable.

Un artéfact moins connu est illustré par la figure 2, qui présente l'impédance électrique de la source, mesurée aux mêmes positions que pour la figure 1. En première approche, cette impédance  $Z_e$  peut être exprimée comme  $Z_e = R_e + Bl * v$ , où  $R_e$  est la résistance électrique des bobines des haut-parleurs de la source,  $Bl$  est le facteur de force équivalent pour ces haut-parleurs, et  $v$  la vitesse de translation de leurs membranes, supposée identique sur toutes les faces. La figure 1 illustre le comportement « masse/ressort » des haut-parleurs, le maximum de  $Z_e$  correspondant au maximum de vitesse des membranes à la fréquence de résonance de l'ensemble « volume de charge + haut-parleurs ». La translation du montage parallèlement à la paroi rigide se traduit par une légère fluctuation de l'impédance maximale, signifiant que la vitesse des membranes n'est pas la même pour différentes positions de mesure. La distance à la paroi rigide étant fixe, c'est à nouveau l'absorption limitée des dièdres présents sur les autres parois qui est en cause, à une fréquence pourtant supérieure à la fréquence de coupure de la salle. L'ordre de

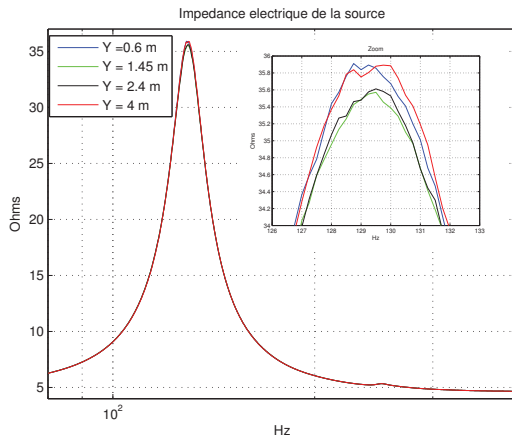


FIGURE 2 – Variations d'impédance lorsque l'ensemble « source+microphone » est déplacé parallèlement au mur rigide d'une salle semi-anéchoïque

grandeur observé ici ( $\approx 1\%$  pour une source a priori très bien conçue, et au-dessus de la fréquence de coupure de la salle) peut être très supérieur dans le cas d'une source ordinaire, notamment une source comportant un ou des événements rayonnants, mesurée aux basses fréquences dans une salle moins performante.

C'est ce type de constat expérimental, effectué dans plusieurs salles et plusieurs laboratoires, qui a motivé l'étude d'une solution d'anéchoïcité active pour permettre des mesures aussi précises que possible aux très basses fréquences. En effet cette gamme de fréquence préoccupe de plus en plus les acteurs de nombreux secteurs industriels (bâtiment, transport, etc) après avoir été longtemps délaissée du fait qu'elle paraissait moins critique en termes de gêne. Après avoir décrit rapidement le principe de l'anéchoïcité active, nous présentons donc des mesures et simulations permettant de valider son principe, puis une installation en cours de montage au LMA pour supprimer l'influence de la paroi rigide d'une salle semi-anéchoïque.

## 2 Principe de l'anéchoïcité active

Le champ de pression acoustique mesuré dans un local est la somme des ondes incidentes provenant des source excitatrices et de leur diffraction par des obstacles : ondes réfléchies par les murs d'une salle, effet d'objets voisins, etc. Dans une salle anéchoïque, l'essentiel du champ diffracté résulte de la performance nécessairement limitée de son revêtement, comme illustré ci-dessus. En effet, abaisser la fréquence de coupure à des fréquences très basses imposerait un revêtement absorbant de plusieurs mètres d'épaisseur, conduisant à des dimensions extérieures démesurées pour garantir un volume de mesure anéchoïque raisonnable.

### 2.1 Estimation de la pression diffractée

Dans le domaine fréquentiel, la pression acoustique totale  $P_{tot}(M)$  en un point  $M$  d'une salle quelconque peut s'écrire comme la somme d'une pression incidente  $P_i(M)$  provenant d'une source et de la pression diffractée (a priori par les murs)  $P_d(M)$  :

$$P_{tot}(M) = P_i(M) + P_d(M) \quad (1)$$

Le principe proposé ici est de déterminer une relation matricielle entre la pression totale  $P_{tot}(M)$ , observable avec des microphones situés dans la salle, et la pression diffractée  $P_d(M)$ , utilisée comme grandeur à minimiser par un dispositif de contrôle actif. Cette relation découle des propriétés de l'opérateur impédance décrivant la réaction des parois sur une surface  $\Gamma_e$  enfermant le domaine de mesure. La figure 3 illustre ce principe de contrôle du champ diffracté. Une représentation intégrale permet en effet de

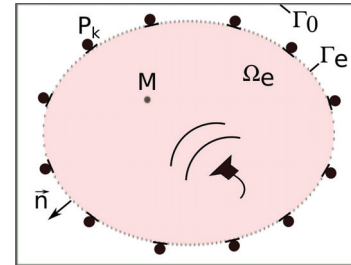


FIGURE 3 – Schéma de principe d'estimation du champ diffracté des parois

reconstituer le champ de pression dans un volume délimité par  $\Gamma_e$  à partir de la connaissance sur cette surface de la pression et de son gradient normal ; en le combinant avec l'opérateur intégral et en discrétisant la surface  $\Gamma_e$ , il est possible de définir une matrice  $H$  indépendante des sources acoustiques, telle que :

$$P_d^{est}(M) \approx \sum_{k=1}^N H(M, P_k) P_{tot}(P_k) \quad (2)$$

avec  $N$  le nombre de microphones (appelés microphones d'identification) placés sur la surface d'évaluation  $\Gamma_e$  aux positions  $P_k$ . La matrice  $H$  relie ainsi la pression totale  $P_{tot}(P_k)$  mesurée par les microphones d'identification sur  $\Gamma_e$  à la pression diffractée estimée  $P_d^{est}(M)$  en un point de mesure  $M$  à l'intérieur de  $\Omega_e$ . Cette matrice est appelée « filtre de diffraction » dans la suite. La détermination de  $H$  pose certains problèmes, mais semble possible de manière réaliste [3, 4]. Elle n'est pas décrite en détail ici.

A partir de cette matrice, il est alors possible de compenser l'effet de la diffraction sur un microphone, par exemple celui utilisé pour mesurer une source dans le volume  $\Omega_e$  (contrôle local), pour aboutir à une estimation du champ incident de la source en ce point. Il est aussi possible de construire plusieurs filtres de diffraction, pour estimer la pression diffractée en plusieurs points, et piloter des sources de contrôle afin de la minimiser simultanément en ces points.

### 2.2 Contrôle global en temps réel

La figure 1 montre que les parois de la salle semi-anéchoïque perturbent la mesure du champ rayonné par la source de référence B&K. La figure 2 montre que ces parois ne font pas que superposer un champ diffracté au champ direct qu'on souhaiterait mesurer : elle perturbent l'impédance acoustique vue par la source B&K, dont l'impédance propre est finie (malgré une conception adaptée, elle ne constitue pas un « générateur de débit » idéal). Le champ direct n'était donc pas, pendant la mesure, celui qui

aurait été produit en l'absence des parois.

Voilà pourquoi, pour supprimer l'effet des parois sur une source à mesurer, il ne suffit pas d'estimer le champ diffracté par ces parois, comme indiqué en section 2.1, pour le retrancher *en temps différé* aux mesures. Un tel post-traitement ne compenserait pas la perturbation de l'impédance vue par la source, illustrée par la figure 2.

Voilà également pourquoi il n'est pas idéal, en temps réel, de ne contrôler que le champ diffracté par les parois qu'à quelques points où l'on souhaite effectuer des mesures. En effet, un dispositif de contrôle ciblant ces quelques points y atténuerait *localement* le champ diffracté mais n'offrirait aucune garantie quant à la charge acoustique à laquelle la source à mesurer serait soumise.

Pour espérer reproduire des conditions de rayonnement comparables au champ libre, il est donc nécessaire de contrôler *globalement* et *en temps réel* l'effet des parois, de façon à présenter à la source à mesurer une charge acoustique aussi proche que possible de celle qu'offrirait un champ libre.

Le contrôle global de la pression diffractée au sein d'une partie ou de la totalité du volume  $\Omega_e$  est un problème assez classique, dès lors que la grandeur à minimiser (la pression diffractée ici) y est connue. L'estimation évoquée au §2.1 peut être réalisée pour n'importe quelle position  $M_i$  à l'intérieur de  $\Omega_e$  : l'identification « off-line » du filtre de diffraction nécessite de placer un microphone à cette position, mais ce microphone peut ensuite être enlevé pour un contrôle « on-line ». Les filtres  $H_i$  permettent ainsi d'estimer la pression diffractée en temps réel sans laisser de microphones en place : il s'agit d'une technique similaire aux « microphones virtuels » utilisés dans de nombreux problèmes de contrôle actif [5].

En pratique le contrôle global du champ diffracté peut alors être obtenu par exemple en disposant autour de la source à mesurer un maillage suffisamment resserré de microphones [virtuels] de contrôle, espacés de moins d'une demi-longueur d'onde à la fréquence considérée [6]. Des positions d'estimation additionnelles peuvent aussi aider à gérer les fréquences irrégulières éventuelles.

### 2.3 Principe de contrôle du champ diffracté par les parois d'une salle anéchoïque

La figure 4 illustre le cas du contrôle du champ diffracté par les parois d'une salle anéchoïque. Des sources de contrôle sont placées sur toutes les parois de la salle et les microphones d'identification matérialisent la surface  $\Gamma_e$  délimitant le volume de mesure  $\Omega_e$  dans lequel la pression diffractée par les parois est estimée d'après la pression totale sur  $\Gamma_e$  (équation 2). Les microphones de minimisation doivent être placés à l'intérieur de  $\Omega_e$  pour permettre un contrôle local de la pression diffractée. Un contrôle global de la pression diffractée dans le volume  $\Omega_i$  serait également réalisable en utilisant un maillage de microphones de minimisation [virtuels] sur son enveloppe  $\Gamma_i$ .

Après l'identification du filtre de diffraction  $H$  et des fonctions de transfert  $G_v$  entre les sources de contrôle et les microphones de minimisation, le principe de la méthode est alors classique : il consiste à minimiser la fonctionnelle  $J$  pour obtenir les commandes  $\mathbf{u}^{est}$  des sources secondaires :

$$J = \|\mathbf{H} * P_{tot} + G_v \mathbf{u}^{est}\|^2 + \lambda \|\mathbf{u}^{est}\|^2 \quad (3)$$

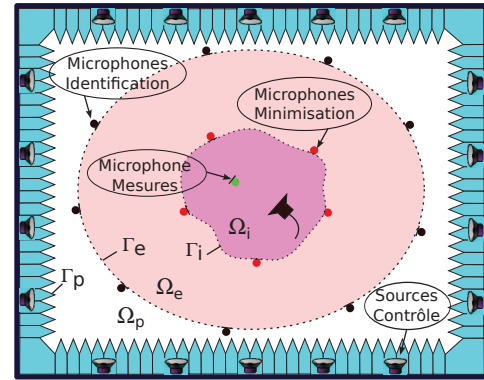


FIGURE 4 – Schéma de principe de contrôle de la pression diffractée dans une salle anéchoïque

où  $H * P_{tot} = P_d^{est}$  est la pression diffractée estimée et  $\lambda$  un paramètre de régularisation (pénalisation) dont la valeur est fixée de manière à garantir l'unicité du contrôle. Une décomposition en valeurs singulières (SVD) permet d'extraire les commandes  $\mathbf{u}^{est}$  :

$$\mathbf{u}^{est} = -X * P_d^{est} \quad (4)$$

où  $X$  est la pseudo-inverse de  $G_v$  calculée par SVD. La pression diffractée contrôlée peut alors s'écrire :

$$P_d^{Cest} = -G_v * \mathbf{u}^{est} \quad (5)$$

La qualité de l'estimation de la pression diffractée contrôlée dépend essentiellement d'une bonne identification du ou des filtres de diffraction  $H$ .

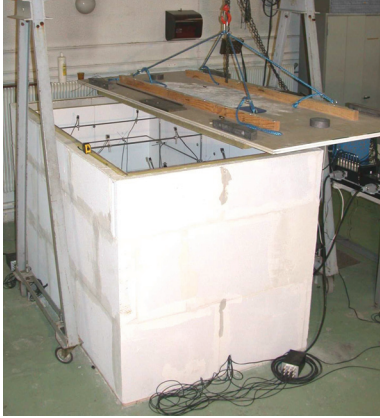
## 3 Résultats expérimentaux et simulations

Dans le cadre du projet de réalisation de la future salle anéchoïque active du LMA, des essais expérimentaux ont été réalisés sur une maquette à l'échelle 1/5<sup>ème</sup>, représentant une salle anéchoïque active [7], [8]. Les résultats de ces essais ont ensuite été confrontés à des résultats de simulation. Une autre étape préliminaire d'un projet en cours consiste à supprimer l'influence de la paroi rigide d'une salle anéchoïque. Nous en présentons ici les premières simulations.

### 3.1 Identification expérimentale d'un filtre de diffraction

Une maquette de salle anéchoïque active (figure 5) a été réalisée au LMA. Les dimensions :  $X = 2m$  ;  $Y = 1,1m$  et  $Z = 1,2m$ , respectent celles de l'ancienne salle anéchoïque du LMA, à l'échelle 1/5<sup>ème</sup>. Les murs intérieurs ont été recouverts de plaques de 5cm de laine de roche. Un maillage de 32 microphones d'identification a été aménagé sur une structure métallique à l'intérieur de la maquette. Le microphone de mesure (B&K modèle 41910) est placé à l'intérieur du maillage des microphones d'identification. La source monopolaire a été réalisée au LMA en assemblant 2 haut-parleurs (Scan-Speak 15W/8530K00) en push-push. Le système d'acquisition-restitution de signaux est une carte Son RME 64 entrées /64 sorties.

Dans le cadre de cette expérience [8], le signal d'excitation de la source est un bruit blanc compris entre 50

FIGURE 5 – Maquette 1/5<sup>eme</sup> de la salle anéchoïque

et 600Hz. Le filtre de diffraction  $H$  a été mesuré en déplaçant 33 fois la source monopolaire à l'intérieur du volume décrit par les 32 microphones d'identification. L'efficacité du filtre  $H$  est vérifiée en estimant la pression diffractée sur le microphone de mesure pour des emplacements de source différents de ceux choisis pour l'identification du filtre.

La figure 6 montre la comparaison entre la pression incidente mesurée en salle anéchoïque et la pression incidente estimée obtenue au point de mesure  $M$  par soustraction de la pression diffractée estimée  $P_d^{est}$  (à l'aide du filtre de diffraction) à la pression totale  $P_{tot}$  mesurée dans la maquette.

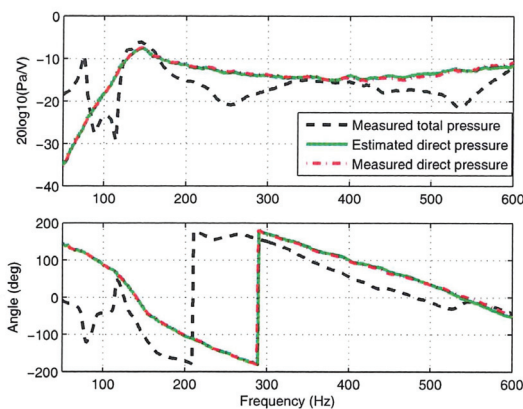


FIGURE 6 – Comparaison des pressions incidentes mesurées et estimées

Les résultats obtenus (figure 6) montrent que la pression incidente mesurée et celle estimée sont très similaires, ce qui indique que l'identification du filtre de diffraction  $H$  est satisfaisante.

### 3.2 Simulations de contrôle du champ diffracté par des parois

Des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel FELIN, développé au LMA, utilisant la méthode des éléments finis de frontière (BEM). La salle simulée ici est toujours la maquette de salle anéchoïque à l'échelle 1/5<sup>eme</sup>. Les emplacements des microphones et des sources « virtuelles » correspondent aux coordonnées réelles mesurées dans la maquette. La figure 7 représente les 32 microphones d'identification (croix rouges) et

les 7 microphones de minimisation (croix noires) qui correspondent à des points de mesures. La source d'identification et la source à mesurer (rond noir) sont assimilées à des sources monopolaires. Les 32 sources de contrôle réparties sur 5 parois correspondent à des vibrations d'élément du maillage BEM. Les simulations ont été réalisées sur la bande de fréquences 50 – 450Hz. Les parois sont décrites par une impédance qui décroît en fonction de la fréquence d'environ 0,98 à 50Hz jusqu'à environ 0,47 à 450Hz.

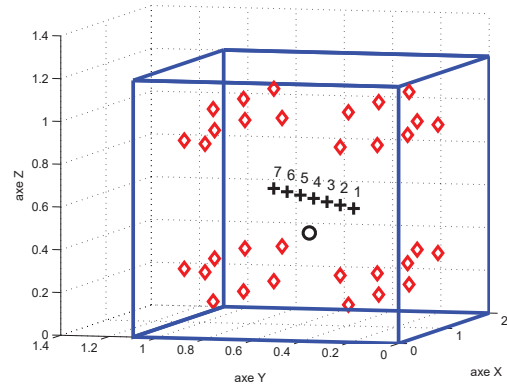


FIGURE 7 – Schéma de la maquette.  
 ◇ : Microphone d'identification ; + : Microphone de minimisation ; ○ : Source à mesurer.

La méthode d'identification du filtre de diffraction  $H$  décrite au §2.1 est appliquée en calculant la pression totale  $P_{tot}$  sur les 32 microphones d'identification pour 32 emplacements de la source monopolaire d'identification, à l'intérieur du maillage microphonique. Ce filtre  $H$  permet donc d'estimer la pression diffractée  $P_d^{est}$  aux points  $M$  (équation 2) correspondant aux microphones de minimisation. Les fonctions de transfert  $G_v$  entre les sources de contrôle et les microphones de minimisation sont calculées ensuite en faisant vibrer consécutivement les éléments de paroi correspondant aux coordonnées des sources de contrôle de la maquette. Le filtre de diffraction  $H$  et les fonctions de transferts  $G_v$  permettent d'estimer les commandes  $u^{est}$  pour piloter les sources de contrôle afin de réduire la pression diffractée estimée  $P_d^{est}$  sur les microphones de minimisation (équation 4).

La simulation consiste à placer une source monopolaire à mesurer à l'intérieur du maillage de microphone d'identification et de calculer la pression diffractée estimée contrôlée  $P_d^{Cest}$  sur les microphones de minimisation (équation 5). Nous comparons ensuite la pression incidente exacte  $P_i$  calculée par FELIN et la pression incidente estimée contrôlée  $P_i^{Cest}$  obtenue par soustraction de la pression diffractée estimée contrôlée  $P_d^{Cest}$  à la pression totale.

La figure 8 montre que la pression incidente estimée contrôlée  $P_i^{Cest}$  (croix bleues) correspond bien à la pression exacte sur les 7 microphones de minimisation à la fréquence 80 Hz (pointillé bleu) bien qu'à cette fréquence la pression totale est principalement due à la pression diffractée.

La figure 9 montre un résultat similaire à la fréquence 370Hz, à l'exception de certains microphones de minimisation où l'estimation est un peu moins bonne.

Les résultats des simulations de contrôle de la pression

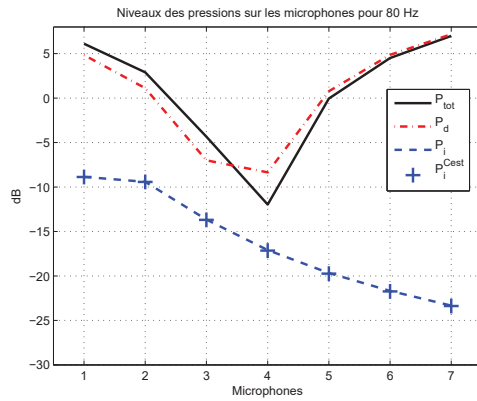


FIGURE 8 – Comparaison des pressions incidentes exactes  $P_i$  et estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  pour une source à 80Hz

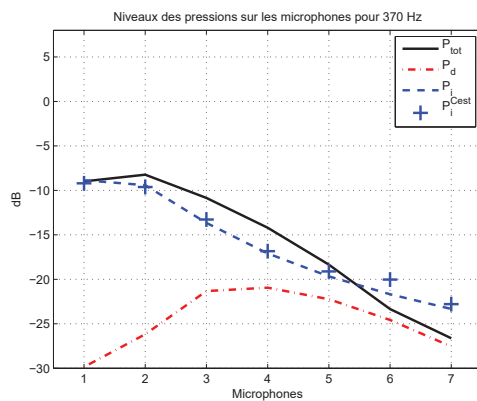


FIGURE 9 – Comparaison des pressions incidentes exactes  $P_i$  et estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  pour une source à 370Hz

diffractée des parois sur les microphones de minimisation sont donc très bons à l'exception de certains microphones aux « hautes fréquences ». Ces résultats sont encourageants car ils montrent l'efficacité du contrôle actif dans les basses fréquences. Dans le cadre d'une salle anéchoïque, le revêtement absorbant comblerait les faiblesses du contrôle pour les hautes fréquences.

### 3.3 Simulation de contrôle de la pression diffractée en salle semi-anéchoïque

Une future installation en cours de montage au LMA consiste à utiliser un système de contrôle actif afin de réduire la pression diffractée par la paroi rigide d'une salle semi-anéchoïque. Cette salle de dimensions :  $X = 9,15m$ ;  $Y = 4,6m$  et  $Z = 4,05m$ , n'est pas équipée de revêtement acoustique sur la paroi verticale en  $X = 0$ . Afin de valider le principe de ce montage expérimental (en cours), des simulations ont été réalisées aux échelles réelles. Dans ces simulations, nous avons affecté un coefficient de réflexion de 1 pour les parois équipées d'un revêtement absorbant et de 0,99 pour la paroi rigide. Ces coefficients de réflexion sont indépendants de la fréquence.

La configuration de ces simulations est illustrée par la figure 10. Les 9 sources de contrôle sont disposées sur la paroi réfléchissante à 80cm des bords et espacées entre elles d'1,2m. Elles sont assimilées, comme dans le cas de la maquette, à des éléments vibrants du maillage de la structure. Les 16 microphones d'identification forment un plan situé à

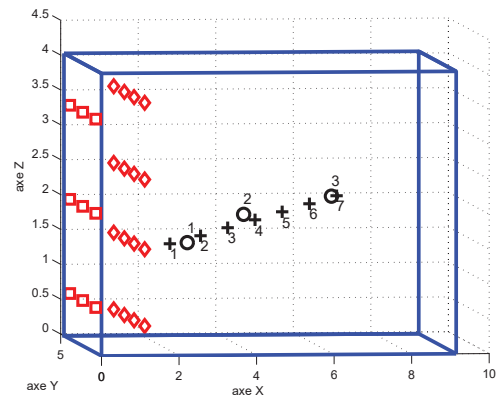


FIGURE 10 – Schéma de la salle semi-anéchoïque.  
□ : Source de contrôle ; ◇ : Microphone d'identification ;  
+ : Microphone de minimisation ; ○ : Source à mesurer.

1,2 mètre de la paroi réfléchissante en évitant d'être en face des sources de contrôle. Les microphones de minimisation forment une diagonale inclinée dans le volume défini par les emplacements des sources d'identification. Nous avons placé la source à mesurer à 3 positions (figure 10).

La méthode d'identification du filtre de diffraction  $H$  est appliquée en calculant la pression totale  $P_{tot}$  sur les 16 microphones d'identification pour 30 emplacements de la source monopolaire d'identification. Les fonctions de transfert  $G_v$  entre les sources de contrôle et les microphones de minimisation sont calculées ensuite en faisant vibrer consécutivement les éléments de paroi. Le filtre de diffraction  $H$  et les fonctions de transferts  $G_v$  permettent d'estimer les commandes  $u^{est}$  pour piloter les sources de contrôles afin de réduire la pression diffractée estimée  $P_d^{est}$  sur les microphones de minimisation (équation 4).

La simulation consiste à placer une source monopolaire à mesurer et de calculer la pression diffractée estimée contrôlée  $P_d^{Cest}$  sur les microphones de minimisation (équation 5). Nous comparons ensuite la pression incidente exacte  $P_i$  calculée par FELIN et la pression incidente estimée contrôlée  $P_i^{Cest}$  obtenue par soustraction de la pression diffractée estimée contrôlée  $P_d^{Cest}$  à la pression totale.

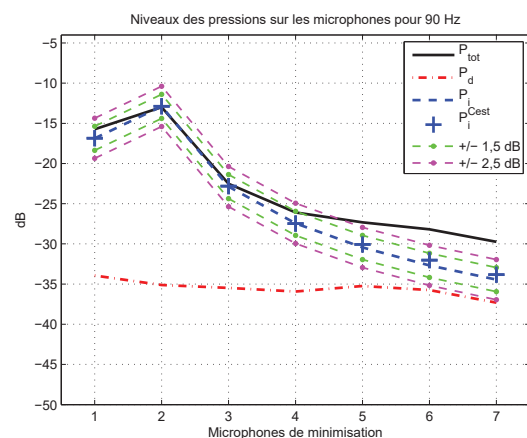


FIGURE 11 – Comparaison entre pressions estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  et norme [1] pour la source n° 1 à 90Hz

La figure 11 présente le cas de la source n° 1, proche de la paroi rigide et du microphone n° 2. Pour les positions

éloignées de la paroi rigide, nous remarquons l'influence de la pression diffractée qui entraîne des écarts supérieurs à  $2,5\text{dB}$  sur la pression totale exacte, ce qui ne serait pas conforme à la norme [1] pour une salle semi-anéchoïque. Inversement les pressions incidentes estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  correspondent bien aux pressions incidentes exactes. Ces simulations de contrôle conduisent à des écarts inférieurs à  $1,5\text{dB}$  par rapport à la décroissance théorique, donc conformes à la norme [1] pour une salle anéchoïque.

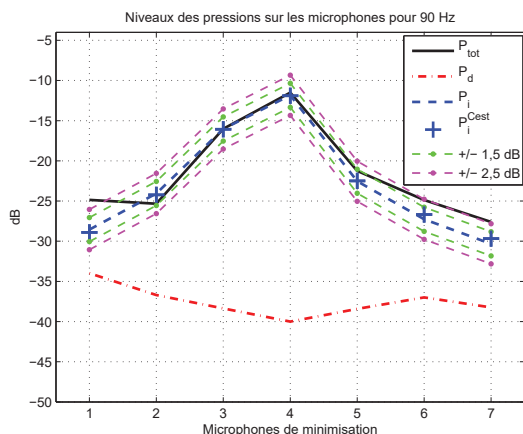


FIGURE 12 – Comparaison entre pressions estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  et norme [1] pour la source n° 2 à  $90\text{Hz}$

La figure 12 présente le cas de la source n° 2 placée vers le centre de la salle et proche du microphone n° 4. Pour les positions les plus proches des parois, les pressions totales exactes sont à la limite de la norme [1] pour une salle semi-anéchoïque, alors que les pressions incidentes estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  correspondent toujours aux pressions exactes avec des écarts inférieurs à  $1,5\text{dB}$ .

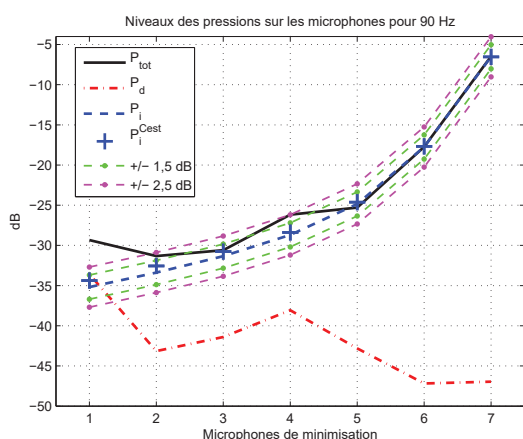


FIGURE 13 – Comparaison entre pressions estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  et norme [1] pour la source n° 3 à  $90\text{Hz}$

La figure 13 présente le cas de la source n° 3 placée à l'opposé de la paroi rigide et proche du microphone n° 7. Pour le microphone n° 1 la pression totale exacte n'est pas conforme avec la norme [1] pour une salle semi-anéchoïque. Les pressions incidentes estimées contrôlées  $P_i^{Cest}$  sont par contre toujours conformes à la norme [1] pour une salle anéchoïque.

## 4 Conclusion

Nous proposons ici une méthode de contrôle de la pression diffractée des parois aux basses fréquences, destinée à compléter le revêtement d'une salle anéchoïque. Des résultats de mesure d'impédance de source ont montré l'intérêt d'un traitement en temps réel par rapport à un post-traitement. De premières expérimentations et des simulations numériques ont donné des résultats encourageants.

Les résultats de simulations en salle semi-anéchoïque valident notamment le principe de contrôle de la pression diffractée par sa paroi rigide. Les résultats étant compatibles avec la norme [1] pour une salle anéchoïque, ils suggèrent que la solution active serait capable de « supprimer virtuellement » un mur rigide, ce qui nous encourage à envisager maintenant une phase de réalisation expérimentale en grandeur réelle.

## Remerciements

Les auteurs remercient Régine Guillermin pour l'utilisation de son code FELIN.

## Références

- [1] Norme ISO 3745, Acoustique - Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique - Méthodes de laboratoire pour les salles anéchoïques et semi-anéchoïques, 2003.
- [2] S. Schneider, C. Kern, Acoustical behavior of the large anechoic chamber at the Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique in the low frequency range, *Acustica united with Acta Acustica* **94** (1), pp 141-147, 2008.
- [3] E. Friot, A. Gintz, Estimation and global control of noise reflections. *ACTIVE 2009*, Ottawa, Canada, 23-26 Aug. 2009.
- [4] Ph. Herzog, E. Friot, D. Habault, C. Pinède, A. Gintz, P. Leroy, M. Pachebat, Towards an active anechoic room. *Forum Acusticum*, Krakow (Pol), 7-12 Sept 2014.
- [5] A. Roure and A. Albarrazin, The remote microphone technique for active noise control, *ACTIVE 99*, pp 1233-1244, 1999.
- [6] N. Epain, E. Friot, Active control of sound inside a sphere via control of the acoustic pressure at the boundary surface, *Journal of Sound and Vibration* **299**(3), pp 587-604, 2007.
- [7] A. Gintz : Estimation des échos à basses fréquence dans un local de mesure. Thèse, Marseille, 2009.
- [8] P. Leroy : Estimation du champ diffracté dans la maquette de chambre sourde active. Internal report, CNRS-LMA, 2010.