



HAL
open science

Assourdissement actif à basse-fréquence des chambres anéchoïques

Emmanuel Friot, Régine Guillermin

► **To cite this version:**

Emmanuel Friot, Régine Guillermin. Assourdissement actif à basse-fréquence des chambres anéchoïques. XVIIème Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-00088102

HAL Id: hal-00088102

<https://hal.science/hal-00088102>

Submitted on 25 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Assourdissement actif à basse-fréquence des chambre anéchoïques

Emmanuel Friot & Régine Guillermin

CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
31 Chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20
friot@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé :

Une stratégie de contrôle actif a été récemment introduite pour atténuer, à l'aide de transducteurs usuels, le champ acoustique diffracté par un objet quelconque ; une application possible en est l'absorption à basse fréquence des réflexions sur les parois des chambres sourdes. On présente ici la stratégie de contrôle et sa mise en œuvre sur une expérience 3D de démonstration puis des simulations numériques destinées à évaluer le nombre de transducteurs nécessaires à l'assourdissement d'une chambre anéchoïque dans la bande 10-80Hz.

Abstract :

Recently, a real-time strategy has been introduced for active control, with off-the-shelf actuators and sensors, of the noise scattered by a reflecting body. This strategy could be implemented for cancellation of the wall reflections in an anechoic room. In the paper the control strategy and results from a 3D demonstration set-up are given, as well as numerical simulations intended for evaluating the number of actuators and sensors required in a large anechoic room for wall reflection control in the 10-80Hz frequency range.

Mots-clefs :

Contrôle acoustique actif ; diffraction ; chambres anéchoïques

1 Introduction

En principe, un contrôle actif permet de réduire le champ acoustique diffracté par un obstacle quelconque (cf. [1], p. 290-293). Une stratégie de contrôle a été récemment introduite et testée en 1D pour y parvenir, en temps réel, à l'aide de transducteurs usuels [2], [3]. Cette stratégie pourrait être appliquée au contrôle des réflexions sur les murs des chambres sourdes pour y obtenir des conditions d'espace libre jusqu'aux très basses fréquences. On présente ici les grandes lignes de l'algorithme de contrôle ainsi que quelques résultats obtenus sur une expérience de validation 3D. On présente ensuite des simulations numériques du contrôle des réflexions sur les parois d'une chambre sourde qui montrent qu'une atténuation importante pourrait être obtenue, dans la bande de fréquence 10-80Hz, à l'aide de quelques dizaines de transducteurs usuels.

2 Une stratégie de contrôle actif du champ diffracté

On dispose pour le contrôle acoustique actif d'algorithmes adaptatifs (e.g. le *Filtered-X Least Mean Square*) qui conduisent souvent à une réduction optimale du bruit capté par un ensemble de capteurs de minimisation [4]. Ces algorithmes ne permettent pas tels quels de minimiser le bruit diffracté par un obstacle qu'on ne sait pas capter directement. Toutefois, si G désigne la fonction de Green de l'équation d'Helmholtz pour le milieu *sans* l'obstacle et S une

surface entourant l'obstacle, la représentation intégrale de la pression :

$$p(\mathbf{r}, \omega) = p_i(\mathbf{r}, \omega) + \iint_S \left[G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} p(\mathbf{r}_0, \omega) - p(\mathbf{r}_0, \omega) \frac{\partial}{\partial n_0} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) \right] dS_0 \quad (1)$$

montre qu'un opérateur linéaire relie la pression totale autour de l'obstacle à la pression diffractée ; cet opérateur est indépendant du champ incident p_i . Par discrétisation de la surface S on peut donc estimer, quel que soit le champ incident, la pression *diffractée* à partir de la mesure de la pression *totale* et de son gradient en un nombre fini de points :

$$p_d(\mathbf{r}, \omega) \approx \sum_{k=1}^N \left[g_k(\mathbf{r}, \omega) \frac{\partial}{\partial n_k} p(\mathbf{r}_k, \omega) + h_k(\mathbf{r}, \omega) p(\mathbf{r}_k, \omega) \right] \quad (2)$$

Enfin, si on considère S comme une surface à réaction localisée (ce qu'on fera ici), seuls des capteurs de pression sont nécessaires puisque la pression et son gradient normal sont proportionnels sur S . Par conséquent, le vecteur des signaux de minimisation à fournir à une électronique de commande pour réduire le champ diffracté peut être écrit dans le domaine temporel comme :

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{p}_d^{(1)}(n) + \mathbf{p}^{(2)}(n) = \hat{\mathbf{G}} * (\mathbf{p}_r(n) - \mathbf{H}_r * \mathbf{u}(n)) + \mathbf{H}_v * \mathbf{u}(n) \quad (3)$$

où $*$ désigne le produit de convolution et :

- $\mathbf{p}_d^{(1)}(n)$ est le vecteur des pressions (primaires) diffractées sans contrôle (que le contrôle doit neutraliser),
- $\mathbf{p}^{(2)}(n)$ celui des pressions (secondaires) de contrôle,
- $\hat{\mathbf{G}}$ est une approximation de l'opérateur de diffraction, mis en évidence dans l'équation (2), entre la pression totale \mathbf{p}_r aux points de mesure sur S (dits "réels") et la pression diffractée aux points de minimisation (dits "virtuels"),
- \mathbf{H}_r et \mathbf{H}_v sont des approximations RIF des fonctions de transfert secondaires entre les signaux de commande \mathbf{u} et la pression totale d'une part aux points de mesure sur S , d'autre part aux points de minimisation.

Les RIF qui apparaissent dans (3) peuvent être identifiées à partir de mesures préalables au contrôle [2]. Le vecteur \mathbf{e} des signaux de minimisation ainsi construit peut être injecté dans un algorithme *Filtered-Error Least-Mean-Square* (cf. [4]) pour le calcul des signaux de commande \mathbf{u} à fournir aux sources de contre-bruit. Si x désigne un "signal de référence" qui détecte le champ incident avant qu'il n'atteigne l'obstacle, les opérations à effectuer en temps-réel pour le contrôle du champ diffracté consistent alors en (cf. [2] pour les détails intermédiaires) :

$$\mathbf{u}(n+1) = \mathbf{W}(n) * x(n) \quad \text{avec :} \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_k(n+1) = \mathbf{W}_k(n) - \dots$$

$$\alpha \left[(\mathbf{H}_v^{rev} * \hat{\mathbf{G}}) * \mathbf{p}_r(n - \tau + 1 - k) + (\mathbf{H}_v^{rev} * (\mathbf{H}_v - \hat{\mathbf{G}} * \mathbf{H}_r)) * \mathbf{u}(n - \tau + 1 - k) \right] x(n) \quad (5)$$

où τ désigne la longueur de la RIF \mathbf{H}_v , et \mathbf{H}_v^{rev} cette réponse lue "à l'envers". Les convolutions entre opérateurs peuvent être effectuées hors temps réel si bien que cet algorithme de contrôle de la pression diffractée demande, à cause du terme en \mathbf{u} qui apparaît dans la mise à jour du filtre de contrôle, environ deux fois plus d'opérations que l'algorithme FELMS usuel.

3 Mise en œuvre de la stratégie sur une expérience 3D

La figure 1 montre le dispositif expérimental installé dans la grande chambre sourde du LMA pour tester en temps réel la stratégie ci-dessus. La figure 2 montre, lorsque les sources secondaires sont inactives, le champ acoustique diffracté aux points de minimisation en le calculant, d'une part, par soustraction du champ sans le parallélépipède diffractant au champ avec, puis, d'autre part, par filtrage de la pression à la surface du parallélépipède par un opérateur de diffraction identifié au préalable à l'aide des seules sources secondaires. Ces deux évaluations du champ diffracté sont en bon accord ; il semble que le champ diffracté puisse être estimé correctement par filtrage quel que soit le champ incident. La figure 2 montre ensuite l'atténuation de 5 à 10dB du champ diffracté obtenue par minimisation temps réel du champ diffracté estimé. Cette atténuation est comparable à celle, optimale pour cette configuration de transducteurs, prédite par la simulation numérique de l'expérience avec un code d'Elements Finis de Frontière.

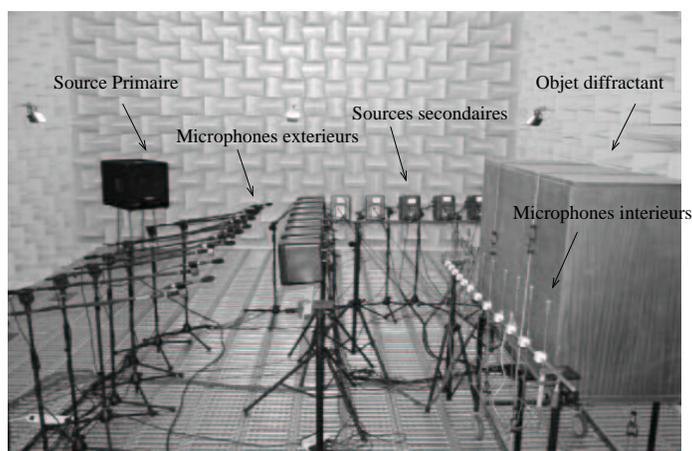


FIG. 1 – Dispositif expérimental pour un contrôle du champ diffracté en 3D

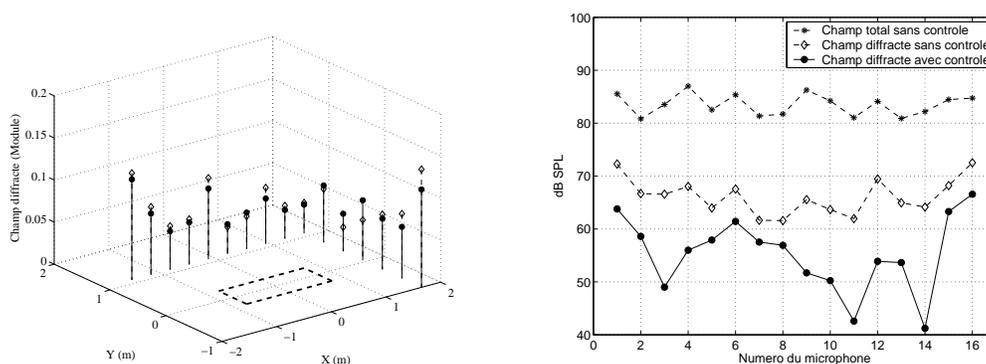


FIG. 2 – Contrôle actif du champ diffracté par une cible : comparaison des pressions diffractées aux points de minimisation, valeurs mesurées (—●) et estimées (- -◇), amplitude des pressions aux points de minimisation avec et sans contrôle

4 Application à l’assourdissement des chambres anéchoïques

La figure 3 décrit le dispositif envisagé pour le contrôle actif des réflexions en paroi de chambre sourde ainsi que les maillages de transducteurs utilisés pour sa simulation numérique dans une chambre de dimensions $10 \times 7 \times 6m$. 68 sources monopôlaires sont disposées sur les parois de la chambre, 68 points de minimisation sont disposés à la surface du volume de mesure utile au centre de la chambre. Une méthode d’image a été utilisée pour simuler la réponse acoustique de la chambre. Cette méthode conduit à une estimation consistante des champs direct et diffracté ; on y incorpore facilement les coefficients d’absorption par les dièdres fournis par les constructeurs de la chambre *via* un coefficient de réflexion en paroi réel et indépendant de l’angle. Un calcul incluant la modélisation volumique de dièdres en mélamine sera conduit ultérieurement ; bien que très frustré, la méthode d’images utilisée conduit à des champs acoustiques plausibles (proches par exemple des “modes en cosinus” aux fréquences de résonance).

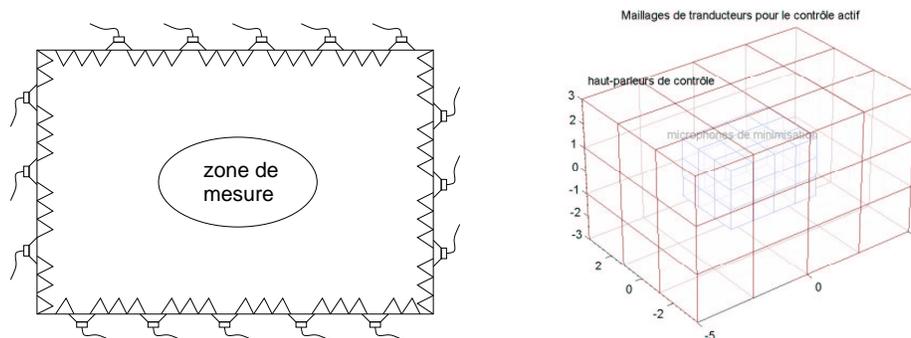


FIG. 3 – Un concept de chambre sourde active et les maillages de transducteurs utilisés pour la simuler

La figure 4 montre les performances du contrôle actif lorsque la source primaire est un monopôle proche du centre de la chambre. Le critère de minimisation choisi incluait à la fois la pression diffractée aux points de minimisation et la norme du vecteur de commande, avec une pénalisation variable en fréquence pour obtenir une atténuation à peu près constante aux points de minimisation. Le contrôle actif permet une atténuation efficace de la pression diffractée ; l’atténuation dans la zone de mesure diminue avec la fréquence, en liaison avec la densité du maillage de minimisation à sa surface. Globalement, le contrôle maintient la pression diffractée, qui diminue avec la fréquence, à un niveau très faible sur toute la plage 10-80Hz. L’effort nécessaire au contrôle, montré sur la figure 4, est le reflet du conditionnement du problème de contrôle ; le débit des sources secondaires reste faible en regard du débit de la source primaire. La simulation suggère donc qu’un contrôle du champ diffracté est faisable avec quelques dizaines d’enceintes bien conçues dissimulées dans les parois d’une chambre sourde, derrière les dièdres absorbants. Les figures 5 et 6 montrent à une fréquence de résonance des coupes des champs total, direct, diffracté sans contrôle puis diffracté avec contrôle. On constate que le contrôle permet une réduction du champ diffracté sur une zone assez large ; la régénération est limitée aux parois de la chambre.

Les simulations ci-dessus ont été menées en supposant le champ diffracté parfaitement connu. En pratique il sera nécessaire de l’estimer comme indiqué au paragraphe 2. La figure 7 décrit un possible dispositif d’identification de l’opérateur de diffraction qui relie la pression

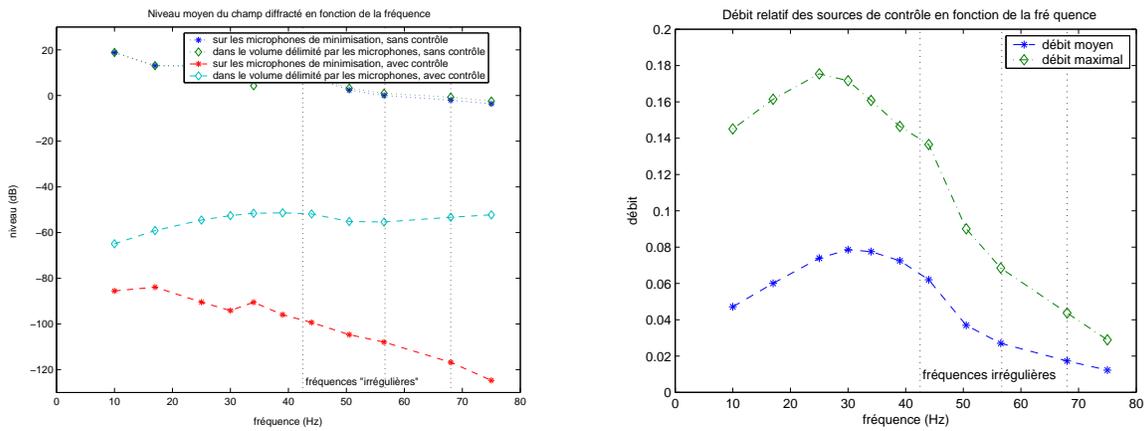


FIG. 4 – Performance et coût énergétique du contrôle actif du champ diffracté par les parois de la chambre sourde

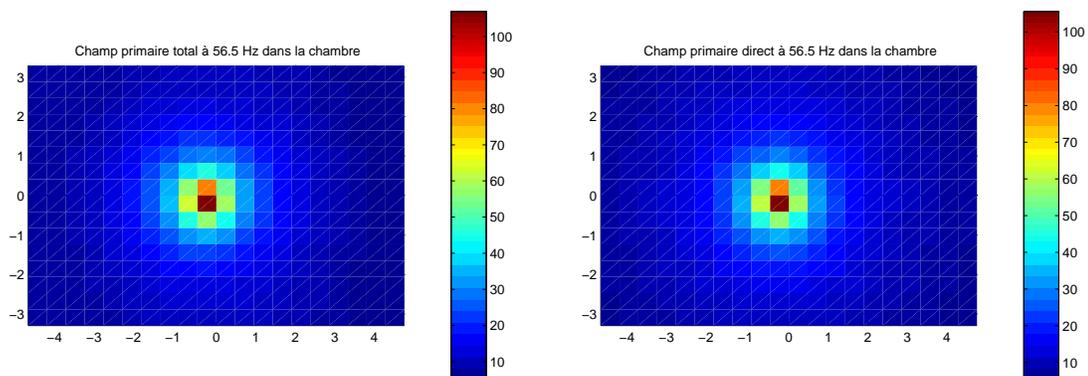


FIG. 5 – Coupe des champs total et direct dans la chambre sourde

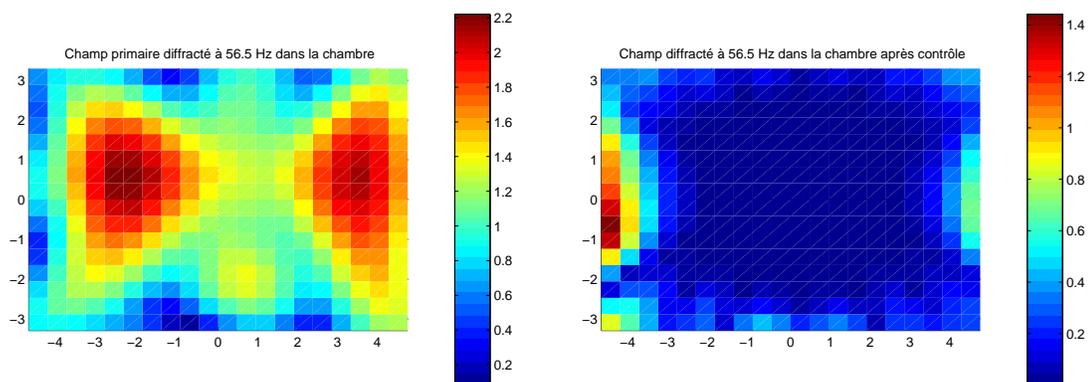


FIG. 6 – Coupe des champs diffractés dans la chambre sourde, sans et avec contrôle

totale en paroi de chambre sourde à la pression diffractée autour de la zone de mesure. On peut mesurer avec soin des réponses impulsionnelles d'une source étalon dans la chambre (cf. e.g.

[5]) et accéder par fenêtrage temporel au champ diffracté, ce qui permet ensuite d'identifier l'opérateur de diffraction par les murs.

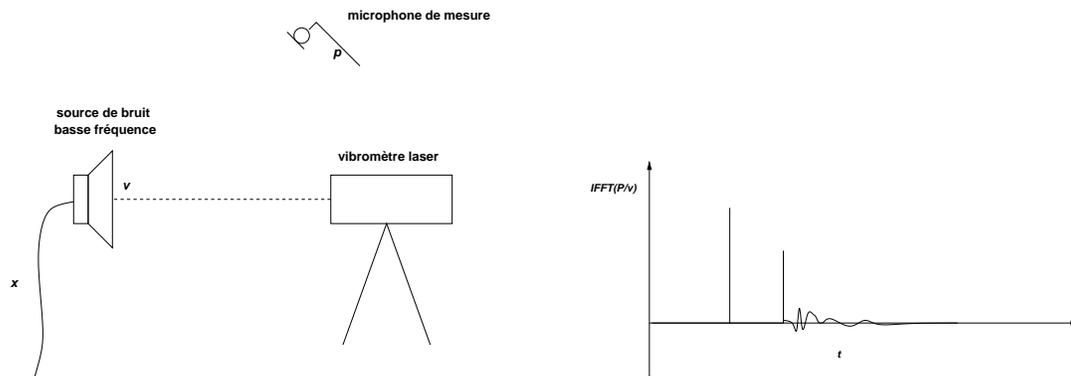


FIG. 7 – Séparation par fenêtrage temporel des pressions directe et diffractée pour une source étalon

5 Conclusion

On a présenté ici une stratégie de contrôle du champ diffracté et des simulations de chambre sourde qui suggèrent que l'atténuation active des réflexions en paroi est faisable dans la bande 10-80 Hz avec un nombre raisonnable de transducteurs usuels. La mise en œuvre en vraie grandeur du contrôle en chambre sourde demande toutefois l'insertion des sources basse-fréquence dans les murs, ce qui en pratique ne pourra être fait qu'à la construction d'une nouvelle chambre ; les travaux sur le contrôle du champ diffracté (notamment sur sa robustesse) se poursuivent au LMA dans l'attente d'une telle éventualité.

Références

- [1] P.A. Nelson and S.J. Elliott. *Active Control of Sound*. Academic Press, 1992.
- [2] E. Friot and C. Bordier. Contrôle actif en temps-réel du champ diffracté par une cible. In *Congrès Français d'Acoustique 2002*, Lille, 8-11 avril 2002. sur CD-ROM.
- [3] E. Friot and C. Bordier. Real-time active suppression of scattered acoustic radiation. *Journal of Sound and Vibration*, 278(3):563–580, 2004.
- [4] S.J. Elliott. *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, 2001.
- [5] S. Müller and P. Massarani. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6):443–471, June 2001.