



HAL
open science

Contrôle actif aux basses fréquences du champ diffracté en salle semi-anéchoïque

Cédric Pinhède

► **To cite this version:**

Cédric Pinhède. Contrôle actif aux basses fréquences du champ diffracté en salle semi-anéchoïque. Sciences de l'ingénieur [physics]. Aix-Marseille Université (AMU), 2019. Français. NNT : 2019AIXM0301 . tel-02332012

HAL Id: tel-02332012

<https://hal.science/tel-02332012v1>

Submitted on 24 Oct 2019

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.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ED 353 – Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et
Nanoélectronique

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique - CNRS - UMR 7031

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de

Docteur d'Aix-Marseille Université

Discipline : Sciences pour l'ingénieur
Spécialité : Acoustique

Cédric PINHÈDE

Contrôle actif aux basses fréquences du champ diffracté en salle semi-anéchoïque

Soutenue le 04/09/2019 devant le jury composé de :

Marie-Annick GALLAND	École Centrale Lyon	Rapporteur
Manuel MELON	Le Mans université	Rapporteur
Hervé LISSEK	École Polytechnique Fédérale de Lausanne	Examineur
Philippe HERZOG	ARTEAC-LAB et CNRS-LMA	Examineur
Emmanuel FRIOT	CNRS-LMA	Examineur
Dominique HABAUT	CNRS-LMA	Directrice de thèse

Résumé

Cette étude porte sur le développement et la validation expérimentale d'une méthode d'anechoïcité acoustique active permettant de reproduire, dans un espace clos, des conditions de champ libre, c'est-à-dire sans réflexions provenant des parois. L'utilisation d'une salle anéchoïque est une solution classique mais elle est insuffisante aux basses fréquences, en particulier, au-dessous de la fréquence de coupure de la salle qui est directement liée à l'épaisseur de matériau absorbant tapissant les parois. Pour combiner techniques de réduction passives et actives, l'objectif de ce travail de thèse consiste à compléter l'atténuation du champ diffracté par les parois dans cette gamme de fréquences à l'aide de techniques actives. Une difficulté spécifique à ce problème de contrôle actif concerne la mesure du champ diffracté qui n'est pas une grandeur physique directement accessible. Dans ces travaux, une stratégie d'estimation de la pression diffractée est élaborée à partir de mesures de pressions totales. Les techniques de contrôle acoustique actif sont ensuite utilisées pour piloter un réseau d'actionneurs afin de minimiser le champ diffracté estimé. La méthode d'anechoïcité active développée consiste à identifier dans une étape de pré-calibration l'opérateur mathématique permettant de relier la pression diffractée aux pressions totales. Cet opérateur est identifié par minimisation à partir de mesures de pressions obtenues pour un ensemble de sources connues. A l'étape du contrôle actif, l'opérateur est alors utilisé comme un filtre numérique à appliquer aux mesures de pressions totales. L'ensemble de la méthode est testée à l'aide de simulations numériques puis validée expérimentalement dans le cas d'une salle semi-anechoïque. Pour cette première expérience à l'échelle 1, l'objectif consiste à contrôler, dans la gamme de fréquences 40-200 Hz, le champ diffracté par la paroi réfléchissante à l'aide de 9 sources secondaires réparties sur la paroi. La pression diffractée est estimée à partir de mesures de pressions totales obtenues à l'aide d'un filet de 16 microphones situé dans un plan parallèle à la paroi réfléchissante et/ou d'un ensemble de 8 microphones situés dans le volume. Plusieurs stratégies de contrôle sont appliquées et évaluées pour caractériser le rayonnement acoustique d'une source basse fréquence.

Abstract

This study is dedicated to the development and experimental validation of an active acoustic anechoic method to reproduce, in an enclosed space, free field conditions, that is without reflections from the walls. The use of an anechoic room is a classical solution but it is not sufficient at low frequencies, in particular, below the cutoff frequency of the room which is directly related to the thickness of the absorbent material on the walls. In order to combine passive and active noise reduction techniques, the goal of this thesis is to control the field scattered by the walls in this frequency range using active techniques. A specific difficulty with this active control problem concerns the measurement of the diffracted field which is not a directly accessible physical quantity. In this work, a strategy for estimating the diffracted pressure is developed from total pressure measurements. Active control techniques are then used to drive an array of actuators to minimize the estimated diffracted field. The active anechoic method used here consists in identifying in an precalibration step the mathematical operator which relates the diffracted pressure to the total pressures. This operator is identified by minimizing the difference between exact and estimated diffracted pressure obtained for a set of known sources. At the active control stage, the operator is then used as a filter to be applied on the total pressure measurements. The whole method is tested on numerical simulations and a full-scale experiment conducted in a semi-anechoic room. For this first experiment, the goal is to control the field diffracted by the reflecting wall with 9 secondary sources in the frequency range 40-200 Hz. The sources are situated on the reflecting wall. The diffracted pressure is first estimated from measurements of total pressures obtained with a net of 16 microphones located in a plane parallel to the reflecting wall and/or a set of 8 microphones situated in the volume. Several control strategies are applied and evaluated to characterize the acoustic radiation of a low frequency source.

Remerciements

Je souhaite adresser toute ma gratitude à ma directrice de thèse, Dominique Habault, pour son accompagnement rigoureux et ses précieux conseils qui m'ont permis d'acquérir les connaissances et les compétences scientifiques nécessaires au bon déroulement de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier Philippe Herzog et Emmanuel Friot, pour les nombreuses discussions scientifiques dans lesquelles j'ai pu m'enrichir de leurs compétences. Grâce à leurs conseils et leurs constants encouragements, j'ai pu mener à bien toute la partie expérimentale du travail.

Je remercie les membres du jury d'avoir examiné ce travail. Les rapporteurs, Marie-Annick Galland et Manuel Melon, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture critique de ce document et Hervé Lissek pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je souhaite aussi remercier les directeurs successifs du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Frédéric Lebon et Dominique Eyheramendy, de m'avoir autorisé à porter la double casquette ingénieur-doctorant. Je remercie également les membres de l'équipe Sons qui m'ont incité et encouragé à réaliser ce projet de thèse. Je remercie profondément Muriel Winninger et Marc Pachebat de m'avoir soulagé de certaines missions. J'exprime toute ma reconnaissance à Sergio Bellizzi dont le soutien quotidien, autant du point de vue scientifique que du point de vue humain, a été décisif.

Je tiens enfin à remercier ma famille qui m'a encouragé et soutenu tout au long de cette thèse, mes amis pour leurs appuis et leurs aides ainsi que ma compagne, Anne, pour sa présence et son soutien.

Table des matières

Résumé	i
Introduction	1
1 Des stratégies pour émuler des conditions de mesure en champ libre	5
1.1 Utilisation de matériaux absorbants passifs	6
1.2 Post-traitement des mesures	8
1.3 Contrôle actif local : absorption et contrôle de l'impédance de surface	10
1.3.1 Absorption active	10
1.3.2 Contrôle de l'impédance acoustique de surface	10
1.3.3 Optimisation de l'absorption	12
1.4 Vers le contrôle actif du champ diffracté par les parois d'une salle anéchoïque	12
1.4.1 Anéchoïcité vs. Absorption	12
1.4.2 Stratégies de contrôle du champ diffracté	13
1.4.3 Séparation préalable des champs incidents et diffractés	14
1.4.4 Le projet de salle anéchoïque active	14
2 Principe de l'anéchoïcité active	17
2.1 Introduction	18
2.2 Présentation de la méthode - cas de la salle anéchoïque	19
2.2.1 Opérateur de diffraction	19
2.2.1.1 Estimation de la pression diffractée	21
2.2.1.2 Contrôle actif de la pression diffractée estimée	22
2.2.2 Contrôle en plusieurs points dans le volume Ω	23
2.2.3 Contrôle sur la surface Γ	25
2.3 Contrôle en salle semi-anéchoïque	26
2.3.1 Positions des sources et microphones	26
2.3.2 Positions de la source d'identification	28
2.4 Représentation des résultats	29
3 Simulation numérique d'un contrôle dans le volume Ω	31
3.1 Introduction	32
3.2 Estimation de la pression diffractée	33
3.2.1 Configuration \mathcal{A}	33
3.2.2 Configuration \mathcal{B}	35

3.2.3	Synthèse de l'identification du filtre de diffraction	39
3.3	Contrôle de la pression diffractée estimée	40
3.3.1	Configuration \mathcal{A}	40
3.3.2	Configuration \mathcal{B}	43
3.3.3	Synthèse du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}	44
3.4	Conclusions	47
4	Simulation numérique d'un contrôle sur la surface Γ	49
4.1	Estimation de la pression diffractée	50
4.1.1	Configuration \mathcal{A}	50
4.1.2	Configuration \mathcal{B}	52
4.1.3	Synthèse sur l'identification du filtre de diffraction	54
4.2	Contrôle de la pression diffractée estimée	55
4.2.1	Configuration \mathcal{A}	55
4.2.2	Configuration \mathcal{B}	60
4.2.3	Efficacité du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}	61
4.3	Synthèse du contrôle dans le volume Ω et en surface Γ	63
5	Descriptif de l'expérience d'anéchoïcité active	67
5.1	Introduction	68
5.2	La source de référence \tilde{S}	68
5.2.1	Estimation de la directivité	70
5.2.2	Vérification de l'estimation	72
5.3	Caractéristique de la salle semi-anéchoïque	74
5.4	Le dispositif de contrôle actif	77
5.4.1	Sources secondaires	78
5.4.2	Les microphones	79
5.4.3	Le système d'acquisition	80
5.5	Méthode	80
5.5.1	Identification du filtre de diffraction	81
5.5.2	Contrôle de la diffraction	81
6	Expérimentation en salle semi-anéchoïque	83
6.1	Mesures de contrôle dans le volume Ω	84
6.1.1	Estimation de la pression diffractée	84
6.1.1.1	Exemples d'estimation de la pression diffractée	84
6.1.1.2	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée	86
6.1.1.3	Bilan de l'identification du filtre de diffraction D	86
6.1.2	Contrôle de la pression diffractée en un point	87
6.1.2.1	Régularisation du contrôle	87
6.1.2.2	Contrôle au point M_1^Ω	88
6.1.2.3	Contrôle au point M_4^Ω	90
6.1.2.4	Contrôle au point M_7^Ω	91
6.1.2.5	Bilan du contrôle de la pression diffractée en un point	93
6.1.3	Contrôle simultané aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω	93

6.1.3.1	Régularisation du contrôle	93
6.1.3.2	Contrôle de la pression diffractée	94
6.1.4	Contrôle simultané sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω	96
6.1.4.1	Régularisation du contrôle	97
6.1.4.2	Contrôle de la pression diffractée	97
6.1.5	Bilan du contrôle dans le volume Ω	99
6.2	Mesures du contrôle sur la surface Γ	99
6.2.1	Estimation de la pression diffractée	100
6.2.2	Régularisation du contrôle	102
6.2.3	Contrôle aux positions \mathbb{M}^Γ	102
6.2.4	Bilan du contrôle sur la surface Γ	105
7	Post-traitement des mesures	107
7.1	Prise en compte de la directivité de la source \tilde{S}	108
7.1.1	Pression incidente dans la salle semi-anéchoïque	109
7.1.2	Contrôle dans le volume Ω	112
7.1.2.1	Estimation de la pression diffractée	112
7.1.2.2	Contrôle de la pression diffractée	113
7.1.3	Contrôle sur la surface Γ	115
7.1.3.1	Estimation de la pression diffractée	116
7.1.3.2	Contrôle aux positions \mathbb{M}^Γ	117
7.1.4	Conclusion	120
7.2	Vérification du contrôle en des points du volume Ω	122
7.2.1	Contrôle dans le volume Ω	123
7.2.2	Contrôle sur la surface Γ	126
7.2.3	Influence du paramètre de régularisation sur le contrôle dans Ω	130
7.2.4	Conclusion	132
	Conclusion	133
	Table des figures	137
	Liste des Symboles	141
	Bibliographie	149
	Annexes	151
	A Existence de l'opérateur de diffraction	153
	B Source de référence \tilde{S}	157
	B.1 Réalisation de la source \tilde{S}	158
	B.2 Calcul de la pression incidente à partir du débit	158
	C Caractérisation de la source \tilde{S} en salle anéchoïque	161
	D Mesures de niveaux sonores en salle semi-anéchoïque	167

E	Complément sur le dispositif expérimental	171
E.1	Le système d'acquisition/restitution	172
E.1.1	Signaux pour l'identification du filtre D	172
E.1.2	Signaux pour le contrôle	173
E.1.3	Étalonnage des entrées et sorties	174
E.2	Positions de la source à caractériser en S_0	176
E.3	Positions de source d'identification	176
E.4	Sources secondaires	178
E.5	Les microphones	179
F	Complément de résultats de contrôle	181
F.1	Contrôle de la pression diffractée estimée dans le volume Ω	182
F.2	Contrôle de la pression diffractée sur la surface Γ	183
F.2.1	Amplitude la source $0,824V_{rms}$	183
F.2.2	Amplitude la source $8,24V_{rms}$	183

Introduction

Le principal objectif de notre travail est la réalisation d'une campagne expérimentale, menée en salle semi-anéchoïque, afin de tester une technique de contrôle actif du champ diffracté par les parois d'une salle. Il s'agit d'une première étape réalisée en vraie grandeur qui fait suite à une expérience menée à l'intérieur d'une maquette. L'application finale visée est l'application du contrôle actif en salle anéchoïque pour traiter les échos dus aux parois en basses fréquences (notamment au-dessous de la fréquence de coupure de la salle).

En ce qui concerne le rayonnement de bruit, on constate en effet, depuis quelques années, un intérêt fortement croissant pour les basses fréquences audibles. Cet intérêt est dû entre autres à l'utilisation de structures légères qui entraîne une augmentation des problèmes de nuisances sonores, à la fois en terme de normes et de moyens de protection. Un autre exemple est celui de la caractérisation d'un haut-parleur à ces fréquences qui reste un problème ouvert, même si divers types de solutions ont été étudiés. Les équipements de mesures existants sont peu adaptés à la caractérisation de sources en dessous de 100 Hz. Pour que les matériaux absorbants soient efficaces à ces fréquences, il faut augmenter de façon importante leur épaisseur ce qui n'est pas possible pour des raisons tout aussi bien techniques qu'économiques. Aux fréquences basses, il est aussi bien connu que les salles anéchoïques présentent des défauts tels que l'apparition de modes de résonance parasites. Cependant, malgré les alternatives proposées, voire commercialisées, la majorité des normes recommandent l'utilisation d'une salle anéchoïque pour effectuer des mesures de réponses acoustiques.

Parmi les alternatives à l'utilisation de matériaux absorbants de forte épaisseur, le contrôle actif est une technique séduisante puisque son domaine d'efficacité (basses fréquences) complète celui des matériaux conventionnels. L'étude du contrôle actif classique pour la réduction des échos dus à une paroi date de plusieurs dizaines d'années. Les premières applications concernaient notamment l'acoustique sous-marine et le domaine audio ; c'est un sujet toujours d'actualité avec le développement de nouvelles technologies et des applications très diverses.

Le contrôle actif de bruit étant plutôt efficace aux basses fréquences, des techniques d'absorption « hybrides » ont été étudiées, combinant matériaux absorbants (pour les moyennes et hautes fréquences) et transducteurs pilotés pour contrôler le champ sonore aux basses fréquences. Ces systèmes ont fait l'objet de nombreuses recherches avec des variantes sur le choix des matériaux passifs, les capteurs et les stratégies de contrôle.

La plupart de ces études traite de propagation d'ondes planes dans un guide, sous incidence normale. Cependant, le coefficient d'absorption estimé dans cette configuration n'est pas un bon

indicateur pour caractériser l'absorption réellement obtenue dans une salle. De plus, même si nous pensons a priori que des matériaux absorbants « parfaits » pourraient apporter une totale anéchoïcité, il n'y a pas de relation directe entre la réalisation d'une condition d'absorption locale et l'anéchoïcité. Des résultats obtenus en pilotant des cellules hybrides à partir d'un critère d'erreur local ou global ont montré que l'absorption maximale obtenue pour un critère local ne permet pas une réelle condition d'anéchoïcité.

Ces constats ont motivé les travaux réalisés au LMA pour traiter le contrôle actif de la pression diffractée par les murs d'un volume 3D, en prenant en compte une condition aux limites non locale. Le problème traité ici fait suite aux travaux menés pour le contrôle d'un champ diffracté par un objet en espace libre. Dans le cas d'une salle anéchoïque, il s'agit, à l'aide d'un ensemble de microphones situés en périphérie et de sources secondaires placées derrière les dièdres absorbants, de contrôler le champ diffracté dans la salle. L'actuelle salle anéchoïque du LMA (site Château-Gombert) a été conçue et réalisée pour permettre la réalisation expérimentale de ce projet. Il était cependant nécessaire de tester auparavant la méthode et son dispositif dans une configuration simplifiée mais en vraie grandeur. C'est la raison pour laquelle la salle semi-anéchoïque du LMA, disponible sur l'ancien site (Campus Joseph-Aiguier) a été retenue ; le traitement est appliqué à la paroi réfléchissante de la salle.

Le principe innovant de la solution proposée dans ce manuscrit repose sur le contrôle actif du champ diffracté par les parois de la salle. La difficulté spécifique est ici que la mesure du champ diffracté n'est pas une grandeur physique directement accessible. Une stratégie d'estimation de la pression diffractée est donc élaborée à partir de mesures de pressions totales. L'opérateur mathématique permettant de relier les pressions totales à la pression diffractée est considéré comme une matrice de filtres à appliquer aux mesures. Cette matrice de filtres est identifiée dans une étape de pré-calibration à l'aide d'un ensemble de sources et microphones d'identification. Les sources secondaires sont ensuite utilisées pour générer le contre-bruit afin d'annuler la pression diffractée estimée.

Dans ce manuscrit, la méthode est présentée puis appliquée numériquement et expérimentalement au cas particulier d'une salle semi-anéchoïque de taille réelle. L'exemple choisi, schématisé sur la figure 1, est celui de la caractérisation d'une source S à partir de mesures de pression au point M . L'objectif est de contrôler le champ diffracté par la paroi rigide afin de mesurer uniquement la pression incidente émise par la source.

Le chapitre 1 présente un état de l'art des méthodes développées pour simuler des conditions de mesure en champ libre dans un espace clos. Ces méthodes incluent l'utilisation de matériaux absorbants, le post-traitement de mesures et le contrôle actif local et global. Nous revenons en particulier sur les concepts d'absorption active et d'anéchoïcité active.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation de la méthode de contrôle actif de la pression diffractée dans une salle anéchoïque puis semi-anéchoïque. Le développement théorique qui permet de relier la pression diffractée en un point du volume aux pressions totales mesurées sur une surface entourant ce volume est basé sur l'écriture de représentations intégrales de la pression et

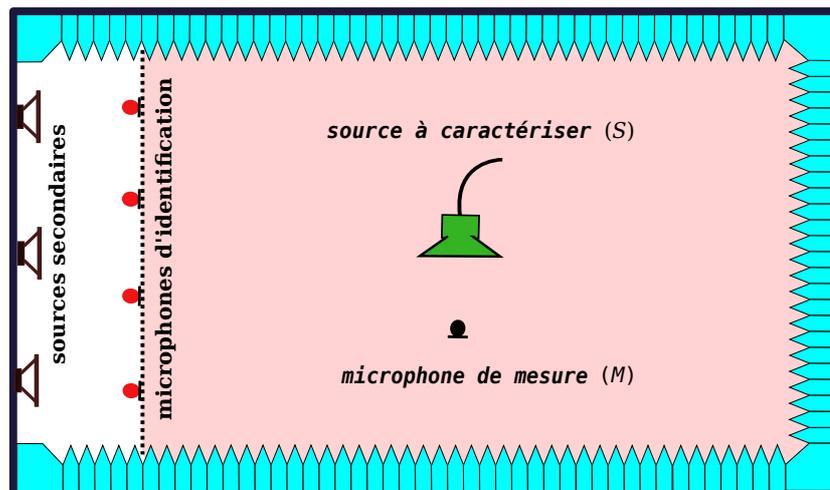


FIGURE 1 – Schéma de principe du contrôle de la paroi rigide d'une salle semi-anéchoïque

l'utilisation d'un opérateur de diffraction. Le contrôle est alors effectué en deux étapes : l'étape d'identification de cet opérateur, également appelé filtre de diffraction, puis l'étape de contrôle de la pression diffractée estimée à partir de cet opérateur. Bien que le développement théorique repose sur des conditions de parois absorbantes (salle anéchoïque), l'expérience que nous avons réalisée a eu lieu en salle semi-anéchoïque pour des raisons expliquées en détail dans ce chapitre. Deux types de contrôles ont été étudiés, dans le volume puis sur une surface parallèle à la paroi réfléchissante.

Les chapitres 3 et 4 présentent un ensemble de simulations menées pour préparer la campagne expérimentale en salle semi-anéchoïque. Elles avaient pour objet de tester plusieurs configurations (répartitions des sources et microphones) pour les deux étapes d'identification et de contrôle.

Le chapitre 5 décrit le dispositif expérimental mis en oeuvre pour contrôler le champ diffracté par la paroi rigide de la salle semi-anéchoïque. La première étape a consisté à réaliser une source, appelée source de référence, caractérisée par un rayonnement en basses fréquences, le plus omnidirectionnel possible. Cette source a été utilisée en premier lieu dans l'étape d'identification de la pression diffractée. Des mesures de niveaux en salle anéchoïque puis semi-anéchoïque ont permis de caractériser au mieux le comportement de la source et de la salle.

Le chapitre 6 présente les résultats des mesures réalisées pour diverses stratégies de contrôle. Pour compléter ces résultats nous présentons au chapitre 7 un ensemble de simulations numériques effectués après la campagne expérimentale. Deux points sont en particulier étudiés : la prise en compte de la directivité de la source de référence et l'étendue de l'efficacité du contrôle aux points qui ne sont pas des points de minimisation.

Chapitre 1

Des stratégies pour émuler des conditions de mesure en champ libre

Sommaire

1.1	Utilisation de matériaux absorbants passifs	6
1.2	Post-traitement des mesures	8
1.3	Contrôle actif local : absorption et contrôle de l'impédance de surface . .	10
1.3.1	Absorption active	10
1.3.2	Contrôle de l'impédance acoustique de surface	10
1.3.3	Optimisation de l'absorption	12
1.4	Vers le contrôle actif du champ diffracté par les parois d'une salle anéchoïque	12
1.4.1	Anéchoïcité vs. Absorption	12
1.4.2	Stratégies de contrôle du champ diffracté	13
1.4.3	Séparation préalable des champs incidents et diffractés	14
1.4.4	Le projet de salle anéchoïque active	14

Mesurer le bruit rayonné par une source acoustique répond à de nombreux besoins scientifiques ou industriels : identifier les mécanismes locaux à l'origine du bruit, modéliser le rayonnement de la source ou en recalculer un modèle... Cela peut aussi répondre à une obligation légale dans le cas par exemple d'un appareil électro-ménager mis sur le marché. Cependant, le champ acoustique rayonné par une source dépend de son environnement ; des conditions expérimentales de « champ libre », où l'on ne mesurerait que le champ directement émis par une source en s'affranchissant de toute réflexion/diffraction autour, ne sont pas faciles à garantir.

Mesurer le champ acoustique autour d'une source en extérieur, à grande distance du sol et en air calme est envisageable [1] mais peu pratique au quotidien. C'est pourquoi nous mesurons le plus souvent le bruit rayonné par des sources dans des espaces clos tapissés tout ou partie de matériaux absorbants. Plusieurs normes réglementent les caractéristiques et les protocoles de mesure dans ces salles (semi-)anéchoïques.

Cependant, l'épaisseur de matériau absorbant requise en paroi de la salle anéchoïque augmente avec la longueur d'onde des sons à absorber. Pour des fréquences décroissantes à partir de 100 Hz, les conditions de champ libre s'y avèrent de moins en moins possibles à garantir [2]. Par ailleurs, les enjeux sociétaux de réduction du bruit, notamment en milieu urbain, font croître l'intérêt pour la caractérisation des sources acoustiques basse fréquence. C'est pourquoi, en complément de l'utilisation de matériaux absorbants, des méthodes de traitement des mesures ou de contrôle acoustique actif ont été récemment proposées pour émuler des conditions de champ libre lors de mesures acoustiques autour de sources basse fréquence.

Nous présentons dans ce chapitre un panorama de dispositifs et de procédés pour réduire l'influence des parois d'une salle sur le champ acoustique et notamment pour essayer de reproduire à basse fréquence des conditions de champ libre autour d'une source à caractériser.

1.1 Utilisation de matériaux absorbants passifs

Le procédé standard pour émuler dans un espace clos des conditions de champ libre autour d'une source acoustique consiste à tapisser les parois d'une salle vide de matériaux acoustiquement absorbants. Les matériaux utilisés sont généralement des matériaux poreux comme les mousses à cellules ouvertes, les fibreux [3] ou certains végétaux [4, 5]. L'absorption acoustique provient principalement des frottements visqueux du fluide sur la partie solide du matériau poreux mais aussi des échanges thermiques entre le fluide et la paroi [6].

La figure 1.1 montre une salle dite « anéchoïque » où des dièdres de matériaux absorbants sont disposés devant toutes les parois de la salle. Les sources acoustiques à mesurer sont placées au centre de la salle. Les normes [7, 8] réglementent les propriétés que doivent satisfaire les salles anéchoïques et les méthodes de mesure à y utiliser pour satisfaire aux obligations de la « métrologie légale ». Cependant, la situation devient paradoxale pour la qualification d'une salle anéchoïque qui doit être réalisée à partir d'une source de référence qui elle-même doit être caractérisée dans une salle anéchoïque. La préconisation des normes à ce sujet indique seulement de caractériser la source de référence dans une salle anéchoïque différente de celle à qualifier.

L'absorption par les dièdres de matériaux poreux en paroi de salle anéchoïque diminue rapidement quand leur épaisseur devient petite par rapport aux longueurs du champ acoustique. La figure 1.2 représente le coefficient d'absorption des dièdres mesuré en incidence normale dans un tube de Kundt. Le dimensionnement des dièdres absorbants est fait en présupposant une

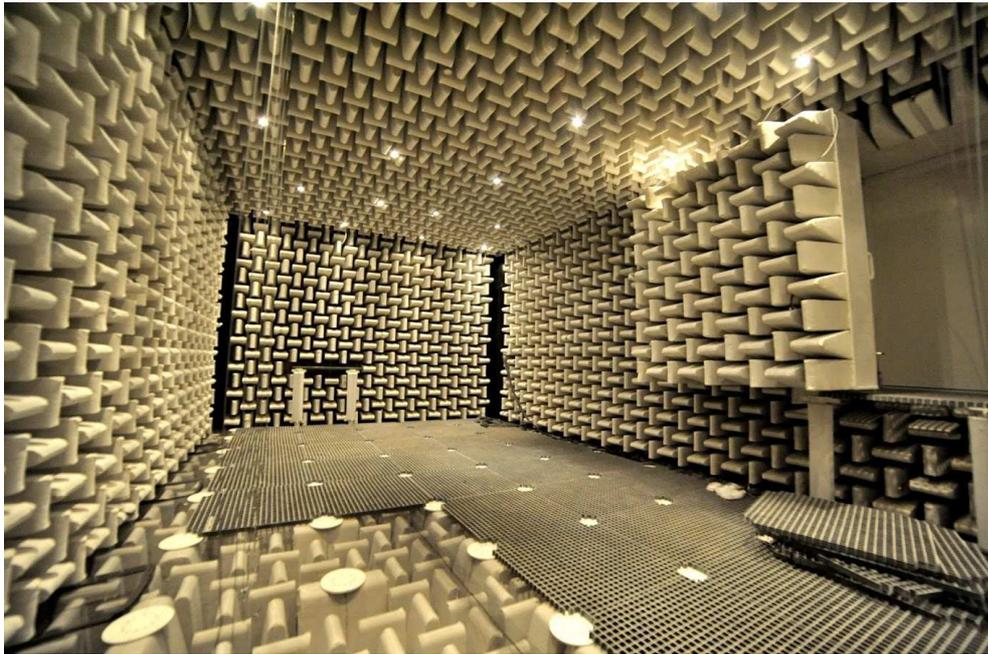


FIGURE 1.1 – Salle anéchoïque du LMA (site Château Gombert)

fréquence minimale au dessus de laquelle les mesures seront acceptables, appelée « fréquence de coupure ». Les mesures aux basses fréquences nécessitent des épaisseurs importantes de revêtement, ce qui pose des problèmes de réalisation [2] et réduit considérablement le volume utile de la salle. De fait peu de salles sont donc conçues pour des mesures aux très basses fréquences (typiquement en-dessous de 100 Hz). De plus, à ces fréquences la qualification de la salle avec une source de référence devient un problème complexe.

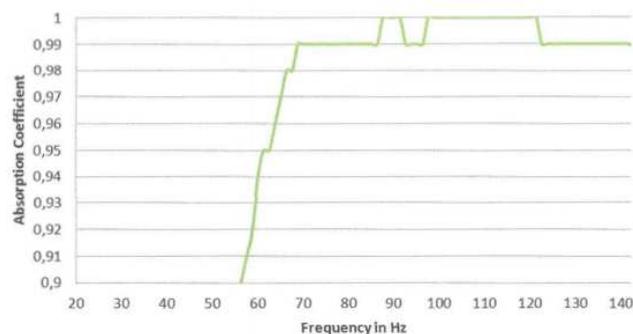


FIGURE 1.2 – Coefficient d'absorption des dièdres tapissant la salle anéchoïque du LMA

Des structures parfois perfectionnées associant plusieurs matériaux ou non ont également été conçues pour l'absorption acoustiques. Nous pouvons citer les plaques micro-perforées [9], des réseaux de tubes creux [10], des métamatériaux [11], des microstructures [12]. Généralement ces matériaux agissent dans une bande de fréquences précise et limitée mais ils peuvent être combinés pour élargir la plage d'absorption, par exemples en couplant des micro-perforées et fibreux [13]. L'absorption par ces structures est souvent optimale pour des ondes sous incidence normale et des travaux sont également menés pour en améliorer les performances sous incidence

oblique, par exemple en arrangeant un matériau poreux en lamelles [14]. Toutes ces structures absorbantes passives ne sont toutefois en général pas efficaces aux très basses fréquences. Une exception notable est constituée par les absorbeurs non linéaires étudiés depuis une quinzaine d'années [15]. Plusieurs expériences ont démontré l'efficacité de ces absorbeurs sur des ondes acoustiques basse fréquence [16, 17, 18] mais pour des bruits de fort niveau.

1.2 Post-traitement des mesures

L'expérience quotidienne suggère que, dans le cas de signaux acoustiques brefs, nous pouvons simplement séparer par fenêtrage temporel le champ acoustique direct des échos. Effectivement, en acoustique ultra-sonore nous pouvons parfois nous affranchir ainsi des parois d'une cuve de mesures mais, pour des sources acoustiques basse fréquence, les phénomènes générateurs du bruit ont des temps caractéristiques plus longs que les temps de vol des échos. Par exemple, la période de résonance d'un haut-parleur, monté sur une enceinte, dont la fréquence de coupure est 20 Hz fait que la réponse impulsionnelle de l'ensemble vers un microphone sera plus longue que le trajet des échos sur les parois d'une salle anéchoïque usuelle. Il ne sera pas possible de distinguer dans les réponses mesurées ce qui est dû à la source et ce qui est dû aux parois.

Il est en revanche théoriquement possible, à partir de mesures de la pression et de la vitesse acoustiques sur une surface entourant une source acoustique, de séparer à posteriori les champs entrant et sortant de cette surface. De cette façon, nous pouvons isoler le champ direct produit par une source. Pour mettre en œuvre cette technique dite de « déconfinement » [19, 20] il est possible, dans le cas d'une source acoustique stationnaire, de réaliser les acquisitions de vitesse et de pression par un balayage automatique. La figure 1.3 montre un tel dispositif.

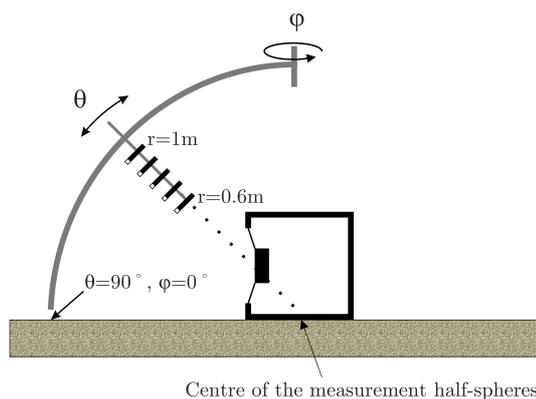


FIGURE 1.3 – Schéma de principe de la technique de déconfinement [19]

La source acoustique à mesurer est au centre de la demi sphère de mesure. Les capteurs à utiliser peuvent être une sonde intensimétrique intégrée ou une antenne de microphones appariés. Dans le cas d'une source instationnaire, il sera nécessaire de mailler la surface avec un grand nombre de capteurs, ce qui rend la technique coûteuse et moins séduisante dans la mesure où le positionnement des capteurs et l'étalonnage des capteurs requièrent une grande précision pour

un déconfinement correct. De plus, la forme et la taille de la source peuvent obliger à adapter le maillage de capteurs ou la structure de balayage. Afin de minimiser le nombre de points de mesure requis à une fréquence donnée, différentes méthodes de séparation de champs peuvent être envisagées pour le déconfinement, notamment en intégrant des informations préalables sur le champ acoustique [21].

Les réflexions acoustiques sur les parois perturbent les mesures effectuées autour d'une source acoustique. Elles perturbent aussi les techniques de reproduction sonore d'environnements virtuels à l'aide d'enceintes acoustiques telles que la synthèse de champ par Wave Field Synthesis (WFS) [22, 23] schématisée en figure 1.4 ; une source pré-enregistrée est reproduite dans un environnement virtuel donné à partir d'un réseau d'enceintes.

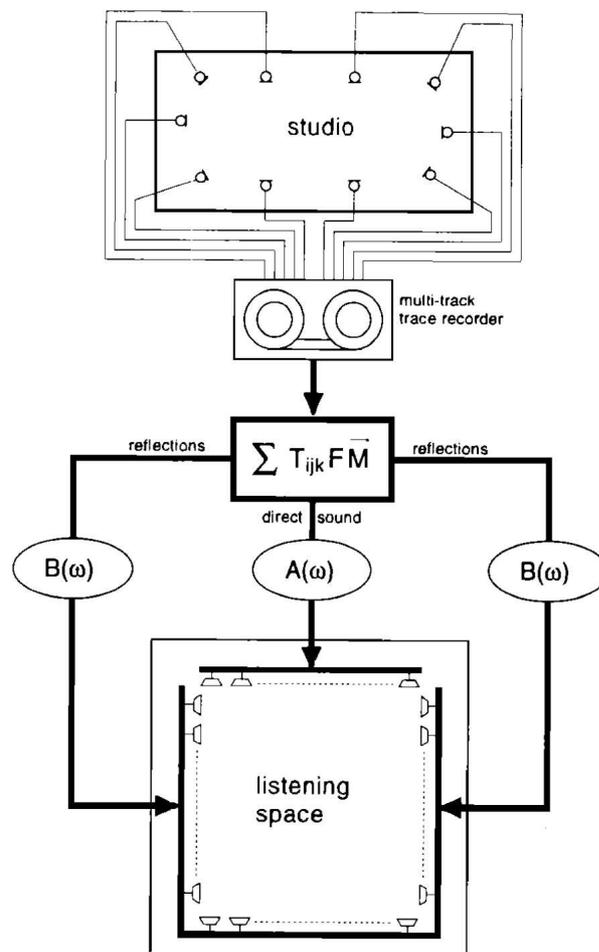


FIGURE 1.4 – Schéma de principe de reproduction sonore avec contrôle des réflexions [23]

De récentes études ont permis d'améliorer ces reproductions sonores en compensant les réflexions des parois par un traitement spécifique des signaux [24, 25].

D'autres techniques de reproduction sonore sont actuellement utilisées afin de créer des zones d'écoute individuelles et personnalisées [26, 27] là encore en s'affranchissant autant que possible des caractéristiques acoustiques du local.

1.3 Contrôle actif local : absorption et contrôle de l'impédance de surface

Nous parlons de « contrôle actif du bruit » lorsque des actionneurs (des haut-parleurs le plus souvent) sont pilotés pour réduire une pression acoustique dite primaire dans tout ou partie de l'espace. Dès 1936, Lueg [28] propose d'utiliser une source acoustique secondaire afin de générer un « anti-bruit » susceptible de réduire le bruit produit par une source primaire, notamment en réglant l'amplitude et la phase d'un haut-parleur disposé dans un conduit. Dans les années 1980, les évolutions de l'électronique et de l'informatique autorisent un filtrage ou un traitement adaptatif en temps réel de signaux acoustiques qui permettent la mise en œuvre du contrôle actif dans un nombre croissant de problèmes de réduction du bruit, Nelson et Elliott [29]. Aujourd'hui, le contrôle acoustique actif est présent dans des produits « grand public » tels que le casque audio actif.

1.3.1 Absorption active

En 1953, Olson et May [30] décrivent un cas particulier de dispositif acoustique actif, celui d'un « absorbeur de son » autonome permettant dans son principe de réduire le son autour d'un microphone placé à proximité du haut-parleur. Dans les années 1980 sont présentées plusieurs mises en œuvre d'un tel dispositif [31, 32]. En disposant plusieurs absorbeurs devant une surface réfléchissante nous pourrions, en principe, réduire sa contribution au champ acoustique mais les limites intrinsèques à ces dispositifs d'absorption n'ont semble-t-il pas donné lieu à leur utilisation pour la réduction spécifique de réflexions acoustiques. Cependant, des recherches sur l'absorption active à partir d'un matériau hybride composé d'une mousse absorbante recouverte d'un film en polyfluorure de vinylidène (PVDF) utilisé comme actionneur sont récemment développées [33, 34].

1.3.2 Contrôle de l'impédance acoustique de surface

L'impédance acoustique de surface est une variable de contrôle particulièrement intéressante à considérer si nous souhaitons réduire les réflexions acoustiques sur une surface [35, 36]. En effet, une onde plane en incidence normale sur une surface plane ne donnera lieu à aucune réflexion si l'impédance de surface Z , définie par $Z = \frac{p}{v_n}$ où p et v_n sont les pression et vitesse normale acoustiques sur la surface, vaut $Z = \rho c$ où ρc est l'impédance caractéristique du milieu de propagation devant la surface [37].

Plutôt que de chercher à minimiser la pression totale sur un microphone, un contrôle acoustique actif peut viser à contrôler l'impédance acoustique à la surface d'un actionneur : garantir $Z = \rho c$ sur l'actionneur permettra par exemple de ne pas y réfléchir les ondes planes sous incidence normale. Au cours des années 1990, des dispositifs variés ont été utilisés pour mettre en œuvre cette stratégie d'« Impedance Matching Technique » [38, 39, 40, 41]. La figure 1.5 montre le schéma de principe d'un dispositif de contrôle actif d'impédance.

Le dispositif de contrôle d'impédance peut aussi être complété avec des matériaux absorbants placés en amont de l'absorbeur actif [42, 43, 44, 45, 46]. La complémentarité passif/actif permet alors d'élargir la bande de fréquence sur laquelle les réflexions sont absorbées.

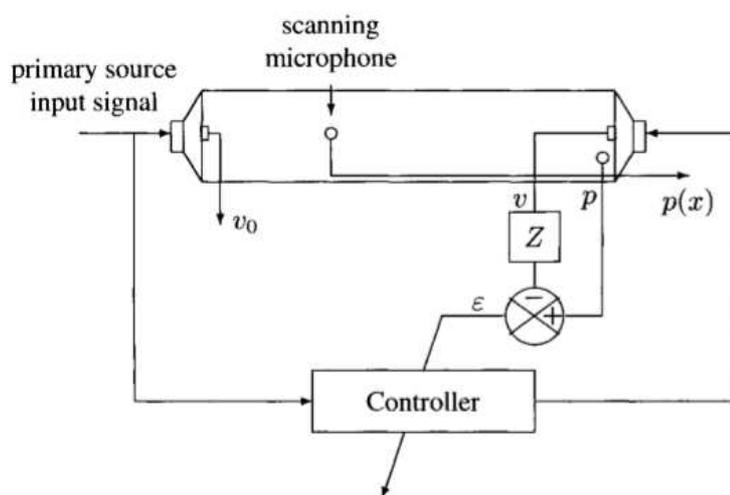


FIGURE 1.5 – Schéma de principe d'un dispositif de contrôle actif d'impédance [37]

Dans des travaux récents, le matériau absorbant a été substitué par une membrane visco-élastique [47], ou encore une plaque micro-perforée [48].

Par ailleurs, le fait que les haut-parleurs soient des structures ayant largement donné lieu à optimisation et le souci de réaliser des dispositifs de contrôle actif « compacts » ont conduit, pour le contrôle local de l'impédance acoustique, à la conception et l'étude de cellules électroacoustiques actives telles que celle présentée en figure 1.6.

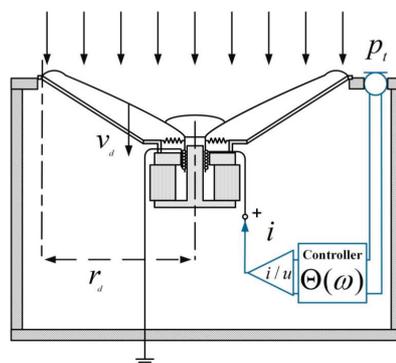


FIGURE 1.6 – Schéma de principe d'un résonateur électroacoustique actif [49]

Ces cellules sont composées de l'électronique de contrôle et de transducteurs. Le contrôle électrique de la membrane de l'actionneur, à partir de la pression et du débit acoustiques mesurés au niveau de la membrane, permet de régler l'impédance acoustique de la cellule électroacoustique [50, 51, 52]. L'intégration d'un résonateur à l'intérieur de la cellule [53] ou l'ajout d'un évent [54] ont aussi été étudiées. L'assemblage de cellules électroacoustiques permet de créer une « métasurface » pilotable comme panneau de haut-parleurs [55]. Nous pouvons aussi en recouvrir les parois d'une salle pour en changer les propriétés acoustiques [49].

1.3.3 Optimisation de l'absorption

Dans le cas d'une onde incidente plane, l'adaptation d'impédance $Z = \rho c$ garantit l'absence de réflexion acoustique sur une surface. Dans le cas d'une unique onde plane d'angle d'incidence θ par rapport à la surface, l'impédance $Z = \rho c \cdot \cos(\theta)$ garantira également l'absence de réflexion. Dans le cas d'un champ acoustique incident plus complexe, comme celui produit par une source dans un espace clos, le contrôle de l'impédance en tout point de la surface peut réduire les réflexions en paroi mais le calcul de l'impédance permettant de les minimiser d'une façon optimale n'est pas du tout trivial [56, 32]. En pratique, en espace clos un tel calcul nécessite un modèle numérique précis du rayonnement de la source. Dans le cas d'une source dont nous souhaitons mesurer le rayonnement en salle anéchoïque ce modèle n'est précisément pas disponible. De plus, les dispositifs de contrôle acoustique actifs les plus efficaces reposent sur des mesures in situ et un traitement adaptatif des signaux plutôt que sur des modèles et des calculs complexes en boucle ouverte. L'impédance de surface n'est donc peut-être pas la variable de contrôle la plus adaptée en pratique pour atténuer fortement les réflexions à basse-fréquence en paroi de salle anéchoïque. Assurer une impédance en paroi sous-optimale pour l'absorption (par exemple l'impédance uniforme $Z = \rho c$) permettrait certainement d'y réduire les réflexions mais nous ne connaissons pas de mise en œuvre d'un tel contrôle à l'échelle d'une salle anéchoïque.

Pour mémoire, un formalisme modal peut être utilisé en liaison avec le contrôle afin de réduire des réflexions acoustiques en paroi avec des actionneurs tels que celui de la figure 1.6. Dans les salles aux parois peu absorbantes, le champ acoustique peut être décrit sous la forme d'une somme de modes dont les résonances, bien séparées à très basse fréquence, sont associées à des ondes stationnaires résultant de réflexions multiples en paroi. Ces résonances peuvent être atténuées via un contrôle local [57, 58, 59]. Ces dernières années, cette stratégie a été appliquée à des salles ordinaires en disposant des cellules électrodynamiques à des emplacements judicieux [60, 61] suggérés par l'analyse modale du champ acoustique.

1.4 Vers le contrôle actif du champ diffracté par les parois d'une salle anéchoïque

1.4.1 Anéchoïcité vs. Absorption

Très tôt des chercheurs ont imaginé utiliser le contrôle actif pour améliorer la discrétion acoustique d'un sous-marin visé par un sonar actif, par exemple Nelson et Elliott [29] au chapitre 9.10. Il s'avère qu'annuler le champ acoustique diffracté par un objet dans un milieu fluide ne peut être obtenu en maximisant l'absorption acoustique à la surface de l'objet : pour utiliser une analogie lumineuse, rendre un objet noir ne le rend pas transparent.

Par ailleurs, pour simuler la transparence, et tromper par exemple une imagerie sonar en transmission, une face de l'objet à rendre invisible doit renvoyer un champ fonction de celui incident sur les autres faces. L'annulation du champ diffracté par un objet ne peut donc être obtenue par le pilotage local d'une grandeur acoustique à la surface de l'objet à partir de mesures au même endroit ; un traitement global de l'information sur toute la surface de l'objet est requis. On notera qu'il en est de même si l'impédance de surface est choisie comme variable intermé-

diare de contrôle, déterminer une distribution optimale de l'impédance à laquelle assigner la surface d'un objet comme évoqué au paragraphe 1.3.3 est un problème d'optimisation global dans les cas non triviaux. Rendre par contrôle actif une surface acoustiquement transparente est donc un problème global qui ne se résume pas à maximiser localement un champ acoustique incident.

1.4.2 Stratégies de contrôle du champ diffracté

Plusieurs études ont été récemment consacrées à la mise en œuvre du contrôle actif du champ diffracté par un objet donné [62, 63, 64, 65, 66]. Dans [67], la méthode de séparation de champ (FSM) évoquée au paragraphe 1.2 est utilisée pour distinguer les ondes incidentes et réfléchies puis les contrôler séparément à l'aide d'un réseau de source de contrôle autour de la source. Dans le cas particulier à une dimension, une simple mesure de pression peut suffire [68]. La figure 1.7 schématise la stratégie générique de contrôle conçue et développée au LMA qui sera présentée plus en détail au chapitre suivant.

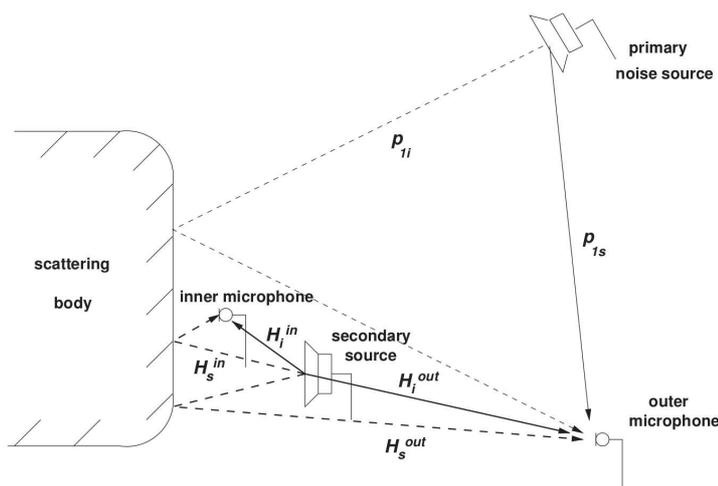


FIGURE 1.7 – Schéma de principe du contrôle actif du champ diffracté [62]

Cette stratégie s'appuie sur le fait qu'un même opérateur linéaire relie le champ acoustique total autour d'un objet au champ acoustique diffracté par un objet quel que soit le champ acoustique incident. Si cet « opérateur de diffraction » peut être identifié à partir de mesures préalables pour un champ incident connu, alors il pourra être utilisé pour calculer le champ acoustique diffracté dans le cas d'un champ incident totalement inconnu. Les algorithmes éprouvés du contrôle acoustique actif pourront ensuite être utilisés pour piloter un réseau d'actionneurs afin de minimiser ce champ acoustique diffracté comme s'il s'agissait d'un champ acoustique total « ordinaire » capté par des microphones. Les limites habituelles de ces algorithmes de contrôle acoustique actif seront transposées au cas du champ diffracté. La fréquence maximale où ce contrôle sera efficace dépendra notamment du nombre d'actionneurs et de capteurs et de leur espacement [69, 70].

1.4.3 Séparation préalable des champs incidents et diffractés

La stratégie de contrôle présentée ci-dessus suppose d'identifier, via une phase de mesures préliminaires, l'« opérateur de diffraction » reliant le champ acoustique total au champ diffracté. Une des premières expériences de contrôle du champ diffracté réalisée au LMA visait à minimiser le champ diffracté par un parallélépipède [62]. Pour identifier l'opérateur de diffraction associé à ce parallélépipède, le champ acoustique a pu être mesuré, sur un ensemble de microphones et en utilisant plusieurs sources acoustiques, avec et sans l'objet. Si nous souhaitons minimiser le champ acoustique diffracté, autour d'une source inconnue, par les murs d'une salle anéchoïque, il ne sera pas possible en revanche d'en faire disparaître les murs dans une phase préalable.

Deux autres procédés ont donc été utilisés au LMA pour identifier l'opérateur de diffraction au coeur de la stratégie de contrôle du champ diffracté. Dans sa thèse [71], Alexandre Gintz a utilisé une source dipolaire : le rayonnement direct d'un dipôle est nul dans le plan passant par son centre et perpendiculaire à l'axe du dipôle. En l'absence d'autres sources acoustiques, toute pression acoustique mesurée dans ce plan correspond à du champ diffracté et non à du champ direct. Il s'est toutefois avéré que le rayonnement très particulier d'un dipôle et les imperfections de sa réalisation pratique n'en faisait pas une source bien adaptée au problème d'identification de l'opérateur de diffraction pour la mise en œuvre du contrôle actif du champ diffracté dans le cas d'une source quelconque.

Pour les travaux présentés dans ce mémoire a été utilisée une « source de référence » au rayonnement presque monopolaire à basse fréquence et dont le débit acoustique instantané est mesuré avec une bonne précision. Le champ acoustique direct rayonné par cette source présentée plus en détail au paragraphe 5.2 est donc, dans une certaine mesure, bien connu.

1.4.4 Le projet de salle anéchoïque active

Une salle anéchoïque est l'installation couramment utilisée pour mesurer le rayonnement d'une source acoustique mais l'épaisseur de matériaux absorbant théoriquement requise fait qu'en pratique les conditions de champs libre n'y sont pas reproduites à basse fréquence ; en général au dessous de 100 Hz, au mieux en dessous de 50 Hz pour les plus grandes salles.

Par ailleurs, une stratégie générique de contrôle actif du champ diffracté a été développée au LMA. Cette stratégie, qui associe identification d'un « opérateur de diffraction » à partir de mesures préalables et algorithmes usuels de contrôle, tels que l'algorithme adaptatif Filtered-Reference Least Mean Square (FxLMS), fonctionne comme pour du contrôle de champ total 3D en deçà d'une fréquence liée à la position et à la densité du maillage de transducteurs. Le concept de « salle anéchoïque active » imaginé au LMA consiste à équiper une salle anéchoïque de microphones devant les dièdres en parois et de sources acoustiques derrière pour minimiser, à l'aide de la stratégie de contrôle du champ diffracté, les réflexions sur les murs de la salle aux fréquences inférieurs à 100 Hz.

La figure 1.8 montre une maquette d'une telle salle anéchoïque réalisée au LMA notamment pour tester les méthodes d'identification de l'opérateur de diffraction qui constitue la phase la plus critique de la méthode ; la moins habituelle dans une mise en œuvre du contrôle actif.

Plusieurs expériences de contrôle ont été conduites dans cette maquette [72, 73, 74, 71] en

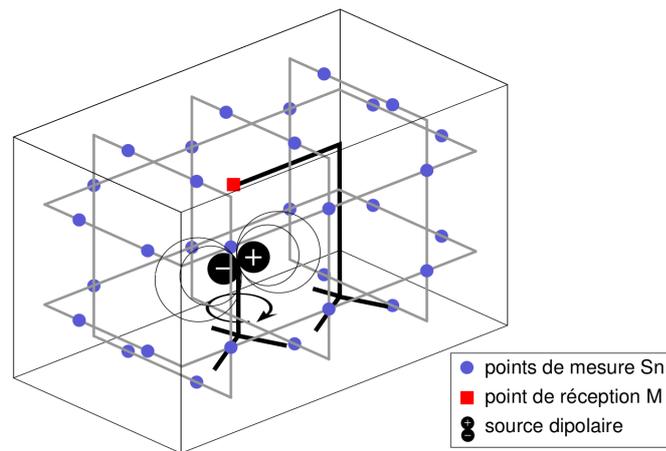


FIGURE 1.8 – Schéma pour l'identification du filtre de diffraction dans une maquette [71]

utilisant notamment une source dipolaire et le fait qu'en dehors de fréquences singulières la pression acoustique à l'intérieur d'un volume donné ne dépend que de la pression sur la surface de délimitation [75] (et pas du gradient de pression, BPC [76], BSC [77]).

Chapitre 2

Principe de l'anéchoïcité active

Sommaire

2.1	Introduction	18
2.2	Présentation de la méthode - cas de la salle anéchoïque	19
2.2.1	Opérateur de diffraction	19
2.2.2	Contrôle en plusieurs points dans le volume Ω	23
2.2.3	Contrôle sur la surface Γ	25
2.3	Contrôle en salle semi-anéchoïque	26
2.3.1	Positions des sources et microphones	26
2.3.2	Positions de la source d'identification	28
2.4	Représentation des résultats	29

Notre objectif est de traiter par contrôle actif les échos dus aux parois en contrôlant la pression diffractée. La stratégie de contrôle se base sur les travaux d'E.Friot et al, voir les paragraphes précédents 1.4.3 et 1.4.4. Le cas choisi initialement est celui d'une source S à caractériser en basses fréquences à partir de mesures en salle anéchoïque.

2.1 Introduction

En pratique, une salle anéchoïque présente des défauts dus aux réflexions sur les parois absorbantes, au minimum au-dessous de sa fréquence de coupure théorique, généralement pour quelques fréquences plus élevées qui peuvent produire des phénomènes de modes dans la salle [2]. Pour contrôler la pression diffractée par les parois, la méthode décrite ici utilise un ensemble de sources secondaires placées sur les murs, derrière les dièdres, et un réseau de microphones de minimisation dans la salle où l'on choisit d'annuler la pression diffractée.

Cependant, la mesure de pression diffractée n'est pas accessible directement ; c'est pourquoi nous choisissons de faire précéder le contrôle par une étape d'identification ou estimation de la pression diffractée. Cette étape est réalisée à partir de mesures de pression totale sur un réseau de microphones entourant la source à caractériser et les points de minimisation.

Le développement théorique de la méthode est décrit au paragraphe 2.2 pour le cas de la salle anéchoïque. Il faut souligner que la pression diffractée pourrait être évaluée à partir d'une technique utilisant des doublets microphoniques en chaque point du réseau entourant la source, comme dans [20] par exemple ; c'est une technique que nous avons cherché à éviter ici car elle nécessite un étalonnage très précis des microphones.

L'étape d'identification est ensuite traitée de plusieurs façons. La première, directement déduite du développement théorique, consiste à utiliser l'ensemble des microphones de minimisation situés dans le volume entourant la source pour obtenir la pression diffractée. La deuxième, dont la supériorité n'a pas été démontrée a priori, consiste à utiliser les microphones d'identification situés sur la surface enveloppant le volume de mesure. Ce dernier cas, si sa pertinence est vérifiée, présente plusieurs avantages : une plus grande proximité avec les parois sources d'échos et un nombre de microphones plus restreint (aucun microphone dans le volume) c'est-à-dire entre autres plus de place pour disposer les sources d'identification. Ces deux configurations sont présentées aux paragraphes 2.2.2 et 2.2.3.

Le paragraphe 2.3 présente les configurations retenues pour les simulations numériques et l'expérience. Bien que notre étude théorique concerne une salle anéchoïque, notre choix s'est porté sur une expérience en salle semi-anéchoïque.

Plusieurs raisons ont présidé à ce choix. Une première raison est qu'elle est devenue disponible pendant la période de déménagement du laboratoire, pouvant ainsi être dédiée à notre montage expérimental pendant plusieurs mois ; mais avec une date impérative de départ, qui a limité certaines des vérifications envisagées.

Une deuxième raison est sa configuration géométrique, assez particulière : sa seule paroi rigide est une de ses petites parois, verticale car destinée à des mesures de transparence. Ainsi, la surface à traiter par le dispositif de contrôle était limitée.

Une troisième raison est que le traitement acoustique des autres faces était bien connu, et

raisonnablement performant. Une des contreparties de cette configuration était la présence d'un caillebotis métallique fixe, dont le comportement acoustique était connu pour limiter l'anéchoïcité de la face inférieure.

Ce choix présente également les avantages suivants :

- les échos dus au mur parfaitement réfléchissant sont plus forts que ceux d'un mur absorbant ce qui rend plus facile la démonstration de l'efficacité du contrôle ;
- les exemples traités dans cette configuration peuvent être comparés à l'exemple numérique très simple d'un mur infini caractérisé par une condition de Neumann homogène ; ce qui doit permettre de mieux mettre en évidence l'influence des cinq parois absorbantes.

D'un point de vue contrôle actif, cette configuration nous a donc paru pertinente et riche en information. Il faut cependant noter que dans ce cas les hypothèses utilisées dans la démonstration ne sont plus vérifiées : tous les murs ne sont pas absorbants et le réseau de microphones n'est plus une surface fermée à l'intérieur de la salle. La démonstration théorique de l'existence de l'opérateur de diffraction n'est donc plus valable pour ce cas.

La salle retenue a donc été la salle semi-anéchoïque sur l'ancien site du laboratoire. En conséquence, même si de nombreux tests numériques ont été préalablement effectués dans le cas d'une salle anéchoïque nous ne présentons dans ce manuscrit que les simulations numériques correspondant à l'expérience réalisée.

Le contrôle s'effectue en deux étapes : identification de la pression diffractée puis son contrôle. L'erreur finale entre la pression incidente ciblée et la pression totale obtenue avec le contrôle peut donc être influencée par les erreurs d'estimation de la pression diffractée et celles commises sur le contrôle de cette pression.

2.2 Présentation de la méthode - cas de la salle anéchoïque

La figure 2.1 illustre l'exemple d'une source S que l'on souhaite caractériser à l'aide de mesures obtenues en un point M dans une salle anéchoïque. Le but est donc de minimiser la pression diffractée au point M afin de mesurer uniquement la pression incidente.

La méthode de contrôle actif de la pression diffractée se décompose en deux étapes. L'étape d'identification de la pression diffractée est réalisée avec un réseau de N^Γ microphones placés aux points $\mathbb{M}^\Gamma = \{M_j^\Gamma, j = 1, \dots, N^\Gamma\}$, sur la surface Γ enveloppant le volume Ω . Le dispositif de contrôle s'appuie sur un ensemble de N^C sources secondaires placées en paroi, aux points $\mathbb{S}^C = \{S_l^C, l = 1, \dots, N^C\}$. Les commandes d'anti-bruit à envoyer aux sources secondaires seront calculées à partir des fonctions de transfert mesurées entre les sources secondaires et le point M .

2.2.1 Opérateur de diffraction

L'estimation de la pression diffractée est basée sur un développement théorique présenté brièvement dans ce paragraphe. La démonstration est exposée dans [78] et en annexe A.

La démarche consiste à obtenir une relation entre la pression diffractée en un point M situé à l'intérieur du volume Ω et un ensemble de pressions totales mesurées aux points \mathbb{M}^Γ situés sur la surface Γ entourant Ω .

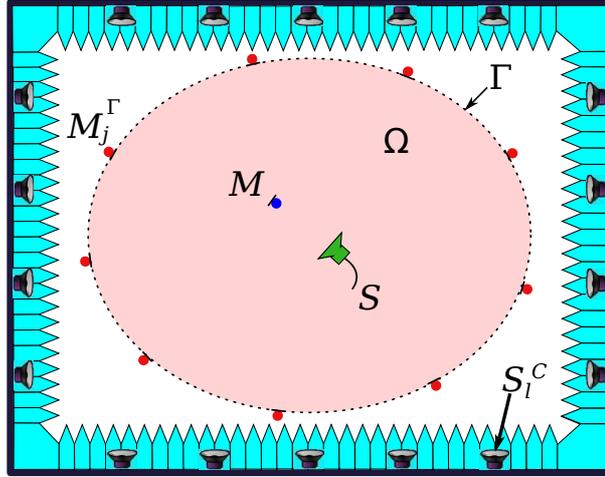


FIGURE 2.1 – Représentation d'une salle anéchoïque active

La démonstration est présentée pour une source S générant un signal sinusoïdal de fréquence angulaire ω dont le comportement temporel est modélisé par $\exp(i\omega t)$. Le vecteur unitaire \vec{n} normal à la surface Γ est orienté vers l'extérieur du volume Ω . Pour toute source S située dans le volume Ω et caractérisée par une force volumique $f(S)$, la formule de Green permet à une fréquence donnée, d'exprimer la pression totale notée $p_{tot}(S, M)$ par :

$$p_{tot}(S, M) = \int_{\Omega} G(S, M') f(M') d\Omega(M') + \int_{\Gamma} \left(p_{tot}(S, P) \frac{\partial G(M, P)}{\partial \vec{n}} - G(M, P) \frac{\partial p_{tot}(S, P)}{\partial \vec{n}} \right) d\Gamma(P) \quad (2.1)$$

où G est la fonction de Green, solution de l'équation d'Helmholtz en espace infini complétée par des conditions de Sommerfeld à l'infini. Elle s'écrit pour tout couple de points M et P :

$$G(M, P) = -\frac{\exp(-ikR(M, P))}{4\pi R(M, P)} \quad (2.2)$$

où k est le nombre d'onde et $R(M, P)$ est la distance entre les points M et P .

La formule de Green permet d'exprimer la pression totale au point M comme la somme de deux termes. Le premier terme représente la pression incidente correspondant à la pression générée par la source S en espace libre. Le second terme représente la pression diffractée correspondant aux ondes réfléchies par la surface Γ .

La démonstration présentée dans [78] montre qu'il existe un opérateur, noté D , permettant de relier la pression diffractée au point M à la pression totale sur la surface Γ par :

$$p_{dif}(S, M) = \int_{\Gamma} p_{tot}(S, P) D(M, P) d\Gamma(P) \quad (2.3)$$

Cette formule est démontrée pour toute source S et tout point M situés dans le volume Ω . De plus, l'opérateur est indépendant de la force volumique de la source S . Dans la suite du

manuscrit, l'opérateur D est appelé opérateur ou, dans sa version discrétisée, filtre de diffraction.

L'étape d'identification est basée sur la discrétisation de cette formulation. Elle est tout d'abord décrite pour le cas d'un seul point M de minimisation.

2.2.1.1 Estimation de la pression diffractée

Par la discrétisation de l'équation 2.3, il est possible d'écrire une relation entre la pression diffractée en M et l'ensemble des pressions mesurées aux points \mathbb{M}^Γ :

$$p_{dif}(S, M) = \sum_{j=1}^{N^\Gamma} p_{tot}(S, M_j^\Gamma) D(M, M_j^\Gamma) \quad (2.4)$$

Cette relation est utilisée pour identifier les termes $D(M, M_j^\Gamma)$ pour $j = 1, \dots, N^\Gamma$ définissant le filtre de diffraction au point M . Le filtre D étant indépendant de la source S , il peut être obtenu à l'aide d'un ensemble de N^D sources S_k^D situées dans Ω en minimisant l'expression :

$$\sum_{k=1}^{N^D} \left| p_{dif}(S_k^D, M) - \sum_{j=1}^{N^\Gamma} p_{tot}(S_k^D, M_j^\Gamma) D(M, M_j^\Gamma) \right|^2 \quad (2.5)$$

Dans cette expression, les données sont les pressions $p_{tot}(S_k^D, M_j^\Gamma)$ mesurées sur la surface Γ et la pression $p_{dif}(S_k^D, M)$ au point M . Cette dernière n'est pas mesurable directement mais, pour une source de référence dont le rayonnement est parfaitement connu, elle peut être obtenue comme la différence entre pression totale mesurée et pression incidente connue :

$$p_{dif}(S, M) = p_{tot}(S, M) - p_{inc}(S, M)$$

La démarche consiste alors à utiliser une source acoustique calibrée (appelée source d'identification) dont le rayonnement acoustique est bien caractérisé et à effectuer des mesures de pression totale au point M pour toutes les positions souhaitées S_k^D . Les pressions totales sont mesurées au point M pour cette source d'identification placée successivement aux N^D positions S_k^D situées dans le volume Ω , figure 2.2.

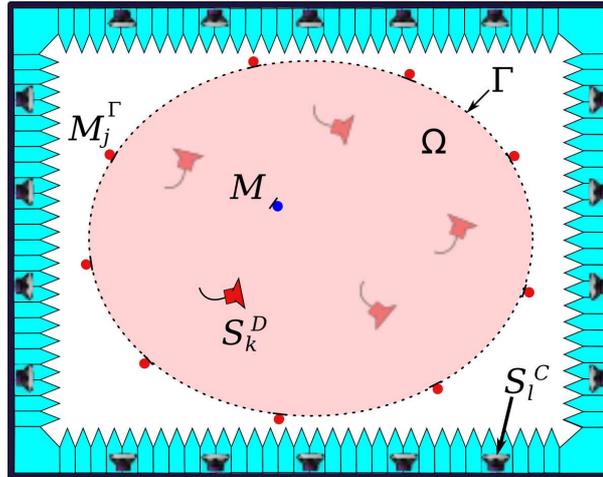
L'équation (2.5) peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\| E - \mathbf{P} D \|_2^2 \quad (2.6)$$

où $\| \cdot \|_2$ désigne la norme euclidienne. Les deux vecteurs D et E et la matrice \mathbf{P} sont donnés par :

$$\begin{aligned} D_j &= D(M, M_j^\Gamma) & j &= 1, \dots, N^\Gamma \\ E_k &= p_{dif}(S_k^D, M) & k &= 1, \dots, N^D \\ \mathbf{P}_{jk} &= p_{tot}(S_k^D, M_j^\Gamma) & j &= 1, \dots, N^\Gamma \text{ et } k = 1, \dots, N^D \end{aligned} \quad (2.7)$$

Le problème de minimisation est un problème a priori mal conditionné qui peut être régu-


 FIGURE 2.2 – Identification du filtre de diffraction D

larisé par une méthode utilisant la décomposition en valeurs singulières (SVD - [79]) telle que la méthode de Tikhonov [80]. Nous utiliserons le formalisme de cette dernière méthode dans laquelle un paramètre de régularisation λ est introduit afin de contrôler la norme de la solution D :

$$\|E - \mathbf{P} D\|_2^2 + \lambda \|D\|_2^2 \quad (2.8)$$

Il existe de nombreuses méthodes pour optimiser la valeur du paramètre de régularisation telle que la méthode de la « courbe en L » [79]. Le choix de λ est discuté, dans notre cas, au chapitre 3.

Une fois le filtre de diffraction identifié \tilde{D} , la pression diffractée en M peut être estimée pour une source quelconque S , à partir des mesures de pressions totales aux N^Γ microphones d'identification par l'expression :

$$p_{dif}(S, M) = \sum_{j=1}^{N^\Gamma} p_{tot}(S, M_j^\Gamma) \tilde{D}(M, M_j^\Gamma) \quad (2.9)$$

Afin d'identifier le filtre de diffraction au travers d'un problème mieux posé (plus d'équations que d'inconnues), le nombre N^D de positions de la source d'identification doit être au moins égal au nombre N^Γ de microphones en surface Γ .

L'estimation d'un filtre de diffraction permet alors d'appliquer une technique de contrôle de la pression diffractée au point M .

2.2.1.2 Contrôle actif de la pression diffractée estimée

Le contrôle de la pression diffractée est un problème assez classique, dès lors que la grandeur à minimiser est connue. Pour une source S , la pression diffractée en M est contrôlée en minimisant l'expression suivante :

$$\left\| p_{dif}(S, M) + \sum_{k=1}^{N^C} C(S_k^C, M) U(S_k^C) \right\|^2 \quad (2.10)$$

où les termes $C(S_k^C, M)$ représentent les fonctions de transfert entre chaque source secondaire S_k^C et le point M . Les termes $U(S_k^C)$ représentent les commandes à envoyer aux sources ; ils sont obtenus par minimisation de l'expression. La pression diffractée $p_{dif}(S, M)$ est celle estimée à l'étape précédente par l'équation (2.8).

Si l'on définit les vecteurs C et U par :

$$\begin{aligned} C_k &= C(S_k^C, M) \quad k = 1, \dots, N^C \\ U_k &= U(S_k^C) \quad k = 1, \dots, N^C \end{aligned} \quad (2.11)$$

la formulation 2.10 peut s'écrire sous forme matricielle :

$$J(U) = \left| \hat{P}^T \tilde{D} + C^T U \right|^2 + \alpha \left| U \right|^2 \quad (2.12)$$

où \hat{P} représente le vecteur des pressions totales mesurées aux microphones d'identification :

$$\hat{P}_j = p_{tot}(S, M_j^\Gamma) \quad j = 1, \dots, N^\Gamma \quad (2.13)$$

Le paramètre de régularisation α est appliqué à la norme de la solution U afin d'obtenir un problème mieux conditionné et pouvoir contraindre les amplitudes des commandes [81]. Soit \tilde{U} la solution obtenue, alors la pression obtenue avec contrôle peut s'écrire comme la somme de la pression totale émise par la source S et les pressions émises par les sources secondaires :

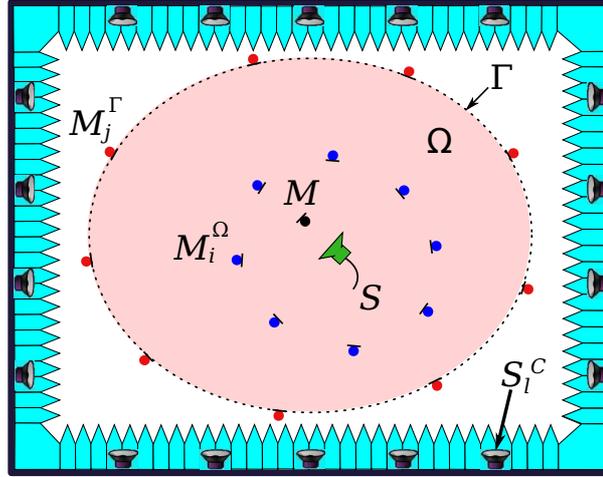
$$p^{ctl}(S, M) = p_{tot}(S, M) + C^T \tilde{U} \quad (2.14)$$

La formulation décrite jusqu'ici correspond au cas de la minimisation de la pression diffractée en un point. Les deux paragraphes suivants reprennent les équations dans le cas du contrôle en plusieurs points du volume Ω puis du contrôle sur la surface Γ . Dans ce dernier cas, on s'éloigne des hypothèses utilisées pour écrire la relation 2.5, nous y revenons plus en détail dans le paragraphe correspondant.

2.2.2 Contrôle en plusieurs points dans le volume Ω

Les résultats obtenus dans [75] montrent qu'un contrôle global du champ diffracté est réalisable en disposant autour de la source à caractériser un maillage suffisamment resserré de microphones de contrôle, espacés de moins d'une demi-longueur d'onde à la fréquence considérée ; des positions additionnelles peuvent également permettre d'éviter le problème de fréquences irrégulières éventuelles.

On note \mathbb{M}^Ω l'ensemble des N^Ω positions de microphones de minimisation, également appelés microphones de contrôle et situés dans le volume Ω (voir figure 2.3). Le contrôle de la pression diffractée est réalisé sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω . À ces positions, on ajoute le point M_0 , appelé point ou microphone test, qui n'est pas utilisé pour déterminer les commandes mais uniquement pour en vérifier l'efficacité.


 FIGURE 2.3 – Contrôle de la pression diffractée estimée en plusieurs points du volume Ω

L'identification du filtre de diffraction est réalisée indépendamment pour chaque position M_i^Ω suivant l'équation (2.8). La solution $\tilde{\mathbf{D}}$ est alors une matrice composée des vecteurs solutions $\tilde{\mathbf{D}}$ et définie par :

$$\tilde{\mathbf{D}} = \tilde{D}_{ij}(M_i^\Omega, M_j^\Gamma) \quad i = 1, \dots, N^\Omega \text{ et } j = 1, \dots, N^\Gamma \quad (2.15)$$

Par contre, la solution du problème de contrôle est calculée simultanément sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω . L'ensemble des fonctions de transfert secondaires s'écrit sous la forme d'une matrice \mathbf{C} . D'après l'équation (2.12), le contrôle de la pression diffractée estimée en plusieurs positions \mathbb{M}^Ω est réalisé en minimisant l'expression :

$$J(U) = \|\hat{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{D}} + \mathbf{C}U\|_2^2 + \alpha \|U\|_2^2 \quad (2.16)$$

avec les composantes de la matrice de transfert :

$$\mathbf{C} = C_{li}(S_l^C, M_i^\Omega) \quad l = 1, \dots, N^C \text{ et } i = 1, \dots, N^\Omega \quad (2.17)$$

La pression au point M_i^Ω obtenue avec le contrôle s'écrit :

$$p^{ctl}(S, M_i^\Omega) = p_{tot}(S, M_i^\Omega) + C_{.i}\tilde{\mathbf{U}} \quad (2.18)$$

La solution du problème de contrôle dépend du conditionnement de la matrice de transfert \mathbf{C} et donc du choix du nombre et de la position des microphones de contrôle.

Nous pouvons remarquer que, pour l'étape de contrôle, on pourrait conserver l'ensemble des microphones de minimisation utilisés pour l'identification ; si les fonctions de transfert $C_{ki}(S_k^C, M_i^\Omega)$ sont mesurées préalablement et si elles sont suffisamment stables, il est possible de supprimer tout ou partie de ces microphones lors du contrôle ; il s'agit d'une technique de microphones virtuels [82] mais qui n'est pas suivie ici car elle ne permet pas de s'assurer directement de l'efficacité du contrôle sur ces microphones.

2.2.3 Contrôle sur la surface Γ

Le contrôle décrit au paragraphe précédent en plusieurs points de Ω respecte les hypothèses mathématiques utilisées pour démontrer l'existence d'un filtre de diffraction. Cependant, pour des raisons pratiques, il est tentant de tester une autre configuration où le contrôle est réalisé sur la surface Γ c'est-à-dire lorsque les microphones d'identification sont utilisés également comme microphones de contrôle. Ce choix enfreint l'hypothèse utilisée qui impose que les microphones de contrôle doivent être situés à l'intérieur du volume Ω mais on peut penser a priori que le contrôle sera plus pertinent et plus efficace sur la surface Γ qui est plus proche des parois de la salle et donc plus sensible au champ diffracté par ses parois. Par ailleurs, cette configuration est plus simple à mettre en oeuvre, puisqu'elle nécessite un plus faible nombre de microphones au total. Elle a donc été testée expérimentalement, elle est représentée sur la figure 2.4.

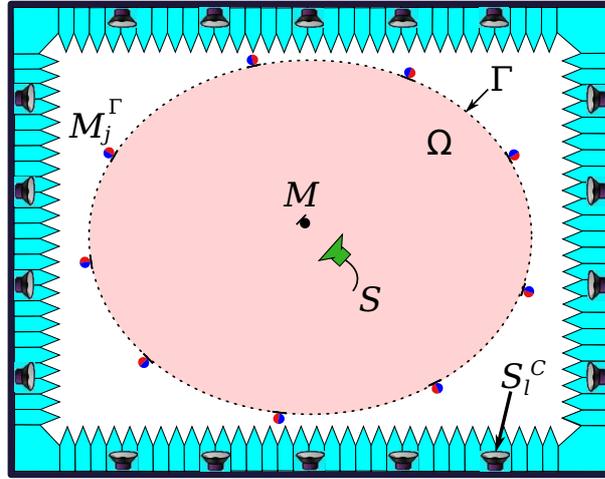


FIGURE 2.4 – Contrôle de la pression diffractée estimée sur la surface Γ

Dans ce cas, l'identification du filtre de diffraction est réalisée pour chaque point M_i^Γ à partir des mesures de pressions totales sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Γ , suivant l'équation (2.8). La solution $\tilde{\mathbf{D}}$ est la matrice définie par :

$$\tilde{\mathbf{D}} = \tilde{D}_{ij}(M_i^\Gamma, M_j^\Gamma) \quad i = 1, \dots, N^\Gamma \text{ et } j = 1, \dots, N^\Gamma \quad (2.19)$$

Le contrôle de la pression diffractée estimée sur la surface Γ consiste à minimiser l'équation 2.16 avec les composantes de la matrice de transfert secondaire C' entre les sources secondaires et les points \mathbb{M}^Γ :

$$C' = C'_{li}(S_l^C, M_i^\Gamma) \quad l = 1, \dots, N^C \text{ et } i = 1, \dots, N^\Gamma \quad (2.20)$$

La pression à la position M_i^Γ obtenue avec le contrôle s'écrit :

$$p^{ctl}(S, M_i^\Gamma) = p_{tot}(S, M_i^\Gamma) + C'_{,i} \tilde{\mathbf{U}} \quad (2.21)$$

L'effet du contrôle dans le volume Ω est obtenu en calculant la pression totale au point M_i^Ω par :

$$p^{ctl}(S, M_i^\Omega) = p_{tot}(S, M_i^\Omega) + C_i \tilde{U} \quad (2.22)$$

2.3 Contrôle en salle semi-anéchoïque

Ce paragraphe décrit la configuration expérimentale choisie comme premier test de la méthode de contrôle. La salle semi-anéchoïque est présentée à la figure 2.5 et schématisée à la figure 2.6. Les dimensions intérieures de la salle de dièdre à dièdre sont : 9,15 m pour la longueur notée X , 4,6 m pour la largeur notée Y et 4,05 m pour la hauteur notée Z . La salle comporte une paroi réfléchissante verticale en $X = 0$. Les autres parois sont revêtues de dièdres dont la profondeur est égale à 1 m. Le plénum, espace entre l'absorbant et la paroi du bâtiment, est de 0,12 m. La fréquence de coupure de la salle donnée par l'installateur est 80 Hz. C'est une configuration qui est proche du cas d'une paroi infinie réfléchissante pour lequel les simulations numériques sont simples à réaliser. Les comparaisons numériques et expérimentales pourront permettre de mettre en évidence l'effet des parois absorbantes.

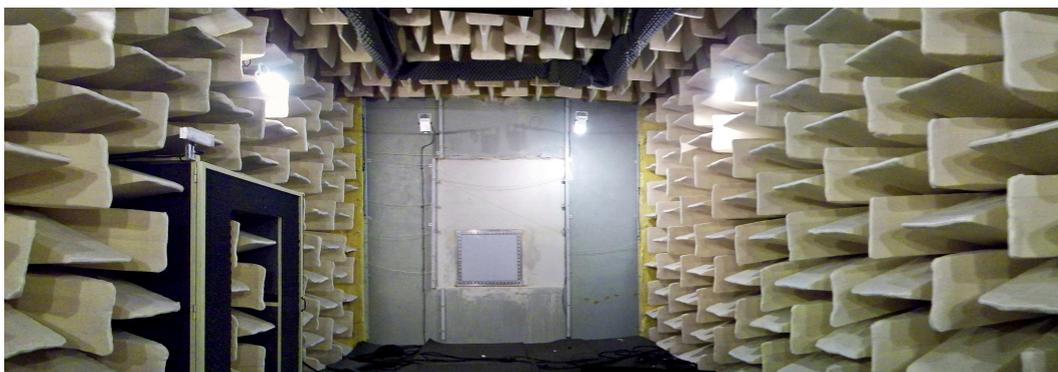


FIGURE 2.5 – La salle semi-anéchoïque du Groupe des Laboratoires de Marseille (GLM)

Cette expérience de taille réelle nécessite a priori un grand nombre de microphones et de sources. Pour rester en situation réaliste, le nombre de microphones pour la configuration de contrôle a été fixé à 8 dans le volume Ω en incluant un microphone de test et à 16 sur la surface Γ . Neuf sources secondaires ont été installées sur la paroi réfléchissante pour générer l'anti-bruit. Ces éléments sont décrits plus en détail au chapitre présentant la réalisation expérimentale.

2.3.1 Positions des sources et microphones

La figure 2.7 présente les positions des éléments du dispositif de contrôle actif dans la salle semi-anéchoïque.

Les coordonnées des points sont définies à partir de la surface formée par la pointe des dièdres. La paroi réfléchissante, définie par le plan $X = 0$, est équipée de neuf sources de contrôle représentées par des carrés verts. Elles sont réparties sur trois niveaux et numérotées du haut vers le bas. Leurs centres acoustiques sont placés à une distance de 0,15 m par rapport à la paroi réfléchissante. Celles situées en périphérie sont à une distance de 0,70 m des dièdres absorbants.

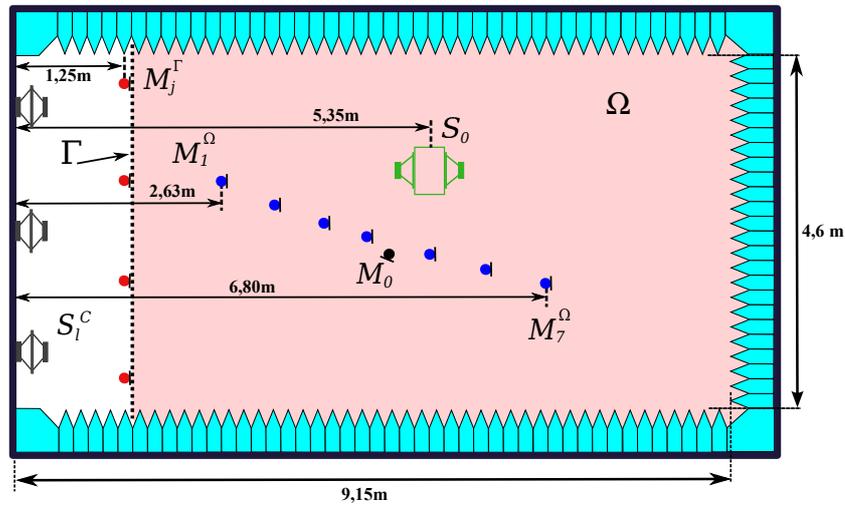


FIGURE 2.6 – Contrôle de la pression diffractée en salle semi-anéchoïque

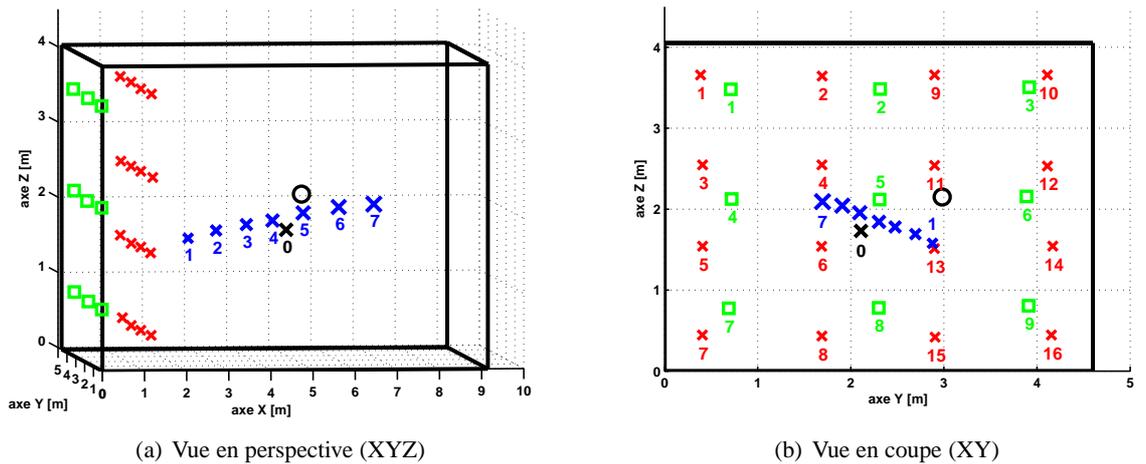


FIGURE 2.7 – Dispositif expérimental pour le contrôle actif du champ diffracté en salle semi-anéchoïque.

\circ : source à caractériser S_0 , \square : sources secondaires S^C , \times : microphones sur la paroi Γ , \times : microphones dans Ω , \times : microphone de test M_0

L'espacement entre les sources varie 1,40 m et 1,60 m. Sur la surface Γ , sont placés 16 microphones d'identification représentés par des croix rouges, à une distance de 1,25 m de la paroi réfléchissante. Ceux situés en périphérie sont à une distance de 0,40 m des dièdres. Leurs positions ont été choisies de manière qu'ils soient situés entre les sources de contrôle. L'espacement entre les lignes verticales de microphones varie entre 1,20 m et 1,30 m et entre 1 m et 1,1 m pour les lignes horizontales. L'efficacité du contrôle sur la surface Γ sera certainement impactée par ces espacements. A l'intérieur du volume Ω , sept microphones de contrôle sont représentés par des croix bleues. Ils sont disposés selon une diagonale montante dans le sens de la longueur. La hauteur du microphone M_1^Ω est de 1,60 m et celle du microphone M_7^Ω est de 2,10 m. Le microphone test M_0 est positionné hors de cette diagonale à une distance de la source identique

à celle du microphone M_4^Ω . La source à caractériser S_0 est représentée par un rond noir et située au voisinage du centre géométrique de la salle. Son centre acoustique est situé à une distance de 2,15 m des dièdres.

Les principales distances caractéristiques entre les 8 microphones du volume Ω et la paroi réfléchissante sont indiquées dans le tableau 2.1 ainsi que dans le tableau 2.2 pour les 16 microphones de la surface Γ .

Distances	M_1^Ω	M_2^Ω	M_3^Ω	M_4^Ω	M_5^Ω	M_6^Ω	M_7^Ω	M_0
Paroi réfléchissante	2,63	3,26	3,94	4,52	5,20	6,01	6,80	4,80
S_0	2,77	2,15	1,55	1,11	0,91	1,26	1,93	1,11

TABLE 2.1 – Distances (mètre) entre les positions M^Ω , la paroi réfléchissante et la source S_0

Distances	M_{1-8}^Γ	M_{9-16}^Γ	S_0
Paroi	$1,24 < d < 1,26$	$1,29 < d < 1,35$	5,35
S_0	$4,30 < d < 5,14$	$4,11 < d < 4,50$	

TABLE 2.2 – Distances (mètre) entre les positions M^Γ , la paroi réfléchissante et la source S_0

Les coordonnées de tous les éléments du dispositif expérimental ont été relevées au théodolite et sont présentées en annexe E.

2.3.2 Positions de la source d'identification

L'étape d'identification du filtre de diffraction D nécessite de mesurer le champ acoustique sur l'ensemble des points M^Γ et M^Ω , pour plusieurs positions S^D à l'intérieur du volume Ω d'une source connue.

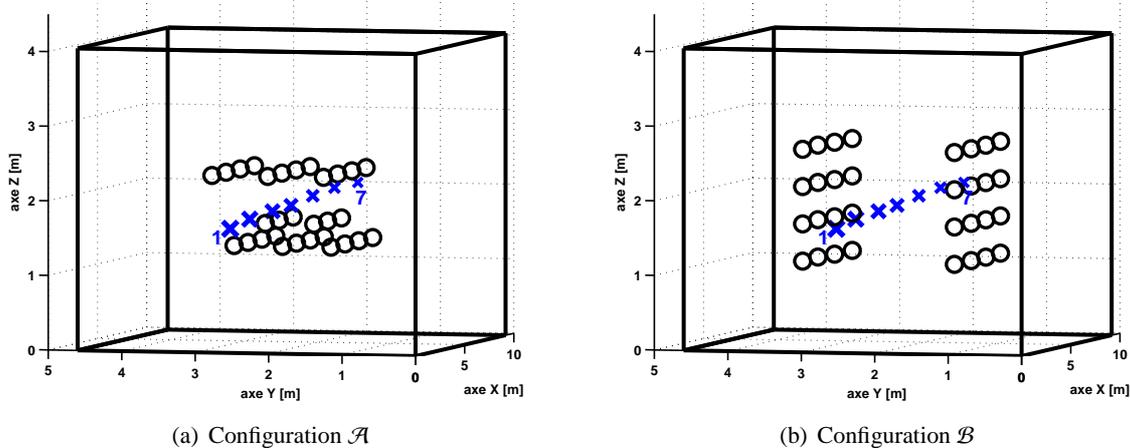


FIGURE 2.8 – Positions des sources pour identifier le filtre de diffraction D .

○ : source d'identification, × : microphones M^Ω dans le volume Ω

Pour minimiser l'expression 2.5, il est préférable d'avoir un nombre de positions de source au moins égal au nombre de microphones d'identification, afin d'obtenir un système contenant plus d'information que d'inconnues. Par ailleurs, pour éviter une redondance entre les données d'entrée, les positions de sources doivent être choisies a priori le plus aléatoirement possible ou au moins éviter trop de symétrie géométrique. Dans ce travail de thèse, nous n'avons pas effectué d'étude complète sur l'optimisation du nombre et des positions de la source d'identification ; à titre de test, deux configurations de positions de source ont été choisies.

La figure 2.8 présente ces deux configurations notées \mathcal{A} et \mathcal{B} ; les cercles indiquent les positions choisies pour le centre acoustique de la source d'identification et les croix correspondent aux microphones du volume Ω . Dans les deux cas l'enveloppe extérieure formée par les positions de sources entoure l'ensemble des 8 microphones.

La configuration \mathcal{A} a été testée en maquette [71]. Elle comprend trente positions de source réparties sur trois hauteurs, voir figure 2.8(a).

La configuration \mathcal{B} correspond à la configuration expérimentale en salle semi-anéchoïque, imposée par des considérations pratiques. Un assemblage de treillis de hauteur 0,5 m a été utilisé pour placer la source ; les contraintes de fixation du treillis sur les caillebotis par du haubanage n'ont pas permis de choisir des emplacements moins réguliers. Les 32 positions de source sont réparties régulièrement dans deux plans parallèles à la paroi réfléchissante et sont plus éloignées des microphones qu'en configuration \mathcal{A} , voir figure 2.8(b).

Soulignons que dans les deux configurations, aucune des positions de source \mathbb{S}^D n'est identique à celle de la source à caractériser S_0 .

2.4 Représentation des résultats

Nous terminons ce chapitre en détaillant les choix faits pour la représentation des résultats de simulations et mesures présentés dans la suite de ce manuscrit.

Ces résultats sont présentés sous la forme de réponses en fréquence normalisées par la pression incidente de la source. Le niveau de pression p^{norm} pour une source S au point M est déterminé par :

$$p^{norm}(S, M) = \frac{p(S, M)}{p_{inc}(S, M)} \quad (2.23)$$

Nous avons utilisé cette représentation afin d'évaluer simplement les écarts par rapport à la pression incidente. Cette représentation est inspirée de la norme ISO 3745 définie pour caractériser le comportement acoustique d'une salle anéchoïque. Dans le cas le plus simple, la pression mesurée est représentée en niveaux à partir de la formule :

$$Niv' = Niv - Niv_0 \quad (2.24)$$

où le niveau normalisé Niv' calculé à la distance R est égal à la différence entre le niveau mesuré Niv à cette distance et le niveau mesuré à une distance de référence d . Cette représentation permet de s'affranchir de l'amplitude de la source et de l'influence de la distance. Pour cette norme, les courbes de niveaux sont présentés en fonction de la distance et le niveau 0 dB correspond donc au niveau de la pression incidente décroissant en fonction de la distance selon

une loi en $1/R$.

Nous avons utilisé cette représentation bien que les courbes ici soient tracées le plus souvent en fonction de la fréquence. Les écarts par rapport au niveau 0 dB traduisent l'efficacité du contrôle lorsqu'ils sont inférieurs à la limite de $\pm 1,5$ dB fixée par la norme dans le cas d'une salle anéchoïque aux fréquences inférieures à 630 Hz.

La présentation des résultats en niveaux est complétée par des figures présentant les courbes d'erreur relative. Cette erreur relative est calculée comme la norme du rapport des pressions suivant l'équation suivante :

$$Err = \left| \frac{p_{ref} - p}{p_{ref}} \right| \quad (2.25)$$

Pour le calcul de l'erreur sur l'estimation de la pression diffractée : p_{ref} est la pression diffractée exacte dans le cas des simulation ; elle est évaluée dans le cas de l'expérience. p est l'estimation de la pression diffractée.

Pour le calcul de l'erreur sur le contrôle de la pression diffractée estimée : p_{ref} est la pression diffractée estimée et $p = C\tilde{U}$ est la pression générée par les sources secondaires.

Pour le calcul de l'erreur sur la pression incidente : p_{ref} est la pression incidente et p est la pression obtenue avec le contrôle.

Le calcul d'erreur relative permet de prendre en compte les différences de phases entre pression de référence et pressions mesurées ou calculées.

Enfin, les résultats expérimentaux de contrôle sont complétés par la présentation des valeurs prises par les amplitudes des commandes des sources secondaires en fonction de la fréquence. Ces amplitudes sont normalisées par l'amplitude du signal envoyé à la source à caractériser S_0 . Seule l'amplitude maximale et minimale des commandes sont présentées à la fréquence de contrôle ; un symbole différent est attribué à chaque source secondaire.

Deux lignes horizontales déterminées empiriquement lors de l'expérience sont tracées sur les figures. La plus haute est l'amplitude maximum qui peut être envoyée aux haut-parleurs constituant les sources secondaires ; la plus basse est l'amplitude critique au-delà de laquelle les haut-parleurs commencent à avoir un comportement non linéaire.

Chapitre 3

Simulation numérique d'un contrôle dans le volume Ω

Sommaire

3.1	Introduction	32
3.2	Estimation de la pression diffractée	33
3.2.1	Configuration \mathcal{A}	33
3.2.2	Configuration \mathcal{B}	35
3.2.3	Synthèse de l'identification du filtre de diffraction	39
3.3	Contrôle de la pression diffractée estimée	40
3.3.1	Configuration \mathcal{A}	40
3.3.2	Configuration \mathcal{B}	43
3.3.3	Synthèse du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}	44
3.4	Conclusions	47

L'objectif des chapitres 3 et 4 est de présenter un ensemble de simulations numériques de la méthode d'anéchoïcité active réalisées pour le cas d'une source à caractériser dans la salle semi-anéchoïque du LMA. Les conditions sont celles décrites à la fin du chapitre 2. Les dimensions correspondent à la taille réelle de la salle et les coordonnées des éléments du dispositif expérimental sont celles de l'expérience de contrôle actif réalisée (voir figure 2.7).

3.1 Introduction

Les configurations étudiées ont été choisies pour préparer la campagne de mesures ; l'objectif étant de caractériser une source à la position S_0 sans perturbations dues à la paroi réfléchissante. Deux cas de contrôle sont présentés : dans le premier, décrit dans ce chapitre, le contrôle est calculé par minimisation simultanée de la pression diffractée estimée aux points répartis dans le volume (M_1^Ω à M_7^Ω) ; dans le second, décrit au chapitre 4, le contrôle est obtenu par minimisation de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ de la surface Γ .

Pour chacun des deux cas, les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} choisies pour les positions des sources d'identification, et présentées au chapitre précédent, sont testées. Pour toutes les simulations, les sources d'identification et la source à caractériser sont assimilées à des sources ponctuelles omnidirectionnelles.

Le logiciel utilisé pour les simulations numériques est le logiciel *Felin*, développé en interne au LMA et basé sur la méthode des éléments finis de frontière (BEM). Il permet ici de calculer, pour une source donnée, la pression incidente et la pression diffractée émise en tout point d'un parallélépipède dont les parois sont caractérisées par des admittances.

Les parois sont maillées avec des éléments triangulaires. Chaque élément peut être caractérisé par une admittance définie comme l'inverse de l'impédance spécifique complexe réduite (i.e. divisée par la valeur de l'impédance en air). Les éléments de la paroi réfléchissante en $X = 0$ sont caractérisés par une admittance égale à $0,001 + i0,001$ afin de reproduire les conditions aux limites de type Neumann homogène. Les éléments des cinq autres parois absorbantes sont caractérisés par une admittance égale à 1. La taille des éléments est choisie de façon à avoir 6 à 10 éléments par longueur d'onde.

Les simulations sont réalisées séparément tous les 5 Hz pour des signaux sinusoïdaux purs compris entre 30 et 200 Hz. En pratique, deux maillages ont été utilisés, l'un pour la bande de fréquences 30 à 100 Hz comprenant 3480 éléments, et l'autre pour la bande de fréquence 105 à 200 Hz comprenant 5244 éléments.

Les simulations ont été réalisées sur le serveur de calcul IOTA du LMA. A titre indicatif, le temps de calcul pour une configuration est de l'ordre de 2 heures pour l'ensemble des fréquences, mais les temps de calcul ne sont évidemment pas un enjeu dans ces simulations.

Le logiciel permet de calculer les pressions en tout point ; ces pressions sont appelées « exactes » dans la suite du texte. Pour chaque configuration, nous présentons :

- pour l'étape d'identification : des comparaisons entre pression diffractée exacte et pression estimée à partir du filtre obtenu \tilde{D} ;
- pour l'étape de contrôle : des comparaisons entre pression incidente exacte et pression totale obtenue avec et sans contrôle.

Les courbes sont tracées selon les représentations définies à la fin du chapitre précédent.

Il est important de tracer à la fois des courbes d'erreurs relatives et absolues car l'objectif final est évidemment de contrôler la pression diffractée là où elle est non négligeable. Si elle est négligeable, l'erreur commise sur son estimation puis sur son contrôle n'a qu'une très faible incidence.

3.2 Estimation de la pression diffractée

L'identification du filtre de diffraction D est réalisée pour les deux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} , décrites au chapitre 2, afin d'estimer la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Ω du volume Ω .

Nous n'avons pas trouvé de méthode particulièrement adaptée pour le choix du paramètre de régularisation λ dans l'expression (2.8) à minimiser. En particulier, la méthode de la « courbe en L » [79] n'est pas efficace pour ce problème. En conséquence, nous avons testé des valeurs de λ choisies arbitrairement.

Dans la configuration \mathcal{A} , pour laquelle le problème est relativement bien posé, λ a été choisi égal à 10^{-5} pour toutes les fréquences.

Dans la configuration \mathcal{B} , deux valeurs sont utilisées 10^{-5} et $\tilde{\lambda}$. Cette dernière valeur est celle qui correspond à la meilleure estimation possible de la pression diffractée ; elle peut être déterminée simplement dans le cas des simulations puisque toutes les pressions sont connues exactement par calcul direct dans Felin. Ce ne sera évidemment pas le cas pour l'expérience réalisée en salle semi-anéchoïque.

Une fois le filtre de diffraction identifié \tilde{D} , la pression diffractée estimée est obtenue en appliquant \tilde{D} , comme indiqué dans l'équation (2.9), aux pressions totales dites exactes (i.e. calculées par Felin) des points \mathbb{M}^Γ .

3.2.1 Configuration \mathcal{A}

La configuration \mathcal{A} comprend 30 positions de la source d'identification réparties dans tout le volume Ω (voir figure 2.8(a)).

La résolution de l'équation (2.8) par la méthode de Tikhonov nécessite l'inversion de la matrice \mathbf{P} composée des pressions totales aux points \mathbb{M}^Γ , acquises pour les 30 positions de source. Comme expliqué plus haut, le paramètre λ est fixé arbitrairement, pour toutes les fréquences, à 10^{-5} .

La figure 3.1 présente les niveaux des pressions totales et diffractées exactes et les pressions diffractées estimées à l'aide du filtre \tilde{D} . Les niveaux de pressions représentent les écarts par rapport au niveau de la pression incidente.

Les résultats sont présentés en 3 points : M_1^Ω proche de la paroi réfléchissante, M_4^Ω proche de la source S_0 et M_7^Ω loin de la paroi réfléchissante. En raison de la représentation des résultats choisie (paragraphe 2.4), le niveau de la pression incidente est égal à 0 dB pour toutes les fréquences. Par ailleurs, l'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée est présentée pour l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω sur la figure 3.1(d).

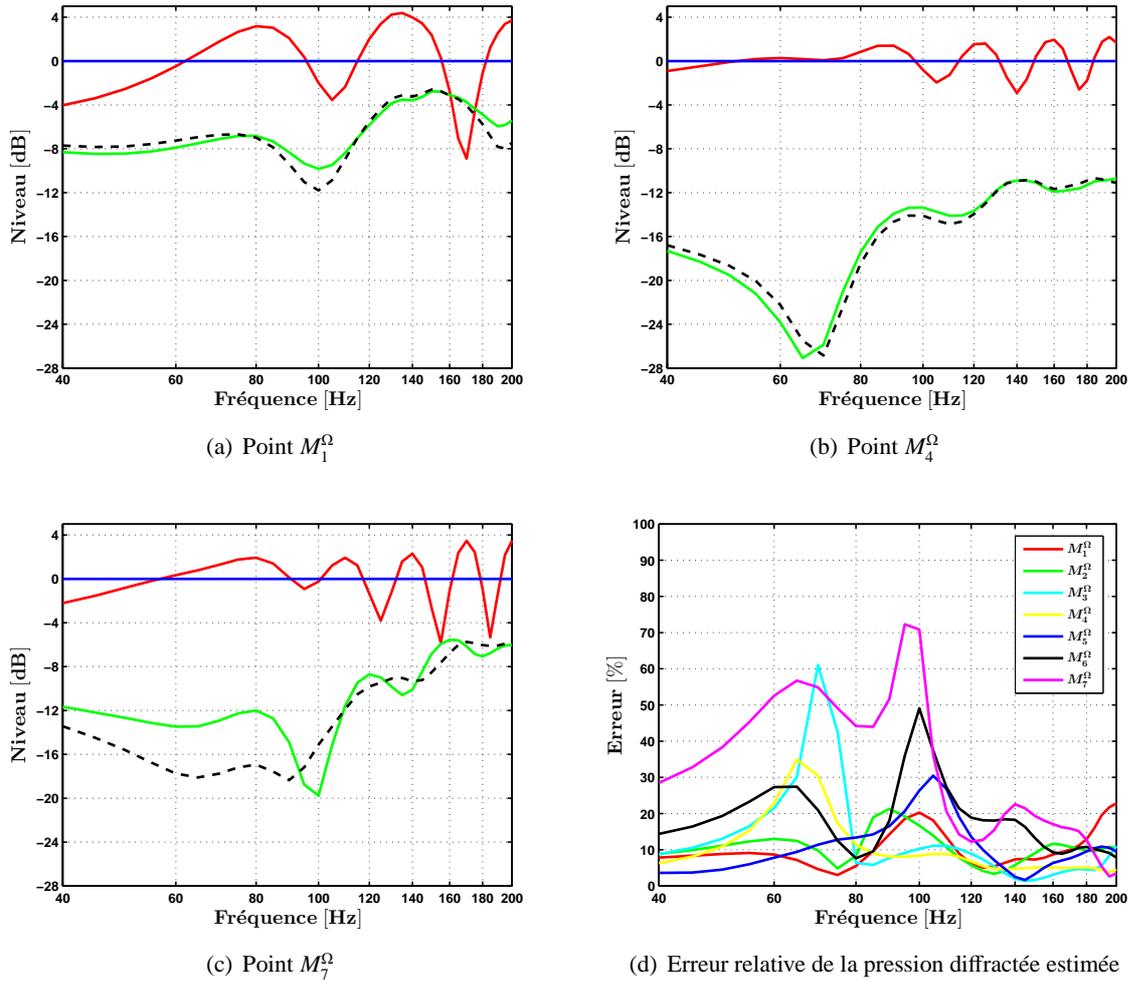


FIGURE 3.1 – Simulation de niveaux de pressions exactes et estimées pour la source S_0 , configuration \mathcal{A} .

— : pression totale, — : pression incidente, — : pression diffractée, - - : pression diffractée estimée

Le niveau de pression totale exacte (courbe rouge) est tracé pour mettre en évidence la différence de niveau avec la pression diffractée. Nous constatons par exemple qu'au point M_4^Ω à la figure 3.1(b), le niveau de pression diffractée est inférieur de plus de 12 dB à celui de la pression totale, proche, lui, de la pression incidente (courbe bleue) ; c'est un résultat attendu puisque le point M_4^Ω est proche de la source et le plus éloigné des parois de la salle.

Les résultats de simulation présentés à la figure 3.1 montrent les interférences acoustiques entre la source S_0 et ses sources images par rapport aux parois. Ces interférences se traduisent par les oscillations de la pression totale ; elles entraînent, sur l'ensemble des points M^Ω , des écarts de plusieurs décibels par rapport à la pression incidente. Ces écarts varient selon la position du point par rapport à la source S_0 ; les perturbations sont logiquement plus faibles aux positions proches de la source où le niveau de la pression diffractée (courbe verte) est minimal comme par exemple au point M_4^Ω , figure 3.1(b). La localisation dans la salle semi-anéchoïque est

un paramètre influent ; pour des positions plus éloignées de la source S_0 , le niveau de la pression diffractée est plus élevé vers la paroi réfléchissante (M_1^Ω) que vers les parois absorbantes (M_7^Ω).

En ce qui concerne les résultats sur l'estimation de la pression diffractée, nous pouvons noter que les niveaux de la pression diffractée estimée (courbe discontinue noire) sont proches de ceux de la pression diffractée exacte. C'est le cas pour les points proches de la paroi réfléchissante, comme M_1^Ω , et ceux proches de la source S_0 comme M_4^Ω .

Par contre, des écarts avec la pression diffractée exacte apparaissent au point M_7^Ω plus éloigné de la paroi rigide ; ils sont importants au-dessus de 120 Hz mais le niveau de pression diffractée reste négligeable ; ils sont de l'ordre de 0 à 2 dB au-dessus de 120 Hz, où le niveau de pression diffractée se rapproche de la pression totale. Il est probable que la caractérisation des parois absorbantes par une admittance égale à ρc ne reproduit pas une réelle condition anéchoïque et entraîne des échos non traités par le réseau de microphones \mathbb{M}^Γ de la surface Γ .

Les erreurs relatives de la pression diffractée estimée présentées à la figure 3.1(d) peuvent être regroupées en deux bandes de fréquences. Au-dessus de 120 Hz, les erreurs sont globalement faibles : inférieures à 10 % pour les points M_1^Ω à M_5^Ω et un peu plus élevées, environ 20 %, pour les points M_6^Ω à M_7^Ω . Au-dessous de 120 Hz, les erreurs relatives sont plus élevées pour l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω et particulièrement autour des fréquences 70 et 100 Hz. Cependant, ces dernières fréquences correspondent à de fortes chutes de niveaux de pression diffractée entraînant une importante augmentation de l'erreur.

Bilan : les erreurs d'estimation de la pression diffractée observées à des faibles niveaux ne devraient pas avoir de conséquences pour l'étape de contrôle. Il semble, au vu de l'estimation de la pression diffractée, que le contrôle actif devrait permettre de ramener les niveaux de pressions totales dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB pour l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω , excepté peut-être au point M_7^Ω .

3.2.2 Configuration \mathcal{B}

Les 32 positions \mathbb{S}^D de la source d'identification pour la configuration \mathcal{B} sont celles de l'expérience réalisée dans la salle semi-anéchoïque, voir la figure 2.8(b). Elles sont réparties sur deux plans parallèles. Le paramètre λ est, dans un premier temps, fixé pour toutes les fréquences à 10^{-5} . L'estimation de la pression diffractée est réalisée aux points \mathbb{M}^Ω .

La figure 3.2 présente les niveaux de pressions totales et diffractées exactes ainsi que ceux des pressions diffractées estimées à l'aide du filtre de diffraction aux 3 points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω . L'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée est présentée pour tous les points \mathbb{M}^Ω à la figure 3.2(d).

Les points \mathbb{M}^Ω et les paramètres de simulation étant identiques à la configuration \mathcal{A} , les pressions totales, incidentes et diffractées exactes sont identiques.

Les résultats d'estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Ω sont moins satisfaisants que ceux obtenus avec la configuration \mathcal{A} . Les allures des courbes de pressions estimées ne sont que globalement reproduites et les écarts de niveaux sont le plus souvent non négligeables. Des différences entre les niveaux de pressions diffractées exactes et estimées apparaissent sur tous

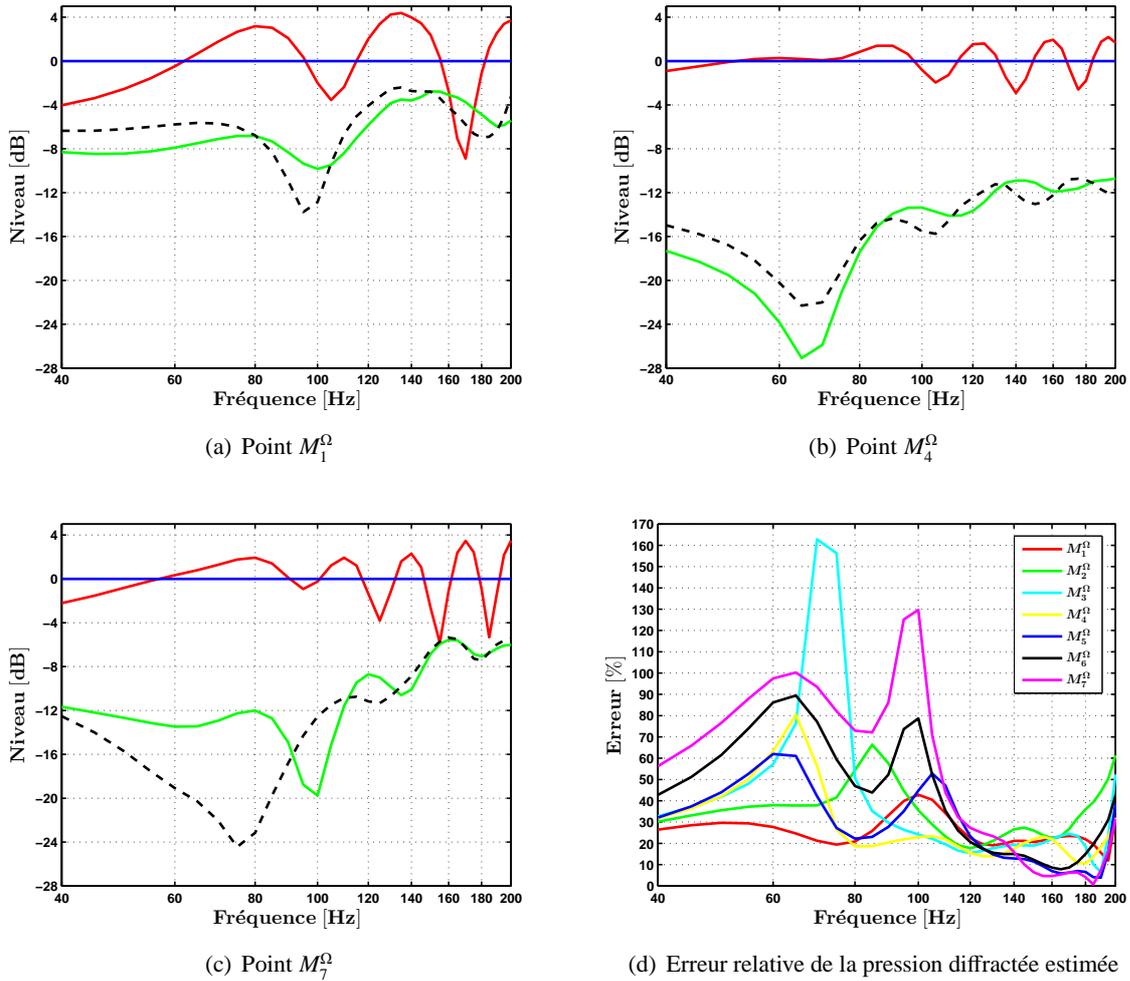


FIGURE 3.2 – Simulation de niveaux de pressions exactes et estimées pour la source S_0 , configuration \mathcal{B} et $\lambda = 10^{-5}$.

— : pression totale, — : pression incidente, — : pression diffractée, - - : pression diffractée estimée

les points M^Ω . Ces écarts peuvent atteindre 2 dB pour des niveaux élevés de pression diffractée et dépasser 10 dB pour de faibles niveaux.

Comme pour la configuration \mathcal{A} , les erreurs relatives peuvent être regroupées en deux bandes de fréquences séparées à 120 Hz, figure 3.2(d). Cependant, les erreurs ont globalement augmenté, particulièrement au-dessous de 120 Hz et autour des fréquences 70 et 100 Hz. Il est probable que les positions de source réparties régulièrement en deux plans parallèles n'apportent pas de données suffisantes sur la répartition du champ acoustique dans la salle. Il s'en suit que le filtre \tilde{D} ne traduit pas correctement la relation entre la pression totale sur la surface Γ et la pression diffractée dans le volume Ω .

Pour tester plus avant cette configuration \mathcal{B} , nous avons choisi une valeur particulière du paramètre de régularisation, notée $\tilde{\lambda}$; elle est obtenue en utilisant la connaissance de la pression

diffractée exacte de la façon suivante.

Pour chaque point de M_i^Ω , une étude paramétrique est réalisée, en calculant les solutions $\tilde{D}_i(\lambda_k)$ de l'équation (2.8) pour un nombre fini de valeurs notées λ_k comprises entre 10^{-16} et 10.

Pour chaque point M_i^Ω , la valeur $\tilde{\lambda}_i$ est choisie pour obtenir l'erreur minimale d'estimation de la pression diffractée c'est-à-dire :

$$\tilde{\lambda}_i = \text{Arg} \left(\min_{\lambda_k} \left(\frac{|p_{dif}(S_0, M_i^\Omega) - \sum_{j=1}^{N^T} p_{tot}(S_0, M_j^\Gamma) \tilde{D}_{ij}(\lambda_k)|}{|p_{dif}(S_0, M_i^\Omega)|} \right) \right) \quad (3.1)$$

Le filtre de diffraction \tilde{D}_i pour le point M_i^Ω est celui obtenu pour cette valeur $\tilde{\lambda}_i$:

$$\tilde{D}_i = \tilde{D}_i(\tilde{\lambda}_i) \quad (3.2)$$

Dans la suite du manuscrit, la valeur $\tilde{\lambda}$ sera appelée le paramètre de régularisation optimisé. Cette démarche n'est évidemment pas applicable dans une situation réelle où le rayonnement de la source est justement l'inconnue du problème ; appliqué aux simulations cela permet d'observer si les résultats d'estimation de la pression diffractée sont améliorés.

Afin d'observer le comportement de l'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée en fonction du paramètre λ , la figure 3.3 présente, pour quelques fréquences, cette erreur aux points M_1^Ω et M_7^Ω .

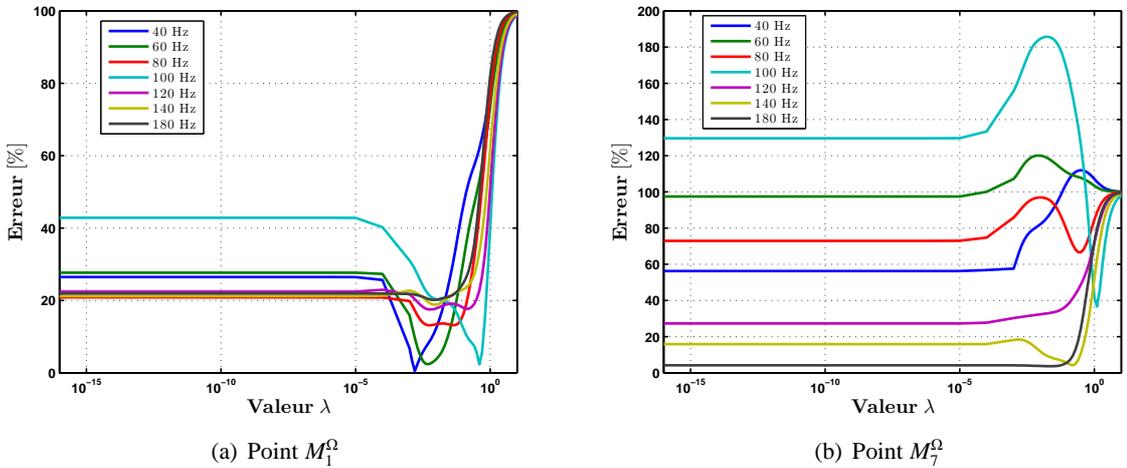


FIGURE 3.3 – Erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée en fonction de λ pour quelques fréquences

Nous pouvons remarquer que ce procédé entraîne une diminution très significativement des erreurs relatives au point proche de la paroi M_1^Ω avec des valeurs de λ , comprises entre 10^{-4} et 10^{-1} , mais n'apporte que peu d'amélioration au point M_7^Ω .

Les résultats de simulation de la pression diffractée estimée avec des valeurs de λ optimisées sont présentés à la figure 3.4.

L'estimation des niveaux de pressions diffractées aux points M_1^Ω et M_4^Ω est satisfaisante sur

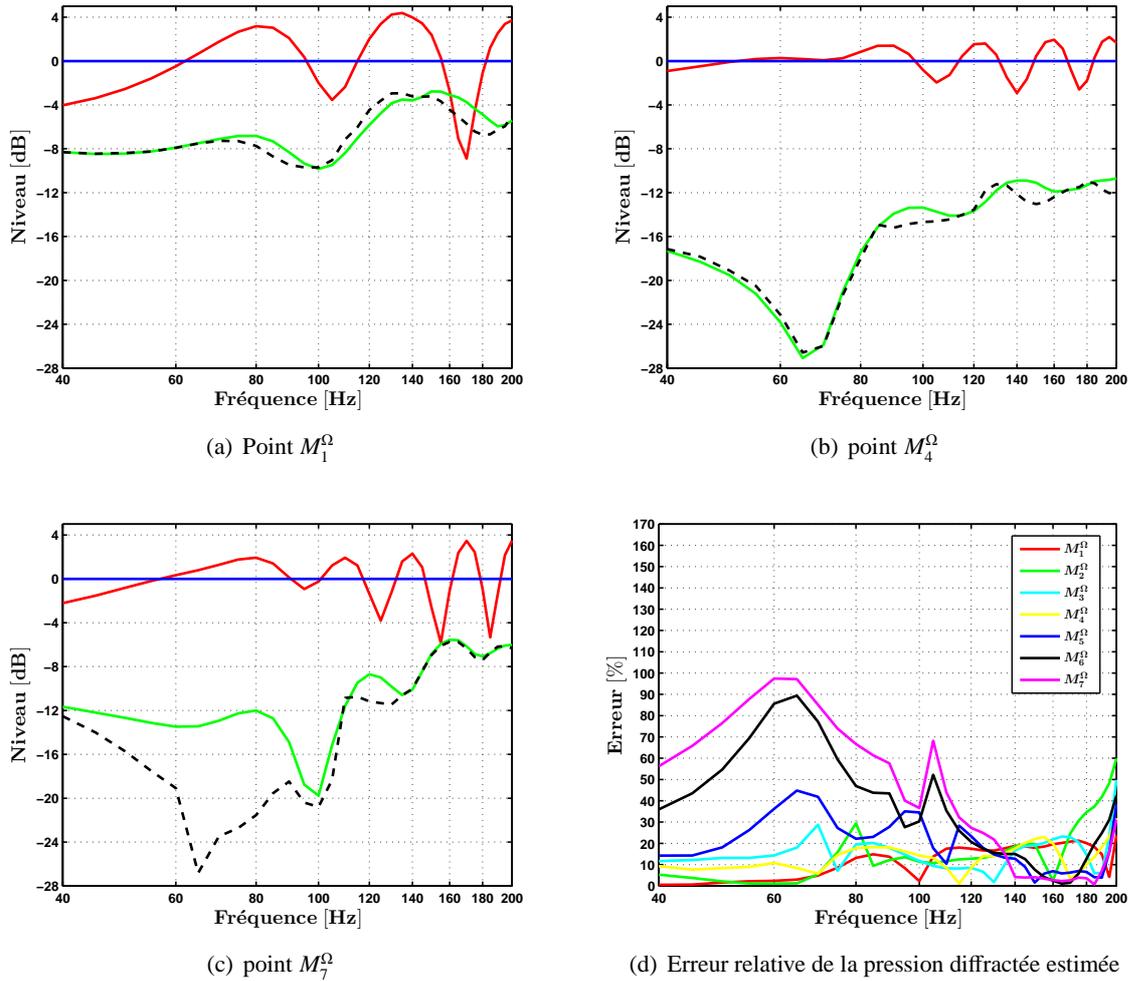


FIGURE 3.4 – Simulation de niveaux de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$.
 — : pression totale, — : pression incidente, — : pression diffractée, - - : pression diffractée estimée

toute la bande de fréquence ; des écarts de l'ordre de 1 à 2 dB, entre pressions diffractée exacte et estimée, apparaissent pour quelques fréquences.

Ces différences sont plus élevées au point M_7^Ω , notamment au-dessous de 100 Hz, voir figure 3.4(c). Nous pouvons noter que le niveau de la pression diffractée en ce point n'est pas faible et devrait être, a priori, plus facile à estimer qu'un faible niveau de pression, comme celui du point M_4^Ω . Or ce n'est pas le cas, le filtre de diffraction n'est pas bien identifié dans cette zone, comme pour la configuration \mathcal{A} .

D'autre part, les erreurs relatives de la pression diffractée estimée ont globalement diminué sur toute la bande de fréquence (figure 3.4(d)). En effet, elles sont principalement inférieures à 20 % pour l'ensemble des points M_i^Ω , hormis les positions éloignées de la paroi rigide M_5^Ω , M_6^Ω et M_7^Ω où les erreurs sont encore élevées au-dessous de 120 Hz.

Les valeurs de λ optimisées apportent une meilleure identification du filtre de diffraction D

et donc une meilleure estimation des pressions diffractées.

3.2.3 Synthèse de l'identification du filtre de diffraction

Le filtre de diffraction a été estimé pour deux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} . Les erreurs relatives sur la pression diffractée estimée aux points M_1^Ω et M_7^Ω pour les deux configurations sont directement comparées à la figure 3.5. La courbe verte correspond au résultat de la configuration \mathcal{A} , les courbes rouge et noire correspondent à ceux de la configuration \mathcal{B} avec la valeur du paramètre de régularisation égale respectivement à 10^{-5} et $\tilde{\lambda}$. Les valeurs retenues pour $\tilde{\lambda}$ sont présentées sur la même figure (axe vertical droit) par des ronds noirs.

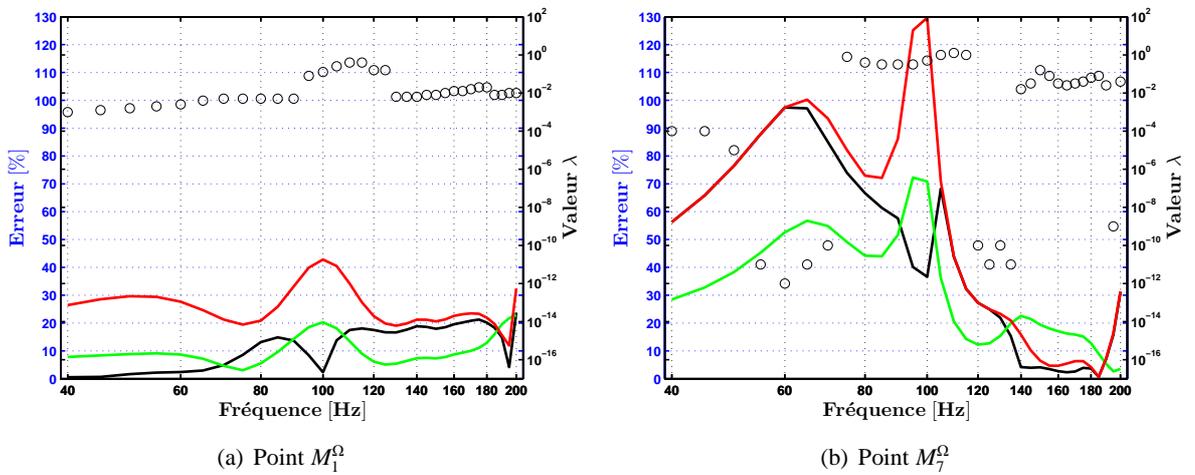


FIGURE 3.5 – Erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée en fonction de la fréquence ; valeurs de $\tilde{\lambda}$.

— : configuration \mathcal{A} , — : configuration \mathcal{B} ($\lambda = 10^{-5}$), — : configuration \mathcal{B} ($\tilde{\lambda}$), \circ : valeur de $\tilde{\lambda}$

Pour les deux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} , les erreurs relatives indiquent que le filtre de diffraction D est correctement identifié aux fréquences supérieures à 120 Hz, pour l'ensemble des points M^Ω .

Par contre, aux fréquences inférieures à 120 Hz, les résultats dépendent de la position du point dans la salle. Le filtre de diffraction est correctement identifié pour les positions proches de la paroi réfléchissante. Dans la zone proche des parois absorbantes, le filtre de diffraction D ne traduit pas correctement la relation entre la pression totale sur la surface Γ et la pression diffractée dans le volume Ω au-dessous de 120 Hz. Nous pouvons supposer que le paramètre d'admittance choisi ρc pour les cinq parois ne reproduit pas la condition d'anechoïcité et que la seule prise en compte de la surface Γ ne permet pas de contrôler les échos dus à ces 5 parois.

Nous constatons également que le choix des positions S^D de la source d'identification est un facteur essentiel pour une identification satisfaisante du filtre de diffraction. En effet, la configuration \mathcal{A} permet d'obtenir une meilleure estimation des pressions diffractées que la configuration \mathcal{B} . La disparité des positions S^D de la configuration \mathcal{A} a probablement permis d'obtenir une

représentation plus fidèle du comportement acoustique de la salle. Il faut cependant noter que les valeurs de λ optimisées ont permis de se rapprocher des résultats de la configuration \mathcal{A} .

La réflexion sur le problème d'inversion n'a pas été approfondie dans cette thèse. Le nombre de positions \mathbb{S}^D de source d'identification a été choisi pour être environ le double des microphones d'identification \mathbb{M}^Γ afin d'obtenir un système surdéterminé.

3.3 Contrôle de la pression diffractée estimée

Dans les deux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} , le contrôle est réalisé sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω à partir des neuf sources secondaires positionnées sur la paroi réfléchissante, figure 2.7.

Dans la simulation, les sources secondaires sont assimilées à des sources ponctuelles omnidirectionnelles. Leurs coordonnées sont celles des centres acoustiques des sources secondaires utilisées pour l'expérience. Les commandes appliquées à ces sources sont calculées en réalisant une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ de l'équation (2.16) pour différentes valeurs α_k , comprises entre 10^{-16} et 10. La valeur $\tilde{\alpha}$ est choisie pour obtenir l'erreur minimale du contrôle de la pression diffractée :

$$\tilde{\alpha} = \text{Arg} \left(\min_{\alpha_k} \left(\frac{|p_{\text{tot}}(S_0, \mathbb{M}^\Gamma) \tilde{\mathbf{D}} + \mathbf{C} \tilde{U}(\alpha_k)|}{|p_{\text{tot}}(S_0, \mathbb{M}^\Gamma) \tilde{\mathbf{D}}|} \right) \right) \quad (3.3)$$

avec $\tilde{\mathbf{D}}$ la matrice des filtres de diffraction et \mathbf{C} la matrice des trajets secondaires. Les commandes à générer par les sources secondaires sont alors données par :

$$\tilde{U} = \tilde{U}(\tilde{\alpha}) \quad (3.4)$$

La pression totale obtenue avec contrôle, pour un point M_i^Ω , est calculée comme la somme de la pression totale exacte sans contrôle et de la pression générée par les sources secondaires :

$$p^{\text{ctl}}(S_0, M_i^\Omega) = p_{\text{tot}}(S_0, M_i^\Omega) + C_i \tilde{U} \quad (3.5)$$

Les pressions totales obtenues avec et sans contrôle sont présentées comme indiqué au paragraphe 2.4. Les courbes représentent les niveaux de pression aux points \mathbb{M}^Ω et au point test M_0 . Le résultat au point M_0 permet d'évaluer l'effet du contrôle au voisinage du point contrôlé M_4^Ω . Sur l'ensemble des figures, l'efficacité du contrôle peut être évaluée par référence à l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

3.3.1 Configuration \mathcal{A}

Le choix de la valeur du paramètre de régularisation α est obtenue d'après l'équation (3.3), en minimisant la norme de l'erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée. La figure 3.6 illustre le choix de la valeur du paramètre de régularisation $\tilde{\alpha}$.

L'erreur du contrôle de la pression diffractée est représentée en fonction du paramètre α , pour quelques fréquences. Les résultats indiquent que l'erreur est négligeable pour des valeurs

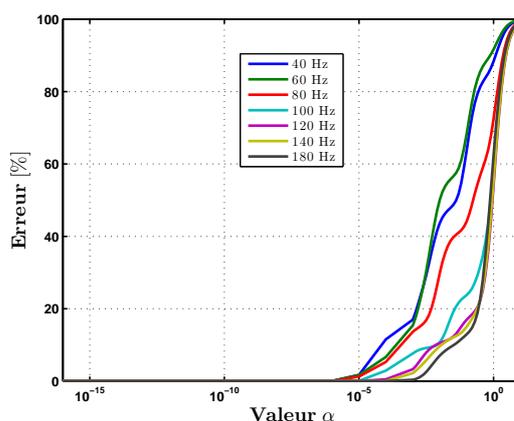


FIGURE 3.6 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α , pour quelques fréquences, configuration \mathcal{A}

de α inférieures à 10^{-6} ; les valeurs $\tilde{\alpha}$ choisies se situent donc au-dessous de cette limite.

Les niveaux des pressions obtenues dans les cas avec et sans contrôle sont présentés, à la figure 3.7, aux points M_1^Ω , M_4^Ω , M_7^Ω (points contrôlés) et au point test M_0 . Les courbes rouge et bleue représentent respectivement les niveaux de pression obtenue sans et avec contrôle. L'intervalle à $\pm 1,5$ dB est représenté par les deux lignes horizontales discontinues.

Les résultats de contrôle de la pression diffractée aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω sont satisfaisants; les niveaux de pressions avec contrôle restent dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB.

Pour les points M_1^Ω et M_4^Ω , le niveau de pression avec contrôle est très proche de celui de la pression incidente exacte.

En M_1^Ω , le contrôle permet de réduire de 9 dB les écarts de niveaux entre pression incidente exacte et pression totale sans contrôle.

En M_7^Ω , l'efficacité du contrôle se dégrade légèrement mais il reste satisfaisant; le niveau de pression reste dans l'intervalle.

Enfin, au point test M_0 , et bien qu'il soit situé à une faible distance (0,36 m) du point contrôlé M_4^Ω , le contrôle a perdu de son efficacité; la courbe sort de l'intervalle de $\pm 1,5$ dB. Le résultat de contrôle obtenu semble donc très localisé aux points contrôlés.

Il est intéressant de noter que ces résultats sont en accord avec l'évolution de l'erreur d'estimation de la pression diffractée, voir figure 3.1(d)

La figure 3.8(a) regroupe, sur une échelle de pourcentage réduite à 25 %, l'erreur relative, en fonction de la fréquence, entre la pression incidente exacte et la pression totale obtenue avec le contrôle de tous les points de \mathbb{M}^Ω .

Les erreurs sont faibles, inférieures à 5 %, pour l'ensemble des points contrôlés \mathbb{M}^Ω hormis en M_1^Ω et M_7^Ω où l'erreur peut dépasser 7 % à quelques fréquences. Or, nous avons vu sur la figure 3.6 que l'erreur sur le contrôle de la pression diffractée estimée était négligeable. L'erreur entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle semble donc due à une estimation incorrecte de la pression diffractée.

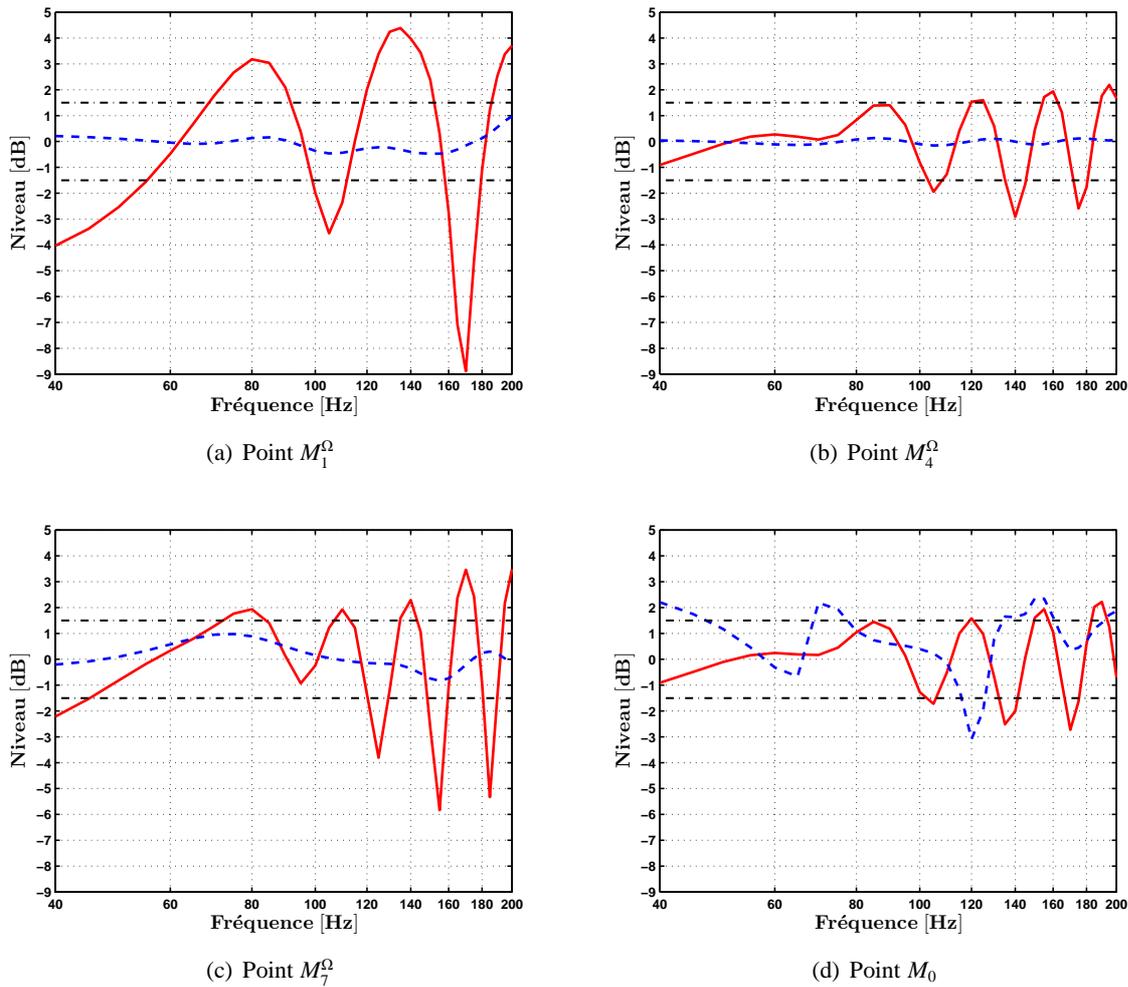


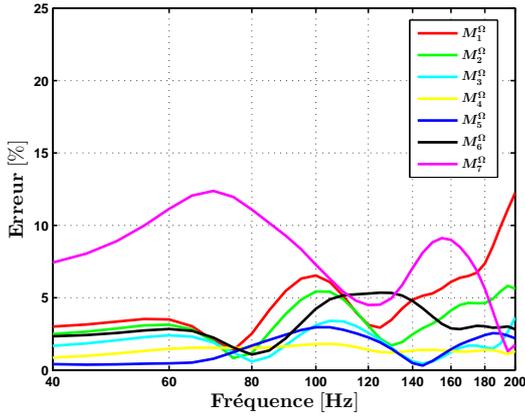
FIGURE 3.7 – Simulation des pressions totales avec et sans contrôle, configuration \mathcal{A} .
 — : pression sans contrôle, - - - : pression avec contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

La figure 3.8(b) présente les amplitudes maximales et minimales des commandes générées par les sources secondaires aux fréquences contrôlées.

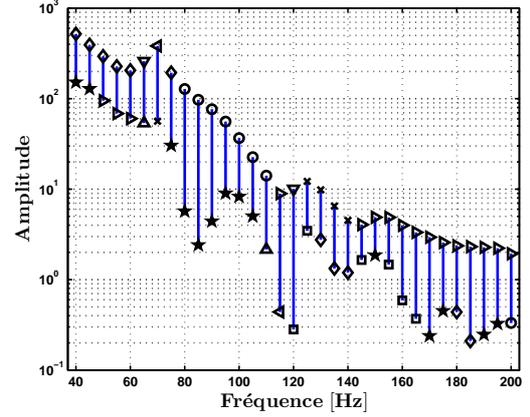
Le niveau moyen des amplitudes diminue avec les fréquences croissantes mais reste globalement élevé. Au-dessous de 80 Hz, les amplitudes se situent entre 10^2 et 10^3 et au-dessus de 160 Hz, elles sont autour de 1.

Nous avons vu à la figure 3.7 que le niveau de pression du point M_0 , pourtant proche de la source S_0 , était perturbé par les sources secondaires. Il semblerait que les fortes amplitudes des commandes des sources secondaires entraînent une forte augmentation du niveau sonore global à l'intérieur de la salle.

Bilan : Les résultats avec contrôle dans la configuration \mathcal{A} sont très satisfaisants aux points contrôlés mais l'effet de contrôle semble localisé en ces points et génère de fortes amplitudes de



(a) Erreur relative sur la pression incidente



(b) Amplitude des commandes des sources secondaires

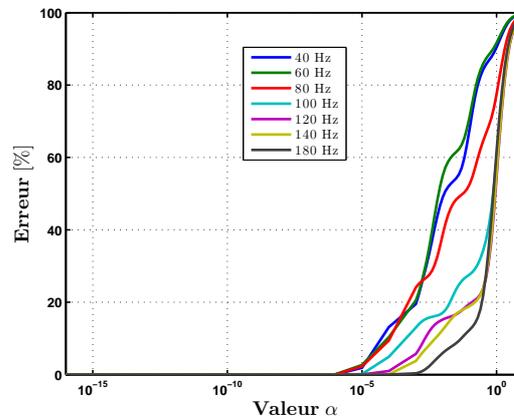
 FIGURE 3.8 – Erreur relative entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle ; amplitude des commandes pour les sources secondaires (configuration \mathcal{A}).

Sources secondaires ; S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft

commandes pour les sources secondaires. L'erreur relative entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle est probablement due aux erreurs d'estimation de la pression diffractée. Cependant, il faut noter que les erreurs d'estimation obtenues pour de faibles niveaux de pressions n'ont pas de conséquences sur l'efficacité du contrôle.

3.3.2 Configuration \mathcal{B}

Pour cette configuration, la pression diffractée a été estimée à partir du filtre de diffraction \tilde{D} identifié successivement avec les 2 valeurs du paramètre de régularisation, 10^{-5} et $\tilde{\lambda}$. Le contrôle est réalisé simultanément sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω , pour les pressions diffractées estimées avec les deux filtres de diffraction.


 FIGURE 3.9 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α , pour quelques fréquences (configuration \mathcal{B} et $\lambda = 10^{-5}$)

Pour le contrôle, la valeur du paramètre de régularisation $\tilde{\alpha}$ est obtenue comme précédemment, voir figure 3.9. Ces courbes correspondent au cas $\lambda = 10^{-5}$; le cas $\tilde{\lambda}$ n'est pas présenté car il est similaire.

À nouveau, l'erreur est négligeable pour des valeurs de α inférieures à 10^{-6} ; les valeurs $\tilde{\alpha}$ retenues sont également inférieures à cette limite.

Les pressions obtenues avec et sans contrôle sont présentées à la figure 3.10 aux points M_1^Ω , M_4^Ω , M_7^Ω (points contrôlés) et au point test M_0 . Les courbes rouge et bleue représentent respectivement les niveaux de pression obtenue sans et avec contrôle. La courbe discontinue bleue claire correspond au cas du contrôle de la pression diffractée estimée avec $\lambda = 10^{-5}$ et celle en bleue foncée au cas du contrôle de la pression diffractée estimée avec $\tilde{\lambda}$. L'intervalle de $\pm 1,5$ dB est représenté par les deux lignes horizontales discontinues noires.

Les résultats de contrôle aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , figures 3.10 (a) (b) (c), sont satisfaisants pour les deux estimations de pressions diffractées ($\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$) ; tous les niveaux de pression aux points contrôlés sont compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

Le contrôle est plus efficace au point M_1^Ω qu'au point M_7^Ω ; le comportement du contrôle est semblable à celui obtenu pour la configuration \mathcal{A} .

Il est intéressant de noter que les résultats de contrôle obtenus avec les deux estimations sont très proches alors que les erreurs d'estimation de la pression diffractée étaient très différentes selon le paramètre λ choisi ; a contrario, les résultats en M_0 , non contrôlé mais proche de M_4^Ω , sont très différents pour les deux estimations, voir figure 3.10(d).

Dans tous les cas, le niveau de pression au point test M_0 est très fortement perturbé par les sources secondaires, comme pour la configuration \mathcal{A} . Le contrôle reste localisé aux points contrôlés mais les perturbations sont beaucoup plus fortes que celles observées à la configuration \mathcal{A} (figure 3.7(d)).

Bilan : Pour la configuration \mathcal{B} , qui correspond aux conditions expérimentales d'identification du filtre, il est intéressant de noter que malgré les fortes erreurs d'estimation de la pression diffractée, les résultats de contrôle sont corrects aux points contrôlés. Cependant, le point non contrôlé reste fortement perturbé par les sources secondaires. Les amplitudes des commandes des sources secondaires ainsi que les erreurs sur la pression incidente sont présentées et comparées à la configuration \mathcal{A} au paragraphe suivant.

3.3.3 Synthèse du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}

Les erreurs relatives entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle sont présentées aux points M_1^Ω , M_7^Ω et M_0 , dans les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} , aux figures 3.11 (a) (b) (c). La courbe verte représente le résultat obtenu pour la configuration \mathcal{A} , les courbes rouge et noire correspondent à la configuration \mathcal{A} avec respectivement $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$. Pour une meilleure visibilité des courbes, l'échelle des pourcentages est réduite à 25 % pour les points M_1^Ω et M_7^Ω et augmentée à 200 % pour le point M_0 .

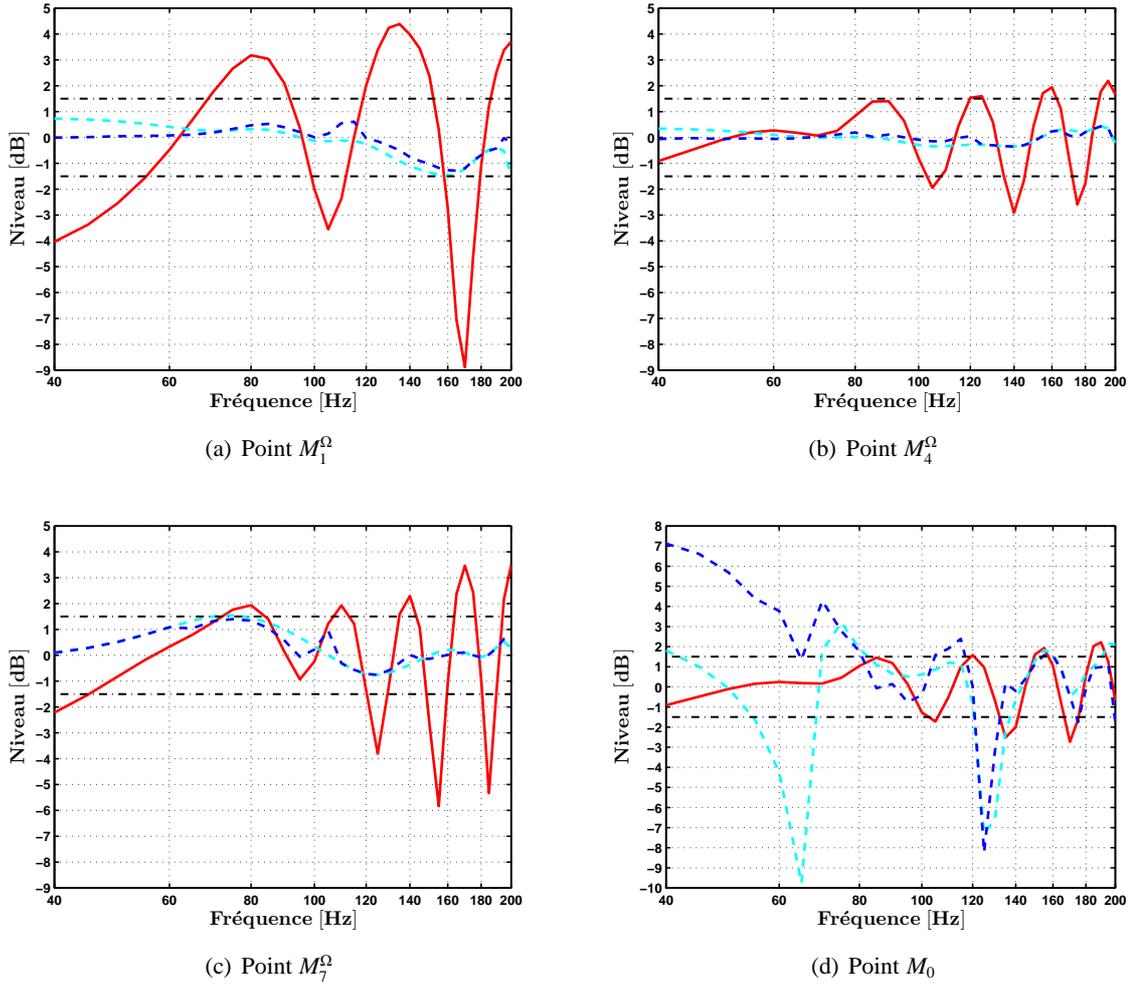


FIGURE 3.10 – Simulation de pressions totales avec et sans contrôle (configuration \mathcal{B} ; $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$).

— : pression sans contrôle, - - - : pression avec contrôle ($\tilde{\lambda}$), - - - : pression avec contrôle ($\lambda = 10^{-5}$), - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Pour les points contrôlés M_1^Ω et M_7^Ω , les erreurs relatives entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle sont inférieures à 20 % pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} ; les erreurs sont plus faibles pour la configuration \mathcal{A} . Au point M_7^Ω , les erreurs relatives sont plus élevées que celles au point M_1^Ω .

Il est intéressant de noter que les allures de ces courbes d'erreurs sont très proches de celles des erreurs sur l'estimation de la pression diffractée.

Par ailleurs, le contrôle entraîne des erreurs très fortes au point M_0 . Ces erreurs sont présentes pour les trois configurations mais sont plus importantes pour la configuration \mathcal{B} avec le paramètre $\tilde{\lambda}$.

Parallèlement, la moyenne des amplitudes des commandes des sources secondaires est aussi plus élevée pour cette dernière configuration, voir figure 3.11(d). Nous pouvons observer que

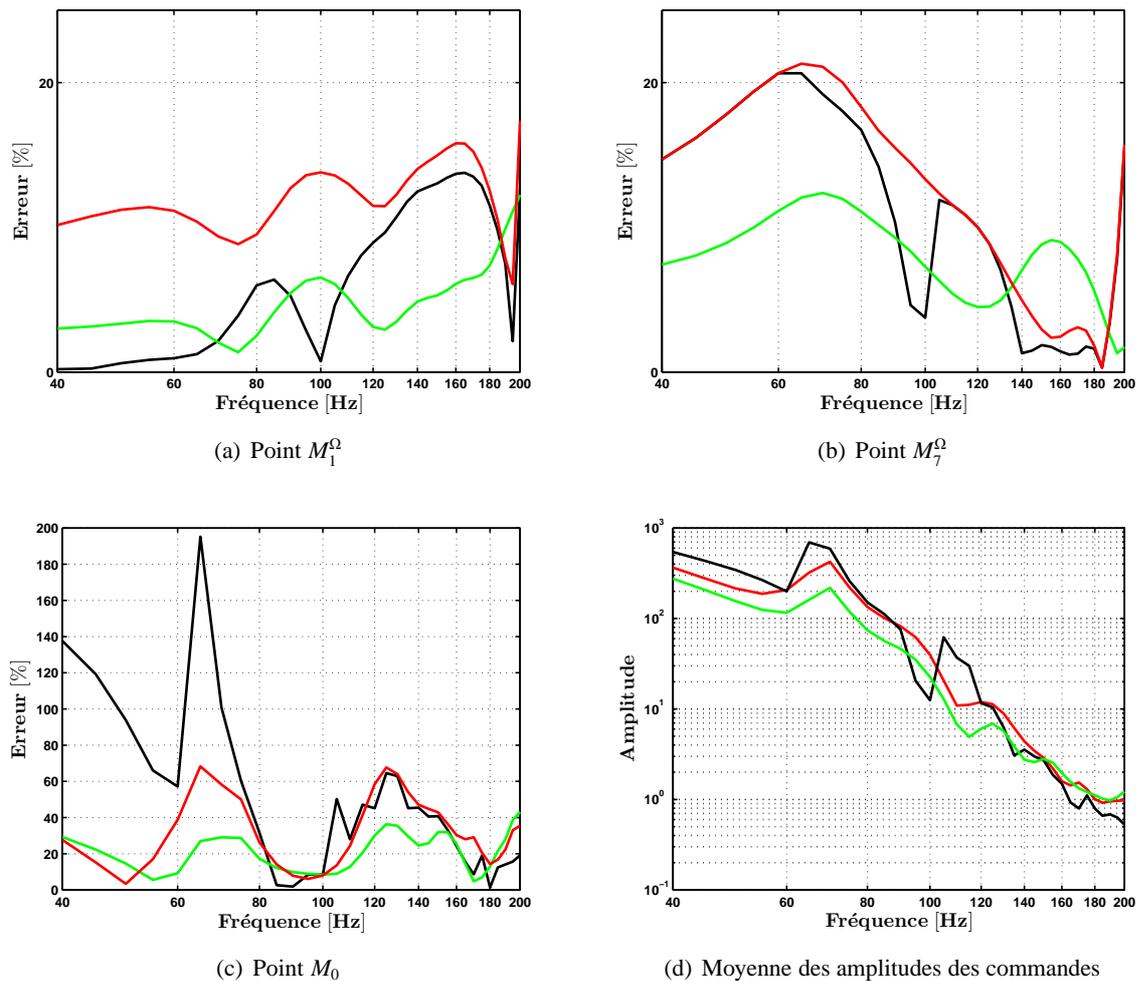


FIGURE 3.11 – Erreur relative entre la pression incidente et la pression totale avec contrôle ; moyenne des amplitudes des commandes des sources secondaires.

— : configuration \mathcal{A} , — : configuration $\mathcal{B}(\tilde{\lambda})$, — : configuration $\mathcal{B}(\lambda = 10^{-5})$

l'amplitude des commandes des sources secondaires est liée à la dégradation de la pression au point M_0 ; plus l'amplitude des commandes est forte, plus la dégradation est élevée.

Il est intéressant de noter que l'estimation de la pression diffractée avec λ optimisé a entraîné une augmentation des amplitudes des sources secondaires. Les résultats de contrôle dans cette configuration se sont légèrement améliorés aux points contrôlés mais se sont dégradés au point non contrôlé. Afin d'affiner le comportement de ce cas de contrôle, des simulations sont réalisées au chapitre 7, afin d'observer l'efficacité du contrôle sur une densité plus importante de points dans le volume Ω .

3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons vu que le choix des positions de la source d'identification est important pour l'identification du filtre de diffraction D .

La configuration \mathcal{B} , avec un paramètre de régularisation optimisé $\tilde{\lambda}$, a permis d'obtenir des estimations de la pression diffractée proches de celles de la configuration \mathcal{A} . Cependant, les résultats de contrôle sont très proches entre toutes les configurations alors que les erreurs d'estimation de la pression diffractée sont très différentes.

Ces erreurs d'estimation doivent être interprétées en prenant en considération le niveau de pression.

Par contre, les perturbations de la pression observées au point M_0 , voisin de M_4^Ω , indiquent un contrôle localisé aux points contrôlés. De plus, les perturbations au point M_0 situé très proche de la source S_0 , ainsi que les fortes amplitudes des sources secondaires, laissent supposer une forte augmentation du niveau sonore global dans la salle.

L'ensemble des résultats obtenus nous a amené à tester le cas d'un contrôle sur la surface Γ plus proche de la paroi réfléchissante, avec deux points à vérifier en particulier : l'amplitude des commandes et l'étendue du contrôle sur l'ensemble des points de minimisation. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Simulation numérique d'un contrôle sur la surface Γ

Sommaire

4.1	Estimation de la pression diffractée	50
4.1.1	Configuration \mathcal{A}	50
4.1.2	Configuration \mathcal{B}	52
4.1.3	Synthèse sur l'identification du filtre de diffraction	54
4.2	Contrôle de la pression diffractée estimée	55
4.2.1	Configuration \mathcal{A}	55
4.2.2	Configuration \mathcal{B}	60
4.2.3	Efficacité du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}	61
4.3	Synthèse du contrôle dans le volume Ω et en surface Γ	63

L'originalité du contrôle présenté dans ce chapitre consiste à supprimer le champ diffracté au plus près de sa génération, c'est-à-dire sur la surface Γ . En sélectionnant un nombre de capteurs et d'actionneurs appropriés, un contrôle proche de la paroi pourrait en effet permettre d'annuler le champ diffracté dans le volume. L'intérêt pratique de la méthode est aussi de contrôler la pression diffractée sur les microphones d'identification, utilisés pour l'estimation préalable de la pression diffractée, ce qui permet de réduire notablement le nombre total de microphones.

Les simulations du contrôle de la pression diffractée sur la surface Γ sont réalisées dans les mêmes conditions que les simulations de contrôle dans le volume. Le filtre de diffraction D est estimé à partir des positions de la source d'identification des configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} . Le contrôle de la pression diffractée est réalisé simultanément sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ . Les résultats du contrôle sont présentés aux points de la surface Γ et du volume Ω .

4.1 Estimation de la pression diffractée

Comme au chapitre précédent, le filtre de diffraction D est évalué pour les deux configurations (\mathcal{A} et \mathcal{B}) de sources d'identification, à partir des pressions totales mesurées sur la surface Γ . L'estimation de la pression diffractée en chaque point M_i^Γ de Γ pour la source S_0 est ensuite obtenue à partir des pressions totales obtenues sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ de la surface Γ .

4.1.1 Configuration \mathcal{A}

Les positions de la source d'identification sont celles décrites précédemment (figure 2.8(a)). Le paramètre de régularisation λ est fixé à 10^{-5} , pour tous les points et toutes les fréquences.

La figure 4.1 présente les résultats sur l'estimation de la pression diffractée pour la source S_0 (courbe discontinue). Les figures 4.1 (a) (b) présentent les pressions totales et diffractées calculées aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ situés au voisinage du centre de la surface Γ (courbe continue). Les figures 4.1 (c) (d) présentent les résultats obtenus aux points M_1^Γ et M_{14}^Γ situés en périphérie de Γ (courbe continue). Pour rappel, les positions des points M_i^Γ sont indiqués à la figure 2.7. La légende des courbes est identique à celle utilisée précédemment.

Les courbes de pression totale ont très globalement la même allure en fonction de la fréquence. Mais comme attendu, les valeurs des niveaux calculées pour les positions en périphérie de Γ sont sensiblement différentes de celles obtenues pour les positions plus centrales, probablement en raison de l'influence des parois à proximité.

Pour les quatre points présentés, le niveau de la pression totale est inférieur au niveau de la pression incidente au-dessous de 100 Hz puis augmente fortement jusqu'à 140 Hz ou au-delà. Le niveau de la pression diffractée exacte est globalement élevé, voire très élevé aux fréquences supérieures et voisines de 140 Hz.

Le niveau estimé de la pression diffractée est très satisfaisant sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ . L'écart entre le niveau de pression diffractée exact et estimé est inférieur au décibel notamment pour les positions voisines du centre de la surface Γ . Ces écarts sont un peu plus importants pour

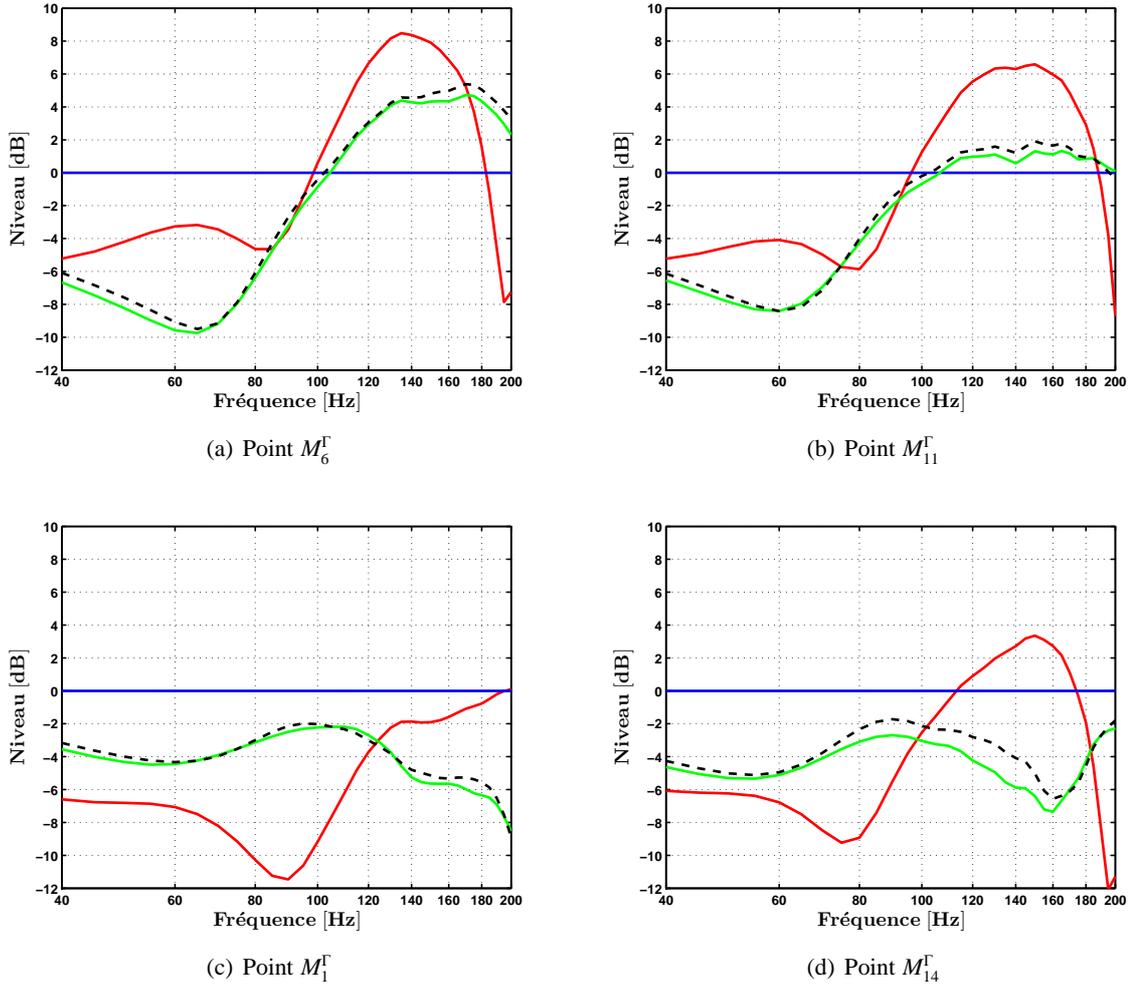


FIGURE 4.1 – Simulation de niveaux de pressions exactes et estimées pour la source S_0 , configuration \mathcal{A} .

— : pression totale, — : pression incidente, — : pression diffractée, - - : pression diffractée estimée

les points en périphérie de Γ à certaines fréquences, mais ils restent inférieurs à 2 dB.

La figure 4.2 présente l'erreur relative de la pression diffractée estimée pour l'ensemble des points M^Γ . La figure 4.2(a) correspond aux points M_1^Γ à M_8^Γ , dont la coordonnée Y varie de 0 à 2, 3 m ; la figure 4.2(b) correspond aux points M_9^Γ à M_{16}^Γ , de coordonnée Y variant de 2, 3 à 4, 6 m.

Les erreurs relatives pour l'ensemble des points M^Γ sont faibles et principalement de l'ordre de 10 %. Quelques erreurs pour des points en périphérie de Γ atteignent des valeurs de 40 % autour de 160 Hz mais à part ces quelques exceptions, les courbes d'erreurs sont proches en comportement et en amplitude. Ces résultats montrent donc que le contrôle de la pression diffractée estimée devrait être efficace en ces points M^Γ .

En ces points plus proches de la paroi réfléchissante, le niveau de pression diffractée est

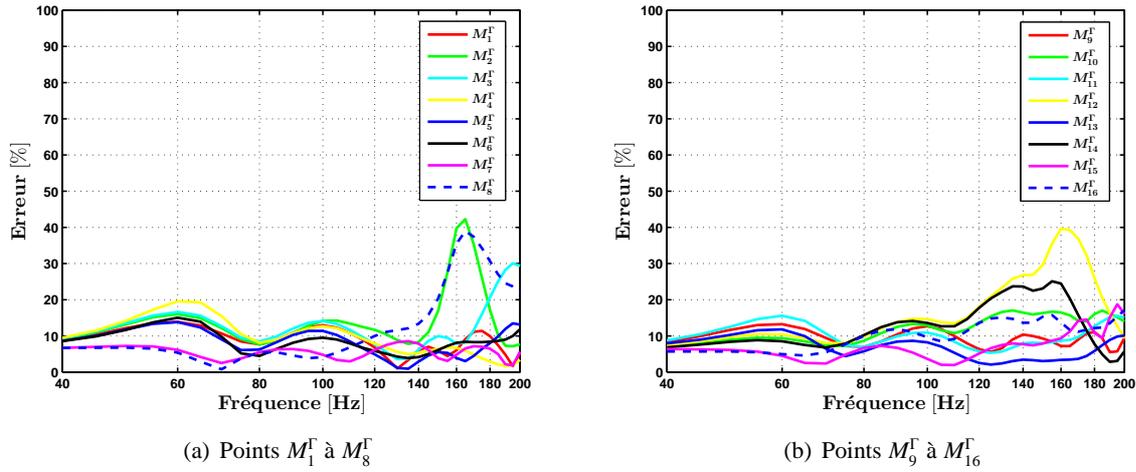


FIGURE 4.2 – Erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée aux points M^Γ , configuration \mathcal{A}

plus élevé avec à un comportement assez similaire sur la surface Γ ; le filtre de diffraction est correctement identifié. Si le contrôle se révèle efficace, l'avantage pratique de cette méthode est que tout le volume Ω est disponible pour y positionner les sources d'identification.

4.1.2 Configuration \mathcal{B}

Dans cette configuration, les deux valeurs du paramètre de régularisation 10^{-5} et $\tilde{\lambda}$ sont testées.

La figure 4.3 présente les résultats sur l'estimation de la pression diffractée pour la source S_0 aux points M_1^Γ , M_6^Γ , M_{11}^Γ et M_{14}^Γ . La légende des courbes est identique à celle utilisée pour la configuration \mathcal{A} , à laquelle est ajoutée la courbe discontinue grise représentant la pression diffractée estimée avec $\lambda = 10^{-5}$.

Nous constatons deux types de résultats; l'estimation de la pression diffractée diffère en fonction de la position sur la surface Γ et de la valeur de λ . L'identification du filtre de diffraction obtenue avec le paramètre de régularisation optimisé ($\tilde{\lambda}$) permet d'améliorer certaines estimations de la pression diffractée.

Aux positions M_{11}^Γ et M_{14}^Γ , de coordonnée Y supérieure à 2,3 m, l'estimation de la pression diffractée, médiocre avec le paramètre $\lambda = 10^{-5}$, est nettement améliorée avec le paramètre $\tilde{\lambda}$ et ce, quasiment sur toute la bande de fréquence.

Aux positions M_1^Γ et M_6^Γ , de coordonnée Y inférieure à 2,3 m, l'estimation de la pression diffractée, insuffisante avec le paramètre $\lambda = 10^{-5}$, n'est que partiellement améliorée pour les fréquences inférieures à 80 Hz.

Le niveau de pression diffractée étant élevé, les écarts obtenus avec le paramètre $\lambda = 10^{-5}$ sont influents et pourraient impliquer un contrôle insuffisant.

La figure 4.4 représente les erreurs relatives de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Γ et pour les deux valeurs de λ : figures 4.4 (a) (b) pour $\lambda = 10^{-5}$, et fig-

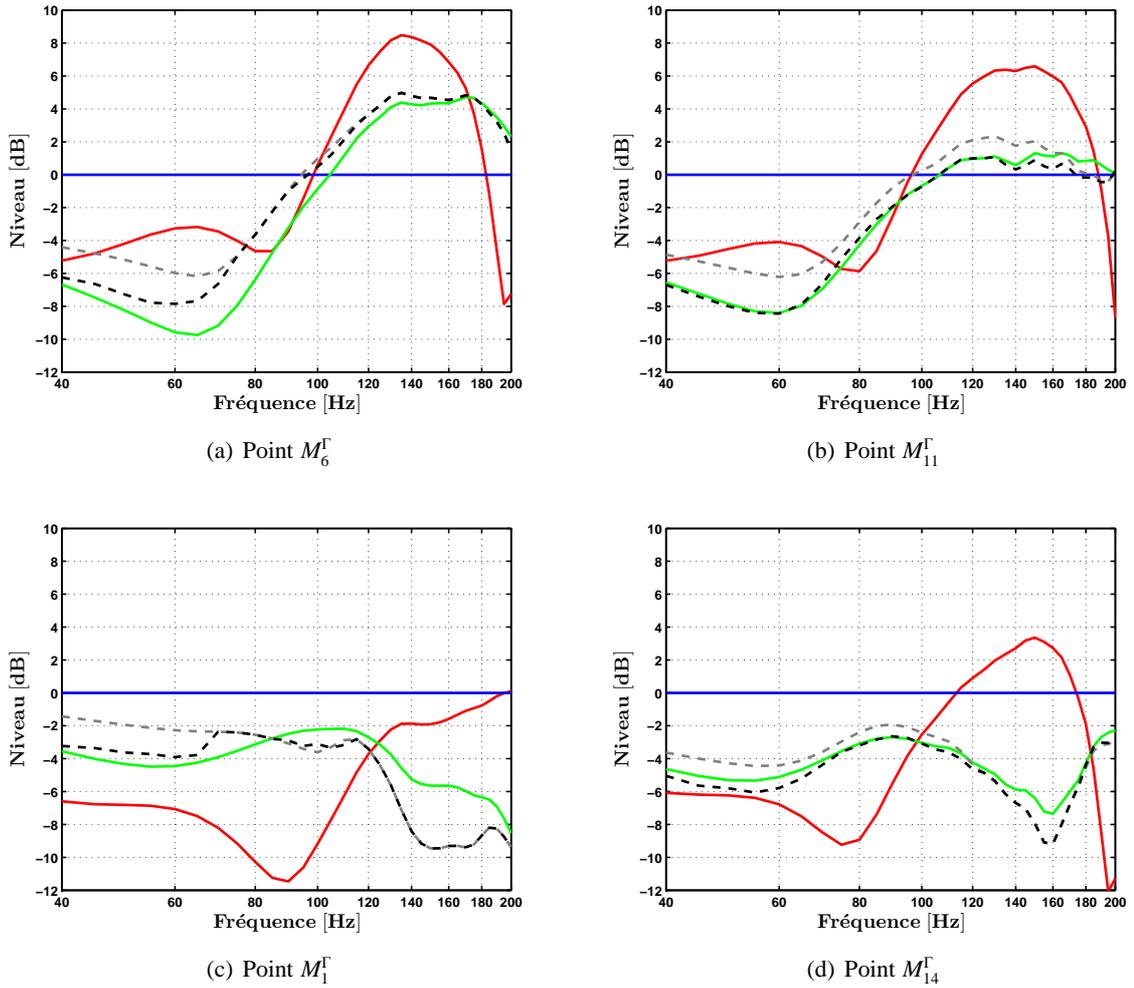


FIGURE 4.3 – Simulation de niveaux de pressions exactes et estimées pour la source S_0 , configuration \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$.

— : pression totale, — : pression incidente, — : pression diffractée, - - : pression diffractée estimée ($\tilde{\lambda}$), - - : pression diffractée estimée ($\lambda = 10^{-5}$)

ures 4.4 (c) (d) pour $\tilde{\lambda}$.

Les résultats obtenus avec $\lambda = 10^{-5}$ indiquent que les erreurs relatives de la pression diffractée estimée diffèrent en fonction de la fréquence. Autour de 60 Hz, elles sont fortes, proches de 35 %, pour l'ensemble des points M^Γ . Autour de 160 Hz, elles sont aussi élevées, près de 55 %, excepté aux positions proches du centre de Γ qui ont des erreurs voisines de 10 %. Cependant, mis à part les erreurs élevées autour de ces deux fréquences, elles se situent principalement aux alentours de 25 %.

Les résultats obtenus avec le paramètre $\tilde{\lambda}$ indiquent que les erreurs relatives de la pression diffractée estimée diffèrent selon la coordonnée Y des points. L'amélioration des résultats concerne essentiellement les points M_9^Γ à M_{16}^Γ , de coordonnée Y supérieure à 2,3 m ; en ces points, les erreurs sont fortement réduites, elles se situent autour de 10 %, pour les fréquences inférieures

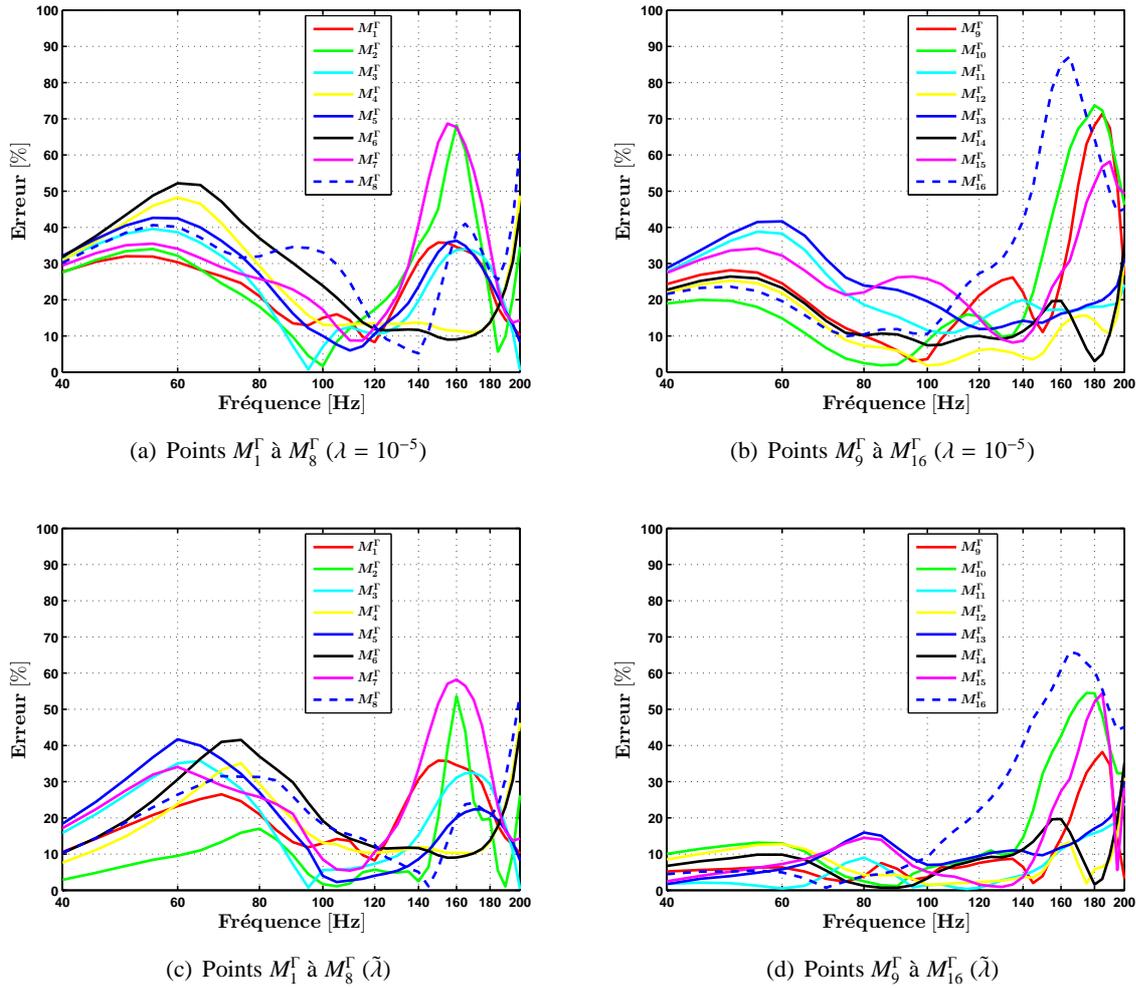


FIGURE 4.4 – Erreur relative de la pression diffractée estimée aux points M^Γ , configuration \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$

à 140 Hz et autour de 40 % pour les fréquences voisines de 160 Hz.

Rappelons que la source S_0 est également positionnée dans cette zone ($Y > 2,3$ m) et pourrait influencer la sélection du paramètre de régularisation λ dans l'équation (3.1).

Aux points M_1^Γ à M_8^Γ , de coordonnée Y inférieure à 2,3 m, la réduction des erreurs est moins importante, d'environ 10 % pour la majorité des points et pratiquement sur toute la bande de fréquences.

4.1.3 Synthèse sur l'identification du filtre de diffraction

Le filtre de diffraction a été estimé pour les deux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} . L'erreur relative moyennée sur les points M_1^Γ à M_8^Γ et celle moyennée sur les points M_9^Γ à M_{16}^Γ sont présentées à la figure 4.5. La courbe verte correspond à la configuration \mathcal{A} , les courbes rouge et noire à la configuration \mathcal{B} avec respectivement le paramètre de régularisation $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$.

Pour la configuration \mathcal{A} , la pression diffractée est correctement estimée sur l'ensemble des

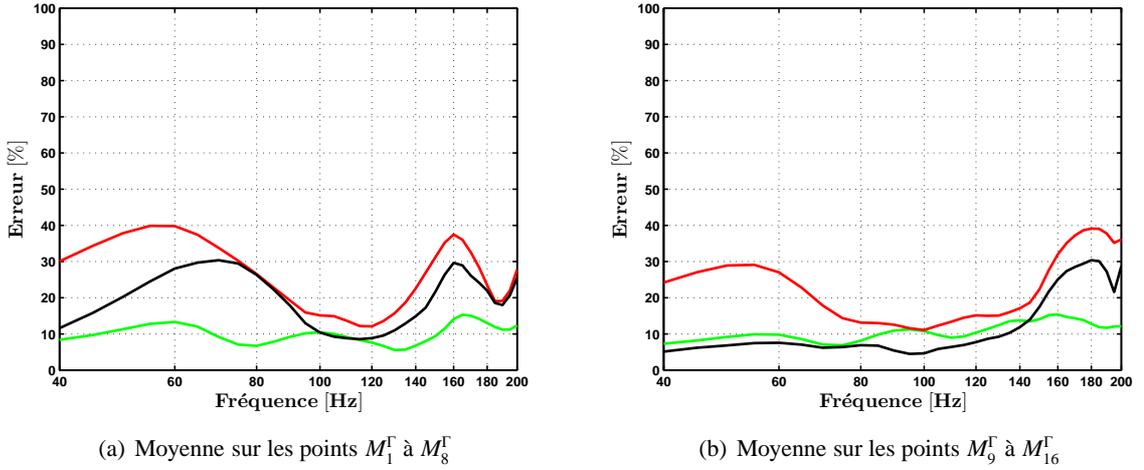


FIGURE 4.5 – Erreur relative moyennée de la pression diffractée estimée.

— : configuration \mathcal{A} , — : configuration \mathcal{B} ($\lambda = 10^{-5}$), — : configuration \mathcal{B} ($\tilde{\lambda}$)

points \mathbb{M}^Γ et dans toute la bande de fréquences. Pour la configuration \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$, la pression diffractée est moins bien estimée, hormis entre 80 et 140 Hz où l'erreur est voisine de celle de la configuration \mathcal{A} . Le choix de $\tilde{\lambda}$ permet d'obtenir des erreurs identiques à celles de la configuration \mathcal{A} , mais essentiellement pour les points M_9^Γ à M_{16}^Γ et au-dessous de 140 Hz.

L'estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Γ à partir des pressions totales en ces mêmes points est donc possible. Cependant, le choix des positions de la source d'identification reste un facteur essentiel pour une bonne estimation du filtre D . A ce stade, nous pouvons penser que le niveau des pressions diffractées étant élevé, leur contrôle apportera une réduction significative des échos dans le volume Ω ; l'étude est présentée au paragraphe suivant.

4.2 Contrôle de la pression diffractée estimée

La démarche consiste à contrôler la pression diffractée estimée sur la surface Γ afin d'annuler la pression diffractée à l'intérieur du volume Ω . Le système de contrôle actif est identique à celui utilisé pour le contrôle dans le volume Ω . Les neuf sources secondaires sont pilotées pour contrôler la pression diffractée estimée sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Γ . Les résultats avec et sans contrôle sont présentés aux points \mathbb{M}^Γ et aux points \mathbb{M}^Ω .

4.2.1 Configuration \mathcal{A}

Comme au paragraphe 3.3, les commandes appliquées aux sources secondaires sont calculées à l'aide d'une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ pour des valeurs α_k comprises entre 10^{-16} et 10. La figure 4.6(a) présente la norme de l'erreur de régularisation en fonction des valeurs du paramètre de régularisation α , et la figure 4.6(b) la norme de l'erreur pour une valeur de α en fonction des fréquences.

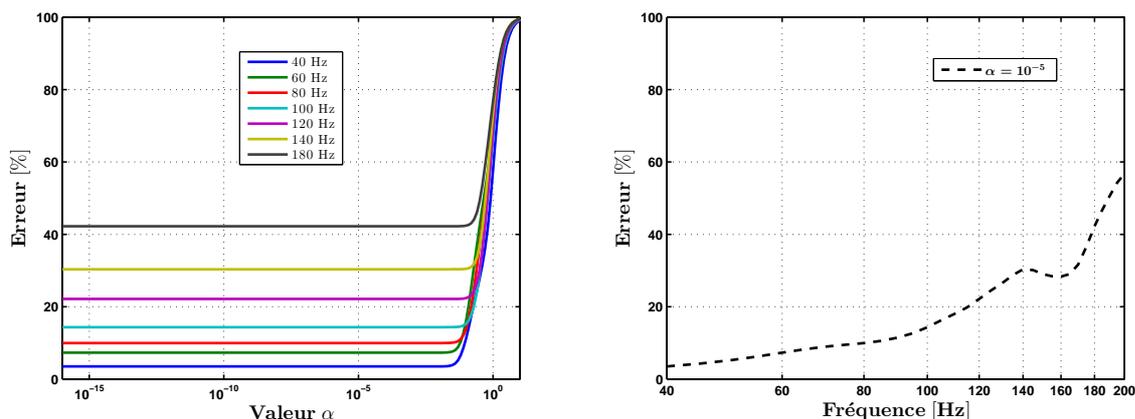


FIGURE 4.6 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée (contrôle sur Γ). Figure de gauche : pour quelques fréquences en fonction de α ; figure de droite : pour $\alpha = 10^{-5}$ en fonction des fréquences

Les résultats présentés indiquent que l'erreur de contrôle de la pression diffractée est constante pour des valeurs de α inférieures à environ 10^{-2} . D'autre part, elle augmente fortement aux fréquences supérieures à 100 Hz où le seuil de 20 % est dépassé.

Le dispositif de contrôle actif ne serait pas adapté pour un contrôle aux fréquences supérieures à 100 Hz. Des sources secondaires supplémentaires permettraient probablement de diminuer l'erreur du contrôle à ces fréquences.

Dans la suite, les commandes \tilde{U} des sources secondaires sont calculées, à chaque fréquence, avec la valeur du paramètre de régularisation $\tilde{\alpha}$ qui minimise la norme de l'erreur. Cependant, une valeur $\tilde{\alpha}$ inférieure à 10^{-4} commune à toutes les fréquences aurait a priori permis d'obtenir les mêmes résultats de contrôle.

Suivant l'équation (3.5), la prédiction du contrôle est obtenue comme la somme de la pression totale émise par la source S_0 et les pressions émises par les sources secondaires pour les valeurs de commandes \tilde{U} . Les pressions obtenues avec et sans contrôle sont présentées à la figure 4.7 aux points M_1^Γ , M_6^Γ , M_{11}^Γ et M_{14}^Γ .

Les résultats de contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ sont très satisfaisants aux fréquences inférieures à 100 Hz ; le niveau de pression avec le contrôle est quasiment identique à celui de la pression incidente. Il faut souligner l'efficacité du contrôle qui permet de réduire de forts écarts, jusqu'à 12 dB, de niveau de pression sans contrôle. Aux fréquences supérieures à 100 Hz, les résultats de contrôle se dégradent sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ et deviennent irréguliers en fonction de la fréquence. Cependant, les niveaux de pression totale avec contrôle restent majoritairement compris dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB.

La figure 4.8 présente les erreurs relatives de la pression incidente aux points \mathbb{M}^Γ pour le contrôle des pressions diffractées estimées sur la surface Γ .

Les erreurs restent faibles, voisines de 10 %, sur l'ensemble des points, pour les fréquences

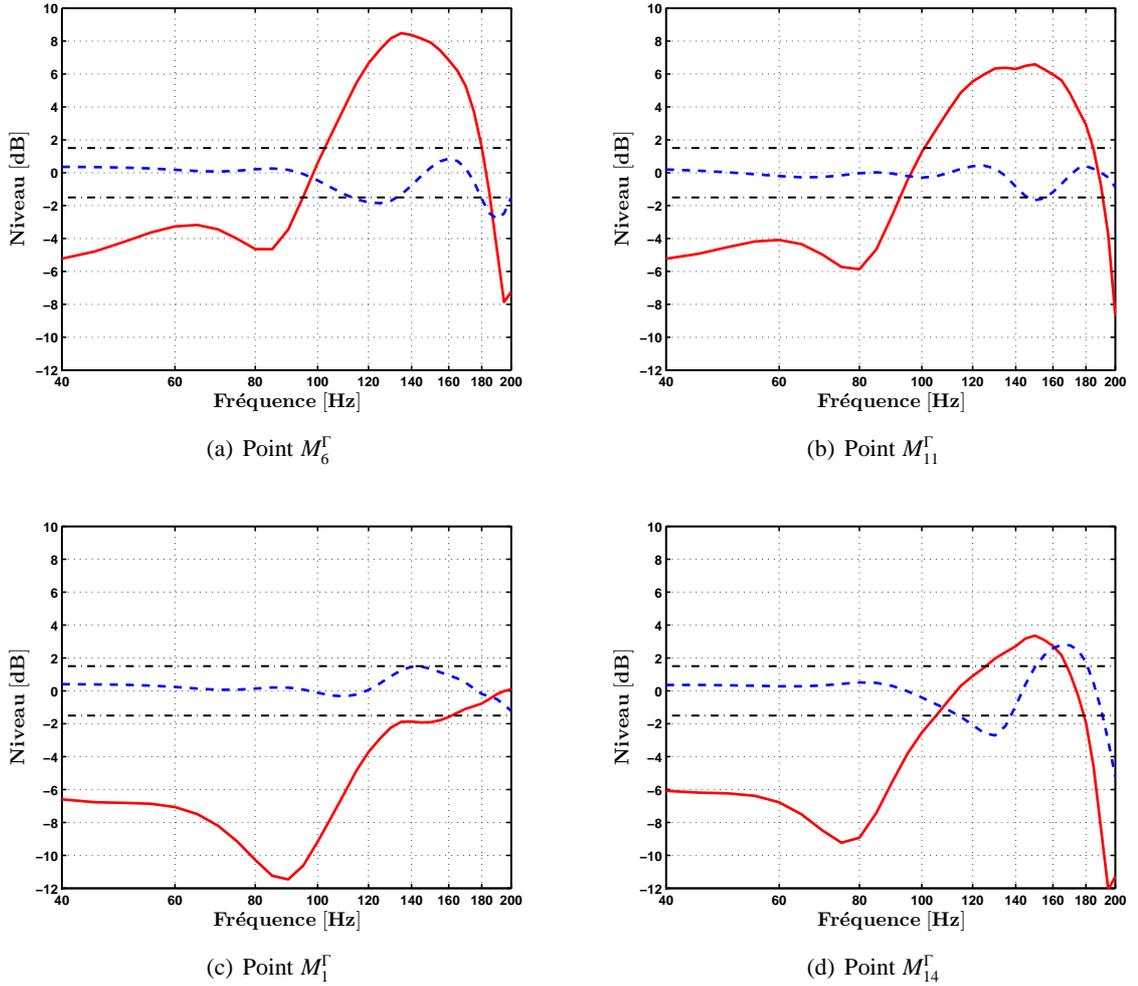
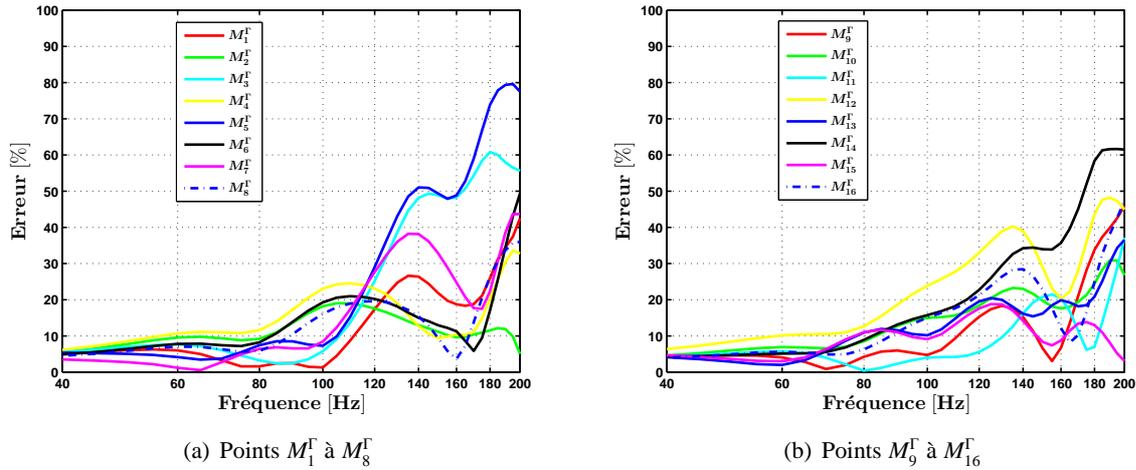


FIGURE 4.7 – Simulation de la pression totale sans et avec contrôle en Γ pour la source S_0 , aux points M^Γ ; configuration \mathcal{A} .

— : pression sans contrôle, - - - : pression avec contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

inférieures à 100 Hz. Elles augmentent aux fréquences supérieures à 100 Hz et cette augmentation est plus élevée pour les positions situées en périphérie de la surface Γ . Pourtant, d'après la figure 4.2, les erreurs d'estimation de la pression diffractée sont faibles (environ 10 %) et constantes en fonction de la fréquence et pour tous les points de Γ . C'est donc a priori l'étape de contrôle qui n'est pas efficace, ce qui signifie qu'il faudrait probablement utiliser plus de sources secondaires. Rappelons que l'espacement entre les sources secondaires est de l'ordre de 1,6 m, c'est-à-dire inférieur à la demi-longueur d'onde pour 100 Hz.

L'objectif est de vérifier l'efficacité du contrôle aux positions intérieures du volume Ω . Les niveaux de pressions obtenues dans ce cas sont présentés à la figure 4.9 aux points M_1^Ω , M_2^Ω , M_7^Ω et M_0 . Les résultats au point M_4^Ω , non présentés, sont très proches de ceux obtenus au point test M_0 . Les niveaux de pression sans et avec contrôle sont représentés respectivement par les courbes continue et discontinue.


 FIGURE 4.8 – Erreur relative de la pression incidente aux points M^Γ , configuration \mathcal{A}

Les résultats de contrôle diffèrent en fonction de la position dans le volume Ω .

Aux points M_1^Ω et M_2^Ω , proches de la paroi réfléchissante, les résultats dépendent de la fréquence, figures 4.9 (a) (b). Les niveaux de pression avec contrôle sont dégradés aux fréquences inférieures à 90 Hz et supérieures à 180 Hz ; dans la bande de fréquences 90 à 180 Hz, ils sont majoritairement compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

En M_0 , proche de la source et M_7^Ω , éloigné de la paroi réfléchissante, les niveaux de pression obtenu avec le contrôle restent à l'intérieur de l'intervalle pour toutes les fréquences ; nous pouvons noter que le contrôle sur la surface Γ n'a aucun effet aux fréquences inférieures 90 Hz.

Les résultats obtenus en M^Ω sont, a priori, surprenants car différents de ceux obtenus aux points M^Γ . En effet, le contrôle sur Γ est très satisfaisant au-dessous de 100 Hz (figures 4.7 et 4.8) et n'a pas d'efficacité aux points M^Ω ; une des causes pourrait être l'influence des cinq autres parois. De même, les niveaux obtenus avec contrôle, au-dessus de 100 Hz, sont majoritairement compris dans l'intervalle aux points M^Ω alors que le contrôle sur Γ est médiocre à ces fréquences (figures 4.7 et 4.8).

La figure 4.10 présente l'erreur relative de la pression obtenue avec contrôle aux points du volume Ω .

Les résultats, présentés à la figure 4.10(a), indiquent des erreurs de pressions incidentes inférieures à 20 %, sur la majorité des positions dans le volume Ω dont la position M^0 et dans toute la bande de fréquence. Seules les positions proches de la paroi M_1^Ω à M_2^Ω ont des erreurs élevées aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 180 Hz. Les erreurs de pression à la position M_3^Ω sont aussi légèrement supérieures à 20 % au-dessous de 60 Hz mais identiques à celles de M_1^Ω et M_2^Ω aux fréquences supérieures à 180 Hz.

D'autre part, l'amplitude des commandes des sources secondaires présentée à la figure 4.10(b) est globalement très faible, autour de 0,1, sur toute la bande de fréquence. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les niveaux des pressions diffractées sont élevés mais que les sources secondaires sont plus proches des positions à contrôler. L'amplitude des commandes varie peu

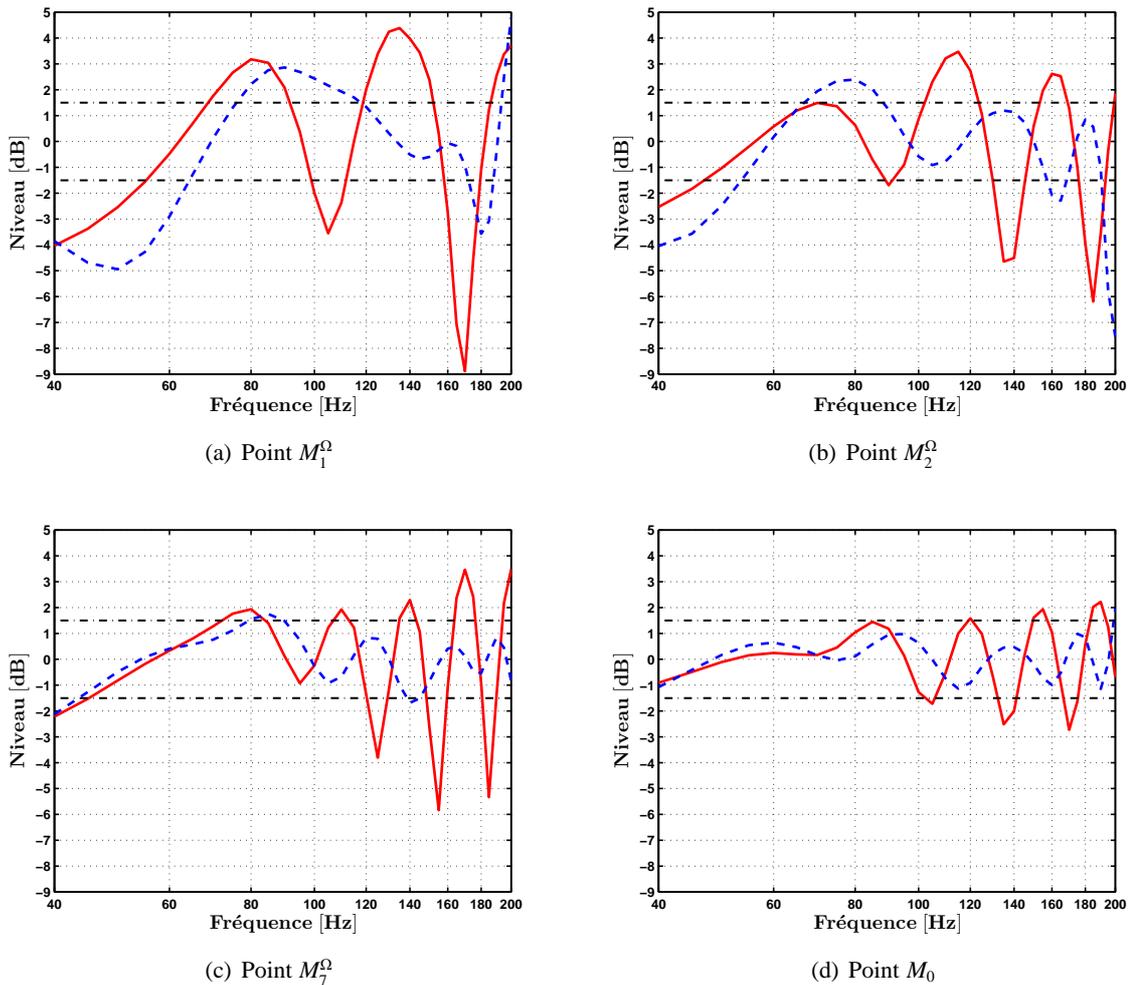


FIGURE 4.9 – Simulation de la pression totale sans et avec contrôle en Γ pour la source S_0 , aux points M^Ω ; configuration \mathcal{A} .

— : pression sans contrôle, - - - : pression avec contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

entre 90 et 140 Hz ; les écarts augmentent avec les fréquences croissantes au-dessus de 140 Hz et les fréquences décroissantes au-dessous de 90 Hz.

Bilan : le contrôle réalisé sur la surface Γ est très satisfaisant sur l'ensemble des points M^Γ en-dessous de 100 Hz. Les résultats se dégradent légèrement au-dessus de 100 Hz et essentiellement aux points M^Γ situés en périphérie ; le dispositif de contrôle actif serait mal adapté.

Cependant, les résultats observés aux positions dans le volume Ω sont satisfaisants sur toute la bande de fréquence, à partir de la position M_3^Ω située à 2,7 m de la surface Γ contrôlée ; il est important de noter que le contrôle en Γ est inefficace aux fréquences inférieures à 80 Hz pour toutes les positions M^Ω .

L'influence des autres parois pourrait être de l'inefficacité du contrôle au-dessous de 80 Hz. Par contre, au-dessus de 100 Hz, la densité spatiale des positions contrôlées sur la surface Γ

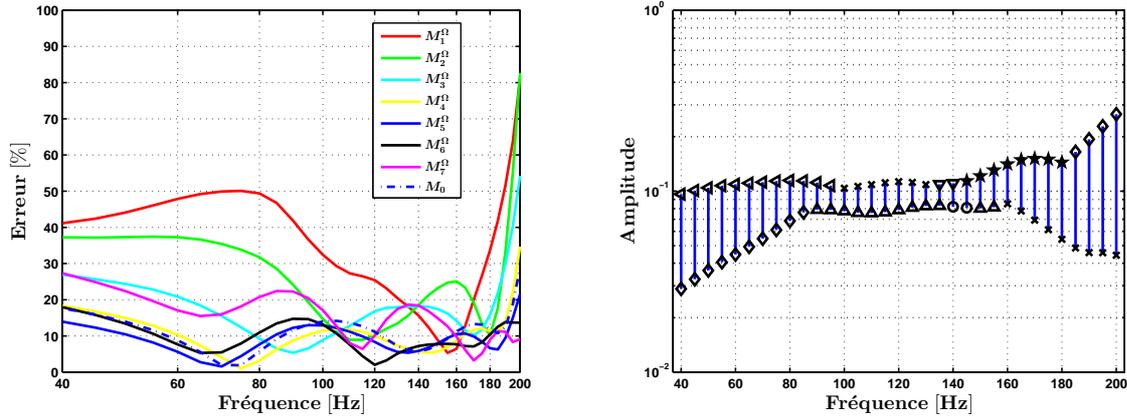

 (a) Erreur relative de la pression incidente aux points M^Ω (b) Amplitude des commandes des sources secondaires

FIGURE 4.10 – Erreur relative de la pression incidente ; amplitude des commandes des sources secondaires, contrôle en surface Γ (configuration \mathcal{A}).

S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft

serait suffisante pour contrôler la pression diffractée dans le volume Ω . Mais l'interprétation de ces résultats sur un nombre non exhaustif de points du volume Ω ne peut être pertinente. Pour approfondir le comportement de ce contrôle, une étude a été réalisée sur un plus grand nombre de points répartis dans le volume ; les résultats sont présentés au chapitre 6.

4.2.2 Configuration \mathcal{B}

Pour cette configuration de positions de la source d'identification, la pression diffractée aux points M^Γ a été estimée à partir des deux valeurs du paramètre de régularisation $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$. Pour le contrôle, la valeur de α est choisie comme précédemment. Les erreurs sur le contrôle de la pression diffractée estimée et les valeurs du paramètre de régularisation α sont très proches de ceux de la configuration \mathcal{A} . Les commandes \tilde{U} sont calculées avec cette valeur $\tilde{\alpha}$ pour chaque fréquence. Les erreurs sur la pression incidente sont présentées et comparées au paragraphe suivant.

Les niveaux de pression obtenue avec et sans contrôle sont présentés à la figure 4.11 pour les points M_1^Ω , M_2^Ω , M_7^Ω et M_0 . Les courbes discontinues bleue claire et bleue foncée correspondent respectivement aux pressions diffractées estimées avec les valeurs du paramètre de régularisation $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$.

Le comportement du contrôle réalisé sur la surface Γ , et observé aux points du volume Ω , est très comparable à celui obtenu avec la configuration \mathcal{A} ; les niveaux de pression sont compris dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB pour toutes les fréquences, à partir de la position M_3^Ω . Les différences de contrôle obtenues avec les valeurs $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$ observées aux points du volume Ω sont faibles et apparaissent essentiellement aux positions proches de la paroi et pour quelques fréquences.

Les comparaisons montrent que, dans ce cas, l'influence du paramètre de régularisation λ

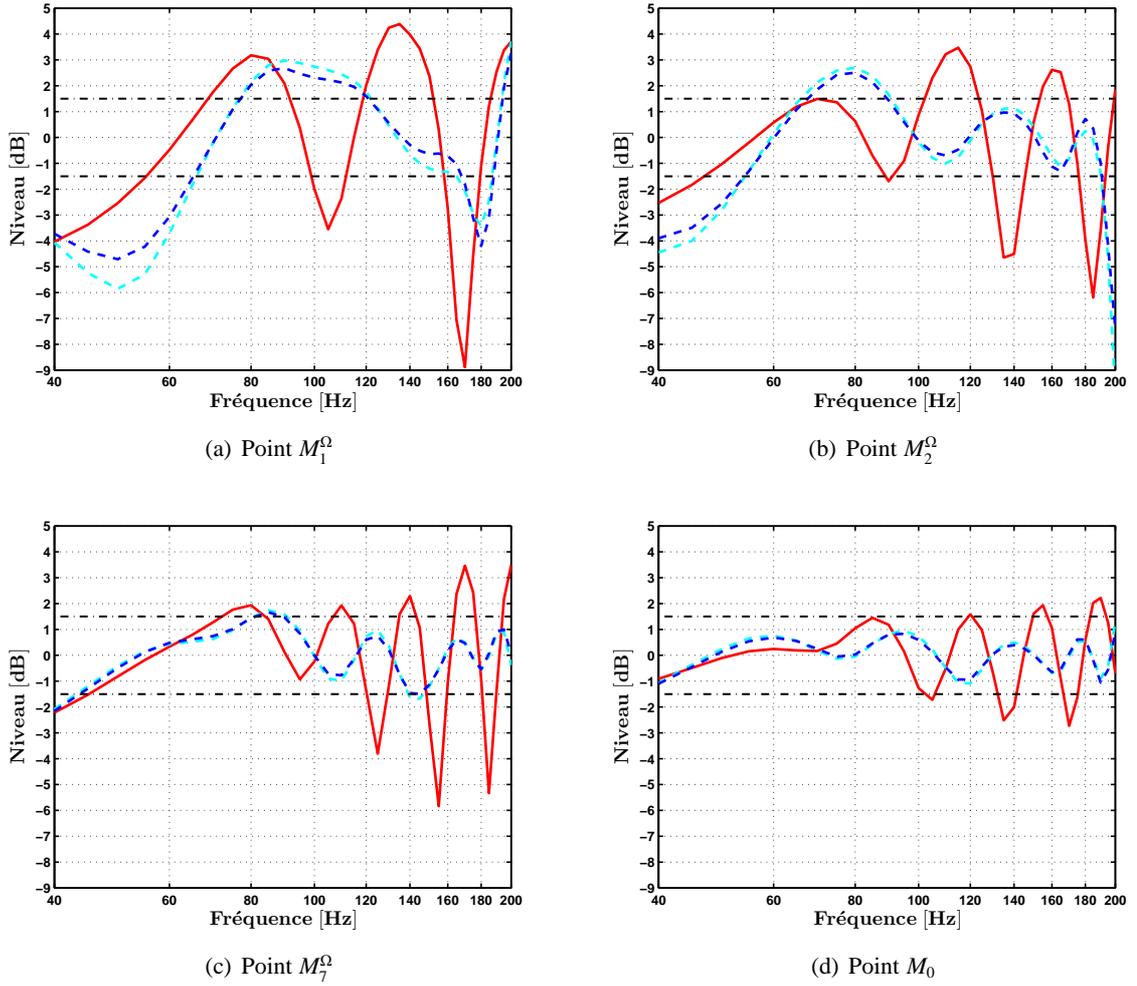


FIGURE 4.11 – Simulation de la pression totale sans et avec contrôle en Γ pour la source S_0 , aux points M^Ω ; configuration \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$.

— : pression sans contrôle, - - - : pression avec contrôle ($\tilde{\lambda}$), - - - : pression avec contrôle ($\lambda = 10^{-5}$), - - - : limite $\pm 1,5$ dB

est faible sur l'efficacité du contrôle obtenu dans le volume Ω .

4.2.3 Efficacité du contrôle pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B}

Nous présentons, dans ce paragraphe, une comparaison des erreurs sur la pression incidente pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} obtenues aux points M^Γ et M^Ω .

Aux points M^Γ , les erreurs relatives sont moyennées : points M_1^Γ à M_8^Γ pour la figure 4.12(a) et points M_9^Γ à M_{16}^Γ pour la figure 4.12(b). La courbe verte représente les résultats de la configuration \mathcal{A} . Les courbes rouge et noire représentent respectivement les résultats de la configuration \mathcal{B} obtenus avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$.

Aux fréquences supérieures à 100 Hz, les erreurs sur les pressions incidentes augmentent sur l'ensemble des points M^Γ et pour les trois configurations. Nous ne retrouvons pas la tendance

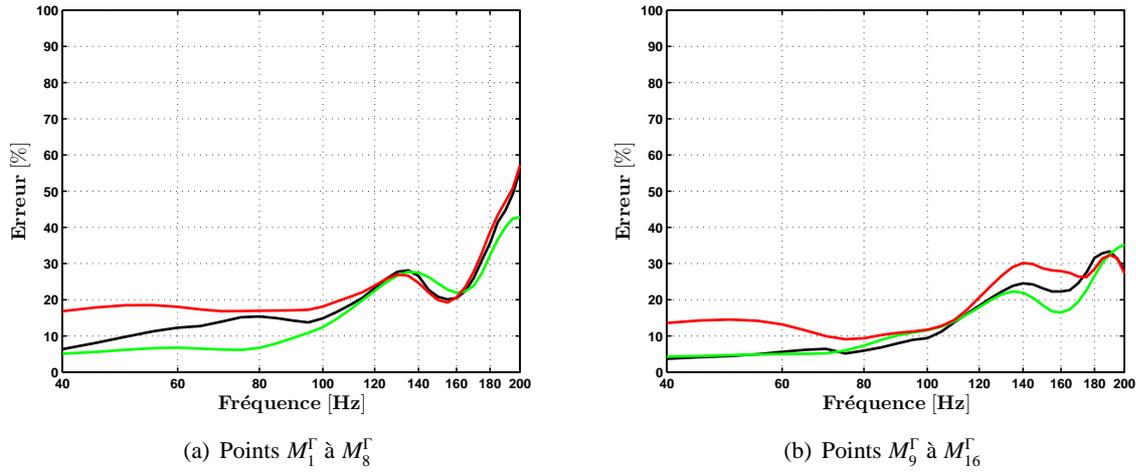


FIGURE 4.12 – Erreur relative moyenne sur la pression incidente aux points M^Γ ; configuration \mathcal{A} et \mathcal{B} .

— : configuration \mathcal{A} , — : configuration \mathcal{B} ($\lambda = 10^{-5}$), — : configuration \mathcal{B} ($\tilde{\lambda}$)

vue sur la figure 4.5, où la configuration \mathcal{A} fournit une meilleure estimation de la pression diffractée. Par ailleurs, nous avons vu, à la figure 4.6, une forte augmentation de l'erreur sur le contrôle de la pression diffractée en fonction de la fréquence.

Ces observations dans cette bande de fréquences indiquent que les erreurs de la pression incidente aux points M^Γ sont essentiellement dues aux erreurs sur le contrôle de la pression diffractée.

Aux fréquences inférieures à 100 Hz, les erreurs sur les pressions incidentes varient peu en fonction de la fréquence mais diffèrent en fonction de la configuration. Nous avons vu à la figure 4.5 que l'erreur d'estimation de la pression diffractée varie en fonction des configurations ; le comportement de ces variations est très proche de celui observé sur la figure 4.12.

Ces observations dans cette bande de fréquences montrent que les erreurs de contrôle aux points M^Γ sont essentiellement dues aux erreurs d'estimation de la pression diffractée.

La figure 4.13 présente les erreurs relatives des pressions incidentes aux points M_1^Ω , M_2^Ω , M_7^Ω et M_0 , pour les configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} .

Pour la majorité des points, les erreurs dépendent peu de la configuration. De faibles différences entre les configuration \mathcal{A} et \mathcal{B} apparaissent aux points M_1^Ω et M_2^Ω ; les résultats obtenus avec la configuration \mathcal{A} sont un peu meilleurs, à toutes les fréquences, sauf autour de 160 Hz en M_2^Ω . Par contre, les écarts d'erreurs entre les différentes configurations, observés aux points de la surface Γ au-dessous de 100 Hz (figure 4.12), ne sont pas reproduits aux points de Ω .

Bilan : l'efficacité du contrôle en Γ obtenue aux points M^Ω pour ces 3 configurations sont très proches ; l'influence des positions de la source d'identification et du paramètre λ est faible. Les erreurs par rapport à la pression incidente aux points M^Γ dépendent très peu des erreurs d'estimation de la pression diffractée, hormis aux fréquences inférieures à 100 Hz.

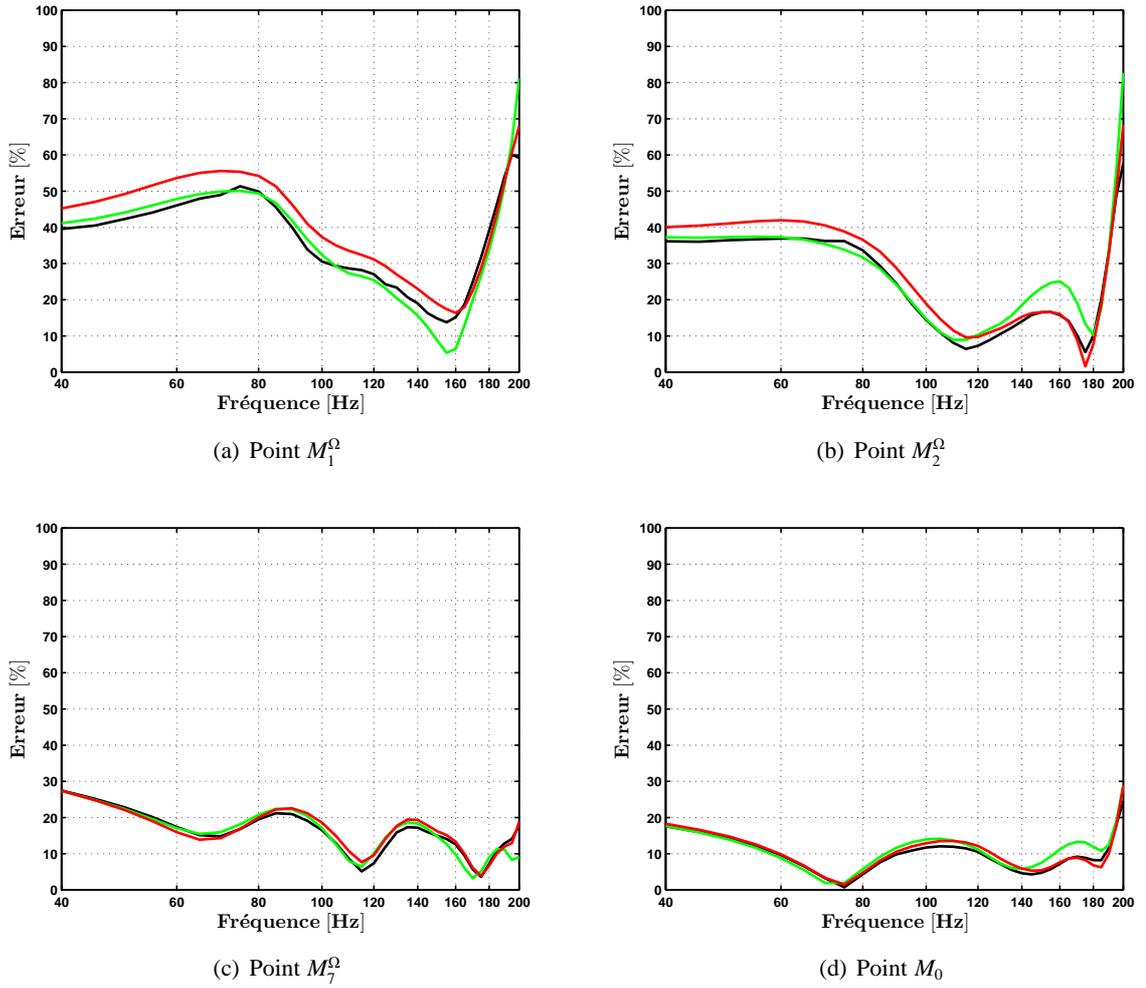


FIGURE 4.13 – Erreur relative de la pression incidente aux positions du volume Ω , pour le contrôle de la pression diffractée sur la surface Γ .

— : configuration \mathcal{A} , — : configuration \mathcal{B} ($\lambda = 10^{-5}$), — : configuration $\mathcal{B}(\tilde{\lambda})$

D'autre part, les erreurs du contrôle de la pression diffractée augmentent fortement aux fréquences supérieures à 100 Hz mais entraînent uniquement des erreurs aux points M^Γ ; le niveau de pression avec contrôle est compris dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB pour les positions dans le volume, de coordonnée X supérieure à 2,5 m.

4.3 Synthèse du contrôle dans le volume Ω et en surface Γ

La figure 4.14 présente les erreurs relatives par rapport à la pression incidente aux points M_1^Ω , M_7^Ω et M_0 pour un contrôle dans Ω (courbe continue) et pour un contrôle sur Γ (courbe discontinue). Les résultats correspondent à la configuration \mathcal{A} .

Les résultats du contrôle dans le volume Ω indiquent de faibles erreurs par rapport à la pression incidente aux points contrôlés, avec cependant de fortes erreurs au point test M_0 , pourtant proche du point contrôlé M_4^Ω ; le contrôle est localisé uniquement aux points contrôlés.

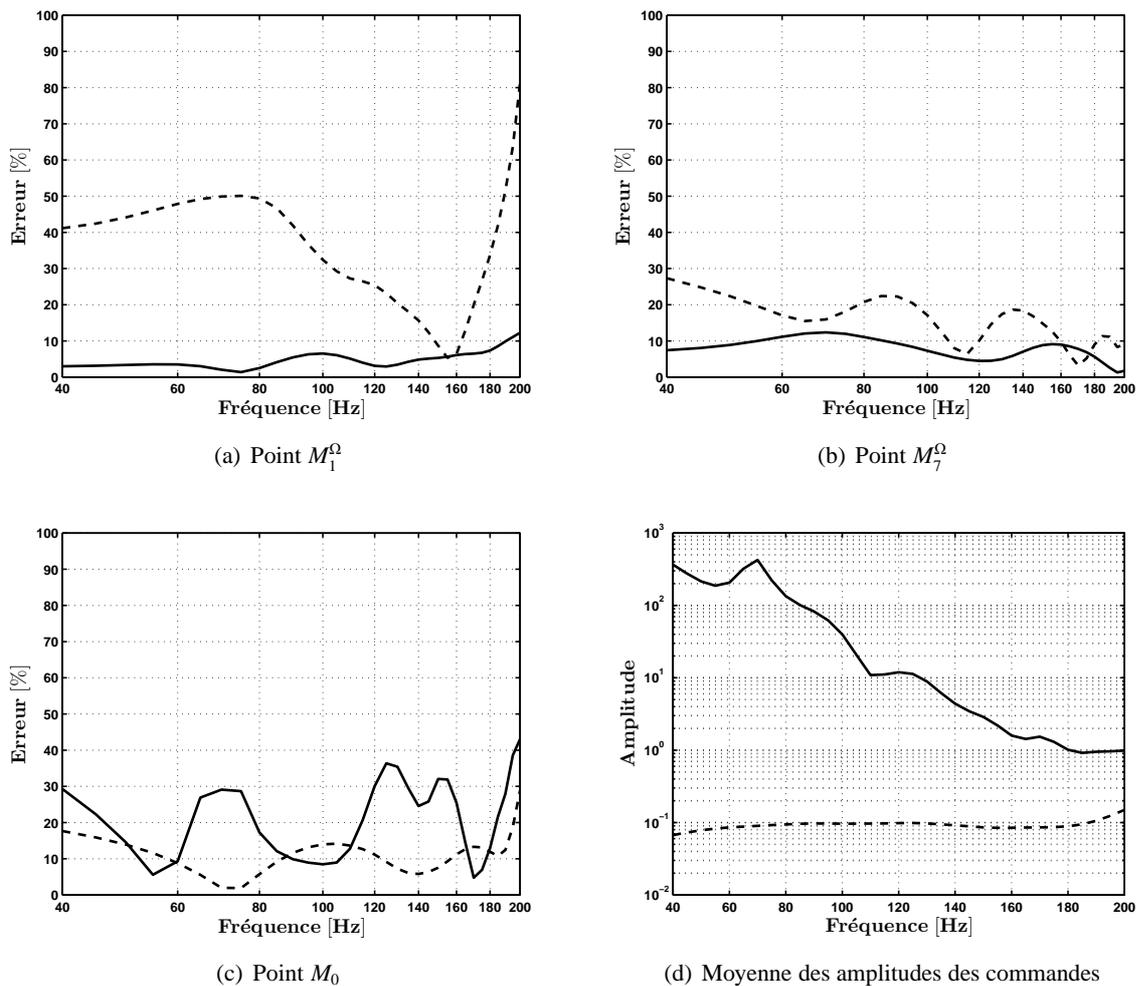


FIGURE 4.14 – Comparaison des erreurs relatives sur la pression incidente aux points du volume Ω , pour un contrôle dans le volume Ω et un contrôle en surface Γ ; la moyenne des amplitudes des commandes des sources secondaires (configuration \mathcal{A}).

— : contrôle dans le volume Ω , — — : contrôle sur la surface Γ

D'autre part, l'estimation de la pression diffractée dépend fortement du choix des positions de la source d'identification mais n'a qu'un faible impact sur l'efficacité du contrôle aux points contrôlés.

Il est intéressant de noter que les amplitude des commandes des sources secondaires sont très élevées et pourraient entraîner une augmentation du niveau sonore global.

Les résultats du contrôle sur la surface Γ indiquent de faibles erreurs par rapport à la pression incidente pour les points du volume Ω éloignés de la surface contrôlée Γ . Au-dessous de 100 Hz, les erreurs observées aux positions proches de la surface Γ pourraient être dues aux conditions d'admittance des cinq autres parois. Le fait que le contrôle soit réalisé sur une seule paroi ne suffirait pas à annuler les réflexions sur les autres parois.

D'autre part, l'estimation de la pression diffractée dépend très peu du choix des positions de la source d'identification.

Il est intéressant de noter que les amplitudes des commandes des sources secondaires sont faibles et constantes en fonction de la fréquence, voir figure 4.14(d).

En résumé, le résultat du contrôle en quelques points du volume (quand on contrôle 7 points simultanément) est très bon en chacun des points contrôlés mais pas au point test ; de plus les amplitudes des commandes sont très élevées alors que les erreurs sur le contrôle de la pression diffractée sont négligeables. L'efficacité du contrôle sur les points de la surface Γ est moins bon aux points du volume proche de la paroi réfléchissante mais meilleur au point test ; les commandes sont beaucoup moins élevées mais l'erreur sur le contrôle de la pression diffractée augmente avec la fréquence. Des simulations supplémentaires sont présentées au chapitre 6 afin d'observer l'efficacité de ces deux cas de contrôle sur une grille de points placés dans le volume Ω .

Ces deux types de contrôles ont été testés expérimentalement ; la campagne de mesures et les résultats sont décrits chapitre suivant.

Chapitre 5

Descriptif de l'expérience d'anéchoïcité active

Sommaire

5.1	Introduction	68
5.2	La source de référence \tilde{S}	68
5.2.1	Estimation de la directivité	70
5.2.2	Vérification de l'estimation	72
5.3	Caractéristique de la salle semi-anéchoïque	74
5.4	Le dispositif de contrôle actif	77
5.4.1	Sources secondaires	78
5.4.2	Les microphones	79
5.4.3	Le système d'acquisition	80
5.5	Méthode	80
5.5.1	Identification du filtre de diffraction	81
5.5.2	Contrôle de la diffraction	81

La validation expérimentale des simulations précédentes est maintenant envisagée afin d'étayer le principe et les hypothèses sous-jacentes à l'anéchoïcité active. Par rapport aux simulations, qui permettent de maîtriser assez bien les hypothèses de travail, la validation expérimentale se heurte à de nombreuses difficultés pratiques qui peuvent la rendre plus ou moins probante.

5.1 Introduction

Ce chapitre vise ainsi à mettre en évidence les qualités et limitations du montage utilisé, afin de bien comprendre la portée des résultats qui en seront issus. Parmi eux, un des plus critique est la source de référence \tilde{S} . Les caractéristiques de la salle elle-même sont également importantes car elles ne peuvent pas répondre complètement aux hypothèses envisagées (chapitre 2). Il est donc important, lors de la comparaison des résultats de mesure aux simulations, d'avoir conscience des caractéristiques réelles de la salle où ont été effectuées les mesures. Enfin, les outils de traitement du signal utilisés ont dû être développés spécifiquement ; leurs limitations seront aussi évoquées.

Le principe, déjà décrit pour les simulations, est de traiter par une installation active la paroi réfléchissante d'une salle semi-anéchoïque. Celle-ci a été choisie pour plusieurs raisons déjà évoquées, mais sa disponibilité sur plusieurs mois et sa configuration géométrique assez particulière étaient des facteurs importants. La figure 5.1 illustre le montage expérimental au sein de la salle utilisée.

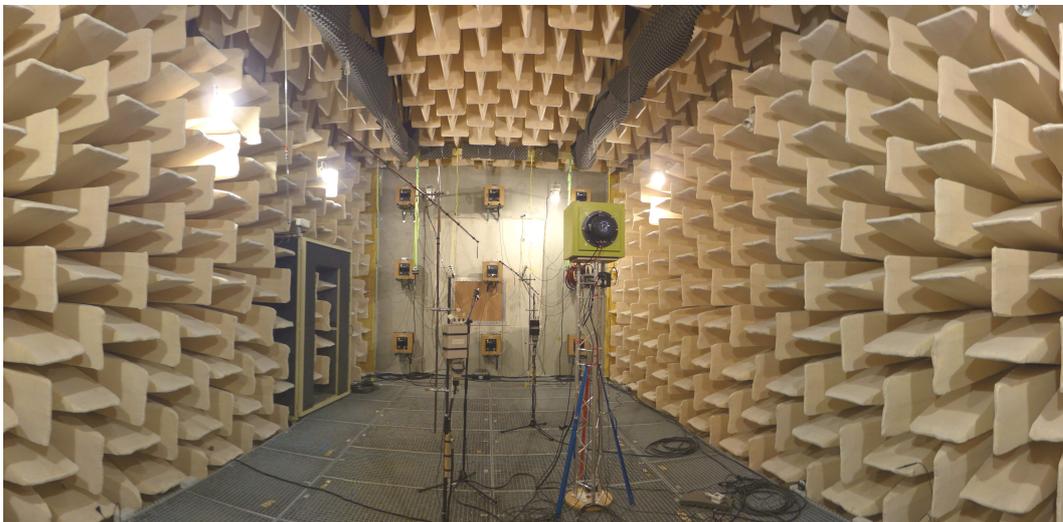


FIGURE 5.1 – Expérience d'anéchoïcité active dans la salle semi-anéchoïque du LMA (GLM)

5.2 La source de référence \tilde{S}

Le principe de la méthode décrite dans ce travail nécessite l'utilisation d'une source dite "de référence" (désignée par \tilde{S}), utilisée lors de toutes les campagnes de mesures. Dans un pre-

mier temps, elle doit permettre l'identification du filtre de diffraction D , avant d'être à nouveau utilisée comme source « à caractériser » avec un contrôle actif de la pression diffractée. Sa conception doit donc permettre de bien en connaître la pression rayonnée, notamment pour estimer la pression diffractée à partir de mesures de pression incidente lors de l'étape d'identification du filtre de diffraction, voir chapitre 2. De plus, ce rayonnement devrait être aussi proche que possible de celui d'un monopôle afin de faciliter la comparaison avec les simulations. Enfin, elle doit être capable de générer une pression suffisante, y compris aux basses fréquences, afin que les signaux de mesure soient de bonne qualité.

La conception de la source utilisée, représentée à la figure 5.2, repose sur le montage de deux haut-parleurs en "push-pull". Les deux membranes se déplacent avec des vitesses identiques mais de sens opposé ; leurs débits acoustiques se combinent approchant une source monopolaire. Les deux haut-parleurs partagent un même volume de charge, très étanche, de 37,5 litres. Ce volume est plutôt petit par rapport aux haut-parleurs utilisés ; cela contribue à coupler les mouvements des membranes et donc à symétriser le rayonnement. De plus, ce volume peut être considéré comme isobare sur une grande partie de la gamme de fréquences. Un microphone est placé au centre géométrique du volume, permettant de déterminer indirectement le débit acoustique de la source et donc la pression rayonnée en champ libre. De plus amples détails sont présentés en annexe B.



FIGURE 5.2 – Source de référence \tilde{S}

A partir de cette estimation de débit Q_s , il est possible de déduire la pression incidente P_{inc} correspondant à la pression rayonnée en champ libre. En assimilant notre source \tilde{S} à une source ponctuelle omnidirectionnelle située au point S , cette pression incidente est classiquement obtenue au point M à partir de la relation suivante :

$$P_{inc}(S, M) = i\omega\rho_0 Q_s \frac{e^{-ikr(S, M)}}{4\pi r(S, M)} \quad (5.1)$$

où $r(S, M)$ est la distance entre S et M .

Pour vérifier la performance de la source \tilde{S} , deux séries de mesures ont été réalisées en salle anéchoïque. La figure 5.3 présente les configurations de mesures, en vue de dessus.

La première série de mesures consiste à estimer la directivité de la source \tilde{S} : la source, représentée par un rond noir, est posée sur une table tournante et les mesures de pression sont effectuées, dans un plan horizontal, au point M_0 représenté par le rond rouge.

La deuxième série de mesures consiste à vérifier l'estimation de la directivité : la source reste fixe à la position M_0 et les mesures de pression sont effectuées sur un axe parallèle à l'une des parois de la salle, aux points représentés par les croix bleues. Les détails des deux expériences sont décrits en annexe C.

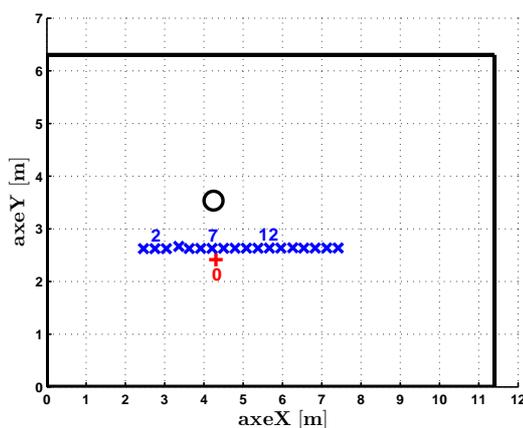


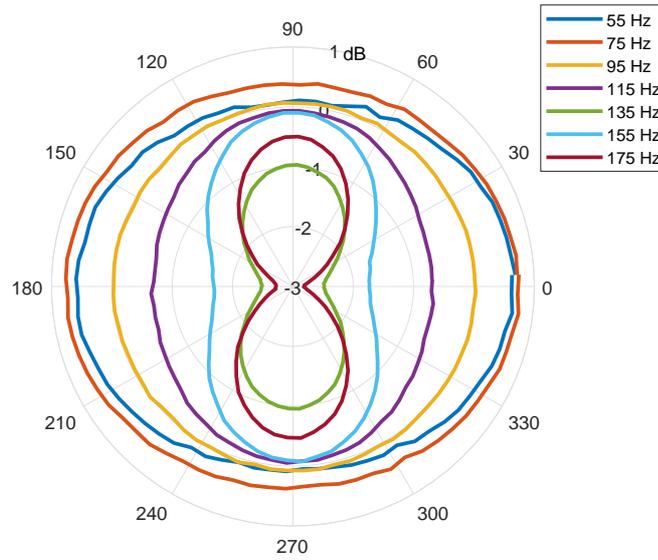
FIGURE 5.3 – Positions des microphones et de la source \tilde{S} dans la salle anéchoïque.
 \circ : source \tilde{S} , $+$ et \times : microphones

5.2.1 Estimation de la directivité

La figure 5.4 présente les diagrammes de directivité de la source \tilde{S} pour des fréquences comprises entre 55 et 175 Hz. Les résultats sont présentés sous la forme de réponses en fréquence normalisées par rapport à la pression incidente P_{inc} , estimée d'après la relation 5.1. Ces courbes représentent donc simultanément l'erreur d'estimation dans l'axe et sa variation en fonction de l'orientation angulaire de la source. L'angle θ est ici défini par rapport à l'axe passant par le centre des membranes des deux haut-parleurs.

Les plus faibles écarts sont obtenus aux basses fréquences, entre 55 et 95 Hz. Pour ces fréquences, la relation 5.1 surestime légèrement la mesure, mais avec un écart toujours inférieur à 0,5 dB. Les variations angulaires du niveau de pression sont encore plus faibles ; la source \tilde{S} peut donc être assimilable à un monopôle à ces fréquences.

A partir de 115 Hz, les écarts sont plus importants. La source tend à rayonner plus efficacement dans le plan perpendiculaire à son axe, où les contributions des deux haut-parleurs sont en phase. Inversement, la pression dans l'axe est réduite par rapport au modèle monopolaire ; l'écart dans l'axe atteignant presque 3 dB à 175 Hz alors qu'il reste autour de 1 dB sur les côtés. À ces fréquences, la source \tilde{S} n'est donc qu'approximativement assimilable au monopôle

FIGURE 5.4 – Diagramme de directivité de la source \tilde{S} pour quelques fréquences

théorique, présentant à la fois une légère décroissance du niveau de pression avec la fréquence et une directivité croissante avec la fréquence.

Par contre, la symétrie des niveaux de pression par rapport à l'origine du diagramme de directivité semble indiquer que le centre géométrique de la source est raisonnablement assimilable à son centre acoustique.

Ces résultats permettent d'évaluer, pour la source \tilde{S} , un coefficient de correction $L(\theta)$ de la pression incidente estimée d'après la relation 5.1 ; le coefficient $L(\theta)$ sera appelé le coefficient de directivité dans la suite du manuscrit. La pression estimée au point M_O peut être exprimée sous la forme :

$$P_{tot}(\tilde{S}, M_O, \theta) = i\omega\rho_0 Q_s \frac{e^{-ikr(\tilde{S}, M_O)}}{4\pi r(\tilde{S}, M_O)} L(\theta) = P_{inc}(\tilde{S}, M_O) L(\theta) \quad (5.2)$$

Le coefficient de directivité $L(\theta)$ de la source \tilde{S} peut donc être obtenu empiriquement à partir des mesures de pression totale suivant l'expression :

$$L(\theta) = \frac{P_{tot}(\tilde{S}, M_O, \theta)}{P_{inc}(\tilde{S}, M_O)} \quad (5.3)$$

L'expression (5.3) permet d'obtenir une estimation de la pression rayonnée par la source \tilde{S} , avec l'hypothèse que le rayonnement ne dépend que de la distance $r(S, M)$ et de l'angle θ . Le coefficient de directivité $L(\theta)$ a été obtenu à une distance d'environ 1 m de la source dont l'enceinte fait environ 40 cm de côté. En supposant que cette distance corresponde au champ lointain de la source, la variation avec $r(S, M)$ devrait être correctement décrite par la relation 5.1.

5.2.2 Vérification de l'estimation

Aux basses fréquences, la dimension de la source n'est cependant pas le seul facteur gouvernant la notion de champ lointain, et la caractérisation de la source a été effectuée dans une salle qui n'est pas parfaitement anéchoïque. Il est donc nécessaire de vérifier la validité de l'estimation corrigée obtenue précédemment.

Une deuxième série de mesures a ainsi consisté à mesurer la pression émise par la source \tilde{S} en 18 points répartis sur un axe horizontal (figure 5.3). Nous présentons ici uniquement les mesures réalisées aux points notés M_2 , M_7 et M_{12} ; des mesures supplémentaires sont présentées en annexe C.

Pour ces points, le tableau 5.1 précise les distances à la source \tilde{S} et les angles θ mesurés entre l'axe de la source et la position du microphone au point M_i . Ainsi, le point M_2 est le plus proche de la porte de la salle, le point M_7 est le plus proche de M_0 (point utilisé pour la mesure de directivité), et M_{12} est un point à peu près symétrique à M_2 par rapport à M_7 .

Point	M_2	M_7	M_{12}
Distance r	1,765 m	0,957 m	1,714 m
Angle θ	147°	92°	34°
Hauteur z	1,319 m	1,262 m	1,248 m

TABLE 5.1 – Distances et angles entre la source \tilde{S} et le microphone aux points (M_2 , M_7 , M_{12})

La figure 5.5 présente, pour chaque fréquence, le niveau de pression P^{norm} estimé à ces 3 points. Il s'agit des pressions mesurées P_{tot} , normalisées par les pressions estimées au point M_i en prenant en compte le coefficient de directivité déterminé précédemment :

$$P^{norm}(\tilde{S}, M_i, \theta) = \frac{P_{tot}(\tilde{S}, M_i, \theta)}{P_{inc}(\tilde{S}, M_i)L(\theta)} \quad (5.4)$$

En s'inspirant de la norme ISO 3745, les niveaux en décibels représentés sur la figure 5.5 peuvent s'écrire suivant la relation (5.5) exprimant la compensation d'une mesure de source inconnue par celle d'une mesure de référence :

$$N_t(\tilde{S}, M_i, \theta) = N_m(\tilde{S}, M_i, \theta) - N_m(\tilde{S}, M_0, \theta) - 20 \log \left| \frac{r(\tilde{S}, M_0)Q_s^i}{r(\tilde{S}, M_i)Q_s^0} \right| \quad (5.5)$$

où N_t et N_m représentent respectivement les niveaux tracés et les niveaux de pression mesurés. La pression de référence est ici obtenue à partir de la première série de mesures au point M_0 . La pression "inconnue" est estimée pour chaque nouvelle mesure, à partir du débit acoustique Q_s^i issu de la mesure de pression interne.

Dans le cas d'une source omnidirectionnelle en champ libre et dont le centre acoustique est

bien connu, le niveau N_i devrait être égal à 0 dB quel que soit le point M_i . La relation (5.5) est ainsi utilisée pour valider le comportement acoustique d'une salle de mesure ; si les courbes obtenues sont comprises dans un intervalle de $\pm 1,5$ dB en basses fréquences (< 630 Hz), la salle est considérée comme anéchoïque.

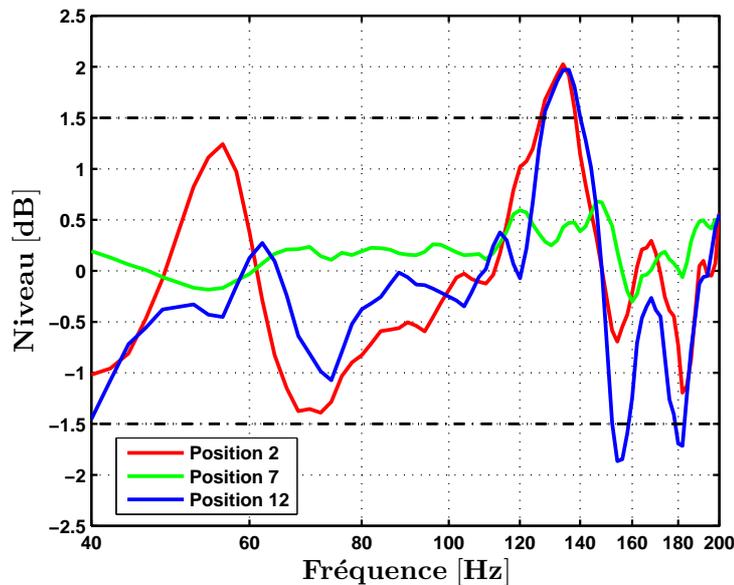


FIGURE 5.5 – Mesure de niveaux aux points M_2 , M_7 et M_{12}

Les résultats présentés sur la figure 5.5 montrent que les niveaux obtenus au point M_7 sont très proches de ceux du point M_0 compris dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB. Compte tenu de la proximité des points M_7 et M_0 , ce résultat indique une bonne répétabilité des mesures effectuées à des moments différents. Par contre, les courbes pour les points M_2 et M_{12} présentent des tendances similaires, beaucoup plus accidentées. Elles sortent en particulier de l'intervalle à $\pm 1,5$ dB autour de 135 Hz pour les deux points et autour de 155 et 180 Hz pour le point M_{12} .

Ces écarts résultent, au moins en partie, de défauts de la salle anéchoïque déjà connus. Tout d'abord, la fréquence de coupure indiquée lors de la mise en place des dièdres est de 75 Hz et peut expliquer les écarts autour de 55 Hz. Par ailleurs, des défauts de cette salle ont été mis en évidence par des séries de mesures sur plusieurs axes de la salle. Par exemple, l'étude décrite dans [2] a mis en évidence, pour des fréquences supérieures à cette fréquence de coupure, des zones où apparaissent des effets d'interférences. Lors d'une comparaison de différentes méthodes de mesure ([1], figure 3), des résonances autour de 55 Hz et 130 Hz avaient également été identifiées dans cette salle, conduisant à des écarts pouvant atteindre 3 dB à une distance de mesure de 2 m (un peu supérieure à celle des points M_2 et M_{12}). La mesure supplémentaire au point M_{16} , présentée en annexe C, confirme ces observations.

D'autres phénomènes peuvent être invoqués pour expliquer les écarts par rapport au niveau

de référence ; écarts qui restent importants en dehors des défauts connus et plutôt similaires pour des points symétriques. En particulier, l'hypothèse de décroissance du niveau avec la distance pourrait être discutable aux fréquences basses. La forme parallélépipédique de la source (non axisymétrique) pourrait aussi entraîner des phénomènes de diffraction perturbant l'estimation du champ acoustique à certaines fréquences.

Les incertitudes découlant de ces différents phénomènes sont difficiles à évaluer précisément ; il est en particulier difficile de différencier les écarts relevant de la salle anéchoïque des erreurs relevant de la source ou des incertitudes de mesure. C'est un aspect paradoxal du travail sur l'anéchoïcité active, où la salle et la source de référence sont deux problèmes interdépendants.

5.3 Caractéristique de la salle semi-anéchoïque

Les écarts constatés précédemment dans l'estimation de la pression rayonnée par la source \tilde{S} semblent acceptables jusqu'à environ 150 Hz. En admettant que la salle anéchoïque est responsable des écarts autour de 55 Hz et 135 Hz, nous pouvons donc utiliser cette source pour analyser le comportement de la salle semi-anéchoïque où seront menées les expérimentations d'anéchoïcité active.

Généralement les salles semi-anéchoïques sont conçues avec un sol non traité acoustiquement afin de traiter des problèmes industriels (bruit de véhicule, moteurs, ..). La particularité de cette salle semi-anéchoïque est que sa paroi réfléchissante est verticale. Cette paroi est en effet mitoyenne avec la salle anéchoïque et comportait une trappe communicante qui a été maçonnée pour l'expérience. Le sol de la salle est aussi équipé d'un plancher en caillebotis (difficilement démontables), situé à environ 15 cm au dessus du revêtement absorbant. Le revêtement absorbant est composé d'un assemblage de dièdres d'épaisseur 1 m sur une base carrée de 0,4 m, fabriqués en laine de roche et recouverts d'une chaussette en tissu. Les dimensions intérieures et l'origine du référentiel cartésien de la salle ont été définies au chapitre 2.

Afin de caractériser les performances acoustiques de cette salle en présence des sources secondaires de contrôle actif, des mesures de propagation ont été réalisées sur un axe traversant la salle, voir figure 5.6.

La source \tilde{S} est fixée sur un support en treillis attaché au sol et placée au plus proche de la paroi réfléchissante entre deux sources secondaires. Son centre acoustique considéré comme le centre géométrique de la source est situé aux coordonnées ($X = 0,2$; $Y = 3,15$; $Z = 2,15$) exprimées en mètres. L'axe de mesures est une oblique comprise entre le point A de coordonnées (0,52; 3,15; 2,05) proche de la source \tilde{S} et le point B de coordonnées (7,81; 0,48; 0,31) proche du coin bas de la salle, du côté de la porte. Cet axe de mesure est matérialisé par une ficelle tendue, visible sur la figure 5.6.

Les niveaux acoustiques ont été mesurés tous les 0,05 m en utilisant un sinus glissant comme signal d'excitation. La figure 5.7(a) présente une cartographie de ces niveaux mesurés sur le

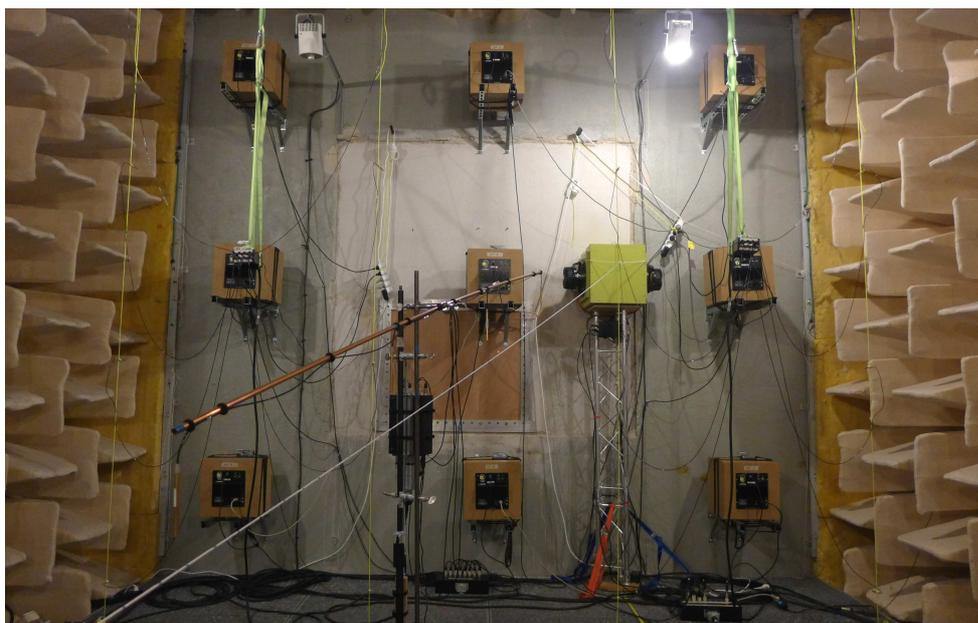


FIGURE 5.6 – Montage pour la caractérisation de la salle semi-anéchoïque

segment AB, en fonction de la fréquence. Les courbes représentent les pressions mesurées, normalisées par la somme de la pression incidente de la source \tilde{S} et de celle de sa source image \tilde{S}' par rapport à la paroi réfléchissante. Le facteur de correction $L(\theta)$ n'a pas été utilisé ici car il a peu d'influence aux angles où sont effectués les mesures. Ces niveaux sont donc à nouveau des écarts entre la pression mesurée et celle qui serait attendue d'après le débit acoustique mesuré.

La cartographie représente, pour les couples (fréquence, distance), un critère basé sur l'écart constaté par rapport à la pression incidente ; les zones en rouge correspondent à des écarts situés hors de l'intervalle à $\pm 1,5$ dB. Cette carte met en évidence deux zones en fonction de la fréquence ; pour des fréquences comprises entre 130 Hz et 170 Hz, les écarts sont majoritairement compris dans l'intervalle alors que pour les fréquences inférieures à 130 Hz, les écarts dépassent en général l'intervalle.

Pour analyser ce résultat, la figure 5.7(b) présente, à quelques fréquences, les niveaux obtenus en fonction de la distance. Les niveaux obtenus sont en général supérieurs à celui de la référence, même à des distances similaires à celle d'identification. Ceci pourrait indiquer que la prise en compte d'une simple source image ne serait pas suffisante pour estimer les pressions mesurées.

Les mesures effectuées en salle semi-anéchoïque sont donc comparées à des simulations obtenues avec deux hypothèses différentes : paroi rigide de dimension infinie (modèle avec une source image) et salle avec des parois caractérisées par des valeurs d'admittance. Ces simulations n'ont pas pour but de reproduire finement le comportement de la salle mais de vérifier que les mesures sont suffisamment proches des simulations pour que l'expérimentation de contrôle actif soit pertinente. Elles sont à nouveau effectuées avec le logiciel *FeLin*. Différentes valeurs d'admittance sont choisies pour simuler l'absorption des parois (en restant conscients de la lim-

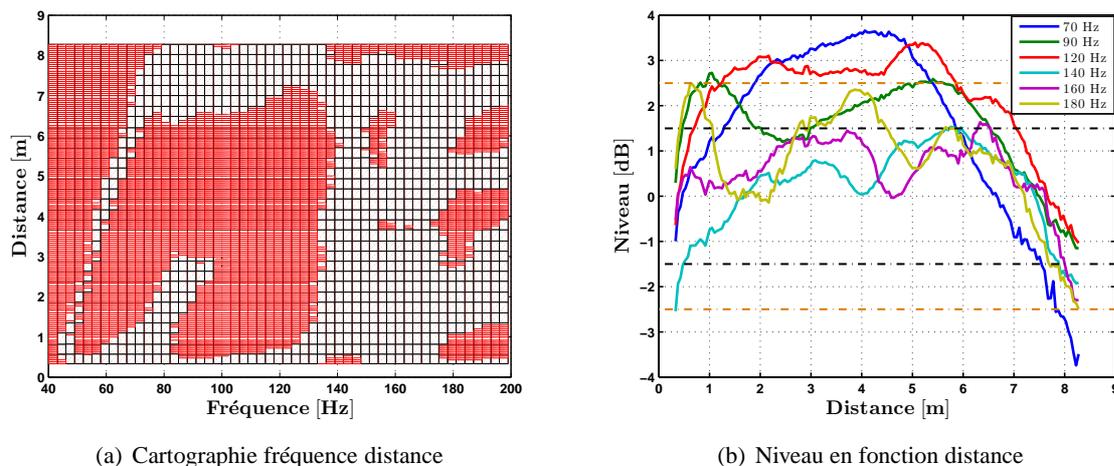


FIGURE 5.7 – Caractéristique de la salle semi-anéchoïque active

ite d'un modèle d'admittance) correspondant à une réaction localisée. Le sol de la salle étant recouvert de caillebotis, il est différencié par une valeur d'admittance différente de celle des autres parois absorbantes.

Les résultats de simulation de la salle présentés sur la figure 5.8 sont obtenus pour une valeur d'admittance réduite égale à $(0,8 + i0,01)$ pour le sol et égale à $(1 + i0)$ pour les quatre parois absorbantes ; la paroi réfléchissante en $X = 0$ étant toujours caractérisée par une admittance égale à $0,001 + i0,001$. Ces valeurs d'admittance restent constantes sur toute la bande de fréquences, toujours dans l'esprit d'une vérification qualitative.

La figure 5.8 présente des exemples de comparaisons pour 4 fréquences. Pour chaque fréquence, le niveau tracé en un point M est obtenu comme la différence entre le niveau mesuré en ce point M et le niveau mesuré au point A (départ des mesures), afin de s'affranchir de l'amplitude de la source.

À 40 Hz, les niveaux mesurés sont plutôt proches de ceux obtenus pour une paroi rigide infinie jusqu'à environ 6 m de distance.

Aux fréquences élevées, comme 170 Hz, les deux simulations convergent jusqu'à environ 2 m, puis les mesures s'en éloignent avec des ondulations parfois proches du modèle de salle.

Aux fréquences intermédiaires, 95 et 110 Hz, les deux simulations sont proches jusqu'à 2 - 3 m mais sous-estiment nettement le niveau de pression mesurée. Aux distances supérieures à 2 - 3 m, les niveaux mesurés sont par contre plutôt proches de ceux simulés via le modèle de salle, qui diverge de celui avec paroi rigide infinie.

Des simulations, présentées en annexe D, avec des valeurs d'admittance différentes ne montrent pas à une meilleure description des résultats expérimentaux.

Ces résultats illustrent une des difficultés de la comparaison entre simulations et expérimentation, pour un problème tridimensionnel tel que celui que nous traitons. Les nombreuses hypothèses posées, que ce soit sur le comportement de la source ou celui de la salle, conduisent à une description physiquement réaliste mais avec des écarts qui peuvent être assez importants,

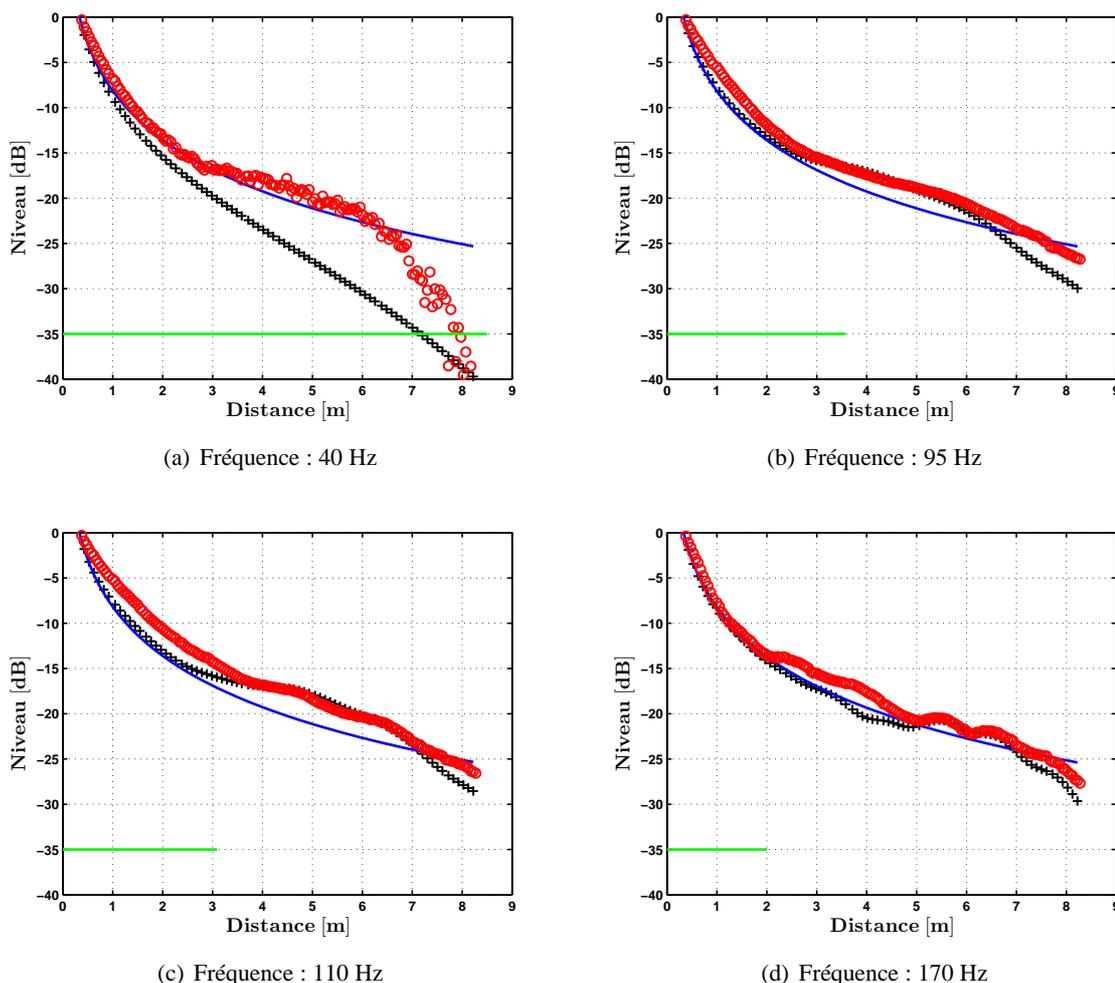


FIGURE 5.8 – Comparaison entre niveaux mesurés (\odot), niveaux simulés pour une paroi rigide infinie (—) et pour une salle dont l'admittance réduite $\beta_r = 0,8 + i0,01$ pour le sol et $\beta_r = 1 + i0$ pour les parois absorbantes (\times). La longueur d'onde correspondante à la fréquence (—).

atteignant souvent 3 dB dans les courbes présentées. Il est important de se rappeler de ces ordres de grandeurs lors de l'interprétation des résultats présentés par la suite.

5.4 Le dispositif de contrôle actif

Partant de la salle semi-anéchoïque décrite, nous cherchons maintenant à faire fonctionner un dispositif de contrôle actif de la pression diffractée par la paroi réfléchissante. Ce dispositif de contrôle actif est composé de neuf sources secondaires fixées à la paroi réfléchissante aux positions \mathbb{S}^C , seize microphones d'identification placés sur la surface Γ aux positions \mathbb{M}^Γ , 7 microphones d'observation et un microphone test placés dans le volume Ω aux positions respectives \mathbb{M}^Ω et M_0 . Les coordonnées des positions des éléments du dispositif, présentées sur la figure 2.7, sont relevées à partir de mesures réalisées au théodolite (Leica, modèle TCR407) ; toutes les coordonnées sont présentées en annexe E.

5.4.1 Sources secondaires

Les sources secondaires doivent être capables de générer une pression équivalente à celle qui se réfléchit sur la paroi. Nous utilisons donc de petites enceintes "subwoofer" adaptées à nos besoins expérimentaux. Ce sont des enceintes closes fabriquées sur mesure par un artisan. Les dimensions extérieures sont de 350 mm de hauteur, 350 mm de largeur, 430 mm de profondeur. Elles comportent chacune deux haut-parleurs de 175 mm de diamètre, montés en push-pull ; ici face à face sur un côté de l'enceinte. Cette configuration permet d'aboutir à une enceinte très compacte et capable de reproduire de basses fréquences avec une bonne linéarité. Un module d'amplification commercial (Mosscade 508) est intégré dans l'enceinte ; il a été modifié afin d'avoir une réponse en fréquence constante sur la bande 40-200 Hz, les courbes sont présentées en annexe E.

Les sources secondaires sont fixées sur la paroi réfléchissante à l'aide d'équerres équipées de patins anti-vibratoires. Les enceintes ont la face comportant les haut-parleurs dirigée vers la paroi, aussi proche que possible afin de minimiser les interférences avec leur source image. Les coordonnées considérées pour exprimer les positions des sources correspondent au centre des deux haut-parleurs (donc au centre de la face la plus proche de la paroi). Il faut remarquer que la position S_5^C (source située vers le centre de la paroi) est très proche de l'ancienne trappe de communication avec la salle anéchoïque ; elle a été maçonnée pour l'expérience mais reste nettement moins massive à cet endroit.

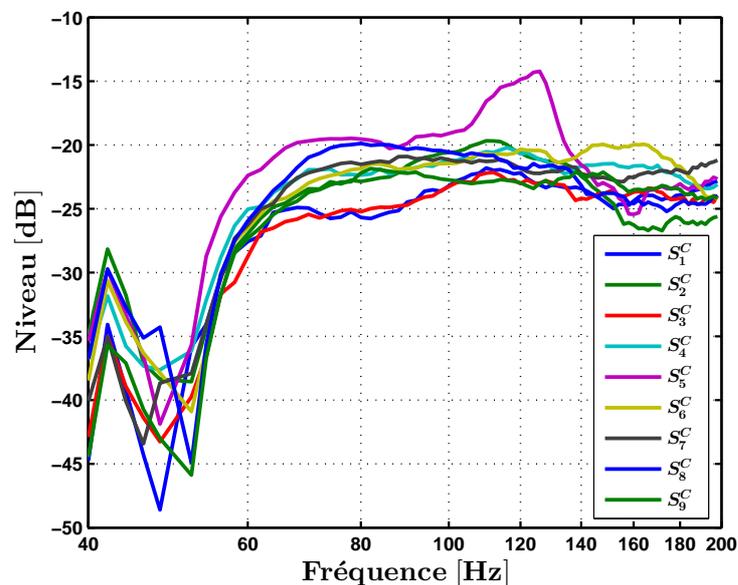


FIGURE 5.9 – Réponse en fréquences des sources secondaire au microphone de la position M_4^Ω

La figure 5.9 présente la réponse en fréquences de ces sources secondaires (matrice C_4) estimée par le microphone au point M_4^Ω ; la position M_4^Ω est choisie proche du centre géométrique de la salle afin d'être à une distance à peu près équivalente des différentes sources secondaires.

Ces réponses en fréquence montrent une grande similitude malgré l'influence de la salle. La différence maximale en termes de niveau de pression à la position de mesure est rarement supérieure à 5 dB pour l'ensemble des sources secondaires. Seule la source S_5^C , très proche de la trappe maçonnée, a un comportement différent des autres sources dans la bande de fréquences 100-140 Hz ; sa réponse comporte un pic d'environ 5 dB qui peut indiquer une résonance. Il est probable que cela résulte du comportement vibratoire local de la paroi où elle est fixée. Lors du contrôle actif du champ diffracté, la similitude de la réponse des sources secondaires est intéressante ; elle évite de trop grandes différences d'amplitudes entre les commandes des sources.

5.4.2 Les microphones

Les microphones d'observation aux positions M^Ω sont répartis sur deux tiges fixées à un pied de microphone. Le microphone test à la position M_0 est fixé sur un pied de microphone indépendant. Les microphones d'identification aux positions M^Γ sont fixés sur des filins pendus depuis un cadre au plafond de la salle. Les coordonnées indiquées pour les positions des microphones correspondent à celles de leurs capsules.

Les microphones d'observation et d'identification sont des microphones "quart de pouce" prépolarisés (CTTM modèle MK90). Ils sont reliés par groupes à des préamplificateurs à huit entrées (CTTM modèle Pre_MK). Le microphone test est un microphone à polarisation séparée composé d'une capsule demi pouce champ libre (GRAS, modèle 40AF) et un préamplificateur (GRAS, modèle 26AK) relié à un module d'alimentation (GRAS, modèle 12 AR).

Le microphone de référence placé à l'intérieur de la source \tilde{S} est composé est un microphone à polarisation séparée composé d'une capsule quart de pouce fort niveau (GRAS, modèle 40BF) et un préamplificateur (GRAS, modèle 26AC) relié à un module d'alimentation (GRAS, modèle 12 AR).

Les réponses en fréquence des microphones d'observation et d'identification ont été estimées par comparaison avec le microphone de référence, dans une cavité isobare (GRAS, modèle 51AB). Elles sont présentées pour quelques microphones d'identification (M_9^Γ à M_{16}^Γ) à la figure 5.10.

Ces résultats d'estimation indiquent que les sensibilités et fréquences de coupure sont proches pour ces différents microphones d'identification. les sensibilités obtenues se situent autour de 20 mV/Pa ; elles sont compatibles avec celles du constructeur. La réponse en phase à 90 ° se situe vers 20 Hz ce qui correspond à la fréquence de coupure annoncée par le constructeur.

Pour les étapes d'identification et de minimisation, la dispersion en amplitude et phase des microphones d'observation et d'identification est prise en compte dans le calcul de la pression incidente reconstruite.

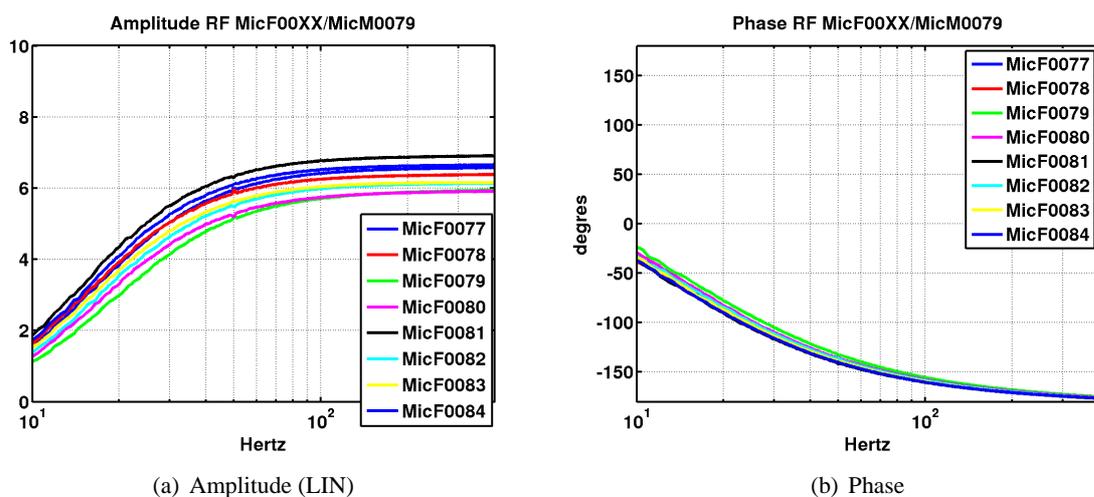


FIGURE 5.10 – Fonction de transfert entre les microphones d'identification (M_9^T à M_{16}^T) et le microphone de référence

5.4.3 Le système d'acquisition

Le dispositif expérimental est composé d'une source de référence, neuf sources secondaires, seize microphones d'identification, sept microphones d'observation et un microphone test. Le système d'acquisition/restitution utilisé est basé sur une interface audionumérique (RME, modèle HDSP Madi) permettant d'enregistrer au maximum 64 voies d'entrées tout en générant simultanément 64 voies de sorties. Les conversions Analogique / Numérique et Numérique / Analogique sont effectuées par des convertisseurs audio (RME, modèle ADI-648 Madi/ADAT ; Sonic modèle Core AD/DA) synchronisés et interfacés via des fibres optiques ADAT.

L'intérêt d'un tel système audio est de permettre une synchronisation des voies d'entrées et sorties, garantie à l'échantillon près, ainsi qu'une grande dynamique des signaux sans changement de calibre. Par contre, les convertisseurs audio n'ont pas de vocation métrologique : leur utilisation pour nos mesures nécessite un étalonnage des entrées et sorties. Les détails et les mesures de vérification du système d'acquisition/restitution sont présentés en annexe E.

Toutes nos mesures utilisent des signaux sinusoïdaux, soit à une fréquence pure incrémentée pas à pas (sinus), soit sous forme d'un "sweep" dont la fréquence varie continuellement entre 40 et 200 Hz (sinus balayé).

Le sinus balayé est utilisé notamment pour la mesure de directivité de la source \tilde{S} , l'identification du filtre de diffraction D et la mesure des trajets secondaires C . Lors de ces mesures, le signal était généré avec le logiciel MatLab en utilisant la méthode développée par Novak et al. [83]. Les détails de cette méthode sont développés en annexe E.

5.5 Méthode

La démarche expérimentale comporte deux étapes : dans un premier temps, le filtre de diffraction D est estimé d'après une série de mesures de la source d'identification, placée suc-

cessivement à différentes positions. Dans un deuxième temps, cette estimation de D est utilisée pour contrôler le champ diffracté, dans le cas d'une source à caractériser, en calculant le critère de minimisation soit dans le volume Ω , soit sur la surface Γ . Le résultat de ce contrôle est vérifié aux microphones ayant servi au contrôle, mais aussi à des positions autres. Rappelons que la source de référence \tilde{S} est utilisée comme source d'identification et source à caractériser.

5.5.1 Identification du filtre de diffraction

Pour l'étape d'identification du filtre de diffraction, la source \tilde{S} est utilisée afin de mesurer les pressions totales aux microphones d'identification et d'observation pour les $N^D = 32$ positions \mathbb{S}^D de la configuration \mathcal{B} , voir figure 2.8(b). Les mesures de la source aux positions de la configuration \mathcal{A} n'ont pu être réalisées en partie à cause de l'encombrement des supports de microphones dans le volume Ω .

Les mesures de la source \tilde{S} aux $N^D = 32$ positions \mathbb{S}^D ont été réalisées une seule fois au début de la campagne de mesures. Lors de ces mesures, les pressions diffractées sont évaluées suivant l'équation 5.6 afin d'identifier le filtre de diffraction D suivant l'équation 2.8.

$$P_{dif}^{ev}(\tilde{S}, M) = P_{tot}(\tilde{S}, M) - P_{inc}(\tilde{S}, M) \quad (5.6)$$

avec $P_{inc}(\tilde{S}, M)$ la pression incidente reconstruite au point M à partir de l'estimation du débit de la source \tilde{S} (relation (5.1)).

Le filtre de diffraction \tilde{D} est ainsi estimé une fois pour toutes en utilisant une valeur optimisée du paramètre de régularisation λ , selon la procédure décrite au chapitre 3.2.2 (équation 3.1). Il est ensuite utilisé pour estimer les pressions diffractées à contrôler P_{dif}^{est} , pour les différentes configurations de contrôle, selon la relation 5.7.

$$P_{dif}^{est}(\tilde{S}, M) = \tilde{D}(M, \mathbb{M}^\Gamma) P_{tot}(\tilde{S}, \mathbb{M}^\Gamma) \quad (5.7)$$

5.5.2 Contrôle de la diffraction

Le contrôle du champ diffracté est effectué en considérant cette fois la source \tilde{S} comme une source à caractériser (figure 2.7). Pour cette étape de contrôle de la pression diffractée, les commandes à envoyer aux sources secondaires sont calculées à partir des trajets secondaires mesurés C entre les sources secondaires et les microphones où la pression diffractée est estimée (équation 2.12). La matrice des trajets secondaires C a été mesurée à chaque début de journée afin de prendre en compte les conditions environnementales. Les commandes \tilde{U} à fournir aux sources secondaires sont alors calculées avec une valeur optimisée du paramètre de régularisation α (équation (3.3)) selon la procédure décrite au chapitre 3.3.1. Pour observer l'effet du contrôle actif, le protocole est le suivant :

- Une première mesure de la pression rayonnée par la source \tilde{S} , notée P^{off} , est effectuée sans contrôle. Cette mesure permet d'estimer la pression diffractée à contrôler et ainsi les commandes \tilde{U} à fournir aux sources secondaires.

- Une seconde mesure de cette pression, notée P^{on} , est ensuite effectuée "avec contrôle" : Cette mesure consiste à générer de manière synchrone les commandes \tilde{U} aux sources secondaires et le signal de la source \tilde{S} .

L'effet du contrôle est observé en comparant les mesures P^{off} et P^{on} . Une estimation de la pression mesurée avec contrôle, notée \tilde{P}^{on} , est aussi obtenue d'après la relation :

$$\tilde{P}^{on}(\tilde{S}, M) = P^{off}(\tilde{S}, M) + C\tilde{U} \quad (5.8)$$

L'intérêt de cette estimation \tilde{P}^{on} est d'être calculée d'après des mesures en sinus balayé, donc pour un spectre de fréquences continu. Inversement les mesures avec et sans contrôle sont réalisées en sinus, et donc limitées aux fréquences présentées dans le tableau 5.2.

Les résultats des mesures sont présentés sous la forme de réponses en fréquence normalisées par rapport à la pression incidente reconstruite P_{inc} (relation (5.1)). Le niveau de pression P^{norm} au point M_i est ainsi déterminé par :

$$P^{norm}(\tilde{S}, M_i) = \frac{P(\tilde{S}, M_i)}{P_{inc}(\tilde{S}, M_i)} \quad (5.9)$$

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont normalisées par l'amplitude du signal de la source \tilde{S} mesurée à la sortie de l'amplificateur.

Les fréquences choisies pour les mesures de contrôle correspondent à des niveaux maximums de pression mesurée sans contrôle aux points du volume Ω , pour des fréquences f comprises entre 40 et 200 Hz. Ce choix a été fait pour observer l'efficacité du contrôle dans le cas de fortes interférences avec la diffraction des parois.

42	45	49	53	55	62	65	73
76	79	81	86	93	99	102	113
120	124	131	136	140	145	151	155
165	175	185	195				

TABLE 5.2 – Tableau des fréquences (Hz) utilisées pour les mesures avec et sans contrôle

Chapitre 6

Expérimentation en salle semi-anéchoïque

Sommaire

6.1 Mesures de contrôle dans le volume Ω	84
6.1.1 Estimation de la pression diffractée	84
6.1.2 Contrôle de la pression diffractée en un point	87
6.1.3 Contrôle simultané aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω	93
6.1.4 Contrôle simultané sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω	96
6.1.5 Bilan du contrôle dans le volume Ω	99
6.2 Mesures du contrôle sur la surface Γ	99
6.2.1 Estimation de la pression diffractée	100
6.2.2 Régularisation du contrôle	102
6.2.3 Contrôle aux positions \mathbb{M}^Γ	102
6.2.4 Bilan du contrôle sur la surface Γ	105

Ce chapitre exploite les mesures obtenues lors de l'expérimentation de la méthode d'anéchoïcité active dans la salle semi-anéchoïque du LMA. Les expériences sont réalisées pour deux cas de contrôle ; l'un pour des points situés dans le volume Ω et l'autre sur l'ensemble des points de la surface Γ . Pour chaque contrôle les résultats sont présentés en deux étapes : l'identification du filtre de diffraction, et la minimisation de la pression diffractée estimée. La source de référence \tilde{S} est utilisée pour l'étape d'identification du filtre de diffraction ainsi que pour l'étape de contrôle où elle est utilisée comme source à caractériser à la position S_0 .

6.1 Mesures de contrôle dans le volume Ω

Dans ce paragraphe, l'estimation le filtre de diffraction est présentée et analysée. Le contrôle de la pression diffractée estimée est ensuite effectué, d'abord séparément pour chacun des points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω . Il est ensuite réalisé simultanément aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω puis sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω .

6.1.1 Estimation de la pression diffractée

Le filtre de diffraction D est identifié à partir des mesures réalisées aux $N^D = 32$ positions \mathbb{S}^D de la source d'identification (configuration \mathcal{B}). Rappelons que c 'est la source de référence \tilde{S} qui est utilisée comme source d'identification. L'estimation du filtre de diffraction \tilde{D} est obtenue avec une valeur optimisée du paramètre de régularisation λ suivant la procédure décrite au chapitre 3.2.2 (équation (3.1)).

6.1.1.1 Exemples d'estimation de la pression diffractée

Pour la source à caractériser en S_0 , les figures 6.1 (a) (b) (c) présentent les courbes des pressions mesurées, évaluées et estimées aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω respectivement. Le niveau de la pression totale mesurée est représenté par une courbe rouge. Celui de la pression diffractée évaluée (d'après le modèle de la source) est représenté par une courbe verte. Celui de la pression diffractée estimée (d'après la pression totale mesurée et l'estimation du filtre de diffraction) est représenté par des pointillés noirs. La comparaison de ces deux dernières courbes permet ainsi d'avoir une idée de la qualité de l'estimation du filtre de diffraction. Les résultats sont présentés pour des fréquences comprises entre 40 et 200 Hz, par pas de 2 Hz ; incluant aussi les fréquences où le contrôle est effectué (tableau 5.2).

Au point M_1^Ω (près de la paroi réfléchissante), le niveau de la pression diffractée évaluée est très élevé notamment aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 150 Hz (figure 6.1(a)). L'estimation du niveau de pression diffractée à cette position est très satisfaisante ; le niveau de la pression diffractée estimée est très proche de celle évaluée, sauf peut-être aux fréquences inférieures à 60 Hz où apparaît un écart d'environ 1 dB.

Au point M_4^Ω (proche de la source et un peu plus loin de la paroi réfléchissante), le niveau de la pression diffractée évaluée est plus faible hormis aux fréquences inférieures à 70 Hz (figure 6.1(b)). Pour cette position, l'estimation de la pression diffractée reste satisfaisante entre 80

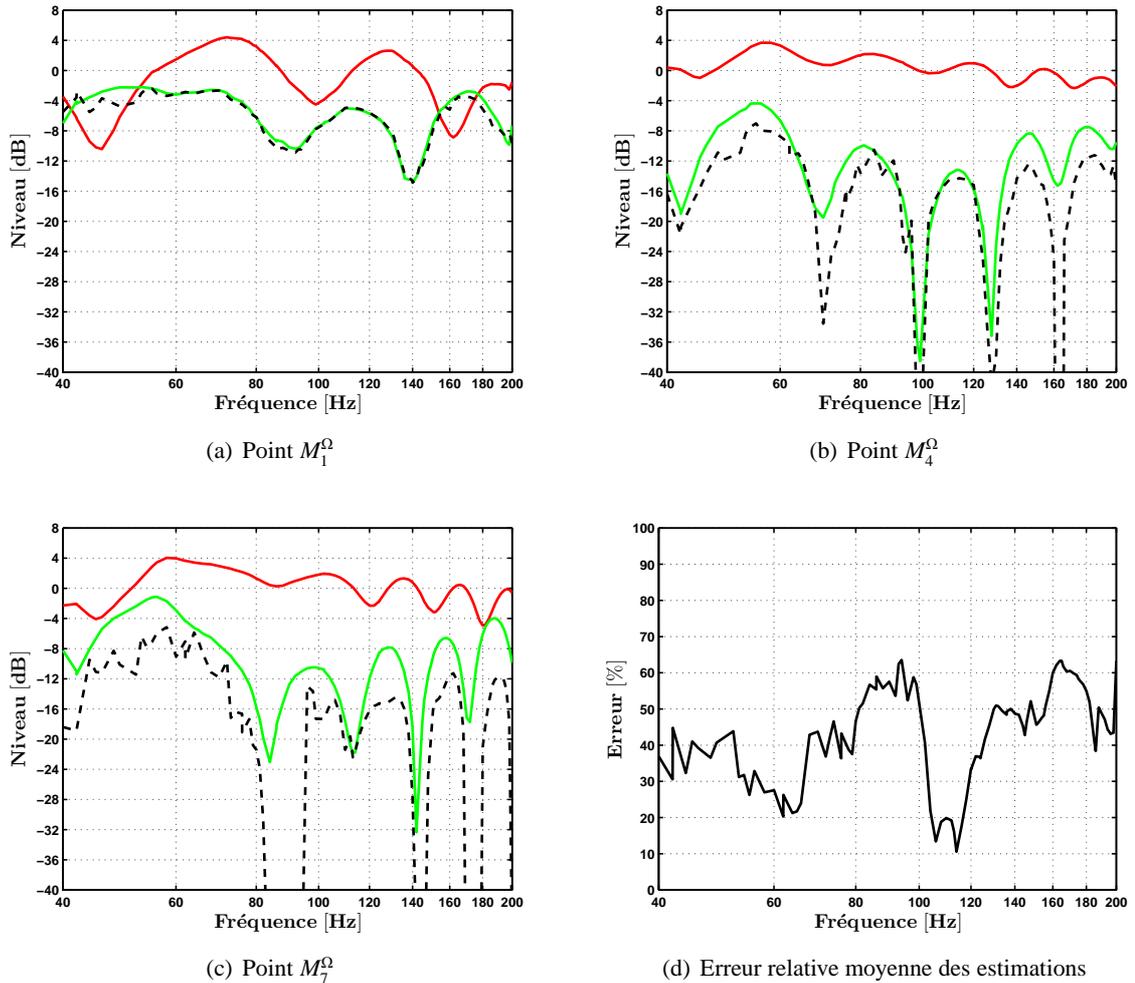


FIGURE 6.1 – Mesure de pression de la source S_0 aux points M^Ω , configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$.
 — : pression totale, — : pression diffractée évaluée, - - : pression diffractée estimée

et 180 Hz. En dehors de cet intervalle, des écarts d'environ 4 dB se produisent aux maxima de la pression diffractée évaluée, autour des fréquences 60, 140 et 180 Hz. Ces écarts peuvent atteindre plusieurs dizaines de décibels aux minima de pression.

Au point M_7^Ω (au fond de la salle), le niveau de la pression diffractée évaluée est plutôt élevé, notamment aux fréquences extérieures à l'intervalle compris entre 80 Hz et 180 Hz (figure 6.1(c)). L'estimation du niveau de pression diffractée n'est cependant pas satisfaisante ; les écarts entre les niveaux de la pression diffractée évaluée et celui de la pression diffractée estimée sont compris entre 2 et 8 dB sur les maxima de pression et atteignent plusieurs dizaines de décibels pour les minima de pression.

La figure 6.1(d) présente les erreurs relatives des estimations de la pression diffractée moyennée sur l'ensemble des points M^Ω . L'erreur est majoritairement élevée ; elle se situe autour de 40 % avec des maxima à 60 % à proximité des fréquences 90 et 160 Hz et des minima à 20 %

autour des fréquences 60 et 110 Hz. Mais cette erreur n'est manifestement pas uniforme dans le volume, comme illustré ci-après.

6.1.1.2 Erreur sur l'estimation de la pression diffractée

Les courbes d'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée sont représentées à la figure 6.2 pour les points M_1^Ω et M_7^Ω ; les valeurs du paramètre de régularisation λ optimisé (représentées par des ronds) sont également tracées, avec un axe des ordonnées à droite.

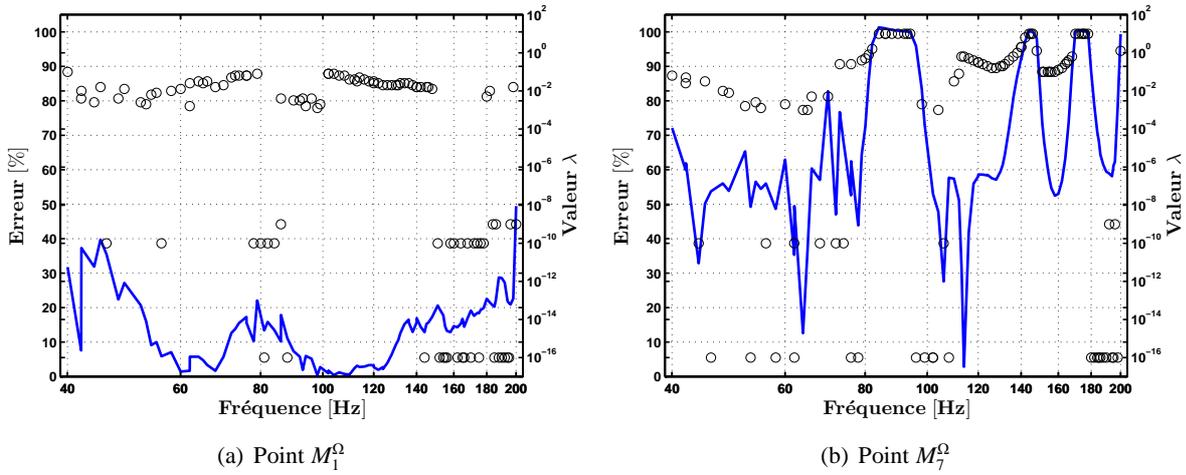


FIGURE 6.2 – Erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée ; valeurs $\tilde{\lambda}$ \circ

Comme anticipé d'après les courbes précédentes, au point M_1^Ω l'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée est plutôt faible, inférieure à 10 %, sur l'ensemble des fréquences (figure 6.2(a)). Cependant, l'erreur augmente jusqu'à 30 % aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 40 % pour lesquelles les niveaux de pression diffractée sont pourtant élevés. Ceci pourrait nuire à l'efficacité du contrôle à ces fréquences. Au point M_1^Ω , les valeurs de $\tilde{\lambda}$ sont en général raisonnablement élevées, autour de 10^{-2} .

Au point M_7^Ω , l'erreur relative sur l'estimation de la pression diffractée est presque systématiquement élevée (figure 6.2(b)), autour de 60 % sur la plupart des fréquences et atteignant 100 % autour des fréquences 90, 140 et 170 Hz. En pratique ces fréquences correspondent à des minima de pression, donc ces erreurs ne devraient pas perturber significativement l'efficacité du contrôle. Par contre, les valeurs du coefficient $\tilde{\lambda}$ au point M_7^Ω se situent plutôt autour de l'unité, la dépassant même souvent ; elles sont donc globalement plus élevées que celles optimisées pour la position M_1^Ω .

6.1.1.3 Bilan de l'identification du filtre diffraction D

L'estimation de la pression diffractée est satisfaisante au point M_1^Ω mais pas au point M_7^Ω , alors que le niveau relatif est élevé dans ces deux cas. Les fortes valeurs de l'erreur moyenne

d'estimation du filtre \tilde{D} présentées à la figure 6.1(d) semblent provenir essentiellement des valeurs obtenues pour des positions \mathbb{M}^Ω éloignées de la paroi, comme le point M_7^Ω . L'estimation de la pression diffractée ne serait ainsi pas satisfaisante dans cette zone de la salle considérée comme « anéchoïque » ; pour certaines fréquences, la pression diffractée est élevée alors que l'estimation de la diffraction par la paroi réfléchissante semble être inefficace. Ces erreurs pourraient provenir des défauts de la salle semi-anéchoïque. Par contre, les erreurs d'estimation aux positions proches de la source S_0 , où la pression diffractée est faible, ne devraient pas impacter l'efficacité du contrôle.

6.1.2 Contrôle de la pression diffractée en un point

Dans ce paragraphe, le contrôle de la pression diffractée est effectué successivement pour quelques points de l'ensemble \mathbb{M}^Ω . Les résultats de mesures sont présentés pour le contrôle individuel des points M_1^Ω puis M_4^Ω et enfin M_7^Ω , ensuite pour le contrôle simultanée des points M_1^Ω , M_4^Ω , M_7^Ω et enfin pour l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω ; le point M_0 reste un point test non contrôlé. Rappelons que la source à caractériser est la source de référence \tilde{S} à la position S_0 .

Les mesures réalisées en sinus balayé sont représentées par une courbe rouge pour la pression totale et par une courbe discontinue bleue pour la prévision du contrôle. Les résultats sont tracés entre 40 et 200 Hz suivant des pas de 2 Hz incluant aussi les fréquences où le contrôle sera effectué (tableau 5.2). Les mesures de contrôle, réalisées en sinus, sont représentées par des losanges bleus. Afin de ne pas surcharger les graphiques, les mesures réalisées en sinus sans contrôle ne sont pas présentées car elles correspondent aux niveaux de pression totale mesurée en sinus balayé.

Pour ces mesures, l'amplitude du signal de la source S_0 est de $8,24 V_{rms}$ pour le contrôle individuel des points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω ; elle est diminuée d'un facteur 10 ($0,824 V_{rms}$) pour le contrôle simultanée de plusieurs points. Une courbe représente alors les amplitudes des commandes à fournir aux sources secondaires ; les amplitudes sont normalisées par l'amplitude de la source à caractériser S_0 . Les maxima et minima de ces amplitudes sont tracés pour chaque fréquence contrôlée ; un symbole différent est attribué à chaque source secondaire. Une ligne horizontale discontinue rouge représente le niveau maximal admissible pour les commandes, un niveau considéré comme "critique" étant matérialisé par une autre ligne horizontale discontinue orange.

6.1.2.1 Régularisation du contrôle

Les commandes appliquées aux sources secondaires sont régularisées via le paramètre α , dont la valeur est fixée d'après une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ pour des valeurs α_k comprises entre 10^{-16} et 10. La figure 6.3 présente les courbes correspondantes, où l'erreur du contrôle de la pression diffractée est représentée en fonction du paramètre α pour quelques fréquences (ici pour le contrôle en M_1^Ω).

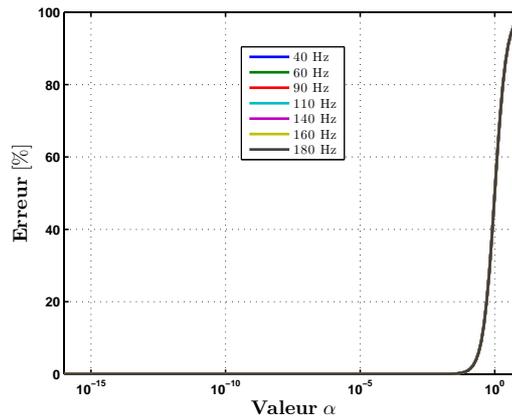


FIGURE 6.3 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α et pour quelques fréquences (contrôle en M_1^Ω)

Ces résultats indiquent que l'erreur est systématiquement négligeable pour des valeurs de α inférieures à 10^{-3} . Les résultats obtenus pour les points M_4^Ω et M_7^Ω sont tout à fait similaires à ceux présentés pour le point M_1^Ω ; les valeurs de $\tilde{\alpha}$ sont donc simplement choisies bien inférieures à 10^{-3} pour chaque expérience de contrôle en un point isolé.

6.1.2.2 Contrôle au point M_1^Ω

Le contrôle de la pression diffractée estimée est dans un premier temps effectué uniquement au point M_1^Ω . Les mesures obtenues aux autres points de l'ensemble \mathbb{M}^Ω servent alors à observer l'effet du contrôle dans le volume Ω . La figure 6.4 présente, aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , le niveau de pression sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_1^Ω .

En M_1^Ω , le niveau de pression mesuré sans contrôle (courbe rouge) est fortement perturbé ; les écarts de niveau avec la pression incidente sont globalement très élevés, atteignant 10 dB autour de 50 et 160 Hz.

Le contrôle de la pression diffractée estimée au point M_1^Ω (losanges bleus) est très satisfaisant ; le niveau de pression avec contrôle est ainsi très proche de celui de la pression incidente, voir figure 6.4(a). Les écarts sont inférieurs à 1 dB dans la bande de fréquences 50-200 Hz. Aux fréquences inférieures à 50 Hz, le niveau de pression avec contrôle atteint tout juste la limite de l'intervalle à $\pm 1,5$ dB.

Inversement, les résultats obtenus aux autres points du volume Ω ne sont pas satisfaisants, voir les figures 6.4 (b) (c). Le contrôle au point M_1^Ω n'est donc efficace que localement, au voisinage de la position contrôlée.

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont très raisonnables, principalement situées entre 10^{-1} et 10^{-2} , voir figure 6.4(d). Elles se rapprochent de la valeur considérée comme critique autour des fréquences 50 et 170 Hz et sont minimales autour de 90 et 140 Hz. La dispersion entre les maxima et minima des amplitudes est de l'ordre d'un facteur 3 sur l'ensem-

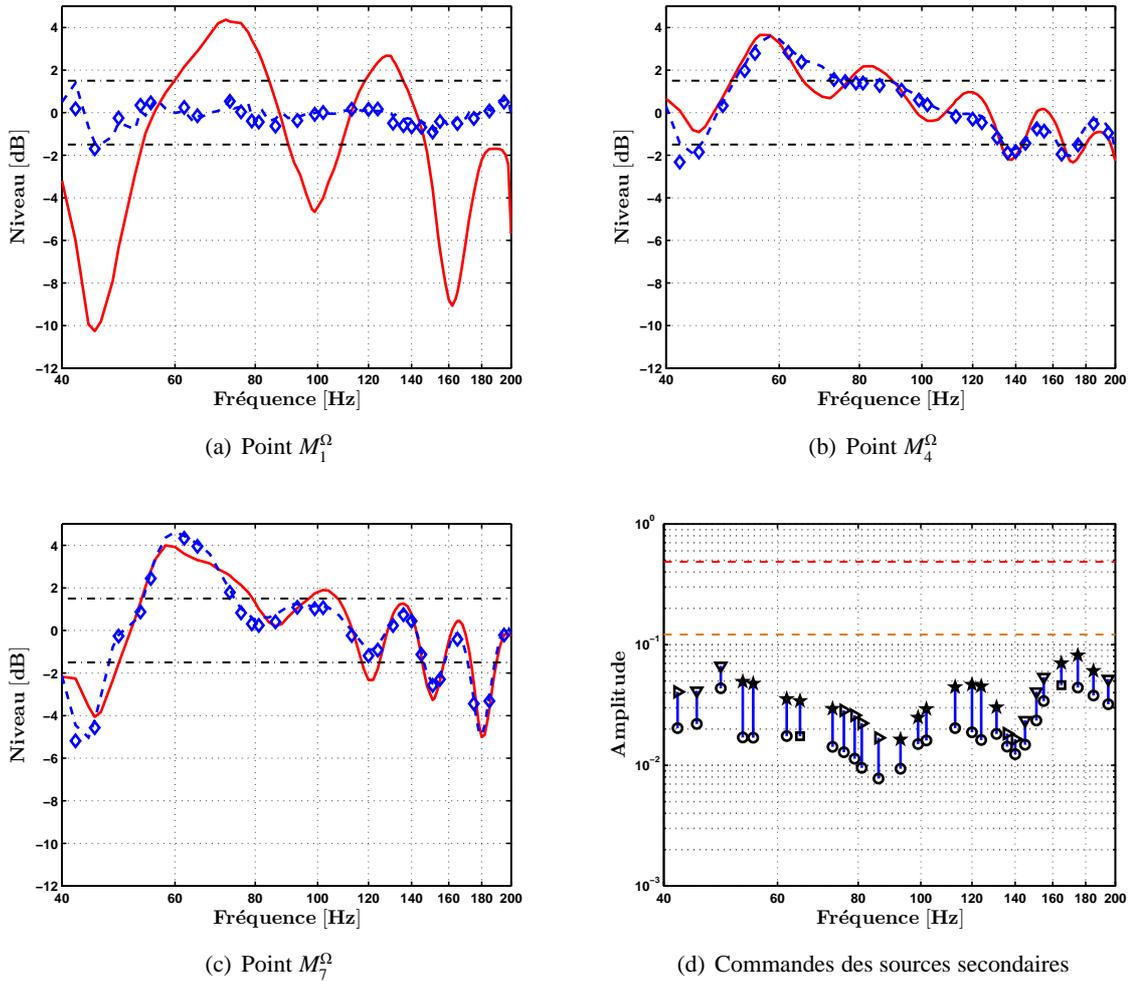


FIGURE 6.4 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_1^Ω . (a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), — — : prévision du contrôle, — — — : limite $\pm 1,5$ dB ; (d) : Amplitude normalisée des sources secondaires ; S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft , — — — : amplitude critique, — — — : amplitude maximale.

ble des fréquences, la source secondaire positionnée en S_1^C nécessitant la plus faible amplitude et la source en S_5^C nécessitant souvent l'amplitude la plus élevée.

Les résultats de mesure avec contrôle (losanges bleus) et la prévision du contrôle (courbe bleue) coïncident sur l'ensemble des points du volume Ω . De très faibles écarts entre la mesure et la prévision peuvent néanmoins apparaître, essentiellement à 42 Hz. Cet écart pourrait être dû à un balayage en fréquence trop rapide ne permettant pas d'estimer correctement la réponse de la source à cette fréquence.

6.1.2.3 Contrôle au point M_4^Ω

Le contrôle de la pression diffractée estimée est cette fois effectué uniquement au point M_4^Ω . La figure 6.5 présente, aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , le niveau de pression sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_4^Ω .

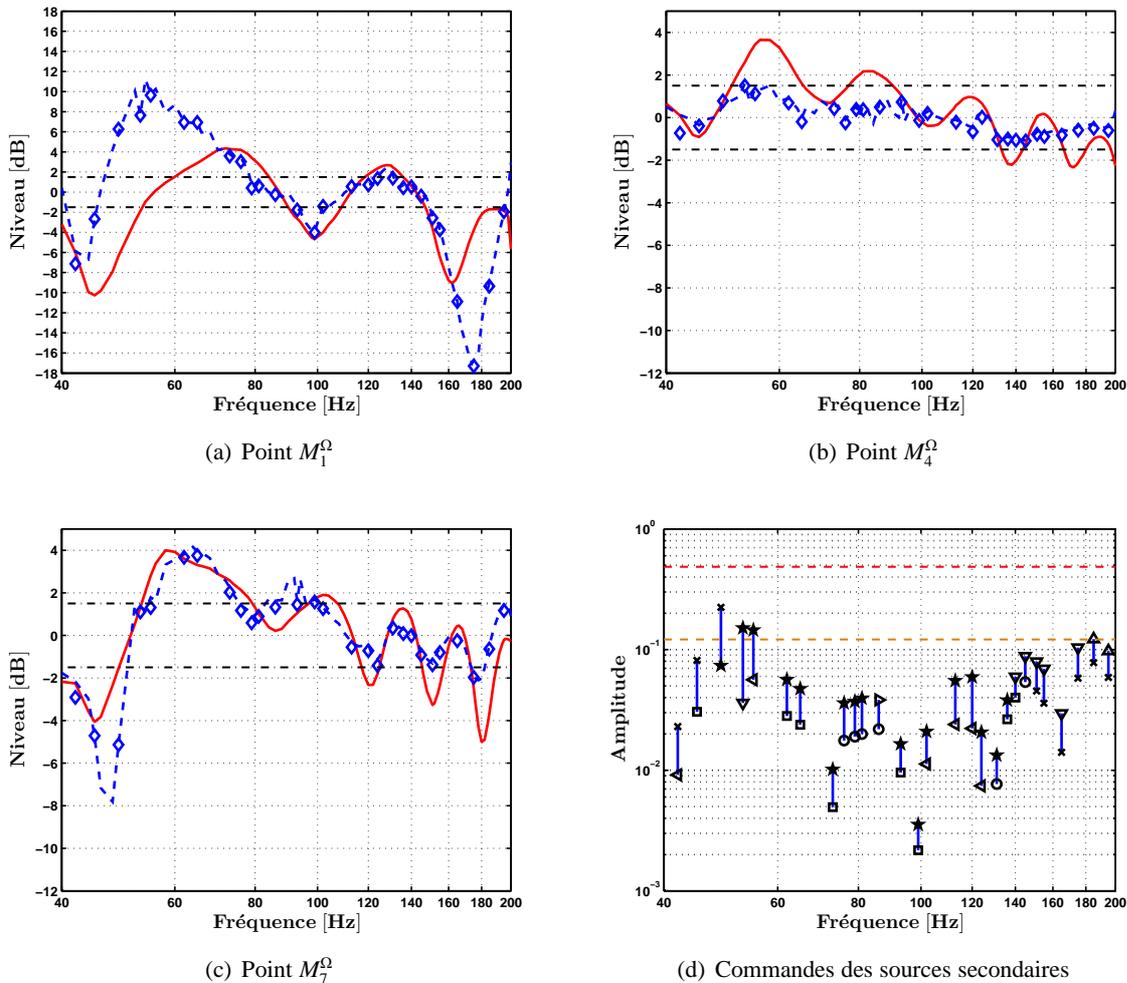


FIGURE 6.5 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_4^Ω . (a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Au point M_4^Ω , à la figure 6.5(b), le niveau de pression mesuré sans contrôle dépasse largement l'intervalle de $\pm 1,5$ dB, essentiellement aux fréquences inférieures à 100 Hz ; l'écart avec le niveau de la pression incidente atteint ainsi 4 dB autour de 50 Hz. Le contrôle de la pression diffractée estimée au point M_4^Ω est satisfaisant ; le niveau de pression reste dans l'intervalle sur toute la bande de fréquences.

Par contre, le niveau de pression avec contrôle au point M_1^Ω est alors très dégradé aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 160 Hz, voir figure 6.5(a) ; ces dégradations atteignent environ 18 dB avec contrôle, alors qu'elles ne dépassent pas 10 dB en l'absence de

contrôle. Dans la bande de fréquences 70 - 160 Hz, le niveau de pression au point M_1^Ω n'est par contre pas significativement modifié par le contrôle au point M_4^Ω .

Ce phénomène ne semble pas être identique au point M_7^Ω , où le niveau de pression avec contrôle a plutôt tendance à se rapprocher de la pression incidente à toutes les fréquences supérieures à 120 Hz, voir figure 6.5(c).

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont plus variables que dans le cas précédent mais elles se situent principalement entre 10^{-1} et 10^{-2} , voir figure 6.5(d). Aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 140 Hz, les amplitudes peuvent atteindre des valeurs considérées comme critiques. Dans la bande de fréquences 60-140 Hz, les amplitudes sont par contre modérées voire très faibles. La dispersion entre les amplitudes des différentes sources est toujours de l'ordre d'un facteur 3 sur l'ensemble des fréquences.

Les résultats de mesure avec contrôle et la prévision du contrôle coïncident sur l'ensemble des points du volume Ω . De très faibles écarts entre la mesure et la prévision peuvent néanmoins encore apparaître à 42 Hz.

Le contrôle au point M_4^Ω a donc permis de réduire les perturbations aux basses fréquences mais a fortement dégradé les résultats en M_1^Ω , une position située en amont (suivant l'axe X) du point contrôlé. Il est intéressant de noter que les dégradations de la pression apparaissent aux fréquences où les amplitudes des sources secondaires sont élevées. Par contre, le contrôle semble avoir un impact favorable aux positions situées en aval du point contrôlé.

6.1.2.4 Contrôle au point M_7^Ω

Le contrôle de la pression diffractée estimée est enfin effectué uniquement au point M_7^Ω , le point le plus éloigné de la paroi réfléchissante (située dans la zone « anéchoïque » de la salle). La figure 6.6 présente, aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , le niveau de pression sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_7^Ω .

Sans contrôle, le niveau de pression mesuré au point M_7^Ω s'écarte de la valeur attendue d'environ 4 dB aux fréquences inférieures à 80 Hz ; il est probable que cela résulte de l'efficacité limitée du matériau absorbant. Aux fréquences supérieures à 120 Hz, le niveau de pression mesuré s'écarte aussi significativement de celui attendu, alors que le matériau absorbant est a priori très efficace à ces fréquences. Ce point sera discuté au chapitre 7.

Le contrôle de la pression diffractée estimée au point M_7^Ω conduit à nouveau à des résultats satisfaisants aux fréquences inférieures à 160 Hz, voir figure 6.6(c) ; l'écart reste dans l'intervalle à $\pm 1,5$ dB. Aux fréquences supérieures à 160 Hz, le contrôle n'est pas assez efficace ; l'écart de pression mesuré reste à l'extérieur de l'intervalle.

Au point M_1^Ω , l'effet du contrôle en M_7^Ω est contrasté, voir figure 6.6(a). Aux fréquences comprises entre 70 et 150 Hz, le niveau de pression avec contrôle est plus proche de celui attendu et l'effet du contrôle reste positif bien qu'insuffisant aux fréquences supérieures à 150 Hz. Par contre, le contrôle dégrade considérablement les mesures aux fréquences inférieures à 70 Hz,

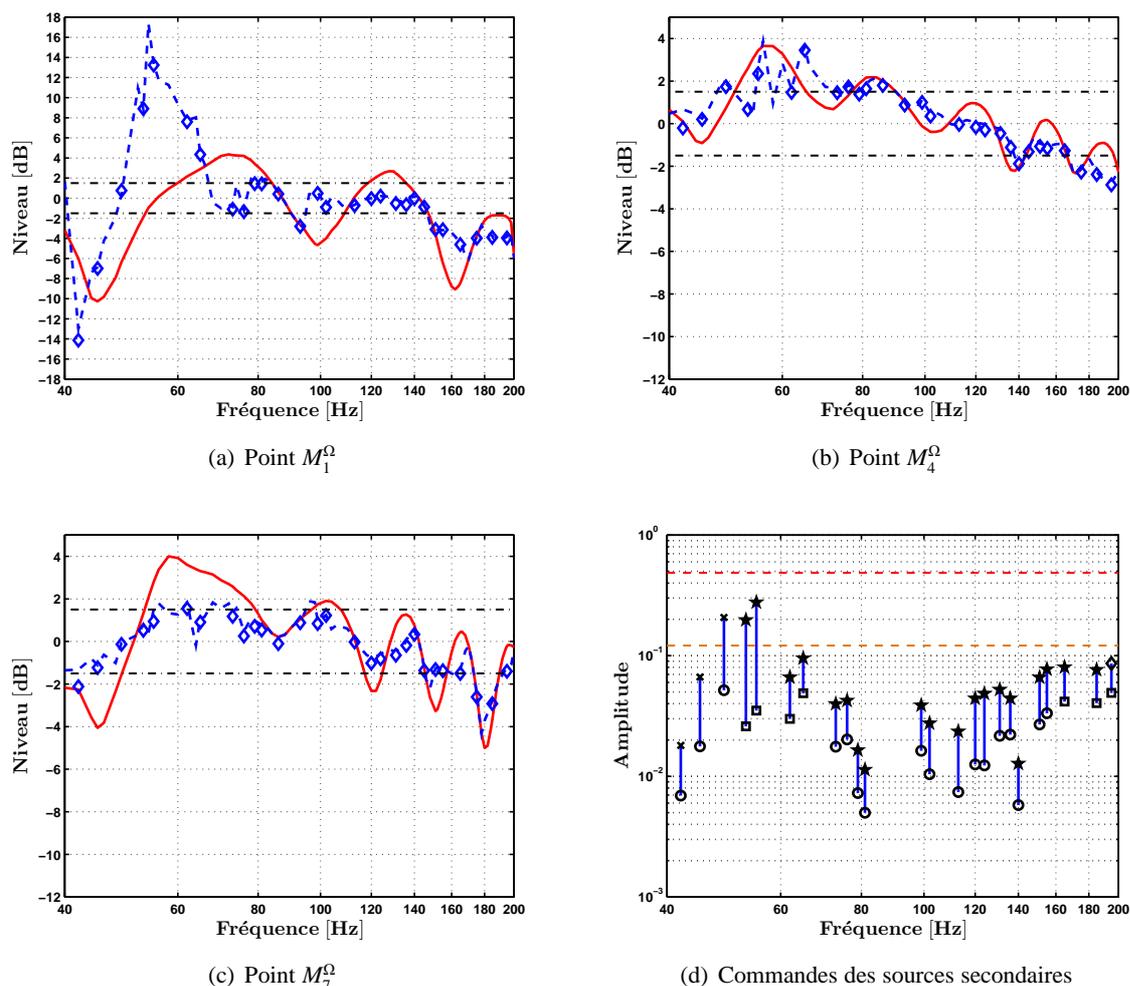


FIGURE 6.6 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée au point M_7^Ω . (a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

conduisant à des écarts de 14 dB avec la pression incidente.

Au point M_4^Ω , l'effet du contrôle est mineur, un peu comme de celui observé aux fréquences supérieures à 70 Hz du point M_1^Ω , voir figure 6.6(b).

Les amplitudes des commandes des sources secondaires peuvent être classées selon trois zones de fréquence, voir figure 6.6(d). Pour les fréquences inférieures à 70 Hz, les amplitudes atteignent souvent des valeurs critiques, avec une grande dispersion entre les sources (de l'ordre d'un rapport 10). Aux fréquences comprises entre 70 et 140 Hz, les amplitudes sont modérées, autour de $2 \cdot 10^{-2}$ avec une dispersion proche d'un facteur 3. Aux fréquences supérieures à 140 Hz, les amplitudes se rapprochent de valeurs critiques avec une faible dispersion entre sources.

Les résultats de mesure avec contrôle et la prévision du contrôle coïncident à nouveau

sur l'ensemble des points du volume Ω (figure 6.6), à l'exception des très faibles écarts à 42 Hz comme pour les deux points considérés précédemment. Étonnamment, aux fréquences inférieures à 70 Hz, la prévision du contrôle indique des fluctuations particulièrement accidentées avec la fréquence.

Le contrôle en M_7^Ω a donc permis de réduire les perturbations aux basses fréquences, en dégradant fortement les résultats en M_1^Ω . Nous remarquons encore que les dégradations apparaissent aux fréquences où les amplitudes des sources secondaires sont élevées. De plus, à ces fréquences la dispersion des commandes est élevée, ce qui pourrait indiquer un contrôle instable.

6.1.2.5 Bilan du contrôle de la pression diffractée en un point

Les résultats de mesures avec contrôle en un seul point de la pression diffractée estimée sont globalement satisfaisants aux points contrôlés ; les niveaux de pression mesurés avec contrôle restent dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB, excepté pour le point M_7^Ω aux fréquences supérieures à 170 Hz.

Par contre, le contrôle n'a qu'un effet localisé au voisinage du point contrôlé et tend à dégrader les écarts mesurés aux autres positions du volume Ω . Ces dégradations apparaissent essentiellement aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 150 Hz. Dans la bande de fréquences 80 - 150 Hz, les pressions mesurées à d'autres positions que celle de contrôle sont parfois améliorées et en tout cas peu perturbées par l'effet du contrôle.

Les amplitudes des commandes des sources secondaires augmentent avec l'éloignement de la position de contrôle de la paroi réfléchissante ; elles sont particulièrement élevées aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 150 Hz.

6.1.3 Contrôle simultané aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω

Dans ce paragraphe, le contrôle de la pression diffractée estimée est réalisé simultanément aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω . Les résultats sont observés aux points contrôlés ainsi que sur des points non contrôlés du volume Ω . L'amplitude de la source à caractériser S_0 , initialement à $8,24V_{rms}$, est diminuée d'un facteur 10 afin que les amplitudes des commandes des sources secondaires ne dépassent pas le niveau maximal de leur gain d'entrée.

6.1.3.1 Régularisation du contrôle

Comme précédemment, les commandes appliquées aux sources secondaires sont régularisées d'après une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ pour des valeurs α_k comprises entre 10^{-16} et 10. La figure 6.7 présente les courbes correspondantes.

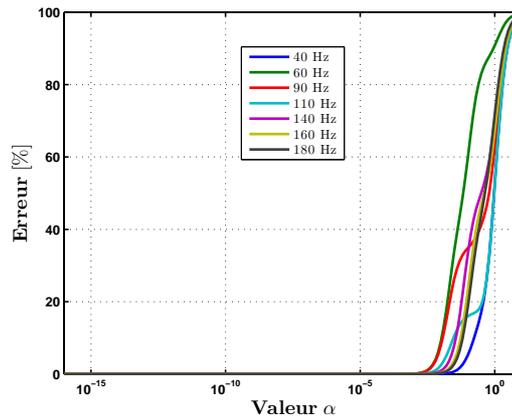


FIGURE 6.7 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α et pour quelques fréquences (contrôle des points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω)

L'erreur du contrôle de la pression diffractée est représentée en fonction du paramètre α pour quelques fréquences. Les résultats indiquent que l'erreur est négligeable pour des valeurs de α inférieures à 10^{-4} ; les valeurs $\tilde{\alpha}$ retenues se situent donc au-dessous de cette limite.

6.1.3.2 Contrôle de la pression diffractée

La figure 6.8 présente, aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , le niveau des pressions sans et avec contrôle de pression diffractée estimée, avec minimisation simultanée en ces mêmes points.

Étonnamment, les résultats des mesures avec contrôle et la prévision du contrôle ne coïncident pas pour certains points contrôlés, essentiellement aux fréquences inférieures à 100 Hz ; les écarts peuvent atteindre jusqu'à 4 dB comme par exemple au point M_1^Ω (figure 6.8(a)) alors qu'ils sont plus faibles, autour de 1 dB, pour des positions éloignées de la paroi réfléchissante comme au point M_7^Ω (figure 6.8(c)).

Il est intéressant de noter que pour les fréquences inférieures à 90 Hz, les prévisions du contrôle aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω sont différentes de celles obtenues avec un contrôle effectué séparément en chacun de ces points, voir figures 6.4, 6.5, 6.6. Les prévisions du contrôle restent par contre globalement inchangées aux fréquences supérieures à 90 Hz.

Les résultats des mesures obtenues avec contrôle sont satisfaisants au point M_1^Ω pour les fréquences supérieures à 90 Hz ; les niveaux de pression mesurée sont proches du niveau de la pression incidente. Aux fréquences inférieures à 90 Hz, le contrôle ne semble par contre pas assez efficace ; la majorité des mesures réalisées avec le contrôle dépassent encore les limites de l'intervalle de $\pm 1,5$ dB, voir figure 6.8(a).

Au point M_4^Ω , les résultats des mesures obtenues avec contrôle sont satisfaisants sur l'ensemble des fréquences ; les niveaux de pression mesurée avec le contrôle sont compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB, voir figure 6.8(b).

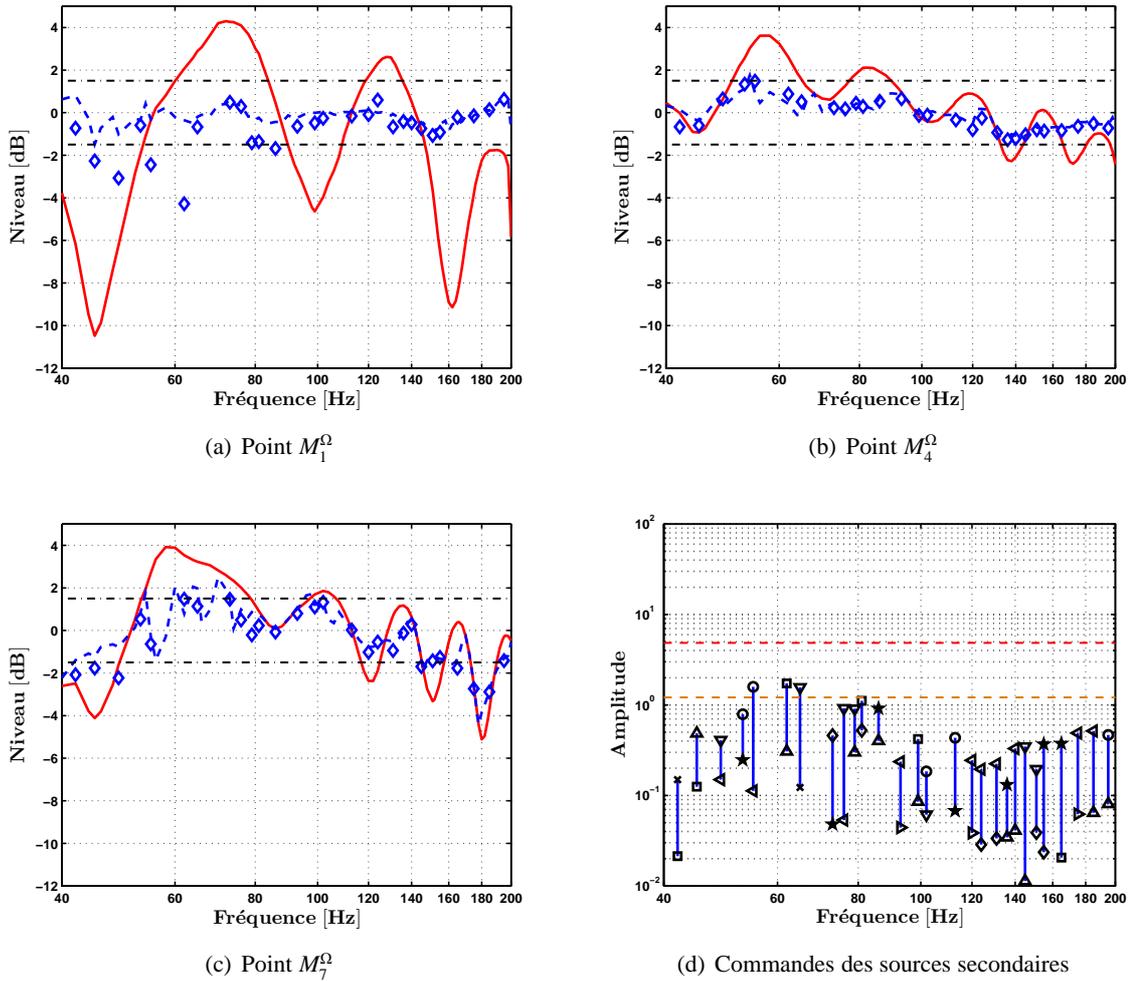


FIGURE 6.8 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω .

(a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Au point M_7^Ω , le contrôle ne semble à nouveau pas assez efficace sur toute la bande de fréquences ; les niveaux de pression mesurée avec contrôle sont irréguliers aux fréquences inférieures à 80 Hz avec des écarts dépassant $\pm 1,5$ dB, voir figure 6.8(c).

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont globalement élevées, voir figure 6.8(d) ; elles sont principalement comprises entre 1 et 10^{-2} . Pourtant, l'amplitude du signal de la source en S_0 a été divisé d'un facteur dix. La dispersion entre les minima et maxima des amplitudes est également élevée, proche d'un facteur 10 pour l'ensemble des fréquences. Dans la bande de fréquences 40 - 90 Hz, les amplitudes des sources secondaires approchent ou dépassent la valeur critique.

Pour évaluer la pertinence du contrôle de diffraction, il est nécessaire de vérifier son effet

en dehors des points de contrôle. Cette vérification est présentée maintenant, aux points M_0 (à 0,36 m du point contrôlé M_4^Ω) et M_2^Ω .

Au point M_2^Ω , le contrôle ne semble pas assez efficace ; l'écart de pression mesurée avec contrôle dépasse l'intervalle de $\pm 1,5$ dB pour les fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 120 Hz, voir figure 6.9(a). Par ailleurs, les niveaux de pression mesurée aux fréquences inférieures à 90 Hz ne correspondent pas à ceux des prévisions.

Au point test M_0 , très proche d'un point contrôlé, les résultats des mesures de pression sont améliorés par le contrôle, même si à quelques fréquences (autour de 40 et 195 Hz) l'écart de pression dépasse légèrement l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

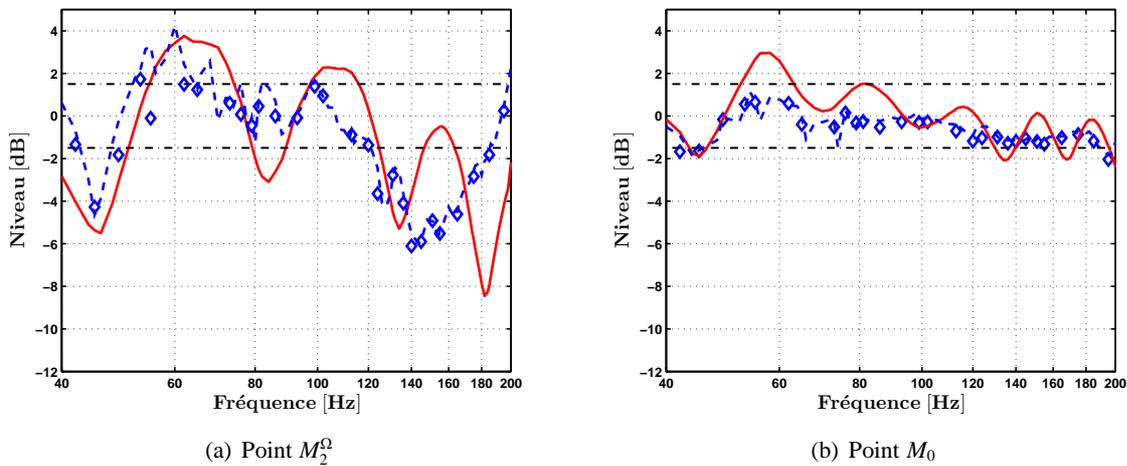


FIGURE 6.9 – Mesure en M_2^Ω et M_0 , sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω .

(a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Bilan : l'effet du contrôle simultané aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω semble satisfaisant aux fréquences comprises entre 90 et 120 Hz, a priori sur l'ensemble des positions du volume Ω . Par contre, le contrôle ne semble pas satisfaisant pour la majorité des positions du volume Ω , aux fréquences inférieures à 90 Hz et supérieures à 120 Hz. Il est intéressant de noter que les écarts observés entre la mesure et la prévision du contrôle sont maximum aux fréquences où les amplitudes des signaux fournis aux sources secondaires tendent à devenir critiques. Par ailleurs, ces amplitudes ont globalement augmenté d'un facteur 10 par rapport au contrôle en un seul point alors que l'amplitude de la source S_0 a diminué d'un facteur 10.

6.1.4 Contrôle simultané sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω

Idéalement, le contrôle de diffraction devrait être global dans tout le volume Ω . L'étape suivante consiste donc à tenter le contrôle de la pression diffractée estimée en la minimisant

simultanément sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω .

6.1.4.1 Régularisation du contrôle

Comme précédemment, les commandes appliquées aux sources secondaires sont régularisées suite à une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ pour des valeurs α_k comprises entre 10^{-16} et 10. La figure 6.10 présente les courbes correspondantes.

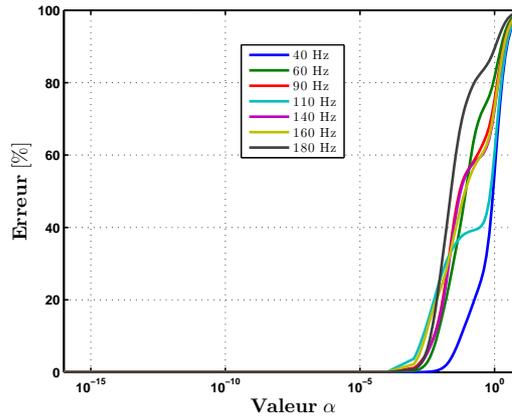


FIGURE 6.10 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α et pour quelques fréquences (contrôle de l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω)

L'erreur du contrôle de la pression diffractée est représentée en fonction du paramètre α pour quelques fréquences. Les résultats indiquent que l'erreur est négligeable pour des valeurs de α inférieures à 10^{-5} ; les valeurs $\tilde{\alpha}$ choisies sont donc inférieures cette limite.

Malgré cette régularisation et le choix d'une amplitude pour la source à caractériser (en S_0) identique à celle du contrôle précédent ($0,824V_{rms}$), les mesures n'ont pas pu être réalisées au delà de 136 Hz car les amplitudes calculées pour les sources secondaires étaient trop souvent supérieures à la valeur critique, voire dépassaient la valeur maximale possible.

6.1.4.2 Contrôle de la pression diffractée

La figure 6.11 présente, aux positions M_1^Ω , M_7^Ω et au point test M_0 , le niveau de pression sans et avec contrôle des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω . La présentation au point test M_0 permet d'observer l'effet du contrôle à un point non contrôlé, bien que proche du point contrôlé M_4^Ω .

À nouveau, les résultats des mesures avec contrôle et leurs prévisions ne coïncident pas sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω et la majorité des fréquences. Il est intéressant de noter que les écarts entre les niveaux de pression mesurée et ceux prévus lors du contrôle sont plus élevés et plus nombreux au point M_1^Ω , proche des sources secondaires, qu'aux autres positions du volume

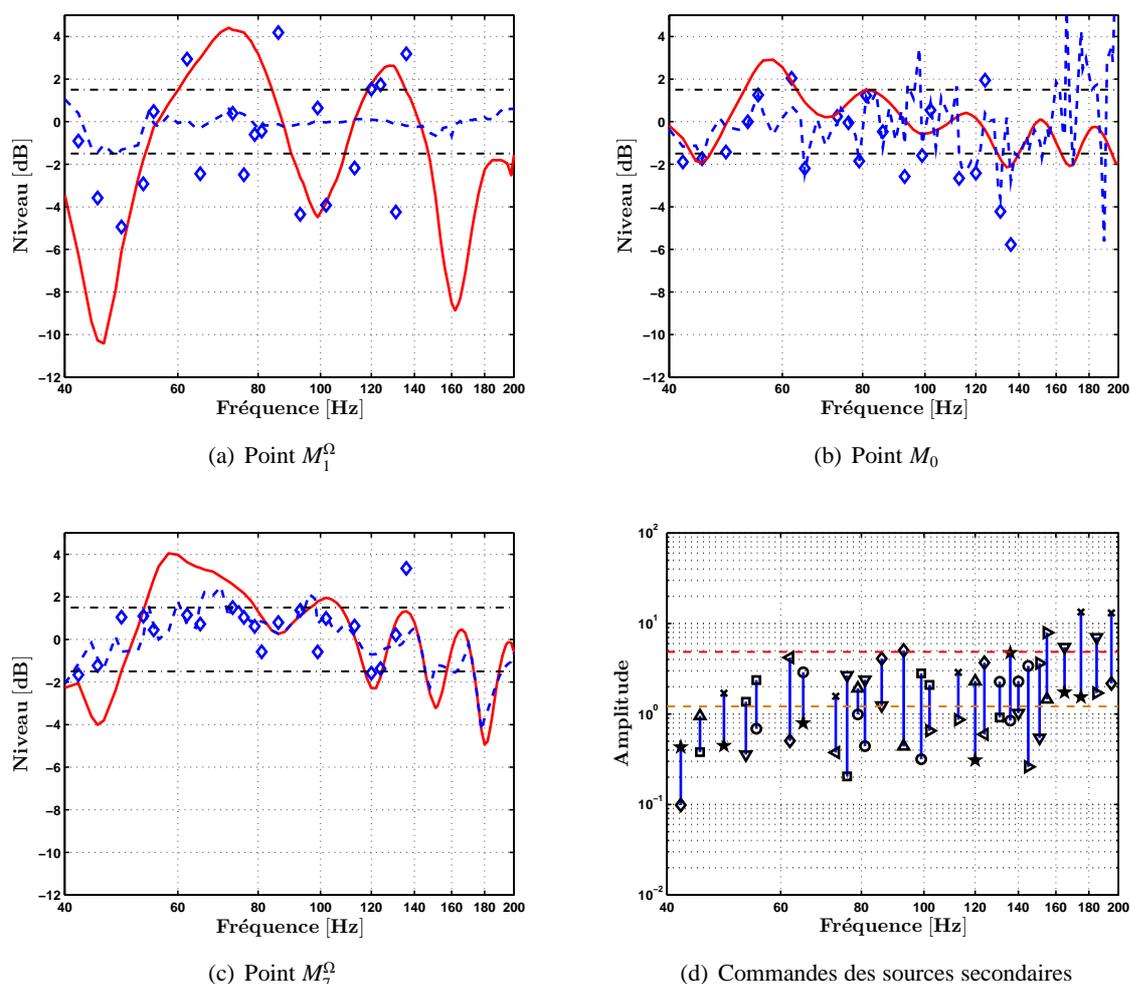


FIGURE 6.11 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée a de l'ensemble des points M^Ω .

(a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Ω .

Les résultats des mesures obtenues avec contrôle sont insatisfaisants au point M_1^Ω pour la majorité des fréquences ; les écarts mesurés avec contrôle sont généralement en dehors de l'intervalle à $\pm 1,5$ dB, voir figure 6.11(a).

Au point M_7^Ω , les résultats avec contrôle sont satisfaisants hormis à 136 Hz ; les écarts mesurés sont compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB, excepté à 136 Hz où le niveau est nettement dégradé, voir figure 6.11(c).

Au point test M_0 (non contrôlé), les résultats sont irréguliers et la majorité des écarts mesurés avec contrôle sont en dehors de l'intervalle à $\pm 1,5$ dB, dépassant souvent ceux sans contrôle, voir figure 6.11(b). Il est intéressant de noter que les prévisions du contrôle annoncent de fortes

dégradations à cette position pourtant proche d'une position contrôlée.

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont globalement très élevées ; la majorité des amplitudes dépassent la valeur critique, voir figure 6.11(d). Certaines amplitudes sont proches de la valeur maximale aux fréquences inférieures à 136 Hz, et la dépasseraient au delà de 136 Hz ; c'est pourquoi les mesures n'ont pas été réalisées à ces fréquences. La dispersion entre les amplitudes des différentes sources est également élevée, proche d'un facteur 10 pour l'ensemble des fréquences.

6.1.5 Bilan du contrôle dans le volume Ω

Les résultats des mesures du contrôle de la pression diffractée, réalisé séparément aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , sont tous satisfaisants aux points contrôlés mais cette amélioration n'est que locale ; ce contrôle tend à dégrader les écarts mesurés aux autres positions du volume Ω .

Les résultats du contrôle réalisé simultanément en plusieurs points sont irréguliers en fonction de la fréquence et se dégradent avec le nombre de points contrôlés. De plus, l'écart mesuré aux points non contrôlés est généralement dégradé ; ce comportement rejoint celui observé par simulation au chapitre 3.

Lors du contrôle sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω , les résultats sont irréguliers en fonction de la fréquence, mais aussi de la position. Les mesures réalisées avec contrôle sont globalement acceptables aux positions éloignées de la paroi réfléchissante, hormis à quelques fréquences. Par contre, les mesures obtenues aux positions proches de la paroi sont globalement insatisfaisantes pour la majorité des fréquences.

Le comportement du contrôle ne provient pas d'erreurs induites lors du calcul des commandes ; les erreurs sont négligeables pour tous les cas de contrôle dans le volume Ω . Ce comportement correspond à celui observé en simulation et indiquerait que les erreurs observées proviendraient plutôt des erreurs d'estimation de la pression diffractée.

Enfin, les amplitudes des commandes des sources secondaires augmentent fortement avec le nombre de points contrôlés. Un comportement non linéaire des sources secondaires lorsque leurs amplitudes deviennent critiques pourrait donc expliquer les dégradations observées à certaines fréquences.

6.2 Mesures du contrôle sur la surface Γ

Dans ce paragraphe, le contrôle de la pression diffractée estimée est réalisé sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ . Les résultats du contrôle sont alors présentés pour les points \mathbb{M}^Γ et pour ceux du volume Ω .

6.2.1 Estimation de la pression diffractée

Le filtre de diffraction D est maintenant identifié pour l'ensemble des points M^Γ à partir des mesures réalisées aux $N^D = 32$ positions S^D de la source d'identification (configuration \mathcal{B}). Pour rappel, la figure 2.7 indique les positions des éléments. Ces mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions que le contrôle dans le volume Ω . Comme précédemment, la solution du filtre de diffraction \tilde{D} est obtenue avec une valeur optimisée du paramètre de régularisation λ suivant la procédure décrite au chapitre 3.2.2 (équation (3.1)).

Pour la source à caractériser S_0 , les figures 6.12 (a) (b) présentent les courbes de pressions mesurées, évaluées et estimées aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ situés au voisinage du centre de la surface Γ . Les figures 6.12 (c) (d) présentent les résultats aux points M_1^Γ , M_{14}^Γ situés en périphérie de surface Γ . La présentation et la légende des courbes sont identiques à celles utilisées précédemment au paragraphe 6.1.1.

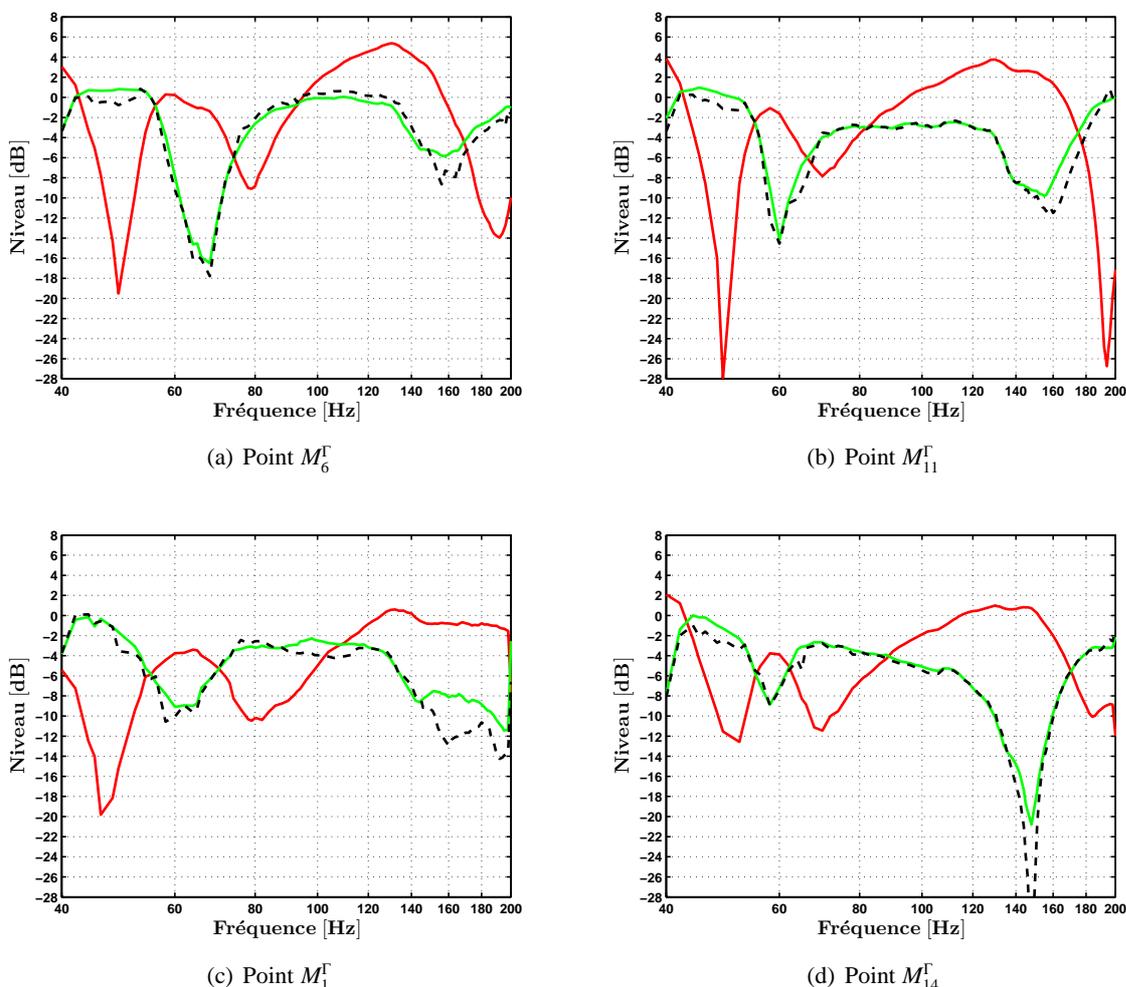


FIGURE 6.12 – Mesure de pression de la source S_0 aux points M^Γ , configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$.

— : pression totale, — : pression diffractée évaluée, - - : pression diffractée estimée

Le niveau de pression totale mesurée aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ évoluent en fonction de la

fréquence, avec de fortes variations comprises dans une dynamique de 30 dB, voir les figures 6.12 (a) (b). Les allures des courbes de pressions se ressemblent aux positions voisines du centre de la surface Γ (M_6^Γ et M_{11}^Γ). En ces points, le niveau de la pression diffractée est majoritairement élevé par rapport à la pression totale ; il est proche du niveau de la pression incidente aux fréquences inférieures à 60 Hz et dans la bande de fréquences 80 - 140 Hz.

L'estimation de la pression diffractée est globalement satisfaisante ; de faibles écarts apparaissent entre la pression diffractée évaluée et celle estimée aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 160 Hz. Les écarts aux fréquences inférieures à 60 Hz sont situés à des maxima de pression et pourraient gêner le contrôle, contrairement aux écarts situés au-dessus de 160 Hz.

Les niveaux de pression totale mesurée aux points M_1^Γ et M_{14}^Γ , situés en périphérie de la surface Γ , évoluent en fonction de la fréquence, avec des variations moins importantes, comprises dans une dynamique de 20 dB, voir les figures 6.12 (c) (d). Les allures des courbes de niveau de pressions sont similaires à celles aux positions M_6^Γ et M_{11}^Γ ; les différences apparaissent essentiellement au point M_1^Γ , situé dans un coin de la surface, aux fréquences supérieures à 120 Hz. Le niveau de la pression diffractée est majoritairement élevé sur l'ensemble des fréquences mais plus faible que celui des positions centrales.

L'estimation de la pression diffractée est aussi satisfaisante à ces positions ; comme aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ , de faibles différences apparaissent aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 160 Hz.

La figure 6.13 représente les erreurs relatives sur les pressions diffractées, estimées pour l'ensemble des points M^Γ .

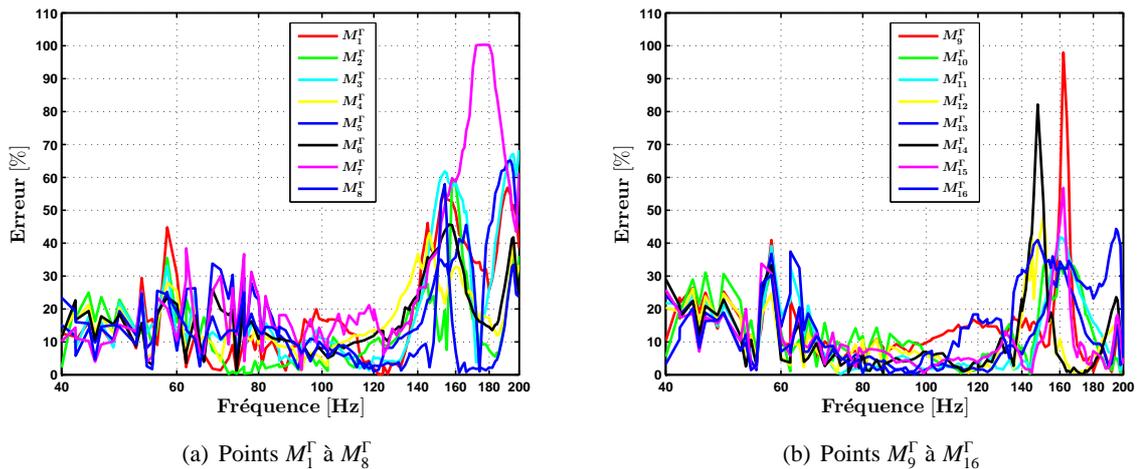


FIGURE 6.13 – Erreur relative d'estimation de la pression diffractée aux points M^Γ

L'erreur d'estimation de la pression diffractée est globalement inférieure à 20 % pour les fréquences inférieures à 140 Hz. Le pourcentage d'erreur est plus élevé, autour de 50 %, pour les fréquences supérieures à 140 Hz ce qui correspondent à de faibles niveaux de pression diffractée.

6.2.2 Régularisation du contrôle

Le calcul des commandes appliquées aux sources secondaires doit à nouveau être régularisé via le paramètre α , dont la valeur est fixée via une étude paramétrique des solutions $\tilde{U}(\alpha_k)$ pour des valeurs α_k comprises entre 10^{-16} et 10. La figure 6.14(a) présente la norme de l'erreur de régularisation en fonction des valeurs du paramètre de régularisation α et la figure 6.14(b), la norme de l'erreur pour une valeur de α en fonction des fréquences.

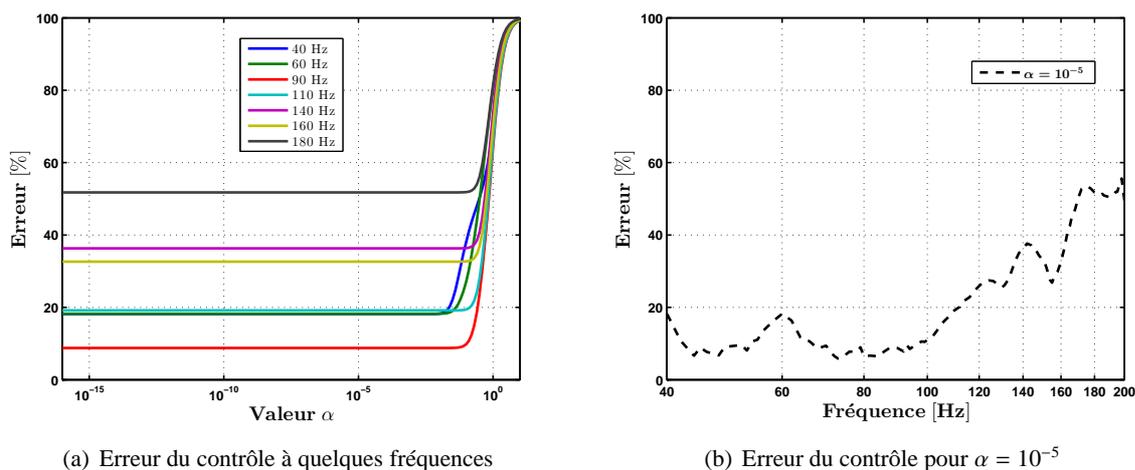


FIGURE 6.14 – Erreur relative du contrôle de la pression diffractée estimée (contrôle sur Γ). Figure de gauche : pour quelques fréquences en fonction de α ; figure de droite : pour $\alpha = 10^{-5}$ en fonction des fréquences

Les résultats, présentés ici à quelques fréquences, indiquent que l'erreur de régularisation est constante pour des valeurs de α inférieures à 10^{-4} . Par contre, et contrairement aux cas précédents, cette erreur dépend fortement de la fréquence : elle est minimale vers 90 Hz et augmente fortement aux fréquences plus élevées, notamment aux fréquences supérieures à 110 Hz où elle dépasse 20 %. Ce dispositif de contrôle actif ne serait donc a priori pas adapté pour un contrôle aux fréquences supérieures à 110 Hz. Des sources secondaires supplémentaires permettraient peut-être de diminuer l'erreur de régularisation à des fréquences plus élevées.

Dans la suite, les commandes \tilde{U} des sources secondaires sont calculées à chaque fréquence avec la valeur du paramètre de régularisation $\tilde{\alpha}$ qui minimise la norme de l'erreur. Cependant, une valeur $\tilde{\alpha}$ inférieure à 10^{-4} commune à toutes les fréquences aurait a priori permis d'obtenir les mêmes résultats de contrôle.

6.2.3 Contrôle aux positions \mathbb{M}^Γ

Le contrôle de la pression diffractée estimée est réalisé sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Γ pour une amplitude du signal de la source \tilde{S} de $0,824 V_{rms}$. La figure 6.15 représente les niveaux de pression mesurée aux points M_6^Γ , M_{11}^Γ , M_1^Γ et M_{14}^Γ .

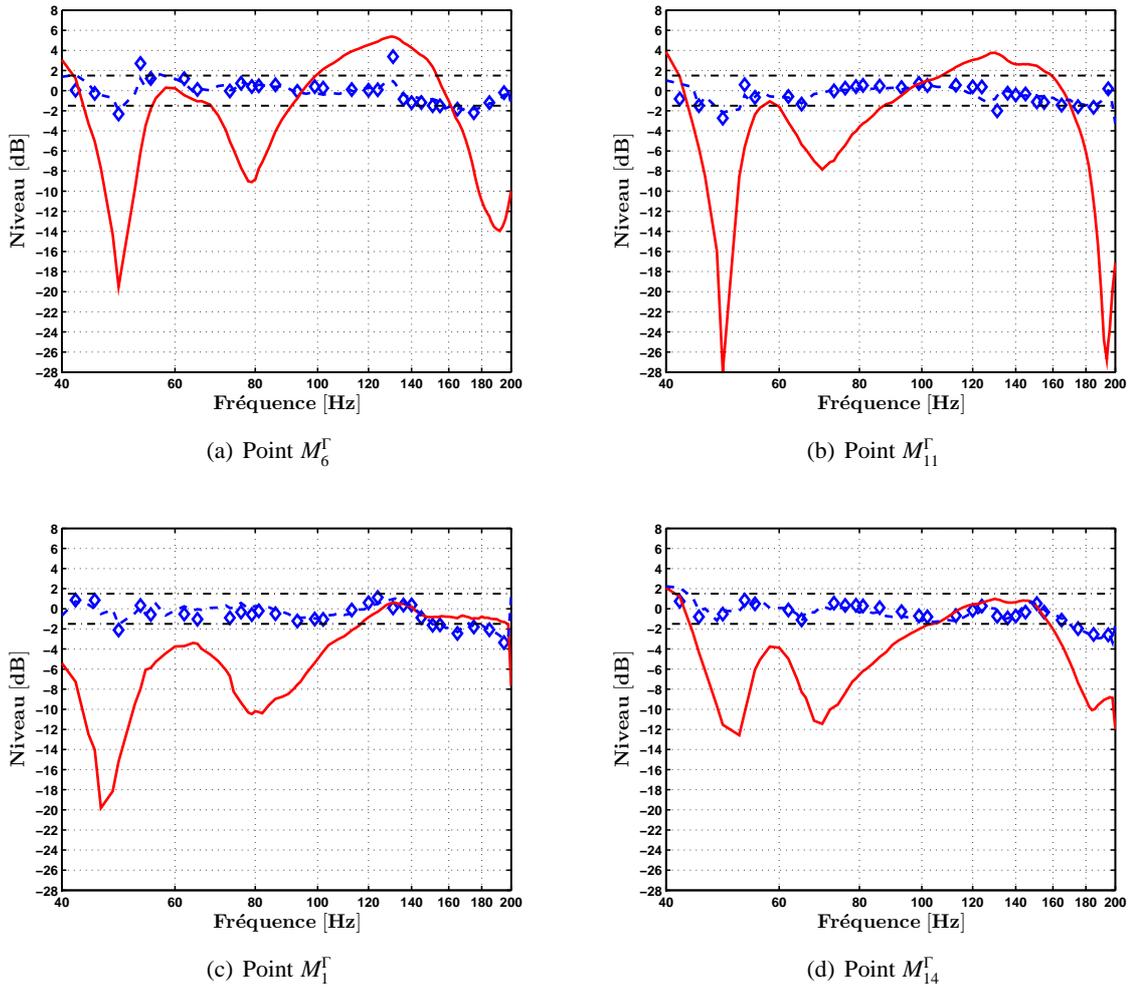


FIGURE 6.15 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ .

(a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Les résultats de mesure avec le contrôle actif et la prévision du contrôle coïncident globalement sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Γ . Cependant un faible écart de niveau, inférieur à 1 dB, entre la mesure et la prévision peut se produire à 42 Hz ainsi qu'aux positions situées en périphérie de la surface Γ . Une exception apparaît cependant à la fréquence 131 Hz aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ ; il s'agit probablement d'une erreur de mesure.

Le contrôle des pressions diffractées estimées aux positions \mathbb{M}^Γ est très satisfaisant ; le contrôle a permis de réduire significativement l'écart avec la pression incidente (jusqu'à 26 dB d'amélioration). Les niveaux de pression mesurée avec contrôle sont alors compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB dans toute la bande de fréquences 60 - 140 Hz. Aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures à 140 Hz, certains écarts dépassent légèrement l'intervalle ; ceci pourrait résulter des imperfections observées sur l'estimation de la pression diffractée (figure 6.13) ou de l'erreur sur le contrôle de la pression (figure 6.14).

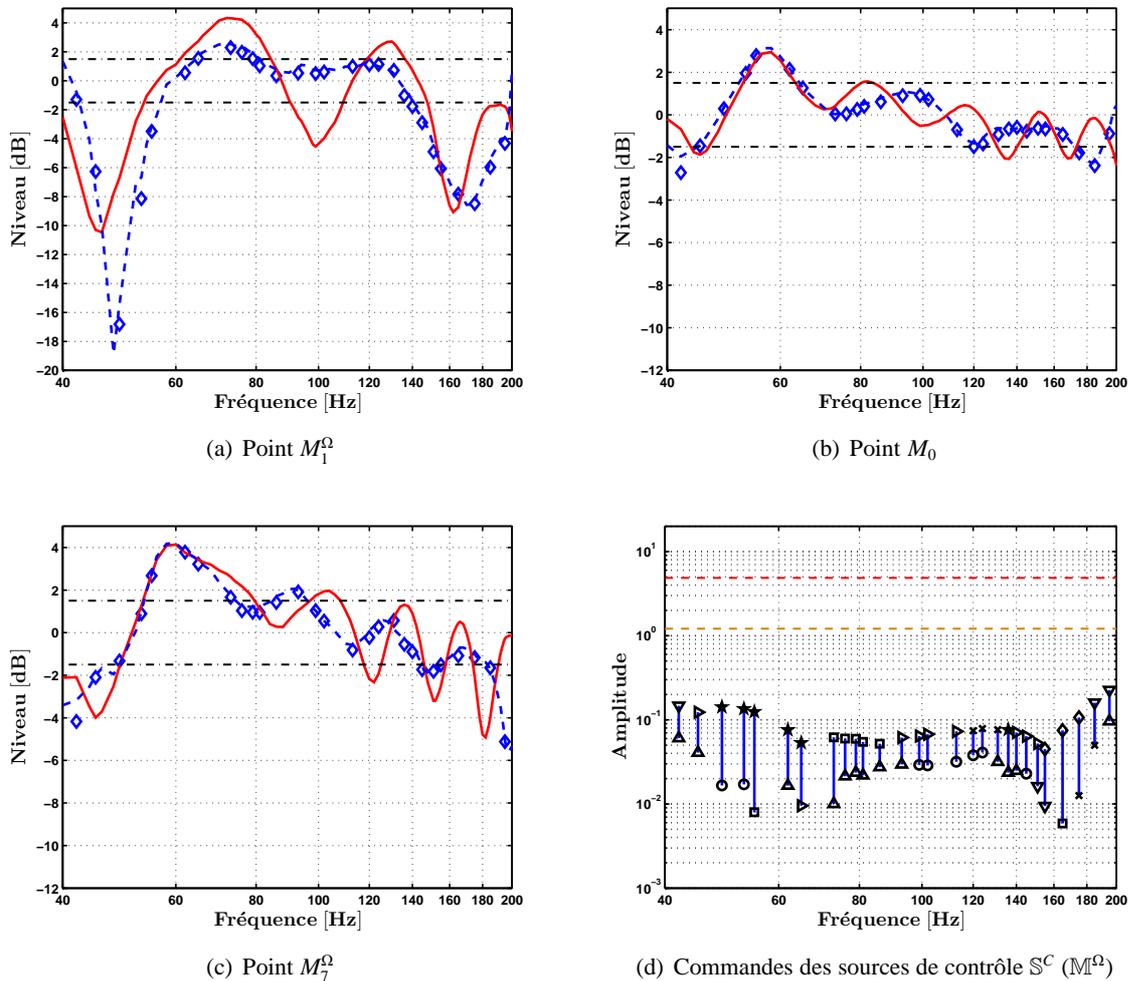


FIGURE 6.16 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée sur l’ensemble des points \mathbb{M}^Γ ; observation sur les points \mathbb{M}^Ω .

(a), (b), (c) : Niveau de pression de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), — — : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

Les conséquences du contrôle aux positions \mathbb{M}^Γ sont alors observées à des positions dans le volume Ω : M_1^Ω , M_7^Ω et M_0 . Ces vérifications sont présentées sur la figure 6.16. Là encore, les résultats de mesure avec le contrôle actif et la prévision du contrôle coïncident globalement sur l’ensemble des positions du volume Γ , même si un faible écart, inférieur à 1 dB, peut être observé à 42 Hz pour certaines positions.

Au point M_1^Ω (dans le volume mais proche de la paroi contrôlée), les résultats de mesure obtenus avec le contrôle sur la surface Γ sont plutôt satisfaisants dans la bande de fréquences 80-140 Hz (figure 6.16(a)). En effet, le contrôle a permis de réduire l’écart avec la pression incidente qui est alors compris dans l’intervalle $\pm 1,5$ dB dans toute cette bande de fréquences. Cependant, le contrôle sur la surface Γ est inefficace à la position M_1^Ω pour les fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 140 Hz.

Au point M_0 , les résultats de mesure obtenus avec le contrôle sur la surface Γ sont également plutôt satisfaisants dans la bande de fréquences 70-160 Hz (figure 6.16(b)). En effet, le contrôle réduit un peu l'écart par rapport à la pression incidente qui est alors compris dans l'intervalle $\pm 1,5$ dB dans cette bande de fréquences. Là aussi le contrôle sur la surface Γ devient inefficace pour les fréquences inférieures à 70 Hz et dégrade le niveau de pression aux fréquences supérieures à 170 Hz. La comparaison des mesures avec et sans contrôle montre une réduction des ondulations avec la fréquence, sans que ne soit modifiée la pente moyenne de la réponse.

Au point M_7^Ω , les résultats de mesure obtenue avec le contrôle sur la surface Γ sont aussi relativement satisfaisants dans la bande de fréquences 80-180 Hz (figure 6.16(c)). L'écart par rapport à la pression incidente reste presque toujours dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB mais en sort à 90 Hz et autour de 150 Hz. Le contrôle sur la surface Γ est toujours inefficace à cette position pour les fréquences inférieures à 80 Hz et il dégrade les mesures aux fréquences supérieures à 180 Hz. À nouveau, le contrôle semble modifier les ondulations fréquentielles observées sur les mesures, sans parvenir à corriger leur pente moyenne.

Il faut noter que l'erreur de contrôle observée à 131 Hz, aux points M_6^Γ et M_{11}^Γ (figure 6.15) ne semble pas avoir de répercussion aux positions dans le volume Γ .

Les amplitudes des commandes des sources secondaires sont plutôt faibles, regroupées entre 10^{-1} et 10^{-2} (voir figure 6.16(d)). Dans la bande de fréquence 80-140 Hz, la dispersion entre les minima et maxima des amplitudes est très faible, de l'ordre d'un facteur 3. Elle augmente par contre, jusqu'à un facteur 10, aux fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 140 Hz.

La mesure du contrôle de la pression diffractée estimée aux positions M^Γ a aussi été réalisée avec une amplitude de source \tilde{S} de $8,24V_{rms}$. Les résultats de contrôle sont similaires à ceux obtenus avec une amplitude de source \tilde{S} de $0,824V_{rms}$ et sont donc reportés en annexe F.

6.2.4 Bilan du contrôle sur la surface Γ

Le contrôle de la pression diffractée estimée aux positions M^Γ permet de réduire très significativement l'écart par rapport à la pression incidente, dont le niveau initialement élevé est atténué avec une réduction atteignant 26 dB. Seules de faibles imperfections de contrôle apparaissent sur les positions M^Γ , aux fréquences inférieures à 60 Hz et supérieures 140 Hz.

Ce résultat est obtenu dans une configuration où 9 sources sont utilisées pour contrôler la pression sur 16 microphones ; le problème d'inversion est donc a priori bien posé, ne nécessitant que très peu de régularisation. Le contrôle doit cependant trouver un compromis entre ces microphones, plus nombreux que les sources, ce qui pourrait limiter la réduction en chaque point. Le fait que la réduction soit au contraire importante en tous les points peut être interprété comme le fait que le contrôle estime bien un opérateur physique sous-jacent.

Le contrôle de la pression sur la surface Γ a un impact moins spectaculaire aux positions du volume Ω mais son effet est aussi bénéfique dans la bande de fréquences 80 - 140 Hz ; les écarts par rapport à la pression incidente sont en général réduits, permettant alors de respecter l'intervalle $\pm 1,5$ dB lorsque le contrôle est actif.

Par contre, aux fréquences inférieures à 80 Hz, le contrôle est inefficace aux positions du volume Ω bien que les résultats de contrôle soient satisfaisants aux positions contrôlées \mathbb{M}^Γ . Une cause de cette limitation est probablement que le revêtement absorbant des cinq parois n'est pas efficace aux basses fréquences ; la réduction de la pression diffractée par une seule paroi (qui de plus, est une des deux plus petites) n'a alors pas de raison de suffire pour obtenir une situation proche de l'anéchoïcité.

Une limitation similaire semble visible aux fréquences supérieures à environ 130 Hz, pour lesquelles le contrôle de la pression diffractée sur la surface Γ est inefficace aux positions du volume Ω alors que les résultats de contrôle sont encore globalement satisfaisants aux positions contrôlées \mathbb{M}^Γ . Cette limitation peut être reliée à l'augmentation rapide de l'erreur liée à la pénalisation observée aux fréquences supérieures à 110 Hz (voir figure 6.14). Elle peut indiquer que le nombre de sources devient insuffisant pour réaliser un compromis satisfaisant sur chacune des positions \mathbb{M}^Γ . D'autre part, la densité spatiale des microphones sur la surface Γ pourrait être, elle aussi, insuffisante pour contrôler la pression diffractée aux fréquences supérieures à 140 Hz.

Enfin, l'identification du filtre de diffraction est probablement imparfaite, entraînant mécaniquement une répercussion sur la qualité des mesures dans le volume Ω . Il faut en particulier garder à l'esprit que la caractérisation de la source \tilde{S} est nécessairement imparfaite, alors, qu'elle est la base de l'identification du filtre de diffraction ainsi que celle de la vérification du résultat de mesure.

Chapitre 7

Post-traitement des mesures

Sommaire

7.1	Prise en compte de la directivité de la source \tilde{S}	108
7.1.1	Pression incidente dans la salle semi-anéchoïque	109
7.1.2	Contrôle dans le volume Ω	112
7.1.3	Contrôle sur la surface Γ	115
7.1.4	Conclusion	120
7.2	Vérification du contrôle en des points du volume Ω	122
7.2.1	Contrôle dans le volume Ω	123
7.2.2	Contrôle sur la surface Γ	126
7.2.3	Influence du paramètre de régularisation sur le contrôle dans Ω	130
7.2.4	Conclusion	132

Au cours des précédents chapitres, nous avons émis plusieurs remarques concernant les hypothèses de simulation et les conditions expérimentales. Il n'est en général pas possible de hiérarchiser a priori l'importance des multiples facteurs qui peuvent influencer le réalisme des simulations ou impacter les résultats de mesure. C'est ce qui conduit en général à itérer un processus expérimental : l'interprétation des écarts ou des anomalies constatées à l'issue d'une première série de mesures permet de revoir le protocole expérimental et de consolider les résultats d'une campagne expérimentale définitive.

Le cadre de ce travail est cependant un peu particulier : l'expérimentation en taille réelle conduit à de très nombreux problèmes concrets, juste évoqués dans ce mémoire, mais qui se sont avérés extrêmement chronophages. À ce volume de travail s'est ajouté un cadre logistique lié au déménagement du LMA : celui-ci nous a permis d'avoir l'exclusivité de l'ancienne salle semi-anechoïque pendant toute la durée de notre campagne expérimentale mais la contrepartie était de libérer les locaux à une date impérative, sans possibilité de reprendre les mesures après avoir fini leur post-traitement.

Nous avons donc dû reporter un certain nombre d'analyses et nous résoudre à traiter certains points via des simulations effectuées a posteriori, en abandonnant l'idée d'une validation expérimentale complémentaire.

Ce chapitre regroupe ainsi des calculs réalisés à partir de mesures ainsi que des simulations numériques. La première partie du chapitre traite de la prise en compte du coefficient de directivité de la source \tilde{S} dans les mesures réalisées en salle semi-anechoïque. Des comparaisons sont menées sur les prévisions avec et sans directivité des deux cas de contrôle, dans le volume Ω et sur la surface Γ . Dans la seconde partie du chapitre, des résultats de simulations sont présentés, visant à mieux vérifier l'effet du contrôle à des points du volume Ω différents de ceux de minimisation.

7.1 Prise en compte de la directivité de la source \tilde{S}

Au chapitre 5, nous avons indiqué que la caractérisation de la source de référence \tilde{S} avait été réalisée en salle anechoïque, permettant notamment d'évaluer un coefficient de directivité $L(\theta)$. Étant donné les défauts de la salle anechoïque, les valeurs du coefficient de directivité sont potentiellement altérées par l'effet des parois, notamment au-dessous de la fréquence de coupure de la salle (75 Hz). Cependant, comme expliqué précédemment, il est difficile de séparer ce qui relève des défauts de la salle anechoïque de ce qui est effectivement caractéristique de la source \tilde{S} .

Certains résultats de mesure sont néanmoins repris en prenant en compte le coefficient de directivité $L(\theta)$ déduit des mesures en salle anechoïque, voir chapitre 5.2. Cette vérification est réalisée afin d'en observer l'impact sur les résultats du contrôle actif dans le volume Ω et sur la surface Γ . Faute d'avoir pu refaire des mesures, les résultats présentés ici sont des calculs basés sur le post-traitement des mesures existantes.

7.1.1 Pression incidente dans la salle semi-anéchoïque

La démarche consiste ainsi à reprendre les résultats obtenus lors des expérimentations (étape d'identification puis étape de contrôle) et les compléter par des simulations :

- Étape d'identification : la pression diffractée évaluée P_{dif}^{ev} , utilisée pour l'identification du filtre de diffraction D , est obtenue à partir de la mesure de pression totale P_{tot} et de la pression incidente reconstruite P_{inc} (équation 5.6). Dans ce chapitre, la pression incidente est maintenant reconstruite en prenant en compte le coefficient de directivité $L(\theta)$ de la source \tilde{S} mesurée dans la salle anéchoïque (équation 5.3). L'identification du filtre de diffraction est obtenue à partir des mesures de pression totale réalisées lors de l'étape d'identification dans la salle semi-anéchoïque (configuration \mathcal{B}) et de la pression incidente reconstruite nouvellement ajustée du coefficient de directivité. La pression diffractée estimée P_{dif}^{est} est alors obtenue avec ce nouveau filtre de diffraction D . La valeur du coefficient de régularisation λ est obtenue suivant la démarche, vue au chapitre 3.2.2), permettant de déterminer une valeur de λ optimisée.
- Étape de contrôle : la prévision du contrôle \tilde{P}^{on} est obtenue à partir des mesures réalisées en salle semi-anéchoïque et des commandes \tilde{U} calculées afin de minimiser la pression diffractée estimée P_{dif}^{est} obtenue à partir du nouveau filtre D (équation 5.8). Les mesures des fonctions transfert C entre les sources secondaires et les points à contrôler ainsi que les pressions totales sans contrôle P^{off} sont reprises des expérimentations réalisées pour une amplitude du signal de la source S_0 égale à $0,824V_{rms}$.

Tout d'abord, pour mieux évaluer l'effet du coefficient de directivité, la figure 7.1 présente une comparaison entre les niveaux de pressions totales mesurées en salle semi-anéchoïque avec et sans prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$. Les mesures utilisées concernent les pressions totales sans contrôle obtenues aux points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω . Le tableau 7.1 présente les angles formés entre les points du volume Ω et la source S_0 dans la salle semi-anéchoïque.

Points	M_1^Ω	M_2^Ω	M_3^Ω	M_4^Ω	M_5^Ω	M_6^Ω	M_7^Ω	M_0
Angle θ	168°	165°	156°	138°	99°	58°	42°	120°

TABLE 7.1 – Angle entre la source S_0 et les points du volume Ω

Les courbes rouges continues et discontinues sur les figures 7.1 (a) (b) (c) représentent les niveaux de pression totales obtenus respectivement avec et sans prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$ dans la normalisation par la pression incidente reconstruite. Comme attendu, la prise en compte du coefficient de directivité a surtout un effet significatif à partir de 120 Hz ; cela a pour principal effet de relever progressivement les niveaux, en les rapprochant ainsi de l'intervalle de $\pm 1,5$ dB. Cette tendance est aussi observable sur les mesures réalisées en salle anéchoïque de la figure 7.1(d).

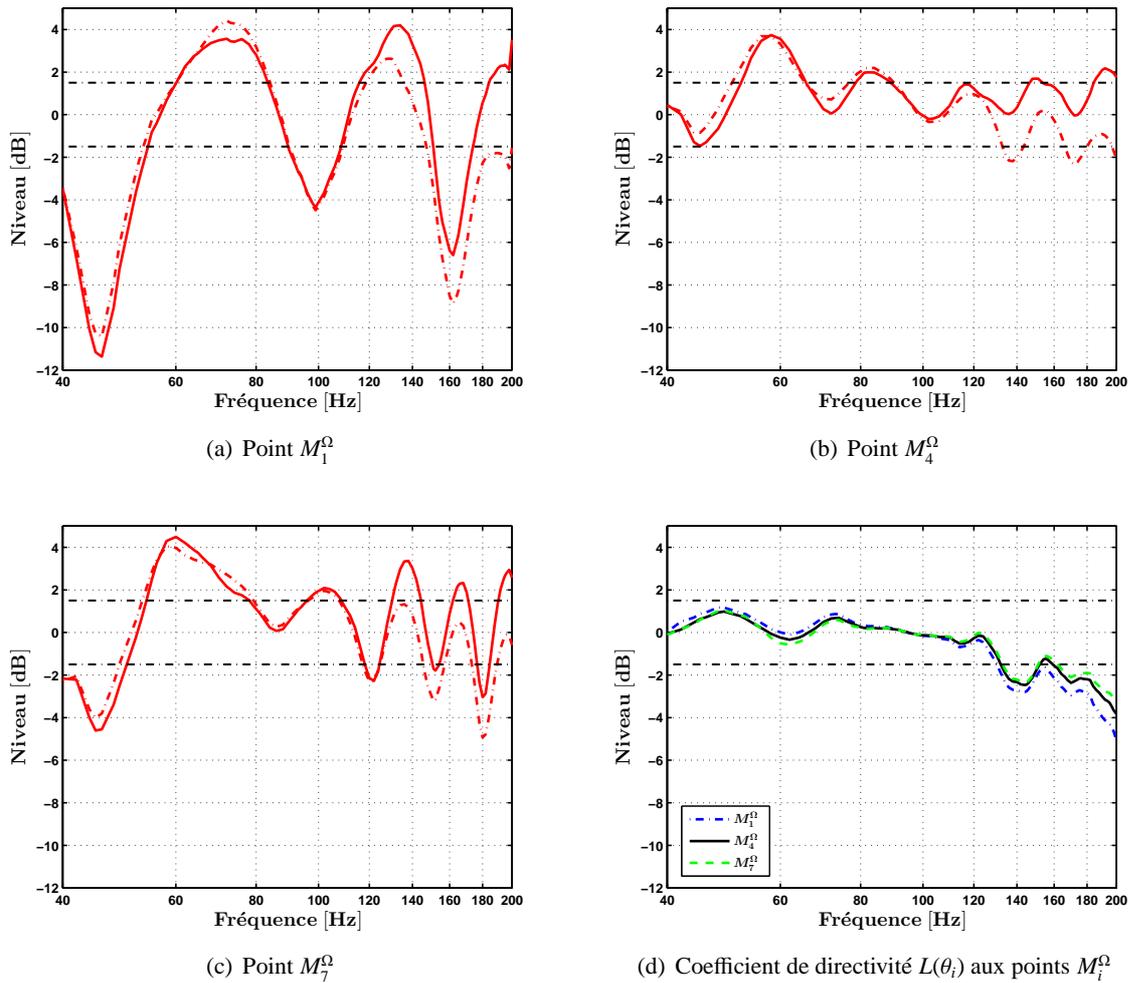


FIGURE 7.1 – Pression totale mesurée avec et sans prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$ de la source \tilde{S} .

— : pression totale ajustée par $L(\theta)$, - - - : pression totale sans $L(\theta)$

Pour les points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , la figure 7.1(d) présente les mesures du coefficient de directivité $L(\theta)$ en fonction de la fréquence obtenues en salle anéchoïque, pour les angles formés entre ces 3 points et la source S_0 dans la salle semi-anéchoïque. Nous pouvons voir une décroissance systématique de la pression avec la fréquence, qui s'accroît au-dessus de 120 Hz, ainsi que des accidents autour de 140 Hz et au-dessous de 80 Hz. Nous pouvons supposer que la décroissance avec la fréquence serait principalement due à la source \tilde{S} alors que les accidents résulteraient des défauts de la salle anéchoïque.

Quoi qu'il en soit, la prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$ permet d'obtenir des résultats en salle semi-anéchoïque moins dispersés, qui seraient peut-être plus proches de la réalité, même si les mesures du coefficient de directivité sont partiellement entachées d'erreurs. Pour étayer cette hypothèse, les pressions totales mesurées aux points M_1^Ω et M_7^Ω sont maintenant comparées à des simulations sur la figure 7.2. Les simulations, représentées par les courbes

discontinues, sont celles obtenues pour le cas de la salle semi-anéchoïque avec le logiciel Felin (voir chapitres 3 et 4) et pour le cas d'un plan rigide infini avec le logiciel Matlab. Pour ce dernier cas, les résultats aux points M_1^Ω et M_7^Ω sont obtenus à partir de la somme des pressions de la source en S_0 et son image par rapport à un plan rigide infini. La source en S_0 et son image sont aussi considérées comme des sources monopolaires de débit Q_s .

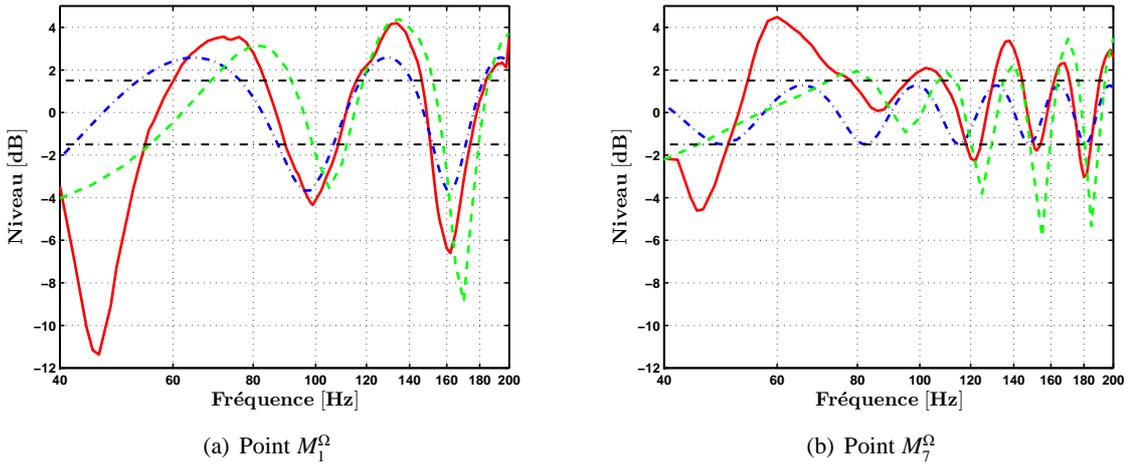


FIGURE 7.2 – Comparaison mesure et simulations des niveaux de pression totale en salle semi-anéchoïque.

— : mesure ajustée avec $L(\theta)$, - - : simulation salle semi-anéchoïque, - - - : simulation plan rigide infini

Pour le point M_1^Ω (le plus proche de la paroi rigide), les courbes montrent des différences de comportement essentiellement aux fréquences inférieures à 100 Hz ; de 50 à 100 Hz la mesure a un comportement intermédiaire entre les deux simulations, qui prédisent assez bien le niveau des écarts liés à l'effet des parois. Aux fréquences plus basses, la mesure décroît beaucoup plus que ne le prévoient les simulations, avec un minimum de pression vers 45 Hz ce qui n'est pas intuitif au voisinage d'une paroi. Aux fréquences supérieures à 100 Hz, les 3 courbes sont très proches. Nous pouvons alors noter, pour le cas de la simulation avec Felin et la mesure, que les cinq parois peuvent être considérées comme absorbantes pour une position proche de la paroi réfléchissante.

La mesure corrigée au point M_7^Ω fait apparaître des différences de comportement plus importantes, significatives jusqu'à environ 140 Hz. Aux fréquences plus élevées, la mesure ressemble qualitativement à la simulation de paroi rigide, mais avec des ondulations plus marquées. Ceci montre que l'influence des parois supposées absorbantes n'est pas négligeable pour une position éloignée de la paroi réfléchissante.

Bilan Globalement, la prise en compte du coefficient de directivité de la source \tilde{S} semble susceptible d'améliorer son modèle de rayonnement acoustique ; l'écart entre la mesure de pression totale et l'estimation de la pression incidente semble plus proche des simulations lorsque la directivité est prise en compte, compensant en particulier une pente fréquentielle (constatée

précédemment au chapitre 6) qui peut être reliée aux caractéristiques de la source.

7.1.2 Contrôle dans le volume Ω

Nous allons maintenant observer l'impact de la prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$ de la source \tilde{S} sur le contrôle de la pression diffractée. Dans un premier temps, l'identification du filtre de diffraction est obtenue pour la configuration \mathcal{B} avec $\tilde{\lambda}$, ensuite la minimisation des pressions diffractées est réalisée simultanément sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω du volume Ω .

7.1.2.1 Estimation de la pression diffractée

Rappelons que l'identification du filtre de diffraction aux points \mathbb{M}^Ω est obtenue en mesurant la pression de la source \tilde{S} sur l'ensemble des points d'identification \mathbb{S}^D . Pour chaque position de la source \tilde{S} aux points d'identification \mathbb{S}^D , la pression diffractée est maintenant évaluée en tenant compte du coefficient de directivité $L(\theta)$.

Afin d'observer l'effet de $L(\theta)$, les pressions diffractées évaluées aux points \mathbb{M}^Ω sont tracées avec et sans la prise en compte de $L(\theta)$ sur les figures présentant les courbes de niveau. L'effet du coefficient $L(\theta)$ sur l'estimation de la pression diffractée est observé sur la moyenne des erreurs des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω . Pour les 3 points M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω , la figure 7.3 présente les niveaux de pression totale mesurée (courbe rouge) et diffractée évaluée (courbe verte). Les niveaux de la pression diffractée évaluée sont représentés, avec et sans la prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$, par les courbes respectivement continues et discontinues.

Comme attendu les différences entre les deux courbes de pression diffractée se situent essentiellement aux fréquences supérieures à 120 Hz. Au point M_1^Ω , les différences sont très élevées, atteignant jusqu'à 8 dB. Ces différences sont d'autant plus importantes que les niveaux des pressions diffractées sont élevés par rapport à la pression totale. Aux points M_4^Ω et surtout M_7^Ω , les deux estimations de pression diffractée sont similaires. Les différences les plus importantes sont visibles à des fréquences où la pression diffractée est négligeable devant la pression incidente. L'effet sur le contrôle devrait donc être négligeable.

L'impact de la prise en compte du coefficient de directivité peut aussi être observé sur la figure 7.3(d) qui présente la moyenne des erreurs relatives des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω . Les courbes continue et discontinue représentent respectivement la moyenne des erreurs avec et sans le coefficient $L(\theta)$. Les deux courbes d'erreur moyenne sont très proches et relativement faibles. Nous pouvons donc à nouveau anticiper des résultats de contrôle équivalents à ceux obtenus sans la prise en compte du coefficient de directivité. Il est intéressant de noter que l'identification du filtre de diffraction semble ici faiblement impactée par la prise en compte de $L(\theta)$.

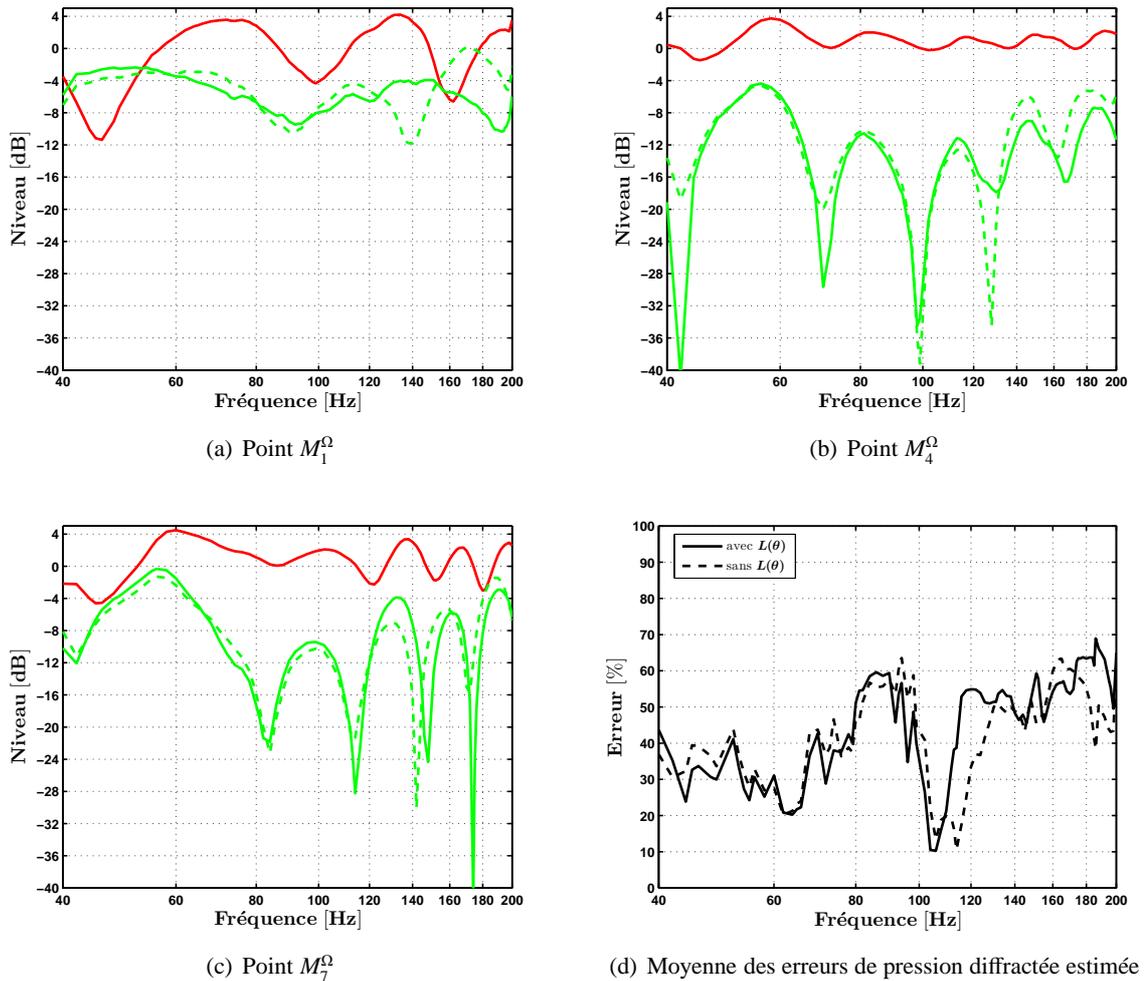


FIGURE 7.3 – Pressions totale et diffractée avec et sans prise en compte de $L(\theta)$ aux points M^Ω (configuration \mathcal{B} , $\tilde{\lambda}$).

— : pression totale, — : pression diffractée évaluée avec $L(\theta)$, - - : pression diffractée évaluée sans $L(\theta)$

7.1.2.2 Contrôle de la pression diffractée

La figure 7.4 présente les pressions totales avec et sans contrôle, pour un contrôle simultané des sept points M^Ω . Comme attendu, les résultats de contrôle ressemblent à ceux obtenus sans la prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$. Les prévisions du contrôle sont satisfaisantes aux positions contrôlées proches de la paroi réfléchissante (M_1^Ω) et de la source S_0 (M_4^Ω). Par contre, les résultats obtenus au point M_7^Ω sont moins bons, avec une dégradation au-dessus de 170 Hz et pour quelques fréquences.

Au point test M_0 , distinct des points de minimisation, les niveaux prédits indiquent une dégradation des performances dès 95 Hz. Le comportement du contrôle avec la prise en compte de la directivité est similaire à celui obtenu précédemment, malgré une très légère amélioration en tenant compte de la directivité.

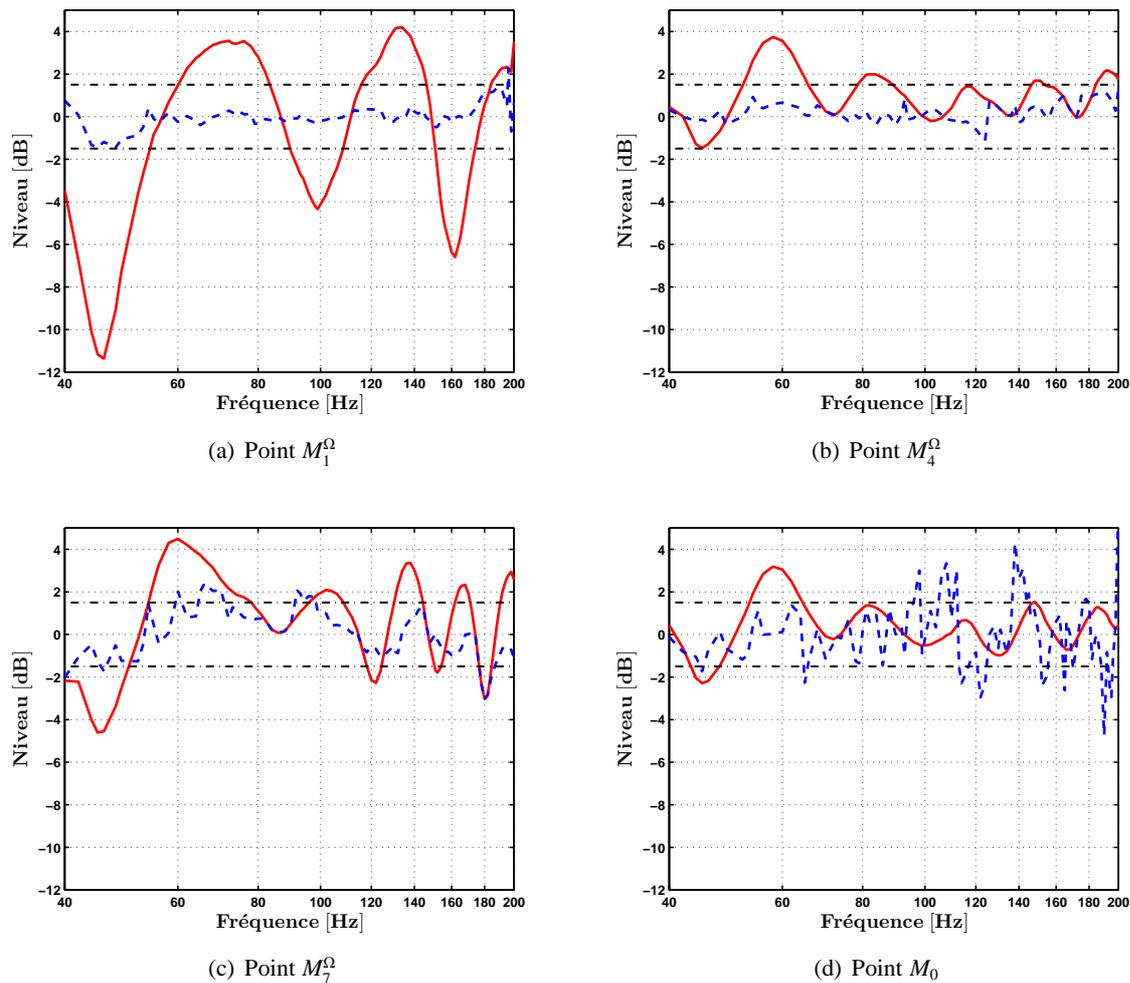


FIGURE 7.4 – Prévion du contrôle simultané des pressions diffractées estimées sur l’ensemble des points M^{Ω} .

— : mesure sans contrôle, - - : prévision du contrôle avec le coefficient de directivité $L(\theta)$

Pour tous les points M^{Ω} , la figure 7.5(a) présente l’erreur relative sur la pression prévue pour le contrôle avec directivité. Aux points contrôlés, l’erreur se situe au-dessous de 20 % dans la bande de fréquences 80 à 120 Hz et autour de 40 % pour les fréquences inférieures à 80 Hz et supérieures à 120 Hz. Par contre, l’erreur relative au point test M_0 est plus importante ; elle se situe autour de 40 % sur toute la bande de fréquences.

La figure 7.5(b) présente les amplitudes des commandes des sources secondaires (toujours normalisées par l’amplitude de la source S_0). Les amplitudes atteignent très souvent la valeur critique et dépassent le maximum pour certaines fréquences. Ces résultats indiquent que les mesures en salle semi-anéchoïque n’auraient pas pu être réalisées à certaines fréquences avec les sources secondaires installées.

Enfin, la courbe noire représente le conditionnement de la matrice des fonctions de transfert entre les sources secondaires S^C et les points à contrôler M^Ω . Le conditionnement de la matrice est défini par le rapport de la plus grande valeur singulière sur la plus petite. Les valeurs du conditionnement de la matrice sont situées entre 10^2 et 10^3 , montrant ainsi de fortes différences entre les valeurs singulières. De plus, la courbe fluctue rapidement avec la fréquence ce qui indique que pour le contrôle aux points M^Ω , le comportement des sources secondaires serait probablement problématique.

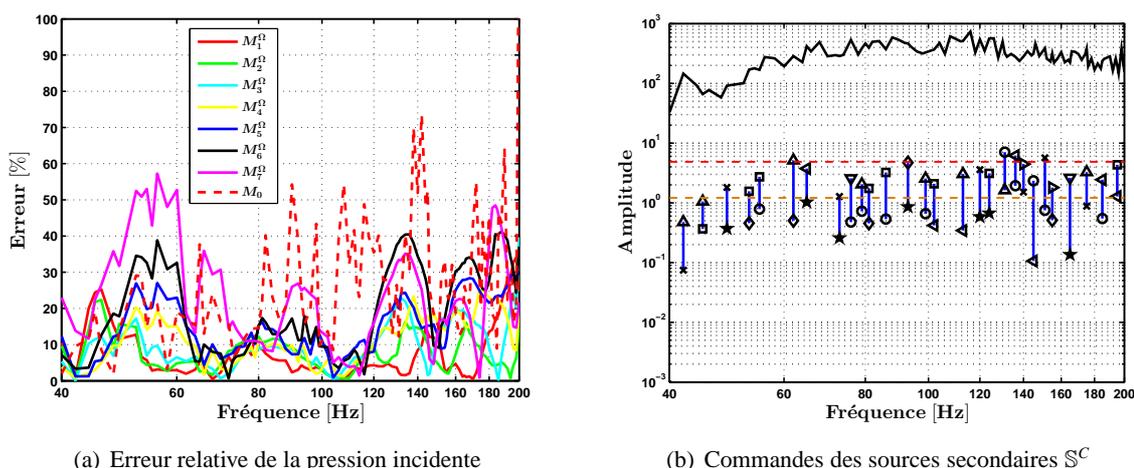


FIGURE 7.5 – Erreur relative sur la pression incidente aux points M^Ω ; commandes des sources secondaires.

(b) : — : rapport des valeurs singulières, Amplitude des sources secondaires ; S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft , — : amplitude critique, — : amplitude maximale.

Bilan Les prévisions du contrôle et les amplitudes des sources secondaires étant similaires à celles obtenues lors de l'expérience (figure 6.11), nous pouvons supposer que nous aurions eu un comportement de contrôle identique. Ces résultats indiquent que l'estimation de la pression diffractée réalisée en prenant en compte la directivité de la source améliore légèrement les résultats de contrôle, mais ne modifie pas significativement son comportement ; l'efficacité du contrôle n'est bonne qu'aux positions contrôlées. De plus, le conditionnement de la matrice de transfert ainsi que les fortes amplitudes des commandes des sources secondaires indiquent un contrôle non prévisible et instable.

7.1.3 Contrôle sur la surface Γ

Nous reprenons maintenant le contrôle du champ diffracté par minimisation sur la paroi. Pour ce contrôle, l'identification du filtre de diffraction est obtenue pour la configuration \mathcal{B} avec $\tilde{\lambda}$ et la minimisation des pressions diffractées est réalisée simultanément sur l'ensemble des points M^Γ de la surface Γ .

7.1.3.1 Estimation de la pression diffractée

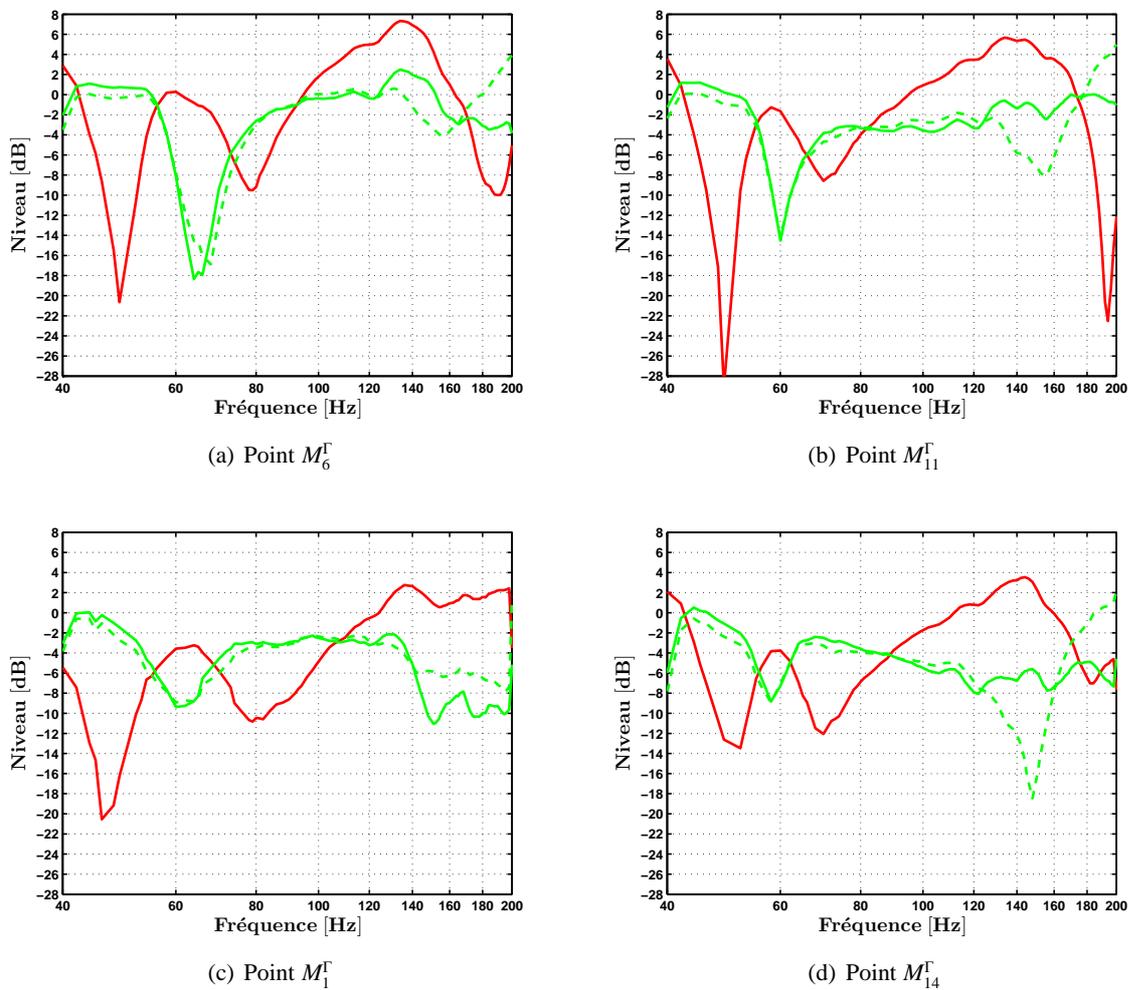


FIGURE 7.6 – Pressions totale et diffractée avec et sans prise en compte de $L(\theta)$ aux points M^Γ (configuration \mathcal{B} , $\tilde{\lambda}$).

— : pression totale, — : pression diffractée évaluée avec $L(\theta)$, - - : pression diffractée évaluée sans $L(\theta)$

L'identification du filtre de diffraction est effectuée aux points M^Γ en prenant en compte le coefficient de directivité $L(\theta)$. Afin d'observer son effet, les pressions diffractées évaluées aux points M^Γ sont tracées avec et sans la prise en compte de $L(\theta)$ sur la figure 7.6. Les résultats sont présentés pour les points M_1^Γ , M_6^Γ , M_{11}^Γ et M_{14}^Γ suivant la légende de la figure 7.3. D'autre part, l'effet du coefficient $L(\theta)$ sur l'estimation de la pression diffractée est observé sur la moyenne des erreurs des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des points M^Γ à la figure 7.7.

Aux fréquences supérieures à 120 Hz, les résultats révèlent de grandes différences entre les niveaux des pressions diffractées évaluées avec et sans directivité $L(\theta)$; leurs comportements se

ressemblent globalement au-dessous de 120 Hz, mais au-delà les écarts entre les deux courbes sont de l'ordre de 6 à 12 dB. Ces forts écarts sont d'autant plus significatifs que, à ces fréquences, les niveaux de la pression diffractée sont globalement élevés comparativement à ceux de la pression incidente.

La figure 7.7 présente la moyenne des erreurs relatives sur la pression diffractée estimée avec et sans le coefficient de directivité. Les courbes de la figure 7.7(a) correspondent aux moyennes des erreurs sur les points M_1^Γ à M_8^Γ et les courbes de la figure 7.7(b) à celles des points M_9^Γ à M_{16}^Γ .

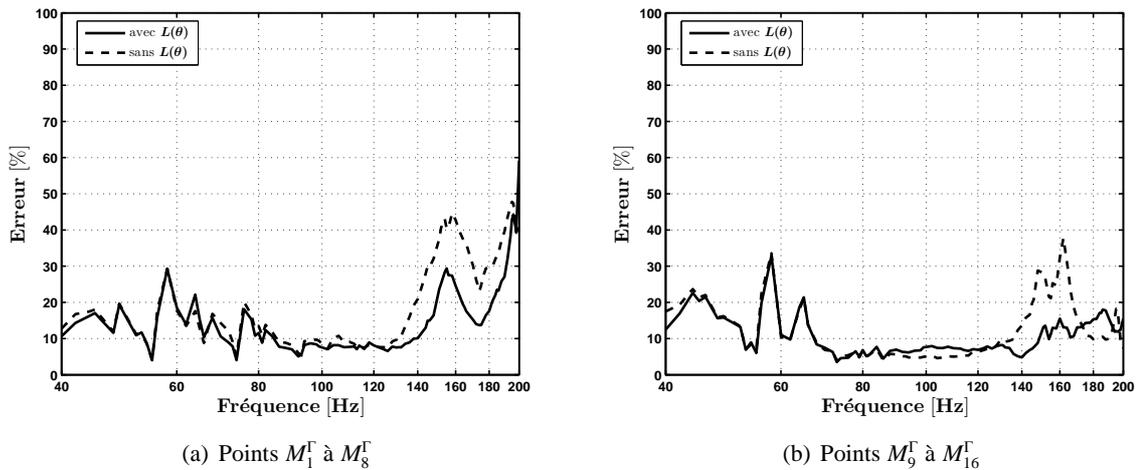


FIGURE 7.7 – Moyenne des erreurs relatives des pressions diffractées estimées aux points M^Γ avec et sans prise en compte du coefficient de directivité $L(\theta)$

Ces résultats montrent que la prise en compte du coefficient de directivité dans l'étape d'identification du filtre de diffraction tend à améliorer l'estimation de la pression diffractée aux fréquences supérieures à 120 Hz. Nous pouvons donc supposer que le contrôle sera amélioré dans cette bande de fréquences. D'autre part, il est intéressant de noter que les erreurs d'estimation de la pression diffractée aux points M^Γ sont très nettement inférieures à celles aux points M^Ω .

7.1.3.2 Contrôle aux positions M^Γ

Les prévisions du contrôle sont maintenant calculées avec un contrôle simultané sur l'ensemble des points M^Γ de la surface Γ . La figure 7.8 présente les résultats, pour quelques points de la surface Γ , obtenus avec et sans le contrôle de la pression diffractée estimée en tenant compte du coefficient de directivité de la source \tilde{S} .

Les résultats des prévisions du contrôle sont satisfaisants aux points de la surface Γ . Néanmoins, nous pouvons noter que le comportement des courbes avec le contrôle est moins stable au-dessus de 120 Hz et peut contenir des accidents comme pour le point M_6^Γ autour de 160 Hz. Ce comportement provient très probablement des erreurs sur le résidu observées en expérimentation.

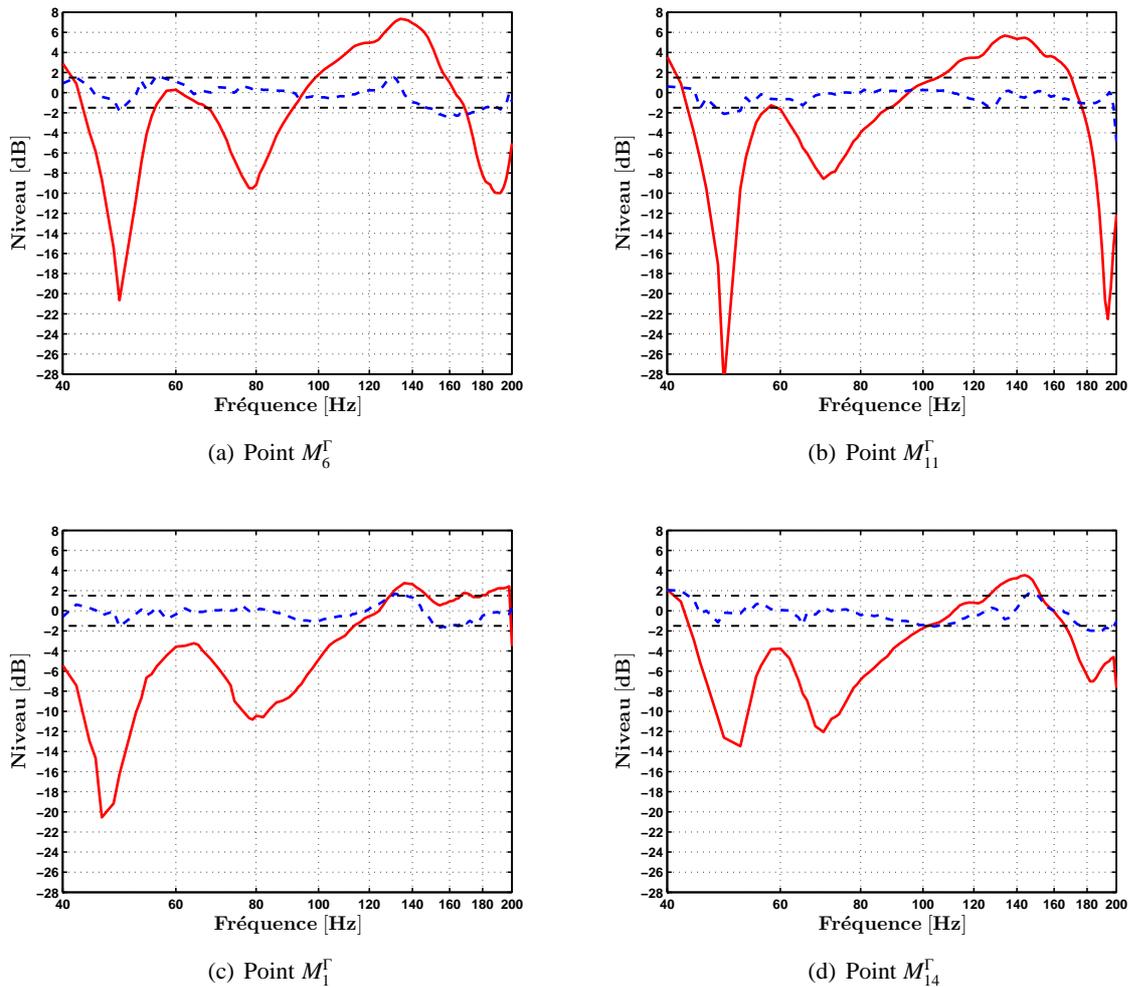


FIGURE 7.8 – Prévion du contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Γ .

— : mesure sans contrôle, - - : prévision du contrôle avec le coefficient de directivité $L(\theta)$

tation à la figure 6.14 et en simulation à la figure 4.6; il pourrait peut-être être amélioré en augmentant le nombre de sources secondaires. Toutefois, en comparant ces résultats avec ceux obtenus sans prise en compte du coefficient de directivité, nous constatons une légère amélioration aux fréquences supérieures à 120 Hz.

La figure 7.9 présente, pour quelques points du volume Ω , les résultats obtenus avec et sans le contrôle de la pression diffractée estimée en tenant compte de la directivité de la source \tilde{S} .

Les résultats de contrôle réalisés en prenant en compte le coefficient de directivité de la source \tilde{S} sont globalement satisfaisants au-dessus de 80 Hz; avec contrôle, la majorité des écarts par rapport au champ incident est comprise dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB. Néanmoins, il reste quelques petits dépassements comme pour le point M_1^Ω autour de 160 Hz et 180 Hz. Comparativement, les résultats de contrôle obtenus sans prise en compte de la directivité de la source sont moins satisfaisants surtout pour les positions proches de la paroi réfléchissante et aux

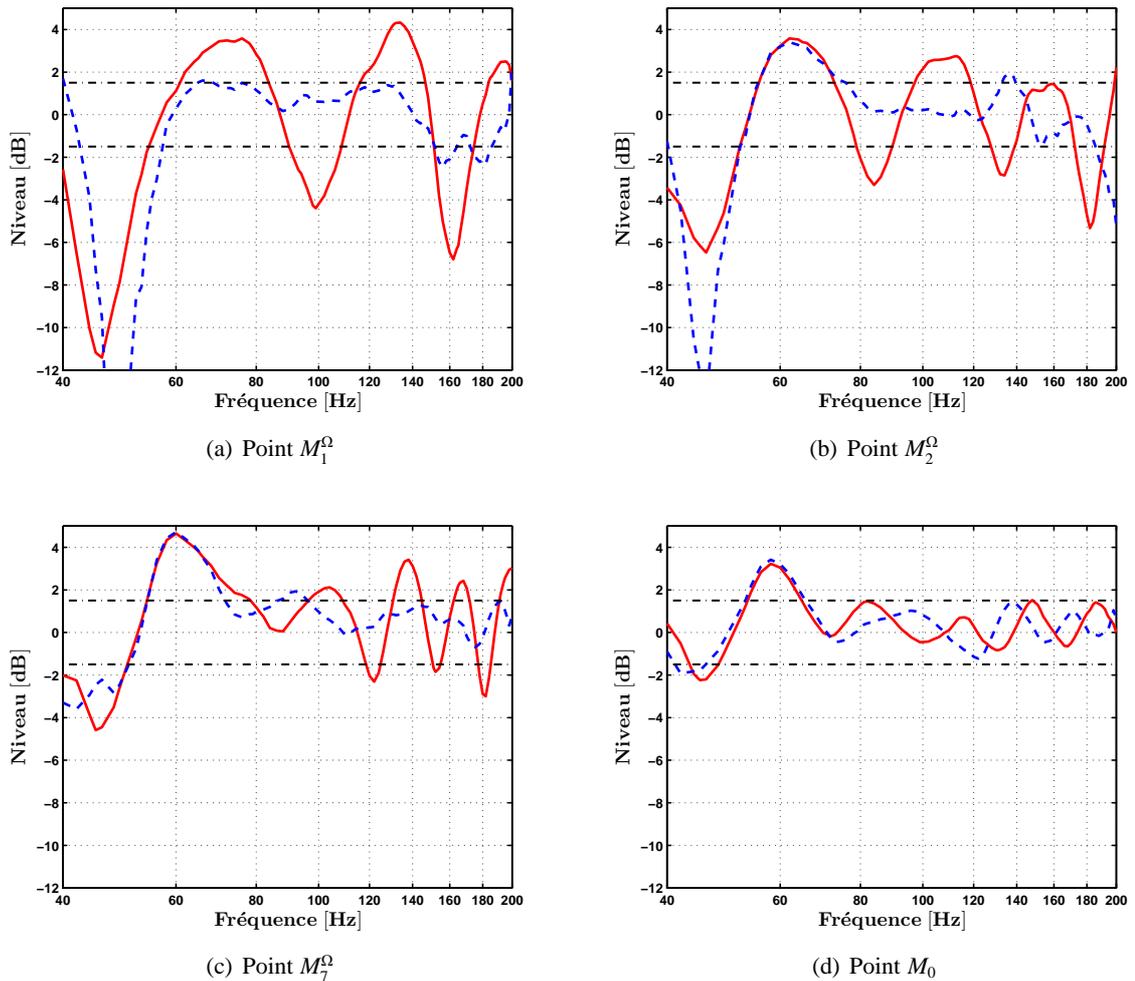


FIGURE 7.9 – Prédiction, pour quelques points du volume Ω , du contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ .

— : mesure sans contrôle, - - : prévision du contrôle avec le coefficient de directivité $L(\theta)$

fréquences supérieures à 120 Hz. Ces résultats confirment que le contrôle sur la surface Γ reste valable sur l'ensemble des positions du volume Ω ; il n'est pas localisé aux positions contrôlées.

La figure 7.10(a) présente, pour tous les points du volume Ω , l'erreur relative d'estimation de la pression incidente prévue, avec un contrôle en prenant en compte le coefficient de directivité $L(\theta)$. Comme attendu, l'erreur est très élevée aux fréquences inférieures à 80 Hz. En effet, aux fréquences très basses, le contrôle de pression diffractée est réalisé sur une seule paroi alors que l'influence des autres parois n'est pas négligeable à ces fréquences. Par contre, les erreurs aux fréquences supérieures sont raisonnables et les allures des courbes sont proches entre les points du volume Ω .

La figure 7.10(b) présente les amplitudes des commandes des sources secondaires (toujours normalisées par l'amplitude la source S_0). L'ensemble des amplitudes sont très faibles ; elles sont

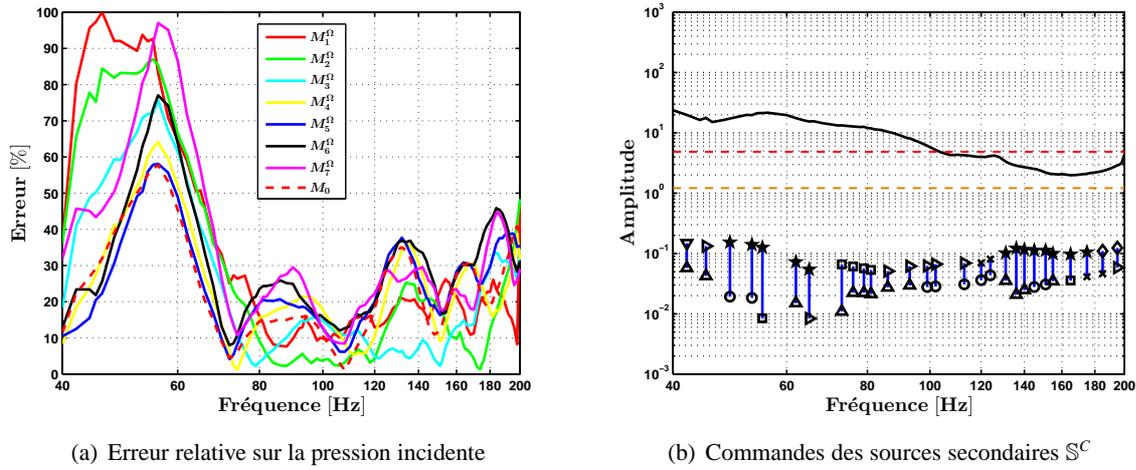


FIGURE 7.10 – Erreur relative sur la pression incidente aux points M^Ω ; commande des sources secondaires.

(b) : — : rapport des valeurs singulières, Amplitude des sources secondaires ; S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft , — — : amplitude critique, - - - : amplitude maximale.

situées entre 10^{-1} et 10^{-2} . En effet, les valeurs du conditionnement de la matrice sont situées autour de 10, les valeurs singulières étant peu différentes. De plus, la courbe de conditionnement est régulière en fonction de la fréquence, contrairement au contrôle dans le volume. Ces résultats semblent indiquer un comportement très sain du dispositif de contrôle.

Les simulations par post-traitement des prévisions du contrôle et les amplitudes des sources secondaires étant similaires à celles obtenues lors de l'expérience (figure 6.16), nous pouvons supposer que nous aurions eu un comportement de contrôle identique lors d'une expérimentation.

7.1.4 Conclusion

La figure 7.11 présente la moyenne des erreurs relatives sur l'estimation des pressions incidentes pour l'ensemble des points du volume Ω (M^Ω et M_0), dans les deux cas de contrôle : minimisation dans le volume Ω et sur la surface Γ . Les résultats sont présentés avec et sans prise en compte du coefficient de directivité de la source \tilde{S} par les courbes noires respectivement continues et discontinues.

Il est intéressant de noter que la prise en compte du coefficient de directivité dégrade l'efficacité autour de 135 Hz dans les deux cas de contrôle. Cette fréquence correspond à l'accident observé sur la courbe du coefficient de directivité, voir figure 7.1(d). Sinon, les résultats du contrôle dans le volume Ω sont très semblables, avec et sans prise en compte de la directivité $L(\theta)$. Inversement la prise en compte du coefficient de directivité améliore sensiblement les résultats de contrôle en surface Γ sur l'ensemble des points du volume Ω , aux fréquences supérieures à

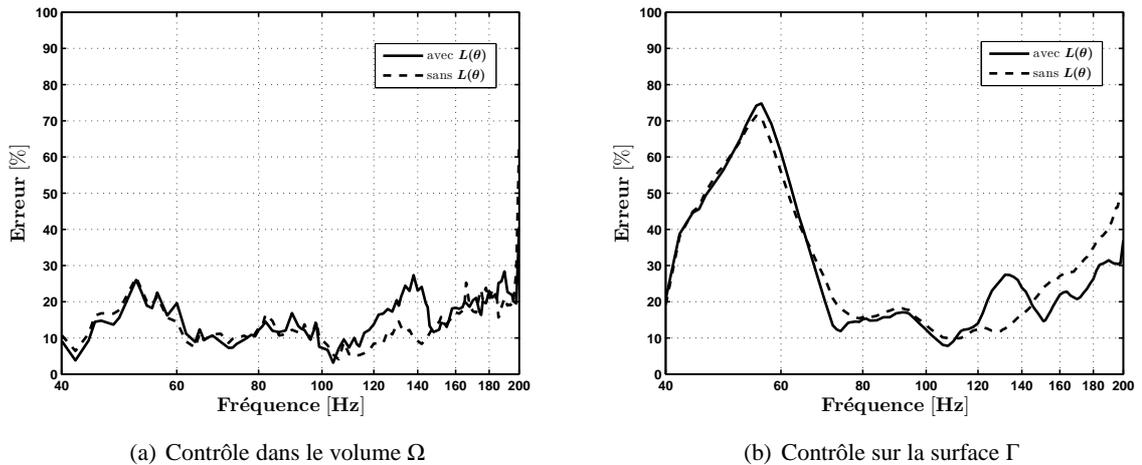


FIGURE 7.11 – Moyenne des erreurs relatives sur les pressions incidentes des points du volume Ω (M^Ω et M_0), pour le contrôle dans le volume Ω et sur la surface Γ , avec et sans prise en compte du coefficient de directivité de la source \tilde{S}

140 Hz.

Dans le cas du contrôle sur l'ensemble des points M^Ω , les résultats d'estimation de la pression diffractée ne sont pas améliorés ; nous pouvons supposer que l'identification du filtre de diffraction n'est pas correcte pour des positions éloignées de la surface Γ , dans des conditions non anéchoïques. Les résultats de contrôle étant équivalents à ceux obtenus sans le coefficient de directivité de la source \tilde{S} , les erreurs d'estimation de la pression incidente proviendraient essentiellement d'une mauvaise estimation du filtre de diffraction. En utilisant la méthode d'anéchoïcité active pour le cas d'une salle semi-anéchoïque, nous avons supposé traiter le cas d'un demi-espace en champ libre. Ces résultats montrent qu'il n'existe pas de relation entre la pression mesurée près de la paroi et la pression diffractée dans une zone éloignée pour des conditions non anéchoïques.

Il semble, a priori, logique que le contrôle à partir d'une seule paroi ne soit pas capable de gérer la diffraction par l'ensemble des conditions aux limites. Or l'identification de D dans le volume Ω ne sépare pas l'influence des différentes parois, caillebotis, etc. De plus, le contrôle sur M^Ω ne dispose que d'un nombre de microphones (7) inférieur au nombre de sources (9) ; il y a donc une infinité de solutions possibles. La minimisation converge donc inévitablement vers un contrôle interférentiel local, sauf en appliquant une forte pénalisation pour réduire les commandes, au prix d'une erreur accrue. La situation serait peut-être un peu différente avec beaucoup plus de points M^Ω mais l'estimation de D ne peut pas être réduite à la contribution de la paroi traitée sans en rapprocher les points d'identification.

Par contre, dans le cas du contrôle de la pression diffractée estimée sur la surface Γ , les résultats sont améliorés par la prise en compte de la directivité $L(\theta)$. Les erreurs sur l'estimation du filtre de diffraction sont alors réduites, notamment aux fréquences supérieures à 140 Hz. Le contrôle de la pression diffractée estimée est légèrement amélioré aux positions en périphérie de

la surface Γ pour les fréquences supérieures à 140 Hz. Ainsi, avec le contrôle sur la surface, la pression estimée aux points dans le volume est plus proche de la pression incidente ; l'écart est compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB pour les fréquences supérieures à 80 Hz.

7.2 Vérification du contrôle en des points du volume Ω

Pour mieux comprendre les différences entre les deux approches de contrôle de la pression diffractée, il serait utile de pouvoir vérifier leur effet à des positions différentes de celles de minimisation, dans tout le volume Ω . La mise en oeuvre expérimentale est complexe et n'a pas pu être réalisée dans le temps imparti. Des simulations sont donc réalisées pour observer l'effet des différents contrôles étudiés en des points non contrôlés du volume Ω tel que le point test M_0 utilisé lors de l'expérience. Ces simulations ciblent 119 points tests supplémentaires, répartis sur une grille rectangulaire dont les côtés sont donnés en mètre par $X = [1, 8 ; 7, 4]$, $Y = [1, 3 ; 3, 3]$. Les points sont espacés de 0,3 m selon l'axe X et de 0,4 m selon l'axe Y. Tous les points sont à la hauteur $Z = 1,8$ m, identique à celle du point M_4^Ω . L'ensemble des points de la grille est noté \mathbb{M}^G .

La figure 7.12 présente les positions des points de la grille représentés par des croix magenta ainsi que les éléments du dispositif de contrôle actif décrits à la figure 2.7.

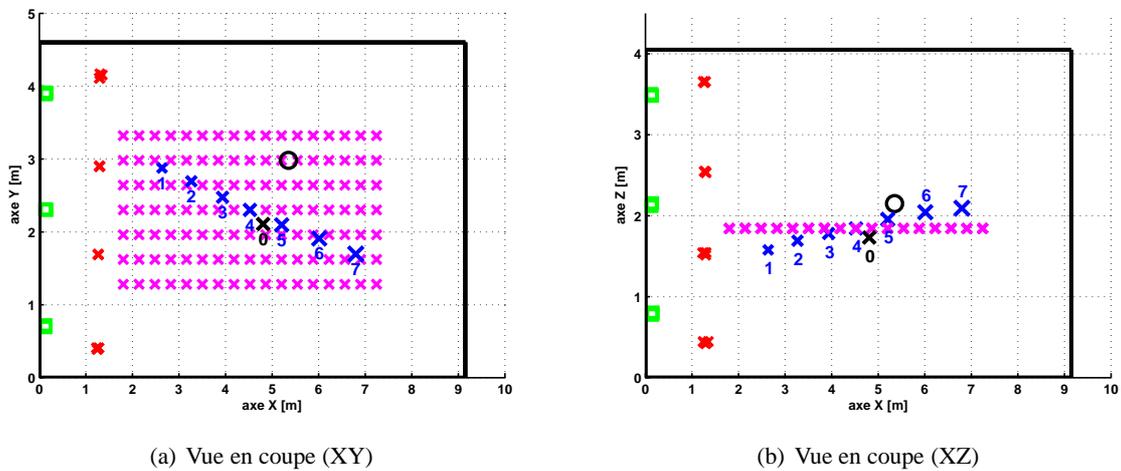


FIGURE 7.12 – Position des éléments du dispositif de contrôle actif et de la grille de points tests dans la salle semi-anéchoïque.

○ : source S_0 , □ : source secondaire S^C , × : point sur la surface Γ , × : point dans le volume Ω , × : point test M_0 , × : point de la grille

Les conditions de simulation sont identiques à celles utilisées avec Felin dans les chapitres 3 et 4. Dans ce cas, l'identification du filtre de diffraction D est simulée suivant la configuration \mathcal{A} et $\lambda = 10^{-5}$. Les commandes \tilde{U} obtenues pour le contrôle de la pression diffractée estimée dans le volume Ω ou sur la surface Γ , sont appliquées aux points tests de la grille suivant l'expression :

$$\tilde{P}^{on}(S_0, M_i^G) = P^{off}(S_0, M_i^G) + C_i^G \tilde{U} \quad (7.1)$$

avec M_i^G un point de la grille et C_i^G les fonctions de transfert entre les sources secondaires et le point de la grille. Le contrôle est réalisé soit sur l'ensemble des points M^Ω du volume soit sur la surface Γ .

Les résultats avec et sans contrôle sont présentés sous forme de cartographie en couleurs. Les points M^Γ , M^Ω , M_0 sont représentés par des losanges et les points de la grille M^G par des carrés. Les couleurs encodent les écarts entre la pression totale et la pression incidente en chaque point. Les figures de gauche représentent la pression totale sans le contrôle et celles de droite avec le contrôle. La couleur verte des symboles indique que le niveau de pression est situé dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB ; les dégradés de rouge et bleu indiquent que l'écart est supérieur ou inférieur à cet intervalle. Les résultats obtenus aux points M^Ω et M_0 sont affichés à leurs positions de la cartographie, mais aussi rappelés dans un cadre au bas de la figure pour être plus visibles. De même, les niveaux de pression des points M^Γ (contrôle en paroi) sont affichés autour de leurs coordonnées XY dans quatre losanges correspondant aux différentes hauteurs Z . Ces résultats de simulations sont présentés pour quelques fréquences comprises entre 40 et 195 Hz.

7.2.1 Contrôle dans le volume Ω

Dans un premier temps, la minimisation est simulée sur l'ensemble des points M^Ω . La figure 7.13 représente les résultats obtenus à 70 Hz.

Le niveau de pression obtenu sans contrôle est proche de celui de la pression incidente dans une zone allant de 4 à 7 m selon l'axe X. Les écarts de niveaux de pression augmentent hors de cette zone ; ils se situent autour de 2 dB pour les points situés à 3 m de la paroi réfléchissante et atteignent 6 dB et plus pour les points M^Γ .

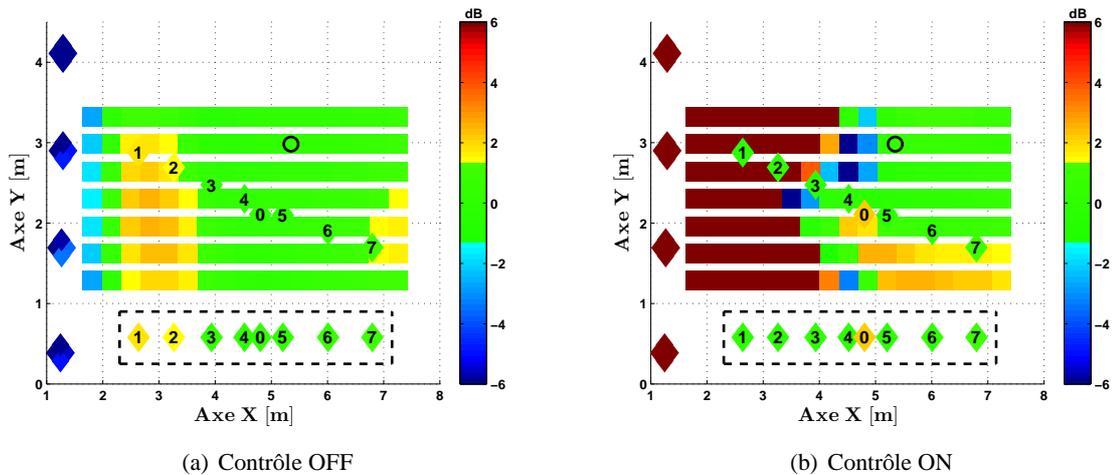


FIGURE 7.13 – Simulation du contrôle de pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Ω à 70 Hz

Les résultats obtenus à 70 Hz avec contrôle sont présentés à la figure 7.13(b). Les niveaux de pressions aux points M^Ω sont alors tous compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB mais celui au point M_0 est hors intervalle, comme mentionné au chapitre 3.

L'examen des niveaux aux points M^G de la grille montre par contre que les performances sont majoritairement très dégradées. La zone dans laquelle les niveaux de pression étaient compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB s'est fortement réduite autour de la source S_0 , à environ 0,5 m. De plus, les écarts de pressions sont très élevés avec contrôle, égaux ou supérieurs à 6 dB, pour les points situés jusqu'à 4 m de la paroi réfléchissante. L'échelle des couleurs a été réduite entre ± 6 dB pour une meilleure visibilité des résultats. Cependant, les écarts de pression obtenus, avec contrôle, aux points M^Γ sont de l'ordre de 40 dB.

Cette situation empire aux fréquences plus élevées, comme le montre la figure 7.14 correspondant à une fréquence de 155 Hz. Sans le contrôle, la zone dans laquelle les niveaux de pression sont compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB est plus étroite que précédemment, limitée à la proximité de la source S_0 . Les écarts de pression sont globalement élevés, en particulier aux positions centrales des points de la surface Γ ainsi qu'autour de 2 et 7 m de l'axe X.

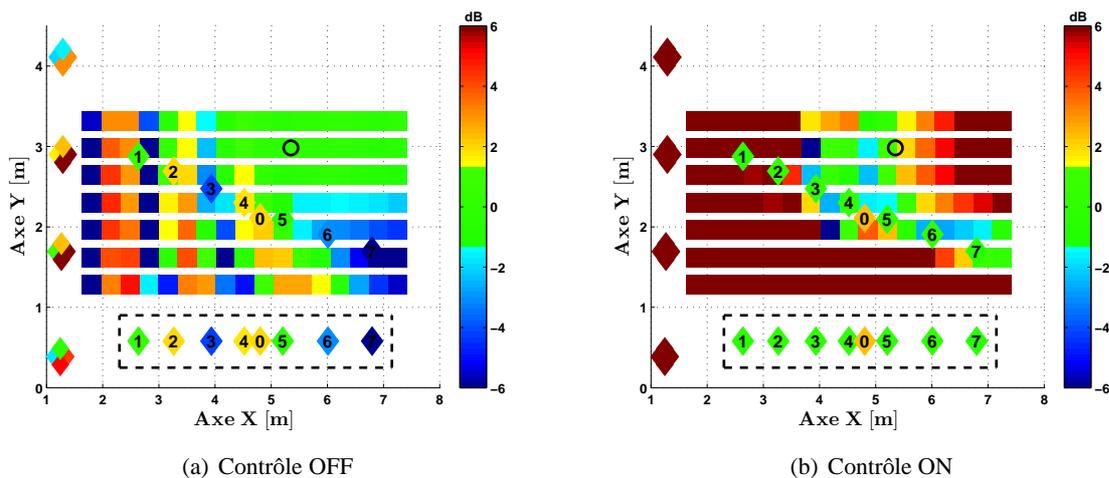


FIGURE 7.14 – Simulation du contrôle de pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Ω à 155 Hz

La figure 7.14(b) présentant les résultats obtenus avec le contrôle, montre une très forte dégradation de l'écart de pression sur pratiquement l'ensemble des points de la grille. Seuls les niveaux de pression aux points contrôlés et quelques points proches de la source S_0 restent compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

Ces écarts de niveau sont majoritairement égaux ou supérieurs à 6 dB. Comme à 55 Hz, les écarts de pression obtenus, avec contrôle, aux points M^Γ sont de l'ordre de 40 dB ; ils pourraient entraîner des perturbations du rayonnement acoustique de la source dans une mesure réelle. Rappelons que les mesures obtenues pour ce cas de contrôle se situaient hors de l'intervalle de $\pm 1,5$ dB aux points contrôlés (figure 6.11). Nous pouvons supposer que ces mauvaises per-

formances découlaient en partie du fait que les hauts-parleurs des sources secondaires étaient saturés, ou que le rayonnement de la source était perturbé.

Nous avons noté précédemment que l'erreur liée à la pénalisation du contrôle de la pression diffractée était négligeable d'après la figure 3.6. Le comportement du contrôle pourrait donc plutôt provenir des erreurs commises sur l'estimation de la pression diffractée, observées à la figure 3.1.

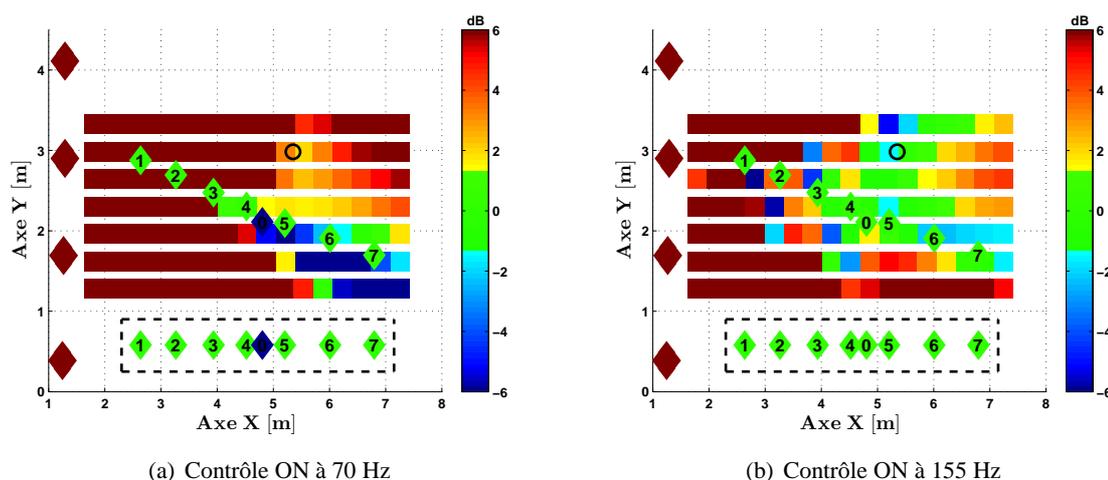


FIGURE 7.15 – Simulation du contrôle de pression diffractée « exactes » de l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω à 70 et 155 Hz

Pour vérifier cette hypothèse, des simulations ont été réalisées en minimisant la pression diffractée « exacte », c'est-à-dire celle calculée par *Felin* au lieu d'être estimée via la pression totale et le filtre de diffraction *D*. La figure 7.15 présente les résultats ainsi obtenus à 70 et 155 Hz. À 70 Hz, le contrôle est très efficace aux 7 points contrôlés \mathbb{M}^Ω mais le niveau de pression est très fortement dégradé sur l'ensemble des points \mathbb{M}^G ; les écarts de pression sont égaux ou supérieurs à 6 dB pour pratiquement tous ces points. Même pour les positions les plus proches (à environ 0,3 m) de la source S_0 , les écarts de niveaux sont très forts. À 155 Hz, le comportement est identique mais les dégradations du niveau de pression sont légèrement moins fortes; elles restent tout de même très élevées sur la majorité des points de la grille.

Ces résultats démontrent que les erreurs sur l'identification du filtre de diffraction ne sont pas la cause principale de l'absence de contrôle dans le volume Ω . L'inefficacité du contrôle aux points non contrôlés pourrait provenir de la diversité en amplitude et en phase des pressions diffractées aux points à minimiser impliquant un contrôle efficace uniquement aux points contrôlés \mathbb{M}^Ω .

La dégradation des résultats par le contrôle dans le volume Ω lorsque la pression diffractée est minimisée semble indiquer que le dispositif effectue alors un contrôle interférentiel sur les quelques points de minimisation au lieu de synthétiser l'opérateur de diffraction sous-jacent.

En effet, la position des sources sur la paroi Γ ne permet probablement pas de reproduire correctement la pression diffractée présente aux points \mathbb{M}^Ω , qui résulte de l'influence de toutes les conditions aux limites et non de la seule surface Γ . Le contrôle converge alors vers une minimisation algébrique, qui peut être excellente sur un petit nombre de microphones utilisé (inférieur au nombre de sources), mais reste alors locale.

7.2.2 Contrôle sur la surface Γ

Dans un deuxième temps, le contrôle est simulé sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ de la surface Γ . La figure 7.16 présente les résultats de simulation avec et sans contrôle obtenus à 70 Hz.

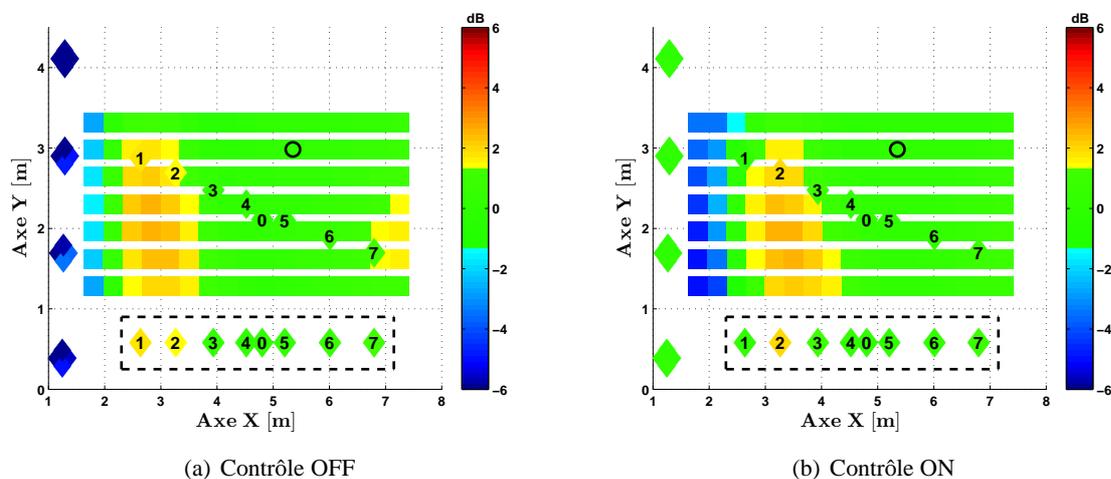


FIGURE 7.16 – Simulation du contrôle de pression diffractée estimée sur la surface Γ à 70 Hz

Les résultats obtenus sans contrôle ont été commentés au paragraphe 7.2.1 ; ils sont affichés pour la comparaison avec les résultats du contrôle. La figure 7.16(b) montre que le niveau de pression avec contrôle est satisfaisant sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ de la surface Γ . Cependant, les points de la grille sont faiblement impactés par le contrôle. Seuls les écarts de pression des points situés au-delà de 7 m de la paroi réfléchissante sont maintenant compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB.

D'autre part, la zone de la grille correspondant à des écarts significatifs (carrés jaunes et bleus) semble simplement un peu décalée en direction de la source S_0 . Le comportement de ce contrôle laisse à penser que, bien que la condition aux limites soit effectivement modifiée sur la paroi réfléchissante, la pression diffractée reste significative, provenant a priori de réflexions sur d'autres parois.

À 70 Hz, l'effet du contrôle est donc sensible mais mince ; la zone où l'écart de pression est faible est un peu plus étendue (vers les grandes distances par rapport à la paroi), mais elle ne couvre pas l'ensemble des points du volume Ω . Globalement, le contrôle ne dégrade pas les

performances dans le volume mais il ne les améliore pas non plus.

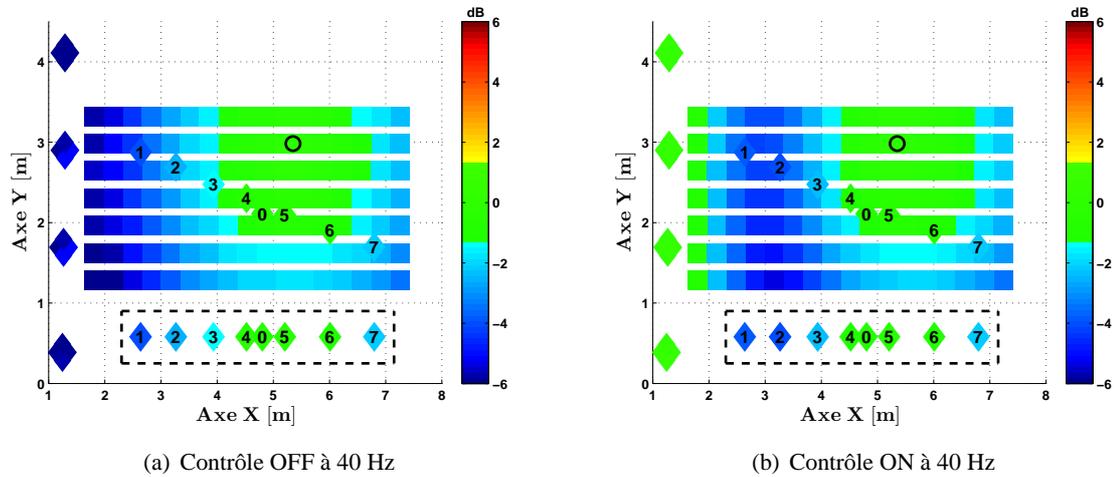


FIGURE 7.17 – Simulation du contrôle de pressions diffractées estimées sur la surface Γ à 40 Hz

Cette absence d'effet est encore plus évidente aux fréquences plus basses comme le montre par exemple la figure 7.17 à 40 Hz ; malgré une excellente annulation de la pression diffractée sur les positions \mathbb{M}^Γ en paroi, la pression est à peu près inchangée sur tous les points de la grille \mathbb{M}^G dès lors qu'ils sont à environ 2,5 m de la paroi traitée.

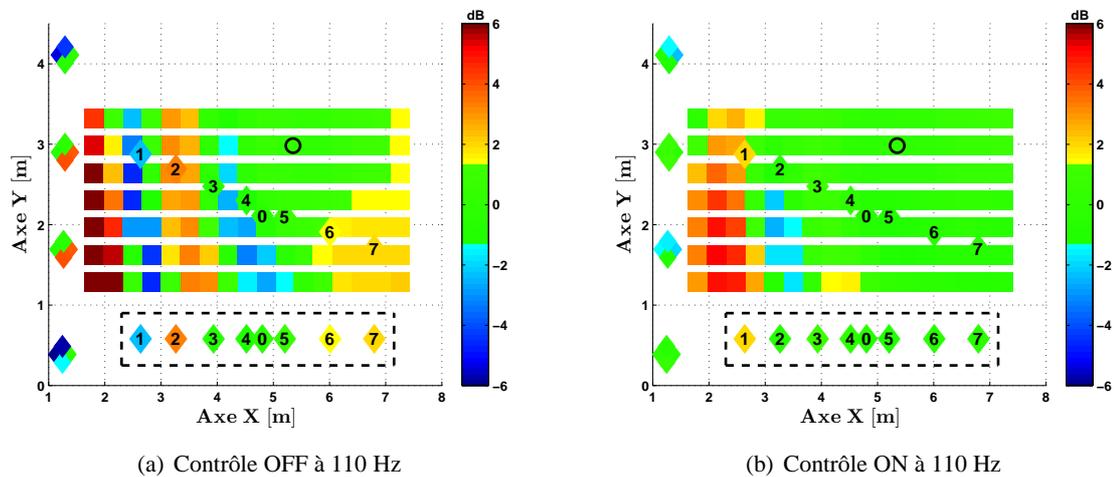


FIGURE 7.18 – Simulation du contrôle de pressions diffractées estimées sur la surface Γ à 110 Hz

Aux fréquences plus élevées (supérieures à environ 80 Hz), l'impact de la minimisation de la pression diffractée sur les positions \mathbb{M}^Γ en paroi est beaucoup plus visible, conduisant ainsi à une amélioration aux points de la grille, comme le montre par exemple les figures 7.18 et 7.19 présentant les résultats de simulation avec et sans contrôle obtenus respectivement à 110 et 155 Hz.

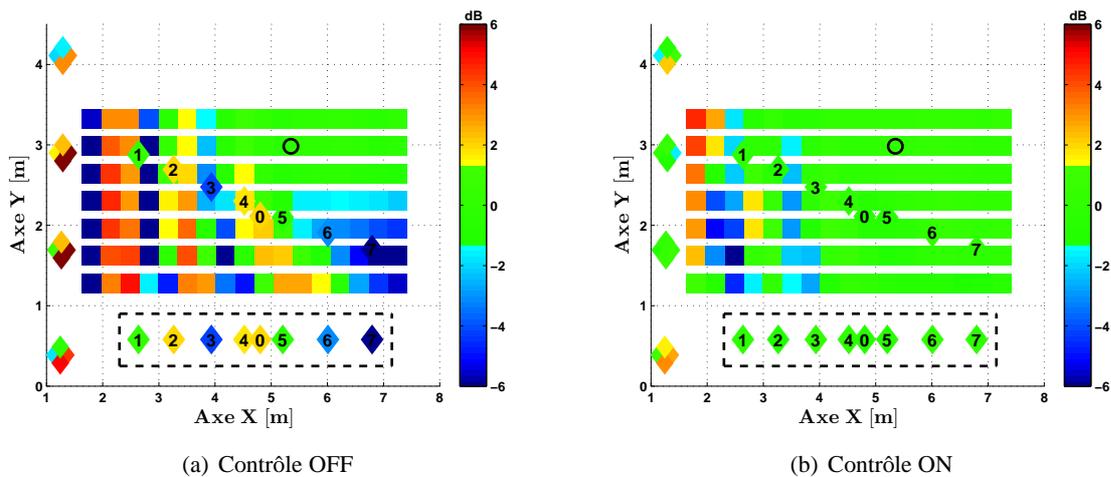


FIGURE 7.19 – Simulation du contrôle de pressions diffractées estimées sur la surface Γ à 155 Hz

À ces fréquences, la minimisation en paroi conduit aussi à une réduction de pression diffractée sur une grande partie des points situés dans le volume Ω ; la zone dans laquelle les niveaux de pression sont compris dans l'intervalle de $\pm 1,5$ dB est plus étendue. À 155 Hz, le contrôle sur la surface Γ a permis de réduire des écarts de niveau de 6 dB et plus sur les points de la grille jusqu'à 7 m de la paroi réfléchissante. Ces résultats satisfaisants sont pourtant obtenus alors que le contrôle n'est pas totalement efficace sur l'ensemble des points contrôlés M^Γ , notamment sur tous les points situés proches de la paroi en $Y = 0$.

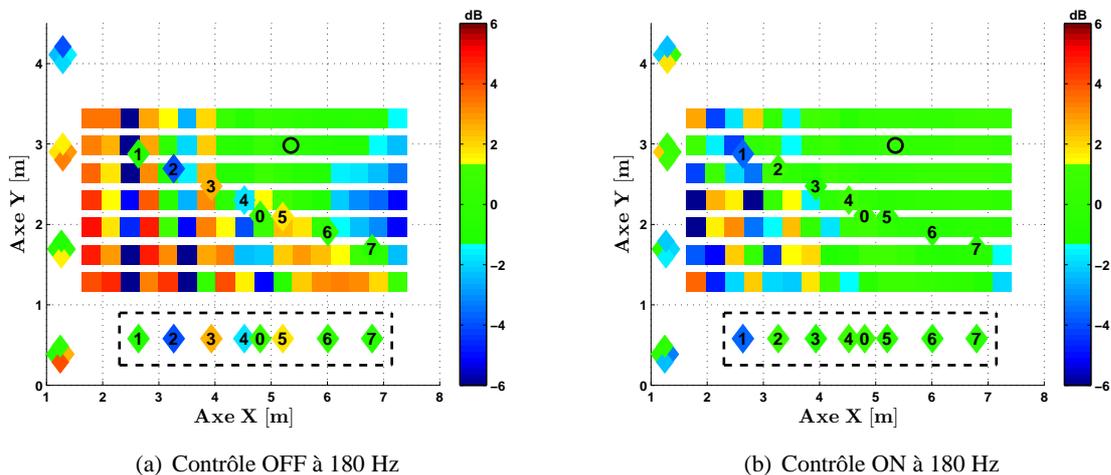


FIGURE 7.20 – Simulation du contrôle de pressions diffractées estimées sur la surface Γ à 180 Hz

Cependant, aux points de la grille proches de la surface Γ , les écarts de niveaux ont nettement diminué mais certains restent significativement impactés par la pression diffractée. Le même type de comportement est obtenu pour les fréquences allant jusqu'à 195 Hz comme le montre par exemple la figure 7.20 à 180 Hz. À cette fréquence, relativement élevée compte tenu du dimensionnement du dispositif, le contrôle sur la surface Γ améliore encore significativement

les mesures sur la grille, mais des écarts significatifs restent visibles jusqu'à environ 4 m de la paroi.

La présence de cette zone moins bien contrôlée à proximité de la paroi traitée reste difficile à expliquer ; elle pourrait provenir de la minimisation imparfaite constatée aux positions périphériques du réseau de points de minimisation M^Γ , elle-même peut-être liée à une erreur d'identification du filtre de diffraction. Des simulations ont donc à nouveau été réalisées en contrôlant la pression diffractée exacte.

La figure 7.21 présente les résultats obtenus dans ce cas à 70 et 155 Hz. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus précédemment (figures 7.16, 7.19), montre qu'il n'y a d'amélioration ni sur les points contrôlés M^Γ de la surface Γ , ni sur les points M^Ω et M^G du volume Ω . L'erreur sur l'identification du filtre de diffraction n'est donc pas la cause principale du phénomène observé.

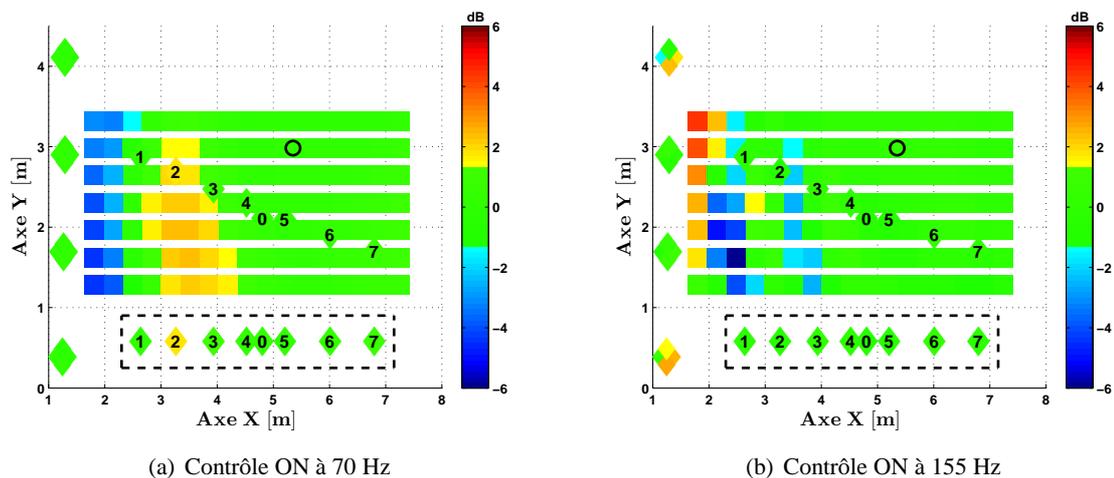


FIGURE 7.21 – Simulation du contrôle de pressions diffractées « exactes » sur la surface Γ à 70 et 155 Hz

Cette limitation peut être rapprochée du constat, effectué précédemment, que l'erreur liée à la pénalisation du contrôle de la pression diffractée augmente rapidement avec la fréquence (figure 4.6). Le dispositif de contrôle actuel ne serait peut-être pas adapté pour un contrôle aux fréquences supérieures à 100 Hz. Des sources secondaires supplémentaires permettraient donc éventuellement d'améliorer les résultats de contrôle à ces fréquences.

Une explication alternative serait que les sources de contrôle, situées plus au centre de la paroi que les points de minimisation, ne seraient pas capables de reproduire les détails du champ diffracté à la périphérie de la paroi ; ceci expliquerait la dégradation constatée aux points correspondant, et se traduirait par un champ parasite similaire à une diffraction en périphérie de la zone contrôlée sur la paroi.

7.2.3 Influence du paramètre de régularisation sur le contrôle dans Ω

Les résultats de contrôle dans le volume Ω présentés au paragraphe 7.2.1 ont été obtenus pour une valeur α du paramètre de régularisation choisie pour avoir une erreur minimale du contrôle, voir équation (3.3). Les amplitudes de commande correspondantes sont présentées à la figure 7.22(a). À titre de comparaison, les amplitudes de commande pour le contrôle en surface Γ sont présentées à la figure 7.22(b).

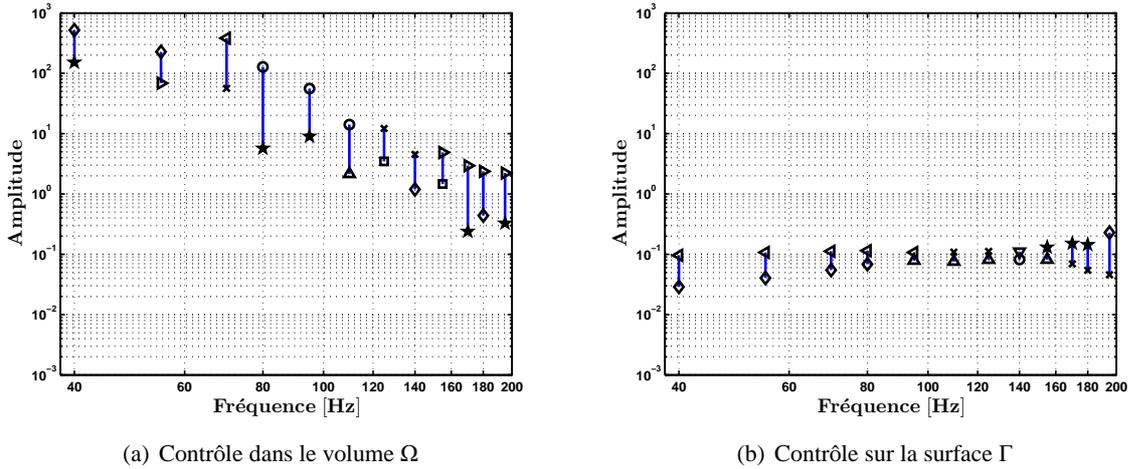


FIGURE 7.22 – Amplitudes des commandes pour les sources secondaires : S_1^C : \circ , S_2^C : \times , S_3^C : \square , S_4^C : \diamond , S_5^C : \star , S_6^C : ∇ , S_7^C : \triangle , S_8^C : \triangleright , S_9^C : \triangleleft ,

Pour mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur l'évaluation des commandes et le contrôle, nous avons choisi une valeur de $\alpha = 10^{-1}$ correspondant à une estimation d'erreur plus forte ; proche de 40 % à 95 Hz et proche de 20 % à 125 Hz, voir la figure 7.23(a). Pour cette valeur de α , les amplitudes des commandes pour le contrôle dans Ω sont plus faibles, voir figure 7.23(b) ; elles sont proches de celles obtenues pour un contrôle en surface (figure 7.22(b)).

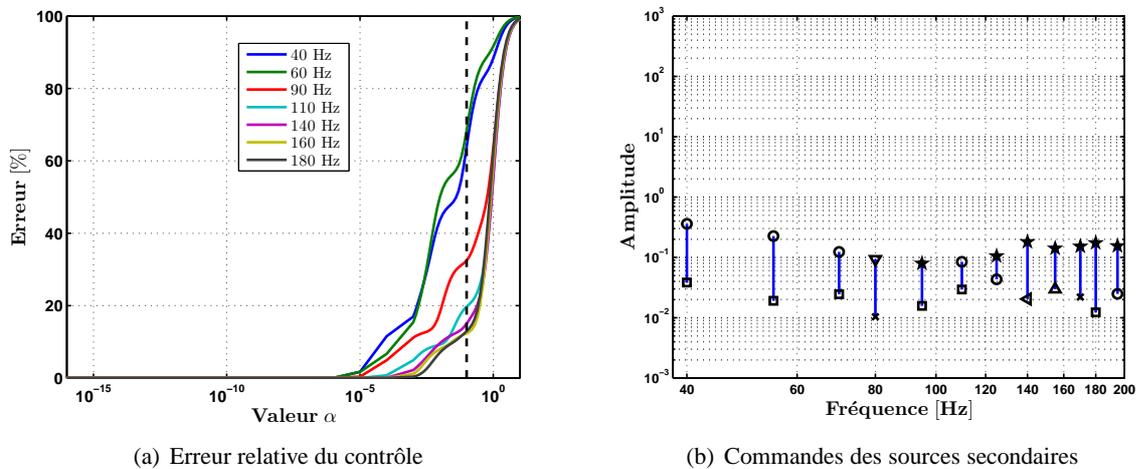


FIGURE 7.23 – Commandes pour le contrôle dans le volume Ω avec $\alpha = 10^{-1}$

Les résultats des contrôles dans le volume Ω avec $\alpha = 10^{-1}$ et sur la surface Γ sont présentés à la figure 7.24 pour la fréquence 95 Hz et figure 7.25 pour la fréquence 125 Hz.

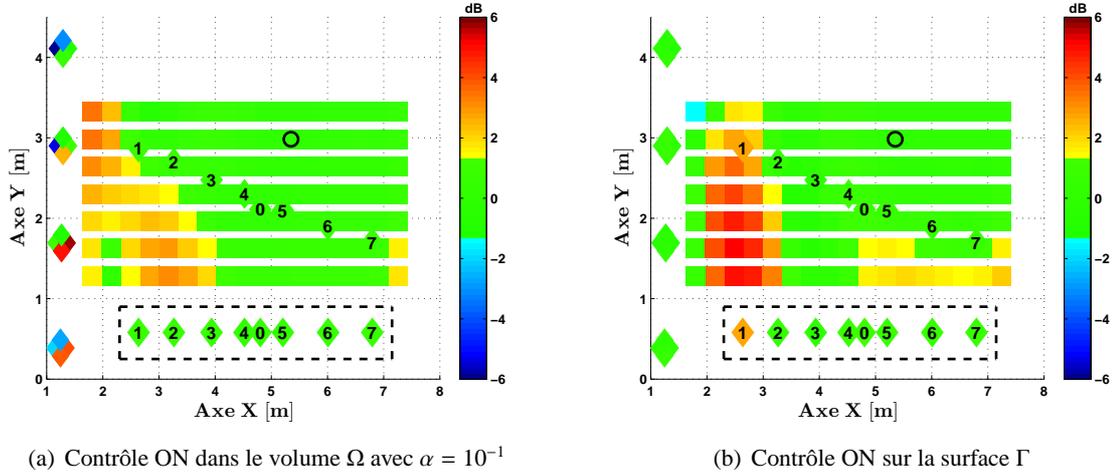


FIGURE 7.24 – Simulation pour les deux approches de contrôle de la pression diffractée estimée à la fréquence 95 Hz

Les résultats du contrôle dans le volume sont nettement améliorés ; l'efficacité du contrôle est satisfaisante aux points contrôlés et s'étend maintenant aux points \mathbb{M}^G de la grille. Une zone à proximité de la paroi reste néanmoins moins bien contrôlée. Il est intéressant de noter que le comportement du contrôle est proche de celui obtenu avec un contrôle sur la surface Γ .

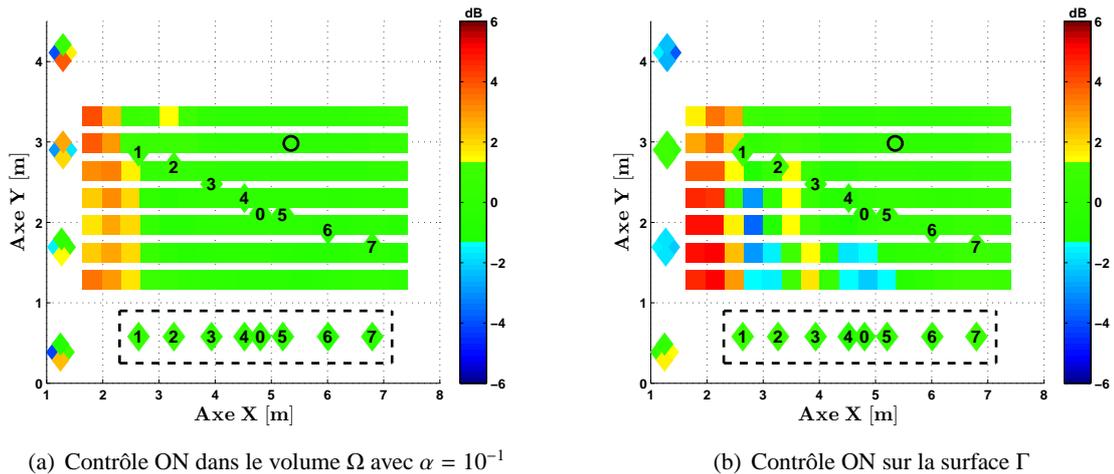


FIGURE 7.25 – Simulation pour les deux approches de contrôle de la pression diffractée estimée à la fréquence 125 Hz

Une analyse paramétrique plus fine doit donc être menée sur le choix du paramètre de régularisation α , afin d'obtenir le meilleur contrôle sur l'ensemble des points.

7.2.4 Conclusion

Les simulations des deux contrôles dans le volume Ω et sur la surface Γ ont montré que les erreurs sur la minimisation de la pression diffractée n'étaient pas liées à une mauvaise identification du filtre de diffraction. D'autre part, les résultats du contrôle dans le volume Ω ont confirmé une minimisation locale de la pression diffractée avec de fortes dégradations de la pression aux autres positions. Un choix plus judicieux du paramètre de régularisation α a permis d'améliorer l'efficacité du contrôle aux points de la grille. Les résultats du contrôle sont alors comparables à ceux obtenus pour un contrôle sur la surface Γ qui ont montré des réductions de la pression diffractée satisfaisantes sur une zone étendue du volume Ω .

Conclusion

L'objectif visé de ce travail était principalement la validation expérimentale d'une méthode de contrôle actif du champ diffracté par les parois d'une salle, afin de prolonger le travail théorique et l'expérimentation sur maquette déjà menés au laboratoire. La méthode d'anechoïcité active proposée, présentée en détail au chapitre 2, peut être décomposée en deux étapes : une étape de pré-calibrage pour identifier le filtre de diffraction et une étape de contrôle de la pression diffractée estimée à partir du filtre identifié. Dans ce travail, la méthode a été validée expérimentalement dans une salle semi-anechoïque afin de contrôler le champ diffracté par sa paroi réfléchissante. Il s'agit ainsi d'une validation expérimentale en vraie grandeur car traitant la gamme des basses fréquences, contrairement aux expérimentations en maquette menées jusqu'ici. Cependant, l'expérimentation s'est limitée à une seule paroi ce qui permettait de limiter la complexité du dispositif mais a peut-être ajouté des effets indésirables en bordure de la zone de contrôle.

La spécificité et principale difficulté de cette approche résident dans le fait que nous n'avons pas directement accès à la mesure du champ diffracté. Il est donc nécessaire d'estimer la pression diffractée à partir d'un filtrage de la pression totale. Dans la méthode proposée, cela consiste à identifier un opérateur mathématique, appelé filtre de diffraction, permettant de relier la pression totale, mesurée sur une surface, à la pression diffractée, à l'intérieur du volume défini par cette surface. Cette étape de pré-calibrage a été réalisée à l'aide d'un ensemble de positions de source à l'intérieur du volume de mesure et d'un réseau de microphones placé - dans le cas de la salle semi-anechoïque - dans un plan parallèle à la paroi réfléchissante. Ces sources et microphones sont appelés sources et microphones d'identification. Les sources secondaires fixées à cette paroi sont ensuite utilisées pour générer le contre-bruit afin d'annuler la pression diffractée estimée. Des tests numériques ont eu lieu à la fois en amont de l'expérimentation pour mieux définir certaines conditions puis postérieurement pour une évaluation plus complète des résultats.

Dans l'étape de pré-calibrage, différentes configurations de positions de la source d'identification ont été testées afin d'estimer le filtre de diffraction. Les résultats numériques ont montré une influence des positions de la source ; des positions aléatoires permettent de mieux estimer le filtre par rapport à des positions comportant des symétries géométriques. Une disposition "trop" symétrique des sources ne permettrait peut-être pas de reconstruire en totalité l'opérateur physique sous-jacent. La redondance introduite par cette symétrie conduisant de plus à un conditionnement élevé du système à minimiser qui entraîne une dégradation de l'estimation du filtre de diffraction. Ce point méritera d'être investigué plus en détail pour d'autres géométries de salle ; il peut cependant expliquer une partie des difficultés rencontrées lors de précédentes

tentatives, notamment celles effectuées dans une maquette [71, 84].

Un autre point qualitatif observé au cours de notre travail est que la pression diffractée était mieux estimée pour des positions proches de la paroi réfléchissante que dans des zones éloignées, au voisinage de parois pourtant considérées comme anéchoïque. Nous avons aussi remarqué que l'estimation de la pression était perturbée lorsque la position considérée était à proximité d'une paroi absorbante. Il est probable que cela soit dû à l'imperfection des dièdres utilisés, qui assurent a priori une excellente absorption mais essentiellement en incidence normale et dans une gamme de fréquences limitée. De plus, la présence du caillebotis et d'éléments de structure peuvent aussi avoir joué un rôle, au moins dans le haut de la gamme des fréquences considérée ici. Cette incertitude sur le comportement des parois passives est une contrepartie inévitable du fait de ne traiter qu'une petite partie de la surface totale des parois. En effet, dans le cas de la salle semi-anéchoïque, les hypothèses mathématiques utilisées pour définir l'opérateur de diffraction ne sont pas rigoureusement vérifiées - les murs n'étant pas totalement absorbants et le réseau de microphones ne définissant pas une surface fermée à l'intérieur de la salle.

Un des résultats concrets de notre travail est la mise en évidence de l'importance de la source de référence lors de l'identification du filtre de diffraction. Notre démarche expérimentale impliquait en effet la réalisation d'une source. Sa conception impliquait de réaliser une source basse fréquence compacte, omnidirectionnelle et dont la pression rayonnée puisse être déterminée avec précision - information nécessaire à l'identification du filtre de diffraction. La sensibilité des résultats de mesure obtenus après identification du filtre de diffraction ont confirmé l'importance de bien connaître le rayonnement de la source, et de choisir des positions pertinentes, comme également observé en simulation. Ainsi, la caractérisation fine de la source de référence et la prise en compte de sa directivité même imparfaite améliorent significativement l'estimation du filtre de diffraction. Il nous a d'ailleurs semblé retrouver la trace sur l'erreur de contrôle d'un défaut d'anéchoïcité de la salle ayant servi à identifier la source ; cela montre à quel point il est difficile de séparer la problématique de la source de celle de la salle où elle est mesurée.

Enfin, un des principaux résultats de ce travail concerne le choix - stratégique - des positions où effectuer le contrôle. L'une des stratégies a consisté à contrôler la pression diffractée à des positions situées dans le volume de mesure. Ce contrôle a permis d'obtenir localement des pressions proches de la pression incidente cible ; la pression obtenue aux positions voisines a par contre été fortement perturbée. Les perturbations ont augmenté avec le nombre de points de minimisation, engendrant des amplitudes des commandes des sources secondaires très, voire trop, élevées. Ce comportement pourrait résulter du fait que nous ne traitons qu'une seule paroi, ce qui ne permettrait pas de reproduire la complexité de la pression diffractée mesurée aux points du volume. Les simulations ont permis de mettre en évidence qu'un choix judicieux du paramètre de régularisation améliorerait l'efficacité du contrôle dans une zone étendue du volume Ω . Ces résultats ont été obtenus à partir d'une grille de 119 points tests ce qui en pratique est difficilement réalisable.

Une autre stratégie s'est avérée plus pertinente, consistant à minimiser la pression diffractée au plus proche de la source à contrôler c'est-à-dire la paroi réfléchissante. Afin d'alléger la mise

en oeuvre du contrôle, la minimisation a été réalisée sur les microphones d'identification utilisés pour estimer la pression diffractée. Il faut noter que ce choix n'est pas compatible avec les hypothèses ayant permis de construire théoriquement l'opérateur de diffraction, la formulation intégrale supposant des microphones de contrôle à l'intérieur du volume de mesure. Cependant, l'efficacité du contrôle observée aux positions du volume est globalement satisfaisante, tout au moins à partir d'une certaine distance de la paroi réfléchissante. La présence d'une zone du volume mal contrôlée, au voisinage de la paroi active, peut résulter de la combinaison d'une estimation dégradée, de la pression diffractée à proximité des parois absorbantes, et d'une minimisation imparfaite. Ce phénomène peut cependant aussi résulter de la taille finie de la surface traitée, l'opérateur de diffraction étant a priori défini pour une surface fermée. Le nombre et la position des sources secondaires pourrait aussi être inadaptés à ce contrôle.

Perspectives

Les résultats obtenus au cours de ce travail de thèse sont globalement très positifs, apportant des éléments concrets en faveur d'un projet de salle anéchoïque active. La cohérence des tendances observées à la fois sur des simulations, des mesures, et leur post-traitement, nous permettent d'avoir une bonne confiance dans les pistes proposées. Cependant, il est nécessaire d'éclaircir certains points par des simulations et une expérience intermédiaire avant la mise en oeuvre d'un dispositif de contrôle de grande taille dans la nouvelle salle anéchoïque du LMA.

D'un point de vue pratique, la stratégie de contrôle consistant à minimiser la pression diffractée sur la surface présente l'avantage d'une économie de microphones puisque les mêmes microphones servent à estimer la pression diffractée et à la minimiser. Le volume de mesure est ainsi entièrement dégagé après la phase d'identification. Notre travail mérite donc d'être prolongé dans cette voie, notamment pour optimiser le nombre et les positions de la source d'identification dans le volume afin d'obtenir la meilleure estimation du filtre de diffraction.

La dégradation des résultats de contrôle au voisinage des parois absorbantes mériterait aussi d'être investiguée, au moins pour confirmer l'influence d'une anéchoïcité imparfaite ; une simple comparaison de l'étape de pré-calibrage simulée pour la salle semi-anéchoïque et simulée pour un plan rigide infini pourrait déjà donner des informations intéressantes.

En ce qui concerne le contrôle, plusieurs résultats obtenus pour les microphones en surface et dans le volume restent encore inexpliqués. Une analyse paramétrique visant à changer le nombre ou la disposition des sources secondaires pourrait permettre d'améliorer les résultats de contrôle aux points de minimisation situés à la périphérie de la surface. Cette étude permettrait alors d'observer si une amélioration du contrôle en surface améliorerait aussi l'efficacité de contrôle dans le volume.

Une analyse similaire portant sur le nombre et les emplacements des microphones de minimisation serait également souhaitable mais plus délicate ; les microphones d'identification et de minimisation étant maintenant les mêmes, toutes modifications de ces microphones impacteraient aussi l'étape de pré-calibrage. Cette phase d'analyse paramétrique n'est donc pas

une petite tâche, les simulations numériques étant facilement très chronophages. Cependant, elle semblerait indispensable pour établir des règles de dimensionnement d'une future installation, ou au moins pour en donner les bases.

En effet, la suite logique de notre travail serait de continuer à travailler aux basses fréquences, en envisageant de contrôler la pression diffractée par plusieurs parois d'une salle. Un avant-projet en ce sens est à l'étude, ciblant cette fois une petite salle semi-anéchoïque, pour laquelle le contrôle serait réalisé sur cinq parois d'un local usuel - ainsi transformé à moindre coût en une salle semi-anéchoïque. Ce projet débiterait par des simulations, comme évoqué précédemment, mais en ciblant un local usuel (de taille limitée) et devrait pouvoir aboutir assez rapidement à une réalisation expérimentale dans un local du LMA.

Parmi les difficultés pratiques à surmonter, il en reste une dont l'importance a peut-être été sous-estimée jusqu'ici : la conception d'une nouvelle source de référence devra être envisagée, et elle devra surtout être caractérisée plus finement dans la nouvelle salle anéchoïque du LMA. De même, le dimensionnement et la conception des sources secondaires devront être faits en cohérence avec la gamme de fréquences et la plage dynamique envisagées pour un tel moyen d'essai de petite taille ; ces contraintes devraient cependant poser moins de problème que pour une grande salle.

Ces différents projets constituent les étapes qui nous semblent nécessaires pour aboutir à la concrétisation de la salle anéchoïque active prévue au LMA dès la construction de son nouveau bâtiment. En effet, cette salle comporte déjà le câblage de 128 microphones d'identification devant les dièdres en parois et de 64 sources secondaires derrière les dièdres. Cette conception devrait permettre de minimiser les réflexions sur les murs de la salle aux fréquences inférieures à 100 Hz, pour lesquelles les dièdres n'ont plus une efficacité suffisante. En traitant toutes les faces de la salle, nous respecterons les hypothèses ayant permis d'établir le principe de l'anéchoïcité active, ce qui éliminera peut-être certains artefacts mais il est possible que cette ultime étape pose d'autres problèmes théoriques et pratiques, qu'il faudra traiter à leur tour, apportant ainsi de nouvelles pistes et résultats de recherche.

Table des figures

1	Schéma de principe du contrôle de la paroi rigide d'une salle semi-anéchoïque	3
1.1	Salle anéchoïque du LMA (site Château Gombert)	7
1.2	Coefficient d'absorption des dièdres tapissant la salle anéchoïque du LMA	7
1.3	Schéma de principe de la technique de déconfinement [19]	8
1.4	Schéma de principe de reproduction sonore avec contrôle des réflexions [23]	9
1.5	Schéma de principe d'un dispositif de contrôle actif d'impédance [37]	11
1.6	Schéma de principe d'un résonateur électroacoustique actif [49]	11
1.7	Schéma de principe du contrôle actif du champ diffracté [62]	13
1.8	Schéma pour l'identification du filtre de diffraction dans une maquette [71]	15
2.1	Représentation d'une salle anéchoïque active	20
2.2	Identification du filtre de diffraction D	22
2.3	Contrôle de la pression diffractée estimée en plusieurs points du volume Ω	24
2.4	Contrôle de la pression diffractée estimée sur la surface Γ	25
2.5	La salle semi-anéchoïque du Groupe des Laboratoires de Marseille (GLM)	26
2.6	Contrôle de la pression diffractée en salle semi-anéchoïque	27
2.7	Positions des éléments du dispositif expérimental dans la salle semi-anéchoïque	27
2.8	Positions des sources pour identifier le filtre de diffraction D	28
3.1	Simulation de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{A}	34
3.2	Simulation de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{B} et $\lambda = 10^{-5}$	36
3.3	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée en fonction de λ	37
3.4	Simulation de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$	38
3.5	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée ; valeurs $\tilde{\lambda}$	39
3.6	Erreur du contrôle de la pression diffractée en fonction de α , configuration \mathcal{A}	41
3.7	Simulation de pressions avec et sans contrôle, configuration \mathcal{A}	42
3.8	Erreur sur la pression incidente ; amplitude des commandes, configuration \mathcal{A}	43
3.9	Erreur du contrôle de la pression diffractée en fonction de α , conf. \mathcal{B} et $\lambda = 10^{-5}$	43
3.10	Simulation de pressions avec et sans contrôle, conf. \mathcal{B} ; $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	45
3.11	Erreur sur la pression incidente, configuration \mathcal{A} ; \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	46
4.1	Simulation de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{A}	51
4.2	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée, configuration \mathcal{A}	52
4.3	Simulation de pressions exactes et estimées, configuration \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	53
4.4	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée, conf. \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	54

4.5	Erreur de la pression diffractée estimée, conf. \mathcal{A} ; \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	55
4.6	Erreur du contrôle de la pression diffractée estimée en fonction de α	56
4.7	Simulation de pressions sans et avec contrôle ; points \mathbb{M}^Γ , conf. \mathcal{A}	57
4.8	Erreur sur la pression incidente aux points \mathbb{M}^Γ , configuration \mathcal{A}	58
4.9	Simulation de pression sans et avec contrôle ; points \mathbb{M}^Ω , conf. \mathcal{A}	59
4.10	Erreur sur la pression incidente aux points \mathbb{M}^Ω , configuration \mathcal{A}	60
4.11	Simulation de pression sans et avec contrôle ; points \mathbb{M}^Ω , conf. \mathcal{B} , $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	61
4.12	Erreur sur la pression incidente aux points \mathbb{M}^Γ ; conf. \mathcal{A} , \mathcal{B} avec $\lambda = 10^{-5}$ et $\tilde{\lambda}$	62
4.13	Erreur sur la pression incidente aux points du volume Ω	63
4.14	Erreur sur la pression incidente dans Ω pour contrôle dans Ω , sur Γ , conf. \mathcal{A}	64
5.1	Expérience d'anéchoïcité active dans la salle semi-anéchoïque du LMA (GLM)	68
5.2	Source de référence \tilde{S}	69
5.3	Positions des microphones et de la source \tilde{S} dans la salle anéchoïque	70
5.4	Diagramme de directivité de la source \tilde{S} pour quelques fréquences	71
5.5	Mesure de niveaux aux points M_2 , M_7 et M_{12}	73
5.6	Montage pour la caractérisation de la salle semi-anéchoïque	75
5.7	Caractéristique de la salle semi-anéchoïque active	76
5.8	Comparaison de niveaux mesurés et simulés pour une paroi rigide et une salle	77
5.9	Réponse en fréquences des sources secondaire au microphone M_4^Ω	78
5.10	Fonction de transfert entre les microphones M_9^Γ à M_{16}^Γ et celui de référence	80
6.1	Estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Ω , configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$	85
6.2	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Ω	86
6.3	Erreur du contrôle de la pression diffractée en fonction de α ; contrôle en M_1^Ω	88
6.4	Mesure sans et avec contrôle au point M_1^Ω	89
6.5	Mesure sans et avec contrôle au point M_4^Ω	90
6.6	Mesure sans et avec contrôle au point M_7^Ω	92
6.7	Erreur du contrôle de la pression diffractée en fonction de α ; ctrl en M_1^Ω , M_4^Ω , M_7^Ω	94
6.8	Mesure sans et avec contrôle aux point M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω	95
6.9	Mesure en M_2^Ω et M_0 , sans et avec contrôle aux point M_1^Ω , M_4^Ω et M_7^Ω	96
6.10	Erreur du contrôle de la pression diffractée en fonction de α ; contrôle sur \mathbb{M}^Ω	97
6.11	Mesure sans et avec contrôle de l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω	98
6.12	Estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Γ , configuration \mathcal{B} et $\tilde{\lambda}$	100
6.13	Erreur sur l'estimation de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Γ	101
6.14	Erreur du contrôle de la pression diffractée estimée ; contrôle sur Γ	102
6.15	Mesure sans et avec contrôle sur Γ ; observation aux points \mathbb{M}^Γ	103
6.16	Mesure sans et avec contrôle sur Γ ; observation aux points \mathbb{M}^Ω	104
7.1	Pression mesurée avec et sans prise en compte de $L(\theta)$	110
7.2	Comparaison mesure et simulations de la pression en salle semi-anéchoïque	111
7.3	Pressions totale et diffractée avec et sans $L(\theta)$; points \mathbb{M}^Ω , configuration \mathcal{B} , $\tilde{\lambda}$	113
7.4	Prévision du contrôle de l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω	114
7.5	Erreur sur la pression incidente aux points \mathbb{M}^Ω	115
7.6	Pressions totale et diffractée avec et sans $L(\theta)$; points \mathbb{M}^Γ , configuration \mathcal{B} , $\tilde{\lambda}$	116

7.7	Erreur sur l'estimation de la pressions diffractée aux points \mathbb{M}^Γ avec et sans $L(\theta)$	117
7.8	Prévision du contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ	118
7.9	Prévision du contrôle sur Γ aux points \mathbb{M}^Ω	119
7.10	Erreur sur la pression incidente aux points \mathbb{M}^Ω ; contrôle sur Γ	120
7.11	Erreur sur la pression incidente pour le contrôle dans Ω et sur Γ avec et sans $L(\theta)$	121
7.12	Position des éléments du dispositif et de la grille de points tests	122
7.13	Simulation du contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω à 70 Hz	123
7.14	Simulation du contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω à 155 Hz	124
7.15	Simulation du contrôle de pression diffractée exactes de \mathbb{M}^Ω à 70 et 155 Hz	125
7.16	Simulation du contrôle sur la surface Γ à 70 Hz	126
7.17	Simulation du contrôle sur la surface Γ à 40 Hz	127
7.18	Simulation du contrôle sur la surface Γ à 110 Hz	127
7.19	Simulation du contrôle sur la surface Γ à 155 Hz	128
7.20	Simulation du contrôle sur la surface Γ à 180 Hz	128
7.21	Simulation du contrôle de pressions diffractées exactes sur Γ à 70 et 155 Hz	129
A.1	Géométrie du problème d'estimation de la pression diffractée	154
B.1	Détails de la source de référence \tilde{S}	158
C.1	Caractérisation de la source \tilde{S} en salle anéchoïque	162
C.2	Position des microphones M_0, M_i et de la source \tilde{S}	163
C.3	Comparaison des pressions mesurées dans l'axe et en directivité	164
D.1	Pressions mesurée et simulée pour une paroi infinie et une salle ; $\beta_r = 1 + \imath 0$	168
D.2	Pressions mesurée et simulée pour une paroi infinie et une salle ; $\beta_r = 0,8 + \imath 0,01$	169
E.1	Dispositif expérimental en salle semi-anéchoïque (LMA - site Joseph-Aiguier)	172
E.2	Gain d'entrées du système d'acquisition/restitution	175
E.3	Volume des sorties du système d'acquisition/restitution	176
E.4	Source secondaire	178
E.5	Fonction transfert du module amplificateur des sources secondaires	178
E.6	Microphones dans le volume Ω et sur la surface Γ	179
F.1	Mesure sans et avec contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω	182
F.2	Mesure sans et avec contrôle sur \mathbb{M}^Γ ; points $\mathbb{M}^\Omega, U(\tilde{S}) = 0,824V_{rms}$	183
F.3	Mesure sans et avec contrôle sur \mathbb{M}^Γ ; points $\mathbb{M}^\Omega, U(\tilde{S}) = 8,24V_{rms}$	184

Liste des Symboles

\mathcal{A}, \mathcal{B}	Configuration des positions de sources d'identification
C	Vecteur des fonctions de transfert entre les sources secondaires et un point M
c	Célérité, [$m.s^{-1}$]
D	Opérateur, filtre de diffraction
f	Fréquence [Hz]
$f(S)$	Force volumique d'une source S , [N]
$G(S, M)$	Fonction de Green
k	Nombre d'onde, [$rad.m^{-1}$]
L	Coefficient de directivité de la source de référence
M_0	Microphone test dans le volume Ω
\mathbb{M}^Γ	Ensemble des positions des microphones sur la surface Γ
M_j^Γ	Microphone j sur la surface Γ
\mathbb{M}^Ω	Ensemble des positions des microphones dans le volume Ω
M_i^Ω	Microphone i dans le volume Ω
\mathbb{M}^G	Ensemble d'une grille de microphones dans le volume Ω
N^C	Nombre de sources secondaires
N^D	Nombre de sources d'identification
N^Γ	Nombre de microphones sur la surface Γ
N^Ω	Nombre de microphones dans le volume Ω
P_{inc}	Pression incidente reconstruite, [Pa]
P_{tot}	Pression totale, [Pa]
P_{dif}^{ev}	Pression diffractée évaluée, [Pa]
P_{dif}^{est}	Pression diffractée estimée, [Pa]
P^{off}	Pression sans contrôle, [Pa]
P^{on}	Pression avec contrôle, [Pa]
\tilde{P}^{on}	Prévision de la pression avec contrôle, [Pa]

p^{norm}	Pression normalisée par la pression incidente
Q_s	Débit acoustique, [$m^3 \cdot s^{-1}$]
$r(S, M)$	Distance entre le point S et M , [m]
\mathbb{S}^C	Ensemble des positions des sources secondaires
\mathbb{S}^D	Ensemble des positions des sources d'identification
\tilde{S}	Source de référence
S_0	Position de la source à caractériser
α, λ	Paramètres de régularisation
β_r	Admittance réduite
ρ	Masse volumique du milieu, [$kg \cdot m^{-3}$]
ω	Fréquence angulaire, [$rad \cdot s^{-1}$]

Bibliographie

- [1] Manuel Melon, Christophe Langrenne, David Rousseau, and Philippe Herzog. Comparison of four subwoofer measurement techniques. J. Audio Eng. Soc., 55(12) :1077–1091, 2007. Cité page 6, 73
- [2] S Schneider and C Kern. Acoustical behavior of the large anechoic chamber at the laboratoire de mécanique et d’acoustique in the low frequency range. Acta Acustica united with Acustica, 94 :141–147, 01 2008. Cité page 6, 7, 18, 73, 164
- [3] Teresa Bravo and Cédric Maury. Sound attenuation and absorption by anisotropic fibrous materials : Theoretical and experimental study. Journal of Sound and Vibration, 417 :165 – 181, 2018. Cité page 6
- [4] Xiaoning Tang, Xiansheng Zhang, Huiping Zhang, Xingmin Zhuang, and Xiong Yan. Corn husk for noise reduction : Robust acoustic absorption and reduced thickness. Applied Acoustics, 134 :60 – 68, 2018. Cité page 6
- [5] Azma Putra, Khai Hee Or, Mohd Zulkefli Selamat, Mohd Jailani Mohd Nor, Muhamad Haziq Hassan, and Iwan Prasetyo. Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres. Applied Acoustics, 136 :9 – 15, 2018. Cité page 6
- [6] J. F. Allard and N. Atalla. Propagation of Sound in Porous Media : modeling sound absorbing materials. John Wiley & Sons, Chichester, 2nd edition, 2009. Cité page 6
- [7] AFNOR. Norme ISO 26101, Acoustique - Méthodes d’essai pour la qualification des environnements en champ libre, 2012. Cité page 6
- [8] AFNOR. 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, 2013. Cité page 6
- [9] Dah-You Maa. Microperforated-panel wideband absorbers. Noise Control Engineering Journal, 29(3) :77–84, 1987. Cité page 7
- [10] Frank Simon. Long elastic open neck acoustic resonator for low frequency absorption. Journal of Sound and Vibration, 421 :1 – 16, 2018. Cité page 7
- [11] Anastasiia O. Krushynska, Federico Bosia, and Nicola M. Pugno. Labyrinthine acoustic metamaterials with space-coiling channels for low-frequency sound control. December 2017. Cité page 7
- [12] Thomas Dupont, Philippe Leclaire, Raymond Panneton, and Olga Umnova. A microstructure material design for low frequency sound absorption. Applied Acoustics, 136 :86 – 93, 2018. Cité page 7

- [13] Teresa Bravo, Cedric Maury, and Carlos de la Colina. Absorption of thin micro-perforated partitions lined with anisotropic fibrous materials. The Journal of the Acoustical Society of America, 141(5) :3872–3872, May 2017. Cité page 7
- [14] Nicolas Dauchez, Benoit Nennig, and Olivier Robin. Additional sound absorption within a poroelastic lamella network under oblique incidence. Acta Acustica united with Acustica, 104(2) :211–219, 2018. Cité page 8
- [15] A. Vakakis, O. Gendelman, L. Bergman, D. McFarland, G. Kerschen, and Y. Lee. Nonlinear Targeted Energy Transfer in Mechanical and Structural Systems, volume 156. Berlin, 2008. Cité page 8
- [16] R. Bellet, B. Cochelin, P. Herzog, and P.-O. Mattei. Experimental study of targeted energy transfer from an acoustic system to a nonlinear membrane absorber. Journal of Sound and Vibration, 329(14) :2768 – 2791, 2010. Cité page 8
- [17] R. Mariani, S. Bellizzi, B. Cochelin, P. Herzog, and P.O. Mattei. Toward an adjustable nonlinear low frequency acoustic absorber. Journal of Sound and Vibration, 330(22) :5245 – 5258, 2011. Cité page 8
- [18] Renaud Côte, Marc Pachebat, and Sergio Bellizzi. Experimental evidence of simultaneous multi-resonance noise reduction using an absorber with essential nonlinearity under two excitation frequencies. Journal of Sound and Vibration, 333(20) :5057 – 5076, 2014. Cité page 8
- [19] Manuel Melon, Christophe Langrenne, Philippe Herzog, and Alexandre Garcia. Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms. The Journal of the Acoustical Society of America, 127(1) :256–263, 2010. Cité page 8, 137
- [20] Christophe Langrenne, Manuel Melon, and Alexandre Garcia. Measurement of confined acoustic sources using near-field acoustic holography. The Journal of the Acoustical Society of America, 126(3) :1250–1256, 2009. Cité page 8, 18
- [21] Thibault Nowakowski, Julien de Rosny, and Laurent Daudet. Robust source localization from wavefield separation including prior information. The Journal of the Acoustical Society of America, 141(4) :2375–2386, 2017. Cité page 9
- [22] A. J. Berkhout. A holographic approach to acoustic control. J. Audio Eng. Soc., 36(12) :977–995, 1988. Cité page 9
- [23] A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. The Journal of the Acoustical Society of America, 93(5) :2764–2778, 1993. Cité page 9, 137
- [24] Philippe-Aubert Gauthier and Alain Berry. Adaptive wave field synthesis with independent radiation mode control for active sound field reproduction : Theory. The Journal of the Acoustical Society of America, 119(5) :2721–2737, 2006. Cité page 9
- [25] Pierre Lecomte, Philippe-Aubert Gauthier, Christophe Langrenne, Alain Berry, and Alexandre Garcia. Cancellation of room reflections over an extended area using ambisonics. The Journal of the Acoustical Society of America, 143(2) :811–828, 2018. Cité page 9
- [26] M. A. Poletti and F. M. Fazi. Generation of half-space sound fields with application to personal sound systems. The Journal of the Acoustical Society of America, 139(3) :1294–1302, 2016. Cité page 9

- [27] Takuma Okamoto and Atsushi Sakaguchi. Experimental validation of spatial fourier transform-based multiple sound zone generation with a linear loudspeaker array. The Journal of the Acoustical Society of America, 141(3) :1769–1780, 2017. Cité page 9
- [28] Paul Lueg. Process of silencing sound oscillations, 1936. Patent 2043416A. Cité page 10
- [29] P. A. Nelson and S. J. Elliott. Active control of sound. Academic London, 1992. Cité page 10, 12
- [30] Harry F. Olson and Everett G. May. Electronic sound absorber. The Journal of the Acoustical Society of America, 25(6) :1130–1136, 1953. Cité page 10
- [31] G. A. Mangiante. Active sound absorption. The Journal of the Acoustical Society of America, 61(6) :1516–1523, 1977. Cité page 10
- [32] Dieter Guicking, Käthe Karcher, and Mathias Rollwage. Coherent active methods for applications in room acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America, 78(4) :1426–1434, 1985. Cité page 10, 12
- [33] Alain Berry, Pierre Leroy, Abhishek Kundu, Philippe Herzog, and Noureddine Atalla. Absorption et isolation acoustique à l’aide de mousses actives. In Société Française d’Acoustique SFA, editor, 10ème Congrès Français d’Acoustique, pages –, Lyon, France, April 2010. Cité page 10
- [34] Pierre Leroy, Alain Berry, Philippe Herzog, and Noureddine Atalla. Experimental study of a smart foam sound absorber. The Journal of the Acoustical Society of America, 129(1) :154–164, 2011. Cité page 10
- [35] Louis G. Beatty. Acoustic impedance in a rigid-walled cylindrical sound channel terminated at both ends with active transducers. The Journal of the Acoustical Society of America, 36(6) :1081–1089, 1964. Cité page 10
- [36] Dieter Guicking and K Karcher. Active impedance control for one-dimensional sound. Journal of vibration, acoustics, stress, and reliability in design, 106(3) :393–396, 1984. Cité page 10
- [37] D. Thenail, O. Lacour, M. A. Galland, and M. Furstoss. The active control of wall impedance. Acta Acustica united with Acustica, 83(6) :1039–1044, 1997. Cité page 10, 11, 137
- [38] F. Orduña-Bustamante and P. A. Nelson. An adaptive controller for the active absorption of sound. The Journal of the Acoustical Society of America, 91(5) :2740–2747, 1992. Cité page 10
- [39] M. Furstoss, D. Thenail, and M.A. Galland. Surface impedance control for sound absorption : direct and hybrid passive/active strategies. Journal of Sound and Vibration, 203(2) :219 – 236, 1997. Cité page 10
- [40] Xavier Meynial. Active acoustic impedance control device. Brevet WO9959377A1. 11, 1999. Cité page 10
- [41] O. Lacour, M.A. Galland, and D. Thenail. Preliminary experiments on noise reduction in cavities using active impedance changes. Journal of Sound and Vibration, 230(1) :69 – 99, 2000. Cité page 10

- [42] D Guicking and E Lorenz. An active sound absorber with porous plate. Journal of vibration, acoustics, stress, and reliability in design, 106(3) :389–392, 1984. Cité page 10
- [43] Samson Beyene and Ricardo A. Burdisso. A new hybrid passive–active noise absorption system. The Journal of the Acoustical Society of America, 101(3) :1512–1515, 1997. Cité page 10
- [44] Jerome P. Smith, Brody D. Johnson, and Ricardo A. Burdisso. A broadband passive–active sound absorption system. The Journal of the Acoustical Society of America, 106(5) :2646–2652, 1999. Cité page 10
- [45] Jing Yuan. Causal impedance matching for broadband hybrid noise absorption. The Journal of the Acoustical Society of America, 113(6) :3226–3232, 2003. Cité page 10
- [46] Manuel Melon, Philippe Herzog, Azzedine Sittel, and Marie-Annick Galland. One dimensional study of a module for active/passive control of both absorption and transmission. Applied Acoustics, 73(3) :234 – 242, 2012. Cité page 10
- [47] P.Y. Bryk, S. Bellizzi, and R. Côte. Experimental study of a hybrid electro-acoustic nonlinear membrane absorber. Journal of Sound and Vibration, 424 :224 – 237, 2018. Cité page 11
- [48] Pedro Cobo, Jaime Pfretzschner, Maria Cuesta, and David K. Anthony. Hybrid passive-active absorption using microperforated panels. The Journal of the Acoustical Society of America, 116(4) :2118–2125, 2004. Cité page 11
- [49] Hervé Lissek, Etienne Rivet, Thomas Laurence, and Romain Fleury. Toward wideband steerable acoustic metasurfaces with arrays of active electroacoustic resonators. Journal of Applied Physics, 123(9) :091714, 2018. Cité page 11, 137
- [50] Hervé Lissek and Xavier Meynial. A preliminary study of an isodynamic transducer for use in active acoustic materials. Applied Acoustics, 64(9) :917 – 930, 2003. Cité page 11
- [51] Hervé Lissek and Xavier Meynial. Les matériaux acoustiques actifs. In Congrès Français de Mécanique, 2005. Cité page 11
- [52] Hervé Lissek, Romain Boulandet, and Romain Fleury. Electroacoustic absorbers : Bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption. The Journal of the Acoustical Society of America, 129(5) :2968–2978, 2011. Cité page 11
- [53] Etienne Rivet, Sami Karkar, and Hervé Lissek. Multi-degree-of-freedom low-frequency electroacoustic absorbers through coupled resonators. Applied Acoustics, 132 :109 – 117, 2018. Cité page 11
- [54] Youngeun Cho, Semyung Wang, Jaeyub Hyun, Seungjae Oh, and Seongyeol Goo. Analysis of sound absorption performance of an electroacoustic absorber using a vented enclosure. Journal of Sound and Vibration, 417 :110 – 131, 2018. Cité page 11
- [55] H Zhu, R Rajamani, and KA Stelson. Active control of acoustic reflection, absorption, and transmission using thin panel speakers. The Journal of the Acoustical Society of America, 113(2) :852–870, 2003. Cité page 11
- [56] Timothy W. Leishman and Jiri Tichy. On the significance of reflection coefficients produced by active surfaces bounding one-dimensional sound fields. The Journal of the Acoustical Society of America, 113(3) :1475–1482, 2003. Cité page 12

- [57] A. R. D. Curtis, P. A. Nelson, S. J. Elliott, and A. J. Bullmore. Active suppression of acoustic resonance. The Journal of the Acoustical Society of America, 81(3) :624–631, 1987. Cité page 12
- [58] Robert L. Clark and Daniel G. Cole. Active damping of enclosed sound fields through direct rate feedback control. The Journal of the Acoustical Society of America, 97(3) :1710–1716, 1995. Cité page 12
- [59] Philippe Herzog, Alberto Soto-Nicolás, and Franck Guéry. Passive and active control of the low-frequency modes in a small room. In Audio Engineering Society Convention 98, Feb 1995. Cité page 12
- [60] Etienne Rivet, Romain Boulandet, Hervé Lissek, and Iris Rigas. Study on room modal equalization at low frequencies with electroacoustic absorbers. In Congrès Français d’Acoustique, 2012. Cité page 12
- [61] Etienne Thierry Jean-Luc Rivet. Room Modal Equalisation with Electroacoustic Absorbers. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 2016. Cité page 12
- [62] E. Friot and C. Bordier. Real-time active suppression of scattered acoustic radiation. Journal of Sound and Vibration, 278(3) :563 – 580, 2004. Cité page 13, 14, 137
- [63] Emmanuel Friot, Régine Guillermin, and Muriel Winninger. Active control of scattered acoustic radiation : a real-time implementation for a three-dimensional object. Acta acustica united with acustica, 92 :278–288, 2006. Cité page 13
- [64] David A. B. Miller. On perfect cloaking. Opt. Express, 14(25) :12457–12466, Dec 2006. Cité page 13
- [65] Dirk-Jan van Manen, Marlies Vasmel, Stewart Greenhalgh, and Johan O. A. Robertsson. Broadband cloaking and holography with exact boundary conditions. The Journal of the Acoustical Society of America, 137(6) :EL415–EL421, 2015. Cité page 13
- [66] Jordan Cheer. Active control of scattered acoustic fields : Cancellation, reproduction and cloaking. The Journal of the Acoustical Society of America, 140(3) :1502–1512, 2016. Cité page 13
- [67] Fei Ma, Wen Zhang, and Thushara D. Abhayapala. Active control of outgoing noise fields in rooms. The Journal of the Acoustical Society of America, 144(3) :1589–1599, 2018. Cité page 13
- [68] Ning Han, Shengzhen Feng, and Xiaojun Qiu. Active control of one-dimension impulsive reflection based on a prediction method. The Journal of the Acoustical Society of America, 127(3) :1193–1196, 2010. Cité page 13
- [69] Stephen J. Elliott, Jordan Cheer, Lam Bhan, Chuang Shi, and Woon-Seng Gan. A wavenumber approach to analysing the active control of plane waves with arrays of secondary sources. Journal of Sound and Vibration, 419 :405 – 419, 2018. Cité page 13
- [70] Shuping Wang, Hongmei Sun, Jie Pan, and Xiaojun Qiu. Near-field error sensing for active directivity control of radiated sound. The Journal of the Acoustical Society of America, 144(2) :598–607, 2018. Cité page 13
- [71] Alexandre Gintz. Estimation des échos à basse fréquence dans un local de mesure. PhD thesis, 2009. Thèse de doctorat dirigée par Herzog, Philippe Acoustique Aix-Marseille 1 2009. Cité page 14, 15, 29, 134, 137

- [72] 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. Cité page 14
- [73] Alexandre Gintz and Emmanuel Friot. Control of low-frequency wall reflections in an anechoic room : estimation of the scattered sound from wall measurements. In ICA 2007, pages CD-ROM (5 pages), Madrid, Spain, September 2007. Cité page 14
- [74] E. Friot and A. Gintz. Estimation and global control of noise reflections. In Active 2009, Ottawa, Canada, 2009. Cité page 14
- [75] N. Epain and 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 :587–604, 2007. Cité page 15, 23
- [76] S Takane, Y Suzuki, and T Sone. A new method for global sound field reproduction based on kirchhoff’s integral equation. Acta Acustica united with Acustica, 85 :250–257, 03 1999. Cité page 15
- [77] S Ise. A principle of sound field control based on the kirchhoff-helmholtz integral equation and the theory of inverse systems. Acta Acustica united with Acustica, 85 :78–87, 01 1999. Cité page 15
- [78] D. Habault, E. Friot, Ph. Herzog, and C. Pinhede. Active control in an anechoic room : Theory and first simulations. Acta Acustica united with Acustica, 103(3) :369–378, 2017. Cité page 19, 20, 154, 156
- [79] Christian Hansen. Discrete Inverse Problems, Insight and Algorithms. Cité page 22, 33
- [80] A. N. Tikhonov and V. IA. Arsenin. Solutions of ill-posed problems / Andrey N. Tikhonov and Vasilii Y. Arsenin ; translation editor, Fritz John. Winston ; distributed solely by Halsted Press Washington : New York, 1977. Cité page 22
- [81] Emmanuel Friot. Time-domain versus frequency-domain effort weighting in active noise control design. The Journal of the Acoustical Society of America, 141(1) :EL11–EL15, 2017. Cité page 23
- [82] A. Roure and A. Albarrazin. The remote microphone technique for active noise control. In ACTIVE 99, pages 1233–1244, 1999. Cité page 24
- [83] Antonin Novak, Pierrick Lotton, and Laurent Simon. Synchronized swept-sine : Theory, application, and implementation. J. Audio Eng. Soc, 63(10) :786–798, 2015. Cité page 80, 173
- [84] Pierre Leroy. Rapport final du post-doctorat sur l’estimation du champ diffracté dans la maquette de chambre sourde active. Technical report, 20110. Cité page 134
- [85] D. Colton and R. Kress. Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory. In Applied Math Sciences, number 93. Wiley, 1983. Cité page 154, 156
- [86] Paul Filippi. Problème de transmission pour l’équation de helmholtz scalaire et problèmes aux limites équivalents : application à la transmission gaz parfait-milieu poreux. Journal de Mécanique, 18, 01 1979. Cité page 154
- [87] T.s Angell, Rainer Kress, and G F. Roach. L2-boundary integral equations for the robin problem. Mathematical Methods in The Applied Sciences - MATH METH APPL SCI, 6 :345–352, 01 1984. Cité page 154, 155, 156

- [88] P. M. Morse and H. Feshbach. Methods of theoretical physics. 1953. Cité page 155
- [89] Antoine Chaigne. Ondes acoustiques. 30/01/2002. Cité page 159

Annexes

Annexe A

Existence de l'opérateur de diffraction

Cette annexe présente un résumé de la démonstration de l'existence de l'opérateur de diffraction \mathcal{D} , étudiée plus en détails dans [78]. L'objectif est de montrer que, pour une source S dans un volume Ω délimité par une surface Γ , il existe une relation entre la pression diffractée p_{dif} en un point M de Ω et la pression totale p_{tot} mesurée sur la surface Γ ; cette relation est basée sur l'utilisation d'un opérateur \mathcal{D} :

$$p_{dif}(S, M) = \int_{\Gamma} p_{tot}(S, P) \mathcal{D}(M, P) d\Gamma(P) \quad (\text{A.1})$$

Afin d'alléger les notations, les points de Γ , notés M^Γ dans l'ensemble du manuscrit, sont ici notés P .

Pour obtenir la relation (A.1), nous considérons le domaine fermé représenté sur la figure A.1. Ce domaine est divisé en deux sous-domaines : Ω_1 à l'intérieur de la frontière Γ et Ω_2 délimité par les frontières Γ et Σ . On suppose que la frontière Σ est décrite par des conditions d'absorption. Les vecteurs unitaires \vec{n} normaux à Σ et Γ sont dirigés vers Ω_2 . Les deux sous-domaines sont caractérisés par les mêmes paramètres : densité ρ et célérité du son c .

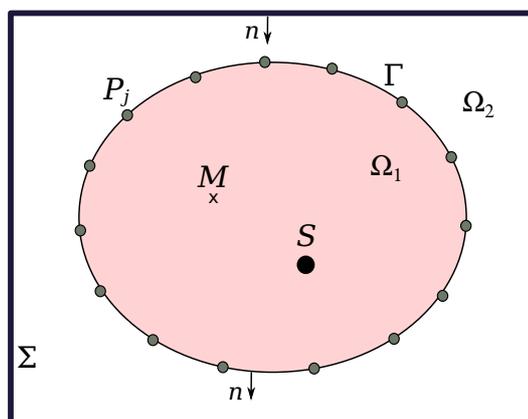


FIGURE A.1 – La géométrie du problème

On considère un problème de transmission acoustique entre Ω_1 et Ω_2 . Une source sonore S , placée dans Ω_1 , génère un signal sinusoïdal de fréquence angulaire ω dont le comportement temporel est modélisé par $e^{-i\omega t}$. Les pressions acoustiques dans Ω_1 et Ω_2 sont notées respectivement p_1 et p_2 . Le problème peut être décrit par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} (\Delta + k^2)p_1(M) = F & \text{dans } \Omega_1 \\ (\Delta + k^2)p_2(M) = 0 & \text{dans } \Omega_2 \\ p_1 = p_2 & \text{sur } \Gamma \\ \partial_n p_1 = \partial_n p_2 & \text{sur } \Gamma \\ \mathcal{A}(p_2, \partial_n p_2) = 0 & \text{sur } \Sigma \end{array} \right.$$

où $k = \omega/c$ est le nombre d'onde et $\partial_n p_i$ désigne la dérivée normale de p_i sur la frontière Γ ou Σ . L'opérateur \mathcal{A} correspond à une condition d'absorption. Grâce aux conditions d'absorption, la solution (p_1, p_2) du système existe et elle est unique [85, 86, 87].

Soit G_1 la fonction de Green définie dans l'espace infini 3D :

$$G_1(M, M') = -\frac{e^{ikR(M, M')}}{4\pi R(M, M')}$$

où $R(M, M')$ est la distance entre les points M et M' . La représentation de Green de p_1 dans Ω_1 s'écrit :

$$p_1(M) = p_{inc}(M) + \int_{\Gamma} [p_1(P)\partial_{n'}G_1(M, P) - \partial_{n'}p_1(P)G_1(M, P)]dP \quad (\text{A.2})$$

où p_{inc} est la pression incidente. Le terme $\partial_{n'}$ représente la dérivée normale au point d'intégration P sur la frontière Γ . L'intégrale sur Γ est égale à la pression diffractée $p_{dif}(M)$ et peut s'écrire formellement :

$$p_{dif}(M) = \mathcal{U}_1[p_1] + \mathcal{V}_1[\partial_{n'}p_1] \quad (\text{A.3})$$

avec les définitions suivantes, pour toute fonction μ définie sur Γ :

$$\mathcal{U}_1[\mu](M) \equiv \int_{\Gamma} \mu(P)\partial_{n'}G_1(M, P)dP$$

$$\mathcal{V}_1[\mu](M) \equiv - \int_{\Gamma} \mu(P)G_1(M, P)dP$$

Dans (A.3), l'opérateur \mathcal{U}_1 est un potentiel de double couche appliqué directement à la pression totale sur Γ . L'opérateur \mathcal{V}_1 correspond à un potentiel de simple couche, appliqué à la dérivée de la pression totale sur Γ . Afin d'obtenir une équation similaire à l'équation (A.1), le second terme de l'équation (A.3) est transformé à l'aide d'une relation liant p_1 et sa dérivée normale sur Γ .

Pour ce faire, on introduit la fonction de Green G_2 définie dans le domaine Ω_2 et solution du système d'équations :

$$\begin{cases} (\Delta + k^2)G_2(M, M') = \delta(M, M') & \text{dans } \Omega_2 \\ G_2 = 0 & \text{sur } \Gamma \\ \mathcal{A}(G_2, \partial_n G_2) = 0 & \text{sur } \Sigma \end{cases}$$

Grâce aux conditions d'absorption sur la frontière Σ , la solution G_2 existe et elle est unique (voir par exemple [87]). On peut noter que l'expression analytique de G_2 est connue pour des conditions et géométries simples [88]. La formule de Green appliquée à G_2 et à la pression p_2 dans le domaine Ω_2 conduit à la représentation :

$$p_2(M) = \int_{\Gamma} p_2(P')\partial_{n'}G_2(M, P')dP' \quad (\text{A.4})$$

en raison notamment des conditions sur la frontière Γ . L'étape suivante consiste à appliquer à cette expression une dérivation normale et à prendre la limite de cette dérivée normale en faisant tendre le point M vers un point P de la frontière Γ . Cette étape nécessite une attention

particulière car elle conduit à la dérivée d'un potentiel de double couche qui est une intégrale très singulière mais peut encore être définie mathématiquement (voir [85, 87]) :

$$\partial_n p_2(P) = \partial_{n(P)} \int_{\Gamma} p_2(P') \partial_{n'} G_2(P, P') dP'$$

En introduisant ensuite la condition de continuité entre p_1 et p_2 dans cette équation, on obtient, pour tout point P de Γ :

$$\begin{aligned} \partial_n p_1(P) &= \partial_{n(P)} \int_{\Gamma} p_1(P') \partial_{n'} G_2(P, P') dP' \\ &\equiv [T[p_1]](P) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

La seconde égalité définit l'opérateur T qui relie la pression totale p_1 à sa dérivée $\partial_n p_1$. L'étape suivante consiste à remplacer $\partial_{n'} p_1(P)$ par cette expression dans l'égalité (A.3). On obtient :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_1[\partial_n p_1](M) &= \mathcal{V}_1[T[p_1]](M) = \\ &= - \int_{\Gamma} \partial_{n(P)} \left[\int_{\Gamma} p_1(P') \partial_{n'} G_2(P', P) dP' \right] G_1(M, P) dP \end{aligned}$$

D'après [85], il est possible d'invertir l'ordre des intégrations ; on obtient alors :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_1[T[p_1]] &= \\ &= - \int_{\Gamma} p_1(P') \partial_{n'} \left[\int_{\Gamma} G_1(M, P) \partial_{n'} G_2(P', P) dP \right] dP' \end{aligned}$$

Finalement la combinaison de cette équation avec l'équation (A.3) montre que l'opérateur peut s'exprimer formellement :

$$\mathcal{D} = \partial_{n'} G_1 - \partial_{n'} \left[\int_{\Gamma} G_1 \partial_{n'} G_2 \right]$$

Il faut souligner que la méthode utilisée est basée sur l'utilisation de deux fonctions de Green qui sont définies et uniques pour toutes les fréquences réelles. Il est difficile d'obtenir les propriétés mathématiques de l'opérateur dans le cas général. Dans [78], une expression explicite de l'opérateur \mathcal{D} est obtenue pour le cas particulier d'un demi-espace avec une condition d'impédance.

Annexe B

Source de référence \tilde{S}

Lors de l'expérience réalisée en salle semi-anéchoïque, l'étape d'identification du filtre de diffraction nécessite une source compacte, parfaitement connue et omnidirectionnelle en basse fréquence.

B.1 Réalisation de la source \tilde{S}

La source \tilde{S} a été conçue et réalisée au LMA pour représenter au mieux un monopôle compact pour la bande de fréquence (40-400 Hz).

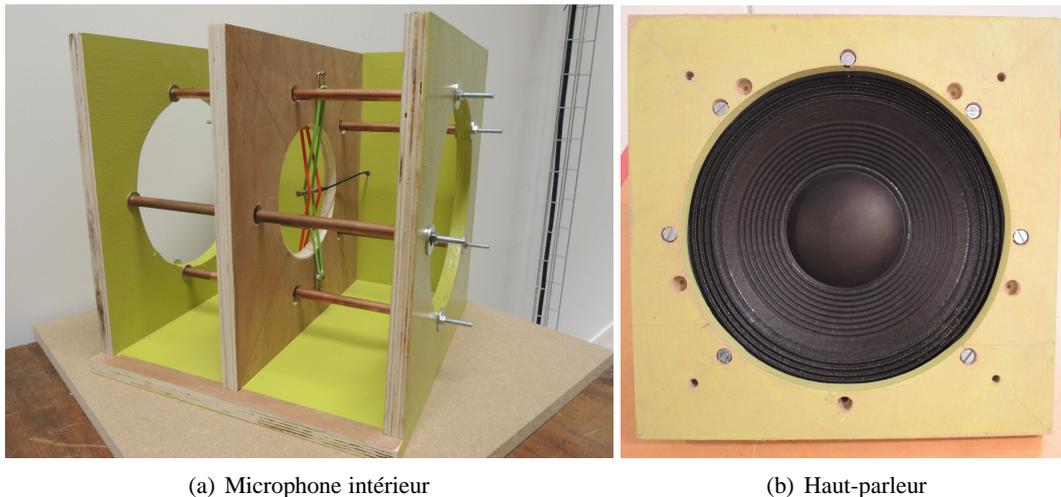


FIGURE B.1 – Détails de la source de référence \tilde{S}

La structure de la source a été réalisée par un assemblage de planches de contre-plaqué de 18 mm d'épaisseur. Les planches sont collées, vissées et peintes afin d'éviter les fuites. Les dimensions intérieures sont : 350 mm de hauteur, 350 mm de largeur, 320 mm de profondeur. Le volume total intérieur est de 37,4 litres. Les raidisseurs transverses en cuivre sont fixés à l'aide de tiges filetées, le raidisseur central est une planche en contre-plaqué trouée au centre pour placer le microphone de référence. La source est composée de deux haut-parleurs (Beyma 10LW30/N) placés face à face, câblés en série. Les haut-parleurs ont été rodés puis choisis pour que leur fréquence de résonance soit proche l'une de l'autre. Un microphone à fort niveau de pression (GRAS 40BF) est fixé au centre géométrique de la source à l'aide de tendeurs. Ce microphone est utilisé pour estimer le débit sortant de la source et évaluer ainsi la pression incidente en tout point M .

B.2 Calcul de la pression incidente à partir du débit

L'étape d'identification du filtre de diffraction nécessite la connaissance de la pression diffractée, voir équation (2.5). La pression diffractée au point M est la différence entre la pression totale mesurée en M et la pression incidente déduite de la mesure de débit de la source. Le débit est évalué à l'aide de la pression mesurée sur le microphone placé à l'intérieur de la source. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que la source \tilde{S} est une sphère de rayon a très petit par rapport à la distance r entre la source et le point M .

En prenant pour convention la dépendance temporelle $e^{i\omega t}$, la pression acoustique en champ libre en un point M de l'espace s'écrit [89] :

$$p_{inc}(\tilde{S}, M) = i\omega\rho_0 Q_s \frac{e^{-ikr(\tilde{S}, M)}}{4\pi r(\tilde{S}, M)} \quad (\text{B.1})$$

où Q_s est le débit sortant de la source, ω la fréquence angulaire et ρ_0 la masse volumique de l'air.

Ce débit Q_s peut se relier à la pression p_a mesurée à l'intérieur de la source. En effet, pour une transformation isentropique c'est-à-dire adiabatique et réversible, la loi de Laplace s'écrit : $PV^\gamma = C$ où P est la pression, V le volume, γ la constante de Laplace, et C une constante. Par dérivation, on obtient :

$$d(\ln(PV^\gamma)) = 0$$

ou

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \quad (\text{B.2})$$

On note $P(t) = P_0 + p_a(t)$ où P_0 est la pression atmosphérique et $p_a(t)$ la pression acoustique correspondant aux variations autour de l'état d'équilibre P_0 . On note $V(t) = V_0 + v(t)$ où V_0 est le volume du milieu et $v(t)$ les variations du volume autour de ce volume.

Si l'on s'intéresse uniquement aux variations de pression acoustique dp_a et de volume dv , l'équation (B.2) conduit à :

$$dp_a(t) = -\gamma \frac{P_0}{V_0} dv(t)$$

et

$$\frac{dp_a}{dt} = -\gamma \frac{P_0}{V_0} \frac{dv}{dt} = +\gamma \frac{P_0}{V_0} Q$$

avec le débit volumique : $Q = -\frac{dv}{dt}$.

Dans le cas d'un signal harmonique, on obtient :

$$i\omega p_a = \frac{\gamma}{V_0} P_0 Q$$

Le débit volumique de la source est obtenu à partir de l'expression :

$$Q_b = i\omega \frac{V_0}{P_0 \gamma} p_a \quad (\text{B.3})$$

Pour un point M situé à l'extérieur de la source, le débit est donné par :

$$Q_s = -Q_b = -i\omega \frac{V_0}{P_0 \gamma} p_a \quad (\text{B.4})$$

En introduisant cette expression dans l'équation (B.1), la pression acoustique p à la distance

r d'une source de pression intérieure p_a est obtenue par :

$$p_{inc}(\tilde{S}, M) = \frac{\omega^2 \rho_0 V_0}{P_0 \gamma} p_a \frac{e^{-ikr(\tilde{S}, M)}}{4\pi r(\tilde{S}, M)} \quad (\text{B.5})$$

Cette formule permet donc de calculer la pression $p_{inc}(\tilde{S}, M)$ au point M .

Il faut souligner enfin que tous les microphones utilisés lors des mesures ont bien sûr été étalonnés auparavant par rapport au microphone de pression intérieure, dans une cavité d'étalonnage.

Annexe C

Caractérisation de la source \tilde{S} en salle anéchoïque

Cette annexe présente les mesures réalisées en salle anéchoïque pour caractériser la source de référence \tilde{S} (voir figure C.1). Deux types de mesures ont été effectuées : une mesure de directivité de la source et une mesure de niveau réalisée sur une portion d'axe horizontal.

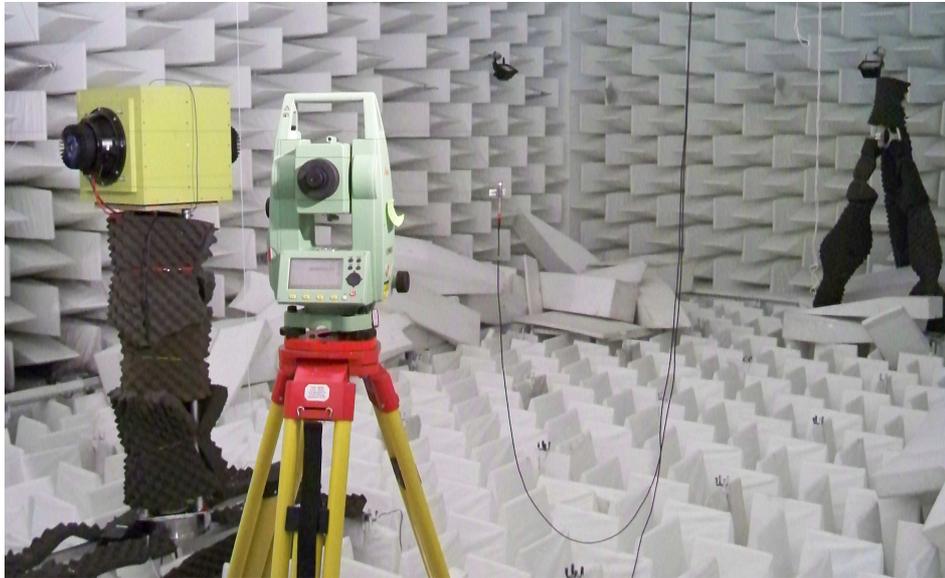


FIGURE C.1 – Caractérisation de la source \tilde{S} en salle anéchoïque (LMA Campus Joseph Aiguier)

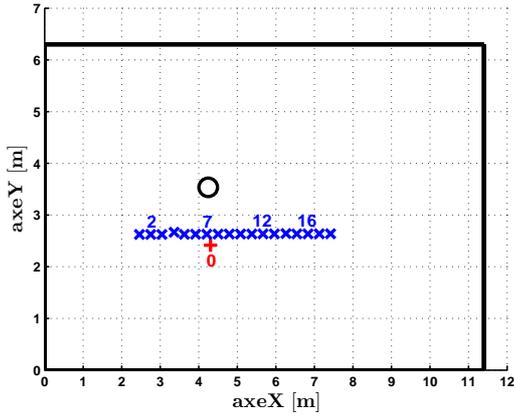
Les mesures de directivité sont réalisées dans un plan quasi-horizontale passant par le centre géométrique de la source \tilde{S} . La source est centrée sur une table tournante à une hauteur $z_0 = 1,569$ m ; la table tournante (Newport, modèle RV240CC) est motorisée et pilotée par un contrôleur (Newport, modèle ESP300). Un microphone est placé au point M_0 à une hauteur $z = 1,564$ m et à la distance $r = 1,041$ m du centre de la source ; il est composé d'une capsule champ libre (GRAS, modèle 40AF) et orienté en direction du centre géométrique de la source. Les mesures angulaires sont effectuées par pas de 5 degrés.

Pour les mesures sur une portion d'axe, la source est fixe, à la même position. Les mesures sont réalisées pour un ensemble de points M_i à l'aide du microphone champ libre ultérieurement placé en M_0 et cette fois-ci fixé à un câble motorisé. Il faut souligner que ce montage nous a contraint, pour des raisons techniques, à orienter le microphone perpendiculairement à la source, ce qui n'est pas conforme à l'utilisation du modèle de ce microphone.

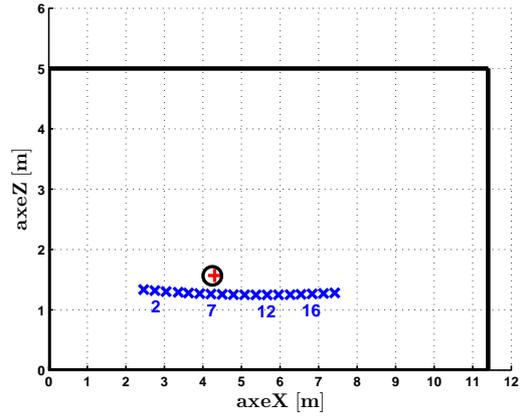
La figure C.2 présente les positions de la source et du microphone de mesure. La source de référence est représentée par un rond noir ; la position M_0 est représentée par une croix rouge et les points M_i par des croix bleues.

L'ensemble des coordonnées des positions de la source et du microphone sont mesurées à l'aide d'un théodolite (Leica, modèle TCR407). Le tableau C.1 indique les distances r_i et les angles θ_i entre la position de la source \tilde{S} et celles des points M_i ainsi que les distances entre le point M_0 et les points M_i .

La figure C.3 présente quatre exemples de comparaison de niveaux de pression en fonction de la fréquence, obtenus lors des deux séries de mesures. La courbe discontinue bleue a été



(a) Vue en coupe XY



(b) Vue en coupe XZ

FIGURE C.2 – Position des microphones M_0 , M_i et de la source \tilde{S} .
 \circ : source \tilde{S} , $+$ et \times : microphones M_0 et M_i

Position Microphone M_i	Source \tilde{S} / Microphone M_i		M_0 / M_i
	Distance r_i [m]	Angle θ_i [°]	Distance [m]
1	2,014	152	1,866
2	1,765	148	1,583
3	1,530	142	1,303
4	1,268	134	1,010
5	1,136	123	0,762
6	1,009	109	0,526
7	0,957	92	0,375
8	0,990	75	0,417
9	1,102	60	0,614
10	1,273	48	0,865
11	1,482	40	1,136
12	1,714	34	1,414
13	1,964	29	1,699
14	2,231	25	1,996
15	2,487	22	2,268
16	2,759	20	2,556
17	3,034	18	2,846
18	3,311	16	3,133

TABLE C.1 – Positions des points M_i par rapport à la source et à M_0

obtenue aux points M_2 , M_7 , M_{12} et M_{16} . Sur chaque figure, la courbe continue rouge correspond à la mesure obtenue en M_0 pour l'angle de directivité le plus proche des angles θ_i donnés dans le tableau ($\theta = 150^\circ, 90^\circ, 35^\circ, 20^\circ$).

Les niveaux de pression présentés sont normalisés par la pression incidente reconstruite de la source \tilde{S} sans la prise en compte du coefficient de directivité, voir équation 5.1.

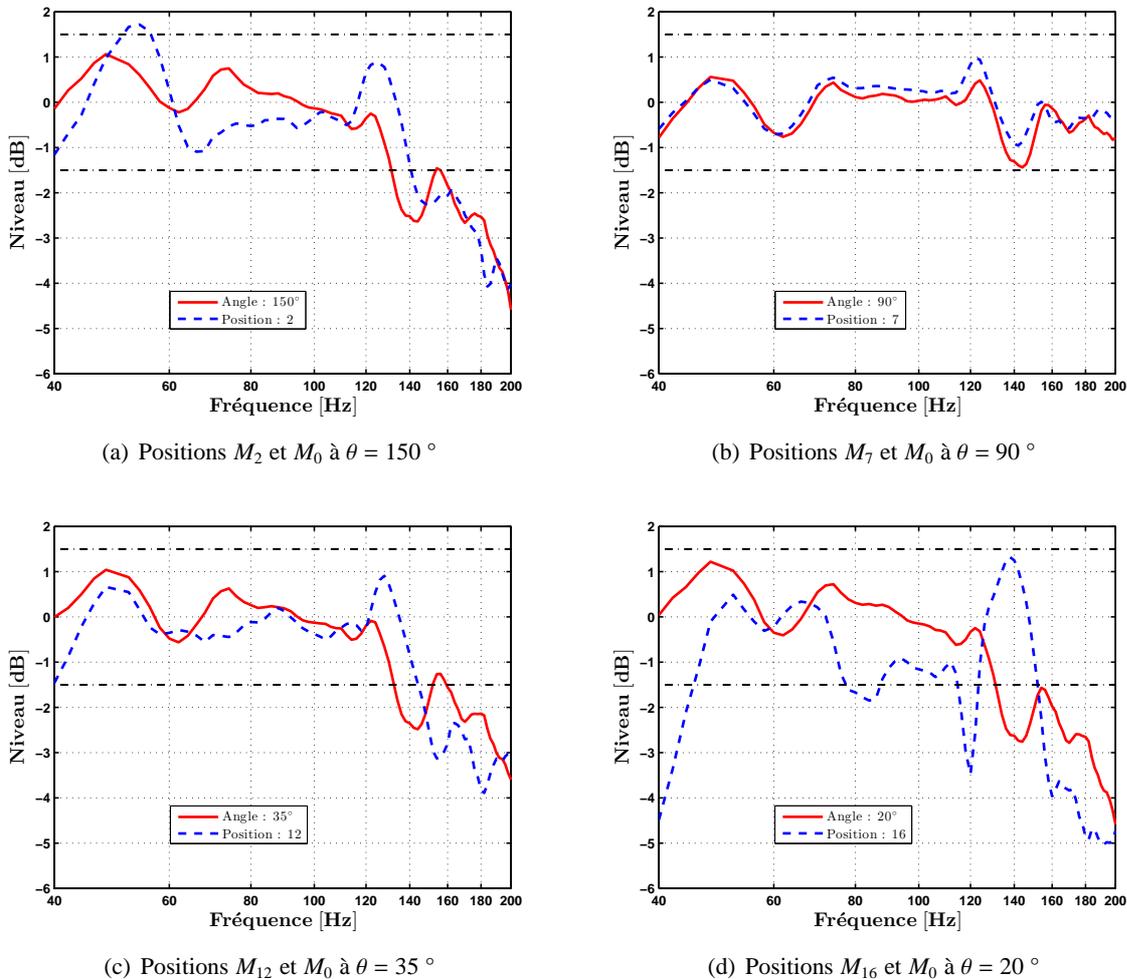


FIGURE C.3 – Comparaison de mesures de niveaux, entre les positions M_2 , M_7 , M_{12} et M_{16} et la mesure en M_0 obtenue pour les angles θ les plus proches des angles θ_i

La meilleure comparaison est obtenue pour le point M_7 , ce qui est attendu puisque les points M_0 et M_7 ont des positions très proches : ce résultat indique une bonne répétabilité des mesures qui ont été effectués à des moments différents.

Nous constatons globalement pour les 3 autres paires de courbes une baisse progressive du niveau au-delà de 120 Hz : les niveaux sortent de l'intervalle admissible, atteignant jusqu'à 5 dB à 200 Hz. Ce comportement est très probablement due aux défauts de directivité de la source.

Hormis cette baisse, nous constatons également quelques accidents, notamment autour de 140 Hz et au-dessous de 80 Hz, qui sont probablement dus à des défauts d'anéchoïcité de la salle ; ces accidents ont déjà été identifiés lors d'anciennes mesures [2].

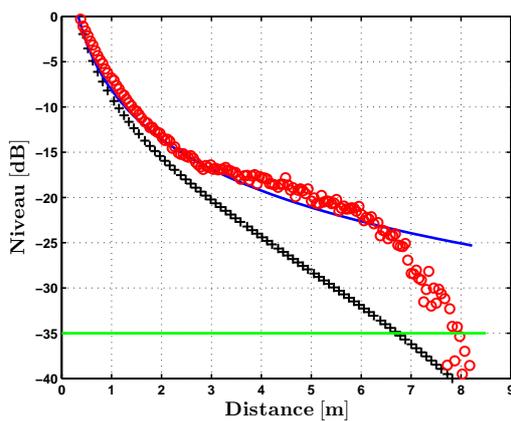
Ces mesures mettent donc en évidence à la fois l'influence de la source et des défauts d'anéchoïcité de la salle. Cependant il est difficile de différencier les écarts relevant de la salle, de la source ou des incertitudes de mesures. Nous n'avons pas eu le temps d'approfondir cette étude. Des nouvelles mesures seront menées dans la nouvelle salle anéchoïque du LMA.

Annexe D

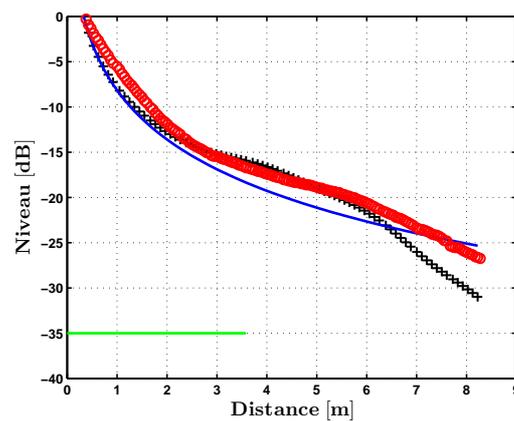
Mesures de niveaux sonores en salle semi-anéchoïque

En complément à la figure 5.8 présentée au chapitre 5, cette annexe présente deux autres comparaisons entre les mesures et des simulations obtenues dans la salle semi-anéchoïque. Les mesures sont comparées à des simulations obtenues pour deux configurations : paroi réfléchissante de dimension infinie (modèle avec une source image) et une salle avec diverses valeurs d'admittance. Pour les 3 cas, les niveaux présentés pour chaque distance r sont définis comme la différence entre le niveau obtenu à la distance r et le niveau obtenu à la distance 0,5 m.

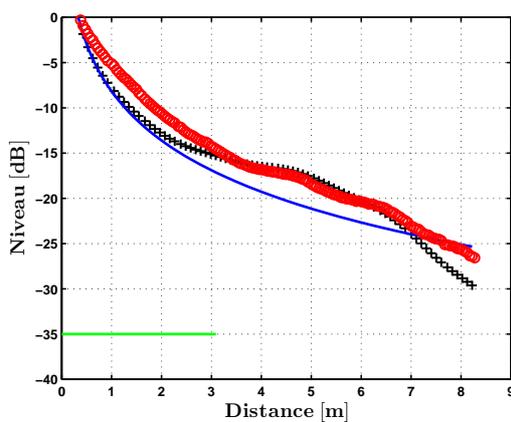
Au chapitre 5, les valeurs d'admittance réduite choisies sont $\beta_r = 0,8 + i0,01$ sur le sol, $\beta_r = 0,001 + i0,001$ sur la paroi réfléchissante et $\beta_r = 1 + i0$ sur les quatre autres parois. L'objectif était de vérifier le comportement éventuellement réfléchissant du sol dû au caillebotis. Des admittances plus faibles pour le sol ont été testées mais les résultats obtenus s'éloignent des résultats de mesures. Les deux exemples présentés ici ont été choisis car ils donnent des niveaux proches des résultats expérimentaux.



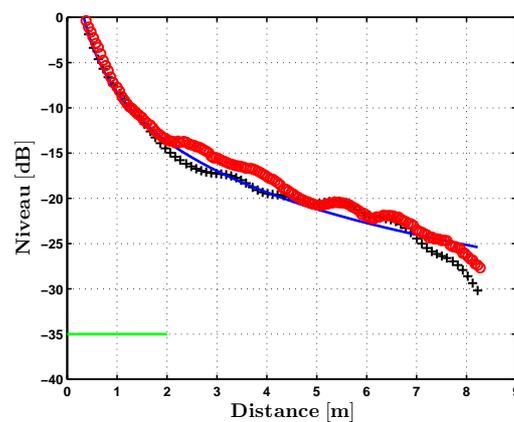
(a) Fréquence : 40 Hz



(b) Fréquence : 95 Hz



(c) Fréquence : 110 Hz



(d) Fréquence : 170 Hz

FIGURE D.1 – Mesures (○), paroi réfléchissante infinie (—), salle semi-anéchoïque (×) ; $\beta_r = 1 + i0$

La figure D.1 correspond à une admittance réduite $\beta_r = 1 + i0$ sur les cinq parois, c'est-à-dire un coefficient de réflexion en ondes planes nul. Le segment vert horizontal tracé en bas de la figure représente la longueur d'onde.

La figure D.2 correspond à une admittance réduite $\beta_r = 0,8 + i0,01$ sur les cinq parois, c'est-à-dire un coefficient de réflexion en ondes planes égal à 0,11.

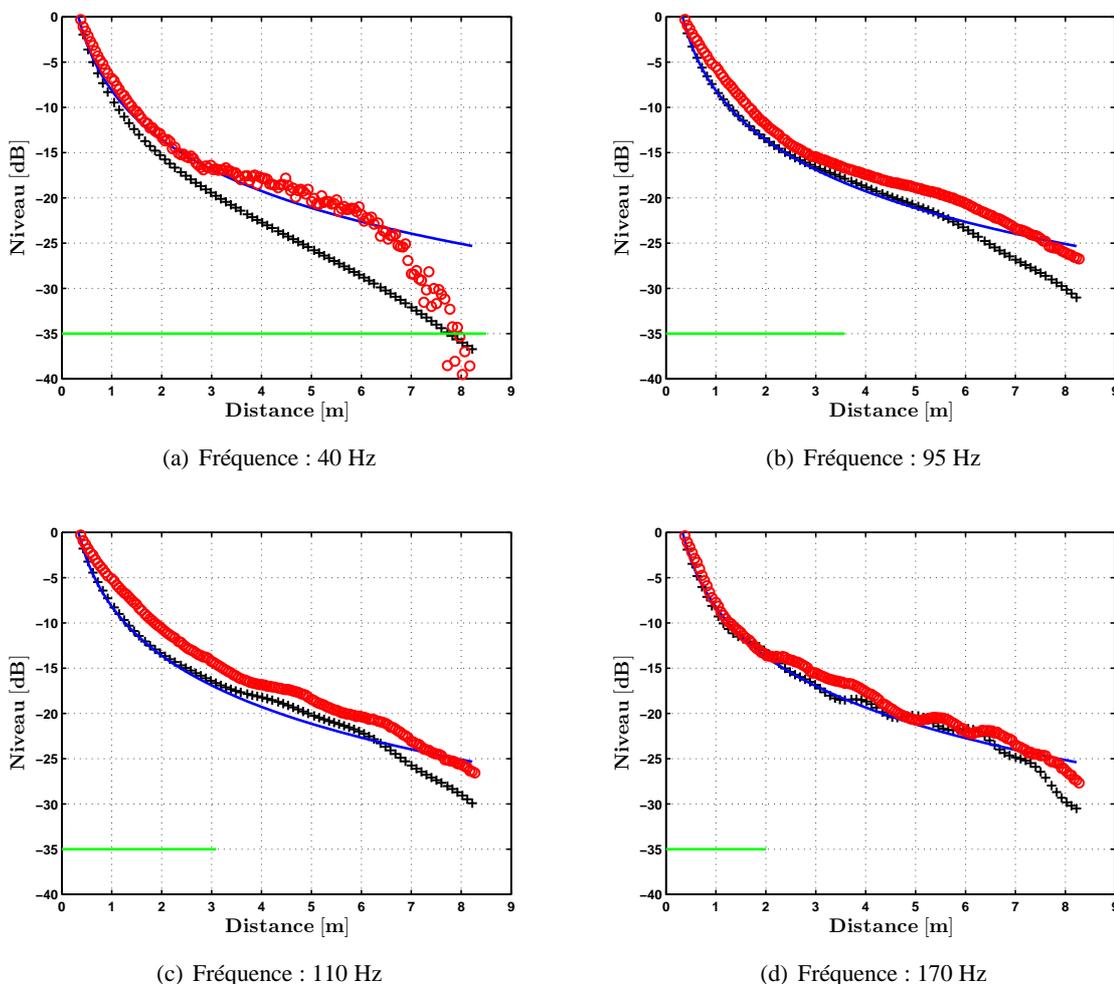


FIGURE D.2 – Mesures (\circ), paroi réfléchissante infinie ($—$), salle semi-anochoïque (\times); $\beta_r = 0,8 + i0,01$

Les résultats montrent qu'à 40 Hz, les niveaux expérimentaux sont très proches de ceux obtenus dans le cas d'une paroi réfléchissante infinie. Aux fréquences intermédiaires, les résultats les plus proches des mesures sont obtenus avec $\beta_r = 1 + i0$. A 170 Hz, les résultats sont légèrement meilleurs avec $\beta_r = 0,8 + i0,01$. Pour modéliser plus finement le comportement de la salle, d'autres séries de mesures auraient été nécessaires mais ce n'était pas l'objet de ce travail.

Annexe E

Complément sur le dispositif expérimental

Cette annexe apporte des informations complémentaires sur le dispositif expérimental mis en place dans la salle semi-anéchoïque. L'ensemble est présenté à la figure E.1. Les coordonnées de toutes les positions ont été obtenues à l'aide d'un théodolite. L'origine du repère est le coin bas à gauche de la paroi réfléchissante. Des informations complémentaires sont aussi présentées sur le traitement du signal développé pour le système d'acquisition/restitution audionumérique.

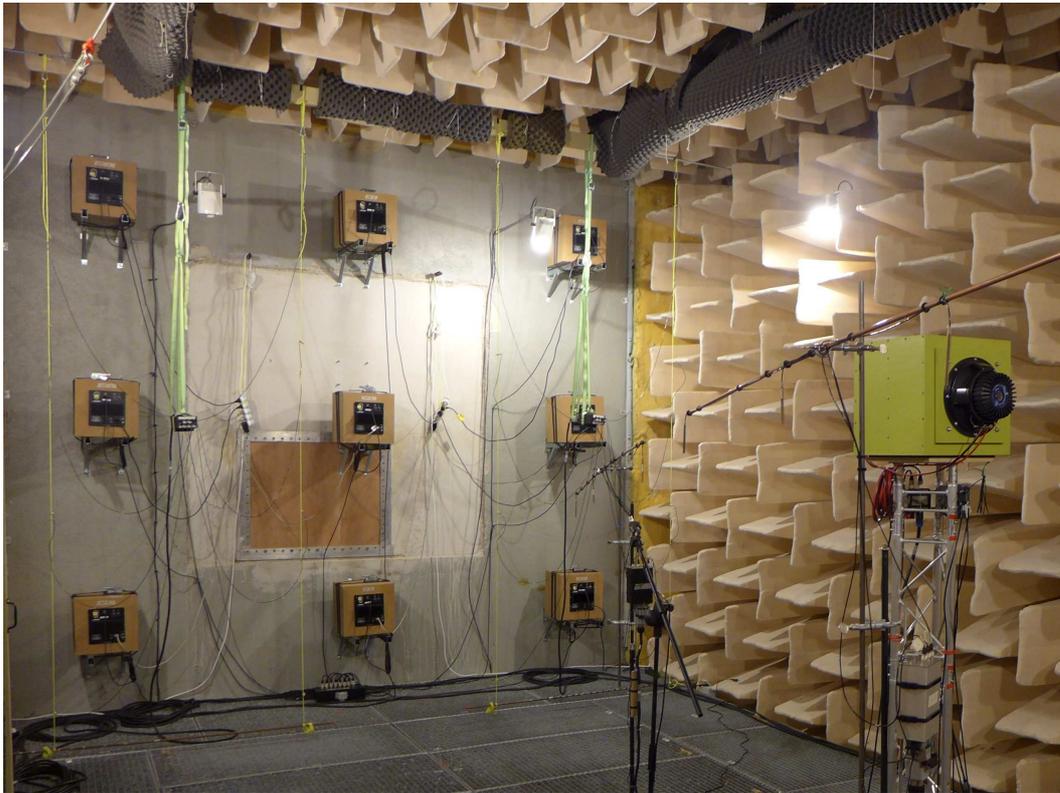


FIGURE E.1 – Dispositif expérimental en salle semi-anéchoïque (LMA - site Joseph-Aiguier)

E.1 Le système d'acquisition/restitution

L'intérêt du système audio utilisé (RME, modèle HDSP Madi) est de permettre une synchronisation des voies d'entrées et sorties, ainsi qu'une grande dynamique des signaux. Par contre, son utilisation pour nos mesures nécessite un étalonnage des entrées et sorties. Pendant la campagne de mesures, les signaux générés sont des sinus balayé pour l'étape d'identification du filtre de diffraction D et des sinus dans la partie contrôle. Les acquisitions temporelles sont traités afin de travailler dans le domaine fréquentiel. Le traitement du signal effectué est décrit dans les deux paragraphes suivants.

E.1.1 Signaux pour l'identification du filtre D

Le sinus balayé est utilisé dans différentes étapes de l'expérience notamment pour la mesure de directivité de la source \tilde{S} , l'identification du filtre de diffraction D et la mesure des trajets

secondaires C . La génération du signal est réalisée avec le logiciel MatLab suivant la méthode du sinus balayé synchronisé, développée par Novak et al. [83].

La première étape consiste à générer un sinus balayé entre une fréquence de départ $f_1 = 40$ Hz et une fréquence d'arrivée $f_2 = 400$ Hz pendant une période $T = 30$ s déroulée à une vitesse exponentiellement croissante. Le signal généré est décrit comme suit :

$$x(t) = A \sin \left[2\pi f_1 L \exp \left(\frac{t}{L} \right) \right] \quad (\text{E.1})$$

avec

$$L = \frac{T}{\ln \left(\frac{f_2}{f_1} \right)}$$

L'amplitude maximale du signal est atteinte progressivement à partir de quelques échantillons. Également, l'amplitude décroît progressivement à la fin du signal sur quelques échantillons avant l'arrêt. Le signal est complété par le nombre d'échantillon de latence mesuré sur le système d'acquisition/restitution. Un gain A différent est appliqué au signal de la source \tilde{S} et celui des sources secondaires. Le signal est enregistré dans un fichier au format "wav" à la fréquence d'échantillonnage 44,1 kHz.

Le signal acquis par le système d'acquisition/restitution est déconvolué dans le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier du filtre inverse $\hat{X}(f)$ du signal $\frac{x(t)}{A}$ pour obtenir la réponse en fréquence $H(f)$ suivante :

$$H(f) = \mathcal{F} [y(t)] \hat{X}(f) \quad (\text{E.2})$$

avec

$$\hat{X}(f) = 2 \sqrt{\frac{f}{L}} \exp \left(-i 2\pi f L \left[1 - \ln \left(\frac{f}{f_1} \right) \right] + i \frac{\pi}{4} \right)$$

L'originalité de la méthode du sinus balayé synchronisé consiste à séparer les harmoniques supérieures des réponses impulsionnelles. Cet aspect n'a finalement pas été étudié dans l'expérience.

E.1.2 Signaux pour le contrôle

Les mesures de contrôle actif de la pression diffractée sont réalisées à partir d'une onde sinusoïdale pour différentes fréquences f comprise entre 40 et 200 Hz. Les différentes fréquences f choisies pour le signal sinusoïdale correspondent à des valeurs obtenues avec le sinus balayé.

Le signal sinusoïdal est calculé à la fréquence f pour une durée $t = 10$ s, dans le corps des nombres complexes suivant l'expression :

$$\hat{x}(t) = \exp(i 2\pi f t) \quad (\text{E.3})$$

Le signal envoyé à la source \tilde{S} correspond à la partie réelle de $\hat{x}(t)$:

$$x^{\tilde{S}}(t) = A \cdot \Re [\hat{x}(t)] \quad (\text{E.4})$$

avec A l'amplitude de signal pour la source \tilde{S} .

Dans le cas du contrôle, les commandes \tilde{U} envoyées aux sources secondaires sont calculées d'après l'équation (2.12), à partir des mesures réalisées en sinus balayé équation (E.2) et s'écrivent suivant l'expression :

$$\hat{x}^{sc}(t) = H^{\tilde{U}} \hat{x}(t) \quad (\text{E.5})$$

avec $H^{\tilde{U}}$ la réponse en fréquences des commandes calculées à la fréquence f . Les signaux envoyés aux sources secondaires correspondent à la partie réelle de \hat{x}^{sc} :

$$x^{sc}(t) = A' \cdot \Re [\hat{x}^{sc}(t)] \quad (\text{E.6})$$

avec A' l'amplitude des signaux pour les sources secondaires.

L'amplitude maximale des signaux est atteinte progressivement à partir de quelques échantillons et elle décroît aussi progressivement à la fin des signaux sur quelques échantillons. Les signaux sont complétés par le nombre d'échantillon de latence mesuré sur le système d'acquisition/restitution. Ils sont ensuite enregistrés dans un fichier au format "wav" à la fréquence d'échantillonnage 44,1 kHz.

Les signaux acquis $y(t)$ avec et sans contrôle sont traités afin d'obtenir la réponse en fréquence $P(f)$ suivant la transformée de Fourier discrète et s'écrit :

$$P(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n) \exp\left(-i 2\pi n \frac{f}{f_s}\right) \quad (\text{E.7})$$

avec N le nombre d'échantillon, f la fréquence et f_s la fréquence d'échantillonnage. Les enregistrements des signaux $y(t)$ correspondant à des microphones sont pondérés par la sensibilité et la courbe d'étalonnage du microphone.

E.1.3 Étalonnage des entrées et sorties

L'étalonnage des gains d'entrées ont été réalisé avec un générateur externe (NTI, modèle Minirator MR2). Les connectiques XLR, Cinch et XLR avec un adaptateur BNC sont testées. Les signaux générés étaient un sinus balayé ou des sinus à différentes amplitude. Les résultats sont présentés sous la forme d'une copie de tableau à la figure E.3. Le volume de sorties est mesuré avec les connectiques XLR et XLR avec adaptateur BNC ; les résultats sont présentés par la copie d'un tableau à la figure E.3.

Voie	Gain	U_in	Signal	Hz	Connecteur	Date	Voie	Gain	U_in	Signal	Hz	Connecteur
1	1.8219	0.775	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
1	1.8214	0.245	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
1	1.7968	0.245	Sinus	40	XLR	2 12 2016						
1	1.7974	0.775	Sinus	40	XLR	2 12 2016	1	1.8003	0.775	Sinus	40	CINCH
1	1.7964	0.775	Sinus	200	XLR	2 12 2016	1	1.7998	0.775	Sinus	200	CINCH
1	1.7958	0.245	Sinus	200	XLR	2 12 2016						
1	1.7968	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	1	1.7981	0.775	Sinus	125	CINCH
2	1.8294	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
2	1.8056	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	2	1.8043	0.775	Sinus	125	CINCH
3	1.8188	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
3	1.7950	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	3	1.7962	0.775	Sinus	125	CINCH
4	1.8272	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
4	1.8031	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	4	1.8032	0.775	Sinus	125	CINCH
5	1.8120	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
5	1.7881	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	5	1.7900	0.775	Sinus	125	CINCH
6	1.8260	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
6	1.8021	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	6	1.8014	0.775	Sinus	125	CINCH
7	1.8059	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
7	1.7824	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	7	1.7866	0.775	Sinus	125	CINCH
8	1.8242	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
8	1.8003	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	8	1.8017	0.775	Sinus	125	CINCH
9	1.8208	0.245	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
9	1.8207	0.775	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
9	1.8181	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
9	1.7943	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	9	1.7956	0.775	Sinus	125	CINCH
10	1.8198	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
10	1.7958	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	10	1.7933	0.775	Sinus	125	CINCH
11	1.8244	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
11	1.8005	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	11	1.8012	0.775	Sinus	125	CINCH
12	1.8336	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
12	1.8095	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	12	1.8090	0.775	Sinus	125	CINCH
13	1.8330	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
13	1.8090	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	13	1.8090	0.775	Sinus	125	CINCH
14	1.8347	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
14	1.8108	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	14	1.8095	0.775	Sinus	125	CINCH
15	1.8358	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
15	1.8118	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	15	1.8179	0.775	Sinus	125	CINCH
16	1.8403	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
16	1.8163	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	16	1.8154	0.775	Sinus	125	CINCH
17	1.8271	0.775	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
17	1.8273	0.245	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
17	1.8256	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
17	1.8016	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	17	1.8084	0.775	Sinus	125	CINCH
18	1.8181	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
18	1.7945	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	18	1.7981	0.775	Sinus	125	CINCH
19	1.8413	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
19	1.8171	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	19	1.8166	0.775	Sinus	125	CINCH
20	1.8279	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
20	1.8039	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	20	1.8087	0.775	Sinus	125	CINCH
21	1.8278	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
21	1.8040	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	21	1.8045	0.775	Sinus	125	CINCH
22	1.8295	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
22	1.8057	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	22	1.8088	0.775	Sinus	125	CINCH
23	1.8172	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
23	1.7934	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	23	1.7939	0.775	Sinus	125	CINCH
24	1.8125	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
24	1.7887	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	24	1.7880	0.775	Sinus	125	CINCH
25	1.8226	0.245	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
25	1.8232	0.775	Sweep	20 400	XLR	2 12 2016						
25	1.8218	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
25	1.7978	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	25	1.7987	0.775	Sinus	125	CINCH
26	1.8397	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
26	1.8155	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	26	1.8146	0.775	Sinus	125	CINCH
27	1.8258	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
27	1.8020	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	27	1.8000	0.775	Sinus	125	CINCH
28	1.8317	0.775	Sweep	20 400	XLR	19 12 2016						
28	1.8076	0.775	Sinus	125	XLR	19 12 2016	28	1.8044	0.775	Sinus	125	CINCH

FIGURE E.2 – Gain d'entrées du système d'acquisition/restitution

Voie OUT	Sortie Généré	Gain Volume	Vrms OUT	Wav rms	Signal	Hz	Date	Voie OUT	Sortie Généré	Gain Volume	Vrms OUT	Voltmètre	Wav rms	Signal	Hz	Date
1	XLR	10.6015	0.375	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017	1	BNC	5.2864	0.187	0.193	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017
1	XLR	10.6409	0.377	0.035	Sinus	125	20_12_2016	1	BNC	5.3053	0.188	0.193	0.035	Sinus	125	20_12_2016
2	XLR	10.6673	0.378	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017	2	BNC	5.3271	0.189		0.035	Sweep	40 400	5_01_2017
2	XLR	10.7048	0.379	0.035	Sinus	125	20_12_2016	2	BNC	5.3456	0.189	0.195	0.035	Sinus	125	20_12_2016
3	XLR	10.6726	0.378	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017	3	BNC	5.3305	0.189		0.035	Sweep	40 400	5_01_2017
3	XLR	10.7088	0.379	0.035	Sinus	125	20_12_2016	3	BNC	5.3484	0.189	0.195	0.035	Sinus	125	20_12_2016
4	XLR	10.6141	0.376	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
4	XLR	10.6505	0.377	0.035	Sinus	125	20_12_2016	4	BNC	5.3140	0.188	0.193	0.035	Sinus	125	20_12_2016
5	XLR	10.6972	0.379	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
5	XLR	10.7328	0.380	0.035	Sinus	125	20_12_2016	5	BNC	5.3625	0.190	0.195	0.035	Sinus	125	20_12_2016
6	XLR	10.6887	0.378	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
6	XLR	10.7253	0.380	0.035	Sinus	125	20_12_2016	6	BNC	5.3509	0.189	0.195	0.035	Sinus	125	20_12_2016
7	XLR	10.6991	0.379	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
7	XLR	10.7356	0.380	0.035	Sinus	125	20_12_2016	7	BNC	5.3709	0.190	0.196	0.035	Sinus	125	20_12_2016
8	XLR	10.7507	0.381	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
8	XLR	10.7871	0.382	0.035	Sinus	125	20_12_2016	8	BNC	5.4048	0.191	0.197	0.035	Sinus	125	20_12_2016
9	XLR	10.7346	0.380	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
9	XLR	10.7710	0.381	0.035	Sinus	125	20_12_2016	9	BNC	5.3934	0.191	0.196	0.035	Sinus	125	20_12_2016
10	XLR	10.7184	0.379	0.035	Sweep	40 400	5_01_2017									
10	XLR	10.7550	0.381	0.035	Sinus	125	20_12_2016	10	BNC	5.3794	0.190	0.196	0.035	Sinus	125	20_12_2016

FIGURE E.3 – Volume des sorties du système d’acquisition/restitution

E.2 Positions de la source à caractériser en S_0

Les coordonnées de la source en S_0 sont données dans le tableau E.1.

	X [m]	Y [m]	Z [m]
S_0	5.3516	2.9819	2.1500

TABLE E.1 – Position de la source \tilde{S} en S_0

E.3 Positions de source d’identification

La source de référence \tilde{S} a été utilisée pour identifier le filtre de diffraction. Elle était posée sur un socle de treillis à 3 hauteurs différentes et déplacée dans la salle. Pour être complet, nous listons ici les coordonnées des positions correspondant aux configurations \mathcal{A} et \mathcal{B} testées numériquement aux chapitres 3 et 4 (tableau E.1(a) et tableau E.1(b) respectivement).

(a) Configuration \mathcal{A}				(b) Configuration \mathcal{B}			
Positions	X [m]	Y [m]	Z [m]	Positions	X [m]	Y [m]	Z [m]
S_1^D	2.4600	1.4800	1.3600	S_1^D	2.1445	1.2014	1.1440
S_2^D	3.8733	1.4800	1.3600	S_2^D	3.7560	1.1898	1.1450
S_3^D	5.2867	1.4800	1.3600	S_3^D	5.3583	1.2047	1.1430
S_4^D	6.7000	1.4800	1.3600	S_4^D	6.9759	1.2218	1.1460
S_5^D	2.4600	2.1400	1.3600	S_5^D	2.1774	3.2726	1.1520
S_6^D	3.8733	2.1400	1.3600	S_6^D	3.7709	3.2796	1.1590
S_7^D	5.2867	2.1400	1.3600	S_7^D	5.3815	3.2674	1.1490
S_8^D	6.7000	2.1400	1.3600	S_8^D	6.9874	3.2420	1.1500
S_9^D	2.4600	2.8000	1.3600	S_9^D	2.1445	1.2014	1.6440
S_{10}^D	3.8733	2.8000	1.3600	S_{10}^D	3.7560	1.1898	1.6450
S_{11}^D	5.2867	2.8000	1.3600	S_{11}^D	5.3583	1.2047	1.6430
S_{12}^D	6.7000	2.8000	1.3600	S_{12}^D	6.9759	1.2218	1.6460
S_{13}^D	3.1667	1.8100	1.6400	S_{13}^D	2.1774	3.2726	1.6520
S_{14}^D	4.5800	1.8100	1.6400	S_{14}^D	3.7709	3.2796	1.6590
S_{15}^D	5.9933	1.8100	1.6400	S_{15}^D	5.3815	3.2674	1.6490
S_{16}^D	3.1667	2.4700	1.6400	S_{16}^D	6.9874	3.2420	1.6500
S_{17}^D	4.5800	2.4700	1.6400	S_{17}^D	2.1445	1.2014	2.1440
S_{18}^D	5.9933	2.4700	1.6400	S_{18}^D	3.7560	1.1898	2.1450
S_{19}^D	2.3000	1.5600	2.3000	S_{19}^D	5.3583	1.2047	2.1430
S_{20}^D	3.7400	1.5600	2.3000	S_{20}^D	6.9759	1.2218	2.1460
S_{21}^D	5.1800	1.5600	2.3000	S_{21}^D	2.1774	3.2726	2.1520
S_{22}^D	6.6200	1.5600	2.3000	S_{22}^D	3.7709	3.2796	2.1590
S_{23}^D	2.3000	2.3200	2.3000	S_{23}^D	5.3815	3.2674	2.1490
S_{24}^D	3.7400	2.3200	2.3000	S_{24}^D	6.9874	3.2420	2.1500
S_{25}^D	5.1800	2.3200	2.3000	S_{25}^D	2.1445	1.2014	2.6440
S_{26}^D	6.6200	2.3200	2.3000	S_{26}^D	3.7560	1.1898	2.6450
S_{27}^D	2.3000	3.0800	2.3000	S_{27}^D	5.3583	1.2047	2.6430
S_{28}^D	3.7400	3.0800	2.3000	S_{28}^D	6.9759	1.2218	2.6460
S_{29}^D	5.1800	3.0800	2.3000	S_{29}^D	2.1774	3.2726	2.6520
S_{30}^D	6.6200	3.0800	2.3000	S_{30}^D	3.7709	3.2796	2.6590
				S_{31}^D	5.3815	3.2674	2.6490
				S_{32}^D	6.9874	3.2420	2.6500

TABLE E.2 – Coordonnées des positions des sources d'identifications \mathbb{S}^D

E.4 Sources secondaires

Chaque source secondaire est une source amplifiée composée de 2 haut-parleurs montés en push-pull, comme le montre la figure E.4. Les dimensions de la source sont : hauteur 350 mm, largeur 350 mm et profondeur 430 mm. Les sources ont été attachées à des équerres fixées au mur.

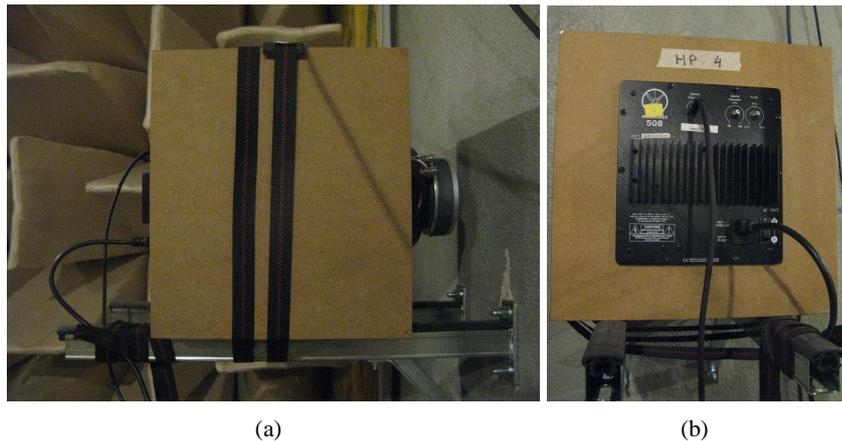


FIGURE E.4 – Source secondaire

L'électronique des modules d'amplification des sources secondaires a été modifiée afin d'obtenir une réponse constante sur la bande de fréquence 40 - 200 Hz, comme le montre les mesures de fonction de transfert des modules sur la figure E.5.

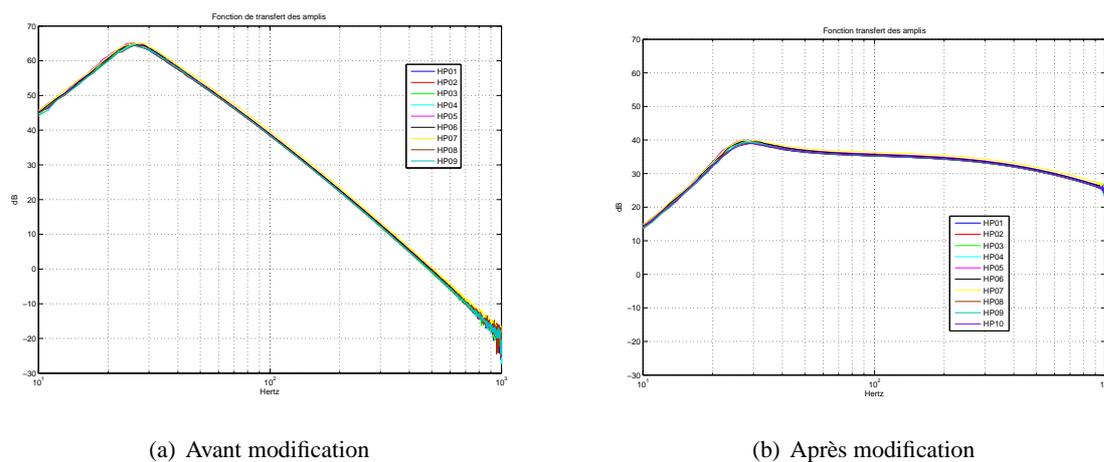


FIGURE E.5 – Fonction transfert du module amplificateur des sources secondaires

Leurs coordonnées, données dans le tableau E.3, correspondent au centre géométrique de chaque système composé des deux haut-parleurs.

Positions	X [m]	Y [m]	Z [m]
S_1^C	0.1318	0.7108	3.4800
S_2^C	0.1419	2.3146	3.4840
S_3^C	0.1318	3.9162	3.5050
S_4^C	0.1335	0.7213	2.1260
S_5^C	0.1228	2.3086	2.1180
S_6^C	0.1442	3.8870	2.1570
S_7^C	0.1337	0.6899	0.7760
S_8^C	0.1538	2.2998	0.7810
S_9^C	0.1566	3.9097	0.8070

TABLE E.3 – Coordonnées des sources secondaires S_i^C

E.5 Les microphones

La chaîne microphonique est composée d'un microphone quart de pouce (CTTM, MK_90) et d'un préamplificateur (CTTM, Pre_MK) à huit entrées. Les microphones dans le volume Ω sont fixés sur une tige attachée à un pied de microphone, voir figure E.6(a) ; les coordonnées des positions de la capsule microphonique sont listées dans le tableau E.3(a). Les microphones sur la surface Γ sont suspendus au plafond par une cordelette, voir figure E.6(b) ; leurs coordonnées sont listées dans le tableau E.3(b).



(a) Microphone d'observation

(b) Microphone d'identification

FIGURE E.6 – Microphones dans le volume Ω et sur la surface Γ

(a) Microphones M^Ω dans le volume Ω				(b) Microphones M^Γ sur la surface Γ			
Positions	X [m]	Y [m]	Z [m]	Positions	X [m]	Y [m]	Z [m]
M_1^Ω	2.6376	2.8772	1.5780	M_1^Γ	1.2453	0.3866	3.6570
M_2^Ω	3.2648	2.6942	1.6910	M_2^Γ	1.2658	1.6932	3.6440
M_3^Ω	3.9364	2.4752	1.7800	M_3^Γ	1.2794	0.4084	2.5470
M_4^Ω	4.5232	2.3022	1.8440	M_4^Γ	1.2654	1.6901	2.5470
M_5^Ω	5.2059	2.0962	1.9560	M_5^Γ	1.2303	0.4088	1.5420
M_6^Ω	6.0108	1.9092	2.0430	M_6^Γ	1.2651	1.6869	1.5410
M_7^Ω	6.7975	1.6969	2.0920	M_7^Γ	1.2433	0.4067	0.4460
M_0	4.8057	2.1097	1.7310	M_8^Γ	1.2649	1.6900	0.4330
				M_9^Γ	1.2906	2.8999	3.6570
				M_{10}^Γ	1.2906	4.1108	3.6570
				M_{11}^Γ	1.2906	2.8999	2.5400
				M_{12}^Γ	1.3026	4.1108	2.5320
				M_{13}^Γ	1.2948	2.8983	1.5130
				M_{14}^Γ	1.3026	4.1686	1.5430
				M_{15}^Γ	1.2965	2.9053	0.4200
				M_{16}^Γ	1.3490	4.1540	0.4450

TABLE E.4 – Positions des microphones

Annexe F

Complément de résultats de contrôle

Cette annexe présente des résultats de mesures obtenus pour des microphones qui n'ont pas été présentés dans le chapitre 6. Les cas de contrôle présentés sont : le contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω du volume Ω et le contrôle sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Γ de la surface Γ .

F.1 Contrôle de la pression diffractée estimée dans le volume Ω

Dans ce paragraphe, le contrôle est réalisé sur l'ensemble des positions \mathbb{M}^Ω . Les mesures de contrôle n'ont pas pu être réalisées au delà de 136 Hz car les amplitudes calculées pour les sources secondaires étaient supérieures à la valeur maximum. L'amplitude de la source de référence \tilde{S} est égale à $0,824V_{rms}$.

La figure F.1 présente, aux points M_2^Ω , M_3^Ω , M_5^Ω et M_6^Ω , le niveau de pression avec et sans contrôle de la pression diffractée aux points \mathbb{M}^Ω .

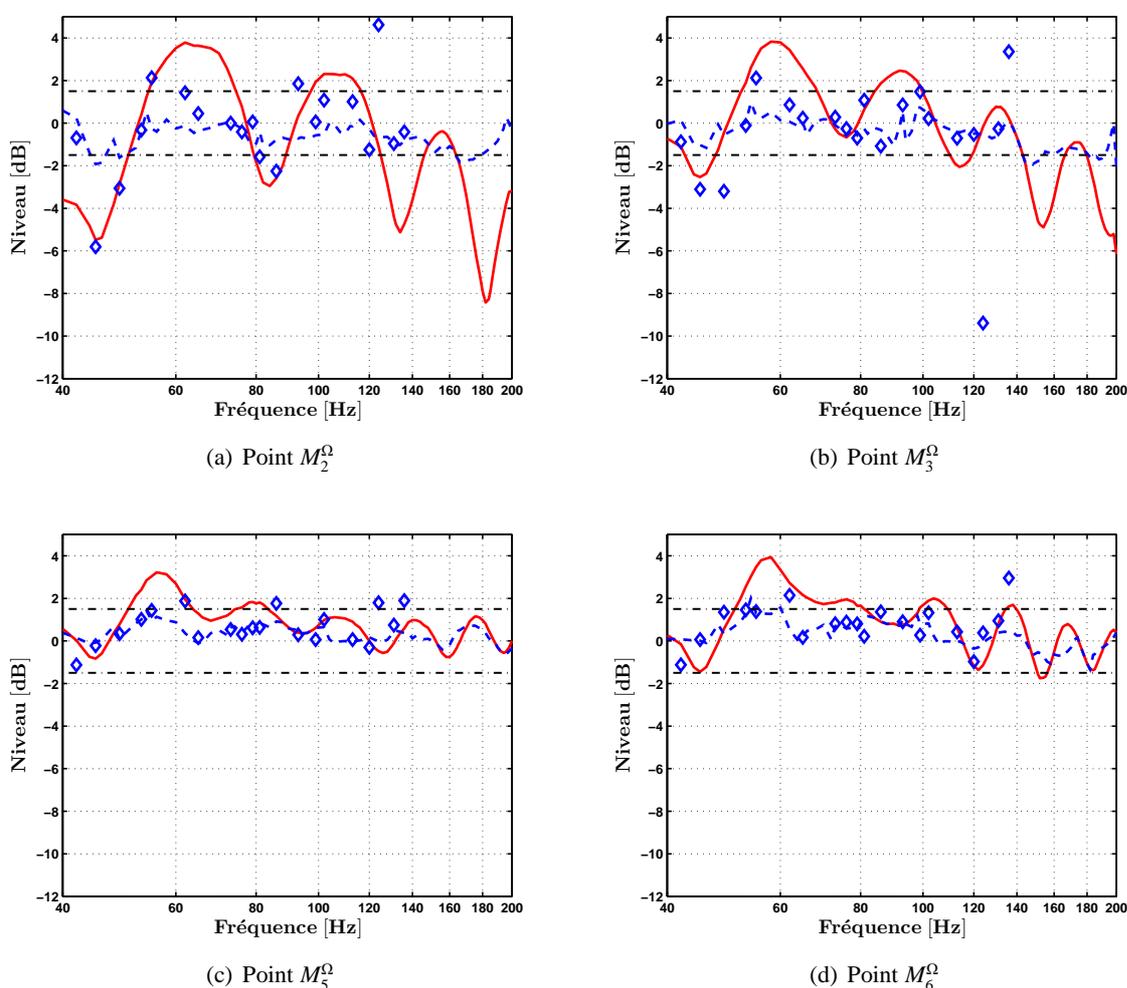


FIGURE F.1 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points \mathbb{M}^Ω .

(a), (b), (c) : Niveaux de pressions de la source S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

F.2 Contrôle de la pression diffractée sur la surface Γ

Le contrôle de la pression diffractée estimée est réalisé sur l'ensemble des points M^Γ . Les résultats du contrôle sont observés aux points M^Ω pour différente amplitude de la source S_0 .

F.2.1 Amplitude la source 0, 824V_{rms}

La figure F.2 présente, aux points M_2^Ω , M_3^Ω , M_5^Ω et M_6^Ω , le niveau de pression avec et sans le contrôle des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des points M^Γ .

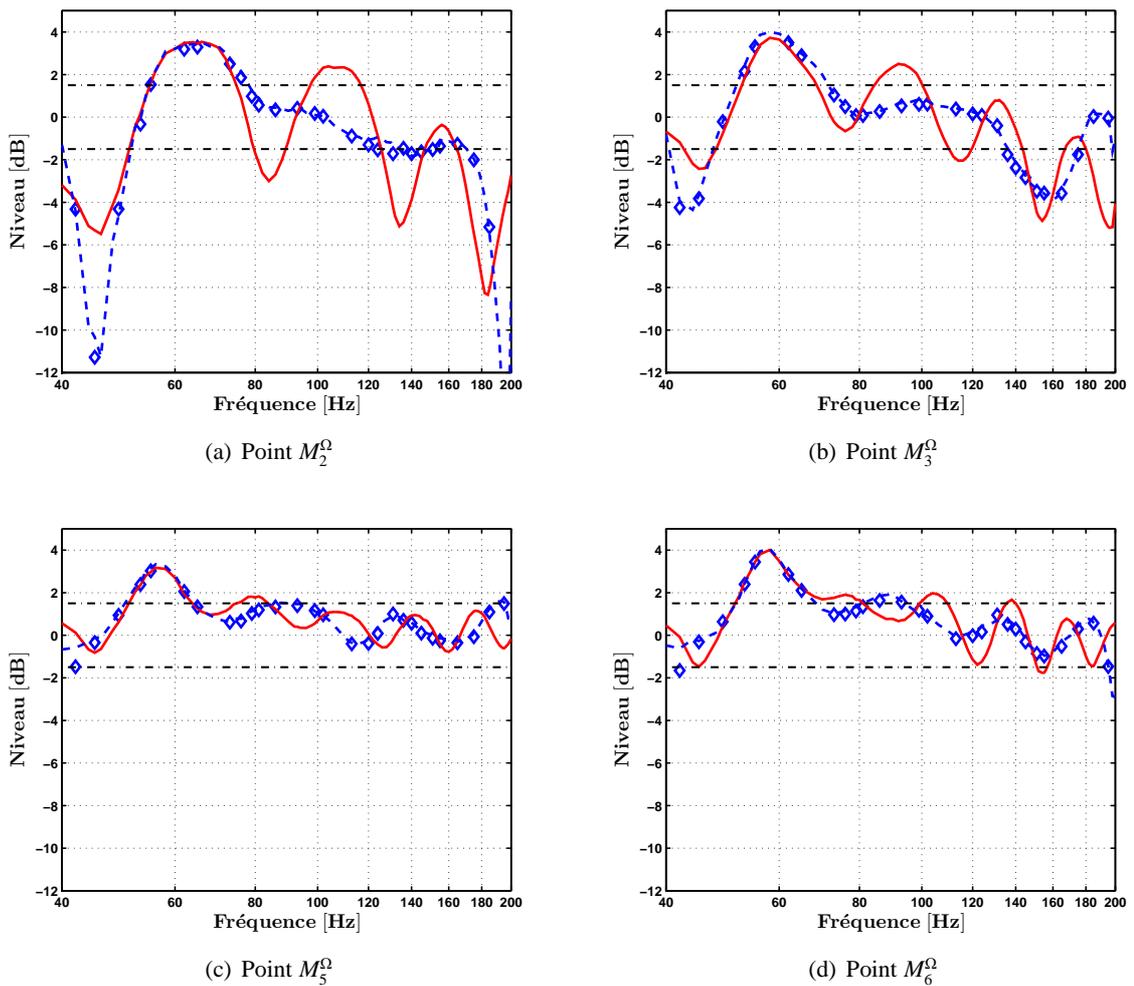


FIGURE F.2 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Γ ; observation sur les points M^Ω .

(a), (b), (c) : Niveaux de pressions de la source en S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

F.2.2 Amplitude la source 8, 24V_{rms}

La figure F.3 présente, aux points M_1^Ω , M_4^Ω , M_7^Ω , le niveau de pression avec et sans le contrôle des pressions diffractées estimées sur l'ensemble des points M^Γ .

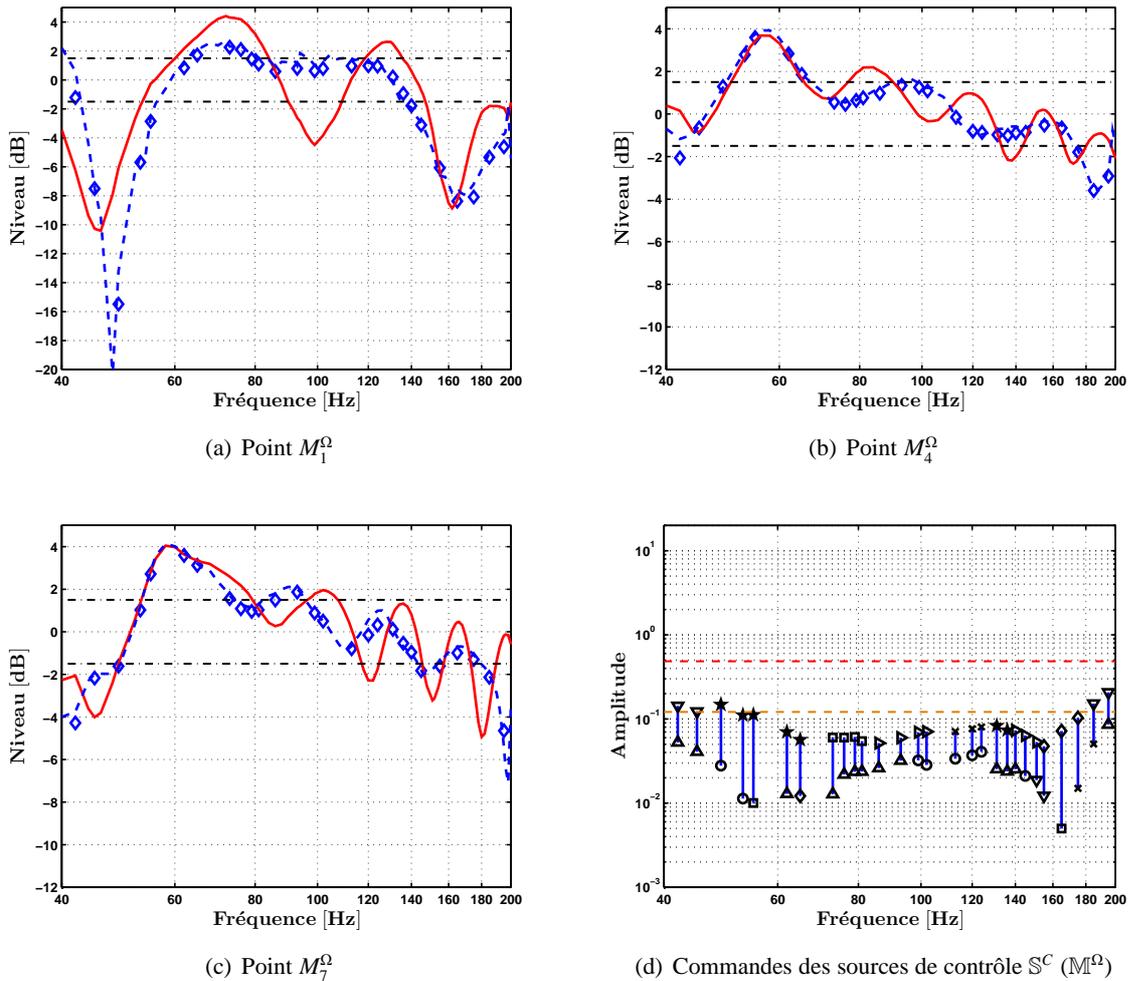


FIGURE F.3 – Mesure sans et avec contrôle de la pression diffractée estimée sur l'ensemble des points M^Γ ; observation sur les points M^Ω .

(a), (b), (c) : Niveaux de pressions de la source en S_0 ; — : mesure (contrôle OFF), \diamond : mesure (contrôle ON), - - : prévision du contrôle, - - - : limite $\pm 1,5$ dB

