Contrôle du champ rayonné par un trombone à l'aide d'un réseau de haut-parleurs

Colas Cavaillès

▶ **To cite this version:**

Colas Cavaillès. Contrôle du champ rayonné par un trombone à l'aide d'un réseau de haut-parleurs. Acoustique [physics.class-ph]. Le Mans Université, 2022. Français. NNT : 2022LEMA1029 . tel-03969184

HAL Id: tel-03969184
https://theses.hal.science/tel-03969184

Submitted on 2 Feb 2023

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

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

COLLEGE DOCTORAL PAYS DE LA LOIRE — SCIENCES DE L'INGENIERIE ET DES SYSTEMES

Le Mans Université

THÈSE DE DOCTORAT DE

LE MANS UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
Spécialité : *Acoustique*

Par

Colas CAVAILLÈS

Contrôle du champ rayonné par un trombone à l'aide d'un réseau de haut-parleurs

Thèse présentée et soutenue à Le Mans Université, le 25 novembre 2022
Unité de recherche : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR-CNRS 6613
Thèse N° : 2022LEMA1029

Rapporteurs avant soutenance :

Marie-Annick GALLAND	Professeur des Universités, École Centrale de Lyon
Jean-Loïc LE CARROU	Maître de Conférences HDR, Sorbonne Université

Composition du Jury :

Examinateurs :	Thomas HÉLIE	Directeur de Recherche CNRS, IRCAM
	Hervé LISSEK	Maître d'Enseignement et de Recherche, EPFL
	Philippe MICHEAU	Professeur, Université de Sherbrooke
Dir. de thèse :	Bruno GAZENGEL	Professeur des Universités, Le Mans Université
Co-dir. de thèse :	Manuel MELON	Professeur des Universités, Le Mans Université
Co-enc. de thèse :	Christophe AYRAULT	Maître de Conférences, Le Mans Université

À mon collègue, Joël.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont vers Bruno Gazengel, Manuel Melon et Christophe Ayrault sans qui ce mémoire ainsi que tout le reste du travail n'existeraient pas. Je vous remercie de m'avoir fait confiance dans ce projet dès le début. Notre bonne entente découle de nos discussions informelles, des pointes d'humour, du soutien et de la générosité envers chacun.

Je remercie le jury composé de Marie-Annick Galland et Jean-Loïc Le Carrou pour avoir rapporté ce travail et de Hervé Lissek, Philippe Micheau et Thomas Hélie pour avoir examiné cette thèse.

Merci encore une fois à Hervé Lissek et à Joël Gilbert d'avoir formé le comité de suivi de thèse. Nos entrevues m'ont permis d'y voir plus clair et de savoir où je devais aller. Vos conseils avisés ont de surcroit aidé notre équipe à choisir la direction à prendre pour la thèse.

Ce n'est pas sans émotion que je remercie tout particulièrement Joël, qui a été présent dès le premier jour. Il ne pouvait pas y avoir meilleur expert et passionné des instruments de type cuivre. Il était alors plus simple de justifier devant les autres l'intérêt de travailler sur un trombone ! C'est le musicien, que je cite à de nombreuses reprises dans le manuscrit, qui a participé à l'ensemble des mesures concernant la caractérisation de l'instrument de musique. Ses différentes interventions l'ont rendu indispensable au fondement de cette thèse.

Les expériences se sont parfaitement déroulées grâce au soutien d'Antonín Novák, d'Emmanuel Brasseur et de l'équipe technique du laboratoire. Certains résultats ont été possibles au moyen de deux stages DUT. C'est pourquoi je remercie Charly Magna ainsi que Fanny Gelezeau pour leur bonne humeur, leur présence, leur persévérance et leur professionnalisme. Les simulations numériques ont par ailleurs vu le jour en raison de l'expertise de Joerg Panzer et de Théo Cavalieri.

Je remercie l'ensemble des membres de l'Opération de Recherche Physique des Instruments de Musique (OR PIM) coordonnée par Frédéric Ablitzer. Je remercie plus généralement les membres du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM). Merci beaucoup d'avoir exprimé votre humour et votre passion.

Je témoigne de la reconnaissance pour Omar Aklouche (ENSIM, Le Mans) et Bertrand Lihoreau (UFR sciences, Le Mans) qui ont pris le temps de m'apprendre les ficelles du métier d'enseignant. Ce fut un plaisir ! Je remercie également le pôle doctoral et l'ED SIS de proposer autant de formations utiles. C'est une des raisons pour lesquelles j'ai pu prendre plaisir à enseigner et à parler en public.

Mes pensées vont également vers Louis Chevalier, Lucas Vindrola et Simon Fargeot qui sont des amis, qui ont été mes camarades de classe au Lycée, en Licence ou en Master et qui furent mes compagnons de thèse de doctorat. Merci à Théo, Gautier, Thibault, Samuel, Pierre, Hugo, Robin, Éric, Audrey et Rémi pour tous les échanges au laboratoire ou en dehors ! Je pense également à celles et ceux qui ont été présents depuis le début des études supérieures : Antoine, Gwenivig, Chen Ming, Théo, Matthieu, Léo, Claire, Spyridon, Vincent, Quentin, Mathias, Camille, Shahin.

J'aimerais enfin remercier tous ceux qui étaient présents à la soutenance, donc presque tous mes amis. J'ai une pensée pour toute ma famille et notamment Sacha, Mia, Robin, Simon, Sylvie et Rémy. Merci Julie pour avoir fait tous les dessins du concours "Expose ta thèse". Merci pour ton soutien, tes encouragements et la préparation de la soutenance de thèse.

Résumé

Dans la famille des instruments de type cuivre, il est parfois nécessaire de réduire le niveau sonore à l'aide d'une sourdine généralement insérée dans le pavillon. Celle-ci modifie le timbre et l'impédance d'entrée de l'instrument et perturbe donc la sensation de jeu du musicien.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le principe et la faisabilité technologique d'un contrôle actif du rayonnement d'un trombone, à l'aide d'un réseau de haut-parleurs placés à l'extérieur de l'instrument. Le dispositif doit réduire la puissance acoustique émise par le trombone ou contrôler sa directivité en ne modifiant que très peu son impédance d'entrée.

Le système de contrôle est composé de haut-parleurs (sources secondaires) disposés en couronne autour du pavillon et en ligne devant ce dernier. Plusieurs configurations du nombre et de la position des sources secondaires sont étudiées par la théorie du contrôle optimal afin de maximiser l'atténuation en puissance ou de favoriser le rayonnement vers le musicien. Dans ce dernier cas, deux stratégies de synthèse de champ sont considérées : l'une consiste à générer une zone d'écoute et une zone de silence et l'autre à reproduire des directivités cibles.

Les résultats expérimentaux confirment les prédictions des modèles analytiques et numériques et montrent qu'il est possible de réduire la puissance acoustique du trombone jusqu'à 2000 Hz et de contrôler sa directivité jusqu'à 1500 Hz.

Dans le cas du contrôle en puissance, le placement d'un haut-parleur devant le pavillon modifie le champ proche de l'instrument, ce qui engendre une atténuation supérieure à celle prédite. L'impédance d'entrée de l'instrument est très légèrement affectée par ce type de contrôle.

Dans le cas du contrôle en directivité, augmenter le nombre de sources en ligne permet de minimiser l'erreur entre les pressions cibles et générées. Imposer des zones d'écoute et de silence permet d'obtenir un contraste acoustique important mais nécessite des débits très élevés et la fréquence du premier pic de résonance de l'impédance d'entrée peut être décalée d'un demi-ton. En revanche, imposer une directivité cible nécessite des débits plus faibles et modifie plus légèrement l'impédance d'entrée, d'autant plus que la directivité est peu marquée.

La faisabilité du contrôle en puissance est évaluée connaissant le débit du trombone estimé pour plusieurs nuances de jeu. Le dimensionnement technologique montre que le système de contrôle est réalisable à condition d'effectuer une régularisation pour limiter la puissance électrique nécessaire à chaque haut-parleur placé dans l'axe du pavillon. L'ajout du paramètre de régularisation a pour effet de réduire l'efficacité du contrôle pour les fréquences inférieures à 300 Hz.

Les perspectives de ce travail s'orientent vers la mise en œuvre d'un contrôle externe effectif en temps réel, ainsi que l'étude d'un contrôle interne monté sur sourdine.

Mots-clés : Acoustique Musicale, Électroacoustique, Contrôle Actif, Instruments de Musique de type Cuivre, Transducteurs, Zones d'Écoute Personnalisée

Abstract

In the brass instruments family, it may be necessary to reduce the sound level with the help of a mute generally inserted into the bell. This changes the timbre and the input impedance of the instrument and therefore disturbs the musician's playing sensation.

The objective of this thesis is to study the principle and the technological feasibility of an active control system modifying the acoustic radiation of a trombone using a loudspeaker array placed outside the instrument. The device must reduce the acoustic power emitted by the trombone or control its directivity, by modifying only slightly its input impedance.

The control system is composed of loudspeakers (secondary sources) placed in a ring around the bell and on a line in front of it. Several configurations of the number and position of secondary sources are studied by the optimal control theory in order to maximize the power attenuation or to favor the radiation towards the musician. In this last case, two field synthesis strategies are considered : one must generate a sound zone and a silent zone and the other has to reproduce target directivities.

The experimental results confirm the predictions of the analytical and numerical models and show that it is possible to reduce the acoustic power of the trombone up to 2000 Hz and to control its directivity up to 1500 Hz.

In the case of power control, placing a loudspeaker in front of the bell modifies the near field of the instrument, resulting in higher than predicted attenuation. The input impedance of the instrument is very slightly affected by this type of control.

In the case of a directivity control, increasing the number of sources placed on a line minimizes the error between the target and the resulting pressure. Impose two zones (sound and silence) provides a high acoustic contrast but requires very high source strengths and the frequency of the input impedance first resonance peak can be shifted by a semitone. However, impose a target directivity requires lower source strengths and only slightly modifies the input impedance, especially if the directivity is slightly pronounced.

The power control feasibility is evaluated knowing the estimated trombone volume velocity for several playing nuances. It is shown that the control system is feasible when a regularization is performed to limit the electrical power required by each loudspeaker placed in the bell axis. Adding a regularization term reduces the control efficiency for frequencies lower than 300 Hz.

A future work is the implementation of a real time external control and a study of an internal control mounted on a mute.

Keywords : Musical Acoustics, Electroacoustics, Active Control, Brass instruments, Transducers, Sound Zones

Publications

Certains résultats de ce mémoire de thèse apparaissent dans les publications suivantes.

Article de journal

[Cav+22] **Colas Cavaillès, Bruno Gazengel, Manuel Melon, Christophe Ayrault.** "Study of the optimal active control of a trombone". Rédigé en anglais. *Acta Acustica* 6 (2022), p. 18.

Articles de conférences

[Cav+19a] **Colas Cavaillès, Christophe Ayrault, Manuel Melon, Joël Gilbert, Bruno Gazengel.** "Loudspeakers Optimisation For Active Control of Trombone Radiation". Rédigé en anglais. International Congress On Sound And Vibration. Montréal, Canada (juillet 2019), p. 8.

[Cav+20] **Colas Cavaillès, Manuel Melon, Christophe Ayrault, Bruno Gazengel.** "Optimal active control for a trombone : a parametric study". Rédigé en anglais. E-Forum Acusticum, Lyon, France (décembre 2020).

Posters

[Cav+19b] **Colas Cavaillès, Christophe Ayrault, Manuel Melon, Joël Gilbert, Bruno Gazengel.** "Optimisation de haut-parleur pour le contrôle actif du rayonnement d'un trombone". Rédigé en français. Journées Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio (JJCAAS), Le Mans, France (juin 2019).

Table des matières

Remerciements . . . I
Résumé . . . II
Abstract . . . III
Publications . . . IV

1 Introduction **1**

2 État de l'art **3**
2.1 Trombone . . . 4
2.1.1 Constitution générale . . . 4
2.1.2 Excitation . . . 4
2.1.3 Propagation dans le résonateur . . . 5
2.1.4 Rayonnement . . . 7
2.1.5 Impédance d'entrée . . . 7
2.2 Sourdines . . . 10
2.2.1 Sourdines passives . . . 10
2.2.2 Sourdines actives . . . 13
2.2.3 Conclusion . . . 14
2.3 Contrôle actif . . . 16
2.3.1 Principe initial . . . 16
2.3.2 Contrôle en champ libre . . . 17
2.3.2.1 Contrôle en puissance . . . 17
2.3.2.2 Contrôle de la directivité . . . 18
2.3.2.3 Contrôle de champ sur un réseau de microphones . . . 20
2.3.2.4 Contrôle de champ dans des zones d'écoute personnalisées . . . 21
2.3.3 Application aux instruments de musique . . . 23
2.3.3.1 Cordes . . . 24
2.3.3.2 Percussions . . . 25
2.3.3.3 Vents . . . 26
2.4 Conclusion . . . 30

3 Caractérisation de la source primaire **31**
3.1 Estimation du débit . . . 31
3.1.1 Protocole expérimental . . . 32
3.1.2 Résultats . . . 34
3.2 Estimation du centre acoustique . . . 35
3.2.1 Résultats . . . 36
3.2.2 Simulations numériques . . . 38
3.2.2.1 Définition des modèles . . . 38
3.2.2.2 Résultats . . . 40
3.3 Conclusion . . . 42

4 Contrôle de la puissance **43**
4.1 État de l'art . . . 44
4.2 Théorie . . . 46
4.2.1 Système étudié . . . 46
4.2.2 Minimisation de la puissance . . . 47
4.2.2.1 Estimation de la puissance par une technique de champ proche . . . 47
4.2.2.2 Estimation de la puissance par une technique en champ lointain . . . 48
4.2.2.3 Application à un trombone joué par un musicien . . . 51
4.3 Simulations . . . 52
4.3.1 Impact du nombre et de la position des sources secondaires . . . 52
4.3.2 Impact sur les impédances de rayonnement et d'entrée . . . 53
4.3.2.1 Pression et impédance secondaire . . . 55
4.3.2.2 Effet sur l'impédance de rayonnement . . . 55
4.3.2.3 Effet sur l'impédance d'entrée . . . 56
4.3.3 Impact de la position de la source primaire . . . 58
4.3.3.1 Filtre de contrôle fixe . . . 59
4.3.3.2 Filtre de contrôle adaptatif . . . 59
4.3.3.3 Discussion . . . 61
4.3.4 Synthèse . . . 61
4.4 Expérience . . . 63
4.4.1 Protocole expérimental . . . 63
4.4.2 Minimisation de la puissance . . . 63
4.4.3 Impact sur l'impédance d'entrée . . . 68
4.4.3.1 Procédure . . . 68
4.4.3.2 Résultats . . . 69
4.4.4 Synthèse . . . 71
4.5 Faisabilité technologique . . . 72
4.5.1 Puissance électrique . . . 72
4.5.2 Excursion maximale . . . 74
4.5.3 Ajout d'un autre modèle de haut-parleur . . . 76
4.6 Conclusion . . . 79

5 Contrôle de la directivité **80**
5.1 Théorie . . . 81
5.1.1 Système étudié . . . 81
5.1.2 Contrôle avec sources pilotées . . . 82
5.1.3 Indicateurs . . . 84
5.1.4 Contrôle avec une source non pilotée . . . 84
5.1.4.1 Contrôle par double zone . . . 85
5.1.4.2 Contrôle par une directivité cible . . . 86
5.2 Évaluation numérique des performances . . . 88
5.2.1 Impact de la pression cible . . . 88
5.2.2 Impact de la position des sources secondaires . . . 91
5.2.3 Impact du facteur de pondération . . . 97
5.2.4 Impact du paramètre de régularisation . . . 97
5.2.5 Impact sur le contrôle en puissance . . . 99
5.2.6 Impact sur l'impédance d'entrée . . . 101
5.2.7 Synthèse . . . 104
5.3 Expérience . . . 105
5.3.1 Directivité . . . 105
5.3.1.1 Protocole expérimental . . . 105
5.3.1.2 Résultats . . . 105
5.3.2 Efficacité du contrôle . . . 107
5.3.3 Influence de la position des sources dans l'axe . . . 110

5.4 Faisabilité technologique 112
5.5 Conclusion 114

6 Conclusions et perspectives **115**

Annexe A Caractérisation de la source primaire **118**
A.1 Centre acoustique 118
A.2 Impédance d'entrée 119
A.2.1 Perce étudiée 119
A.2.2 Modèle 119
A.2.3 Mesure 121
A.2.4 Comparaison 121

Annexe B Contrôle de la puissance **123**
B.1 Impédance d'entrée théorique avec contrôle 123
B.2 Influence de la position des sources secondaires 123

Annexe C Contrôle de la directivité **125**
C.1 Directivité de la source primaire 125
C.2 Évaluation des performances du contrôle 125

Bibliographie **137**

Chapitre 1

Introduction

Pour atténuer ou contrôler l'énergie sonore émise par des sources bruyantes, des matériaux passifs (diffuseurs, matériaux absorbants, ...) sont couramment utilisés. Ces matériaux ne sont cependant efficaces qu'aux moyennes et hautes fréquences. Une première solution permettant d'atténuer les basses fréquences est d'utiliser des matériaux résonants comme par exemple les méta-matériaux qui ont pour but de piéger l'onde dans une série de résonateurs et dont l'efficacité est assurée pour de faibles épaisseurs. Cette technique nécessite néanmoins un design spécifique qui n'est pas forcément modulable. Le contrôle actif est quant à lui adaptable. Cette seconde solution permet d'atténuer les sons basses fréquences en produisant des interférences entre une onde primaire et une onde secondaire.

Le contrôle actif ouvre de nouvelles voies depuis les années 1980 en acoustique. Il est possible de réduire le bruit émis par une source et de contrôler sa directivité notamment aux basses fréquences. Les utilisateurs de casques audio ou d'écouteurs connaissent depuis plusieurs années cette technologie dont le but est d'isoler l'auditeur du bruit environnant. Par ailleurs, des usines sont équipées de systèmes "anti-bruits" pour protéger l'audition des personnes y travaillant. De nombreux chercheurs, ingénieurs et techniciens développent de nouveaux systèmes afin de réduire le bruit produit par les moyens de transport (aériens, ferroviaires, routiers), par les cheminées industrielles ou les ventilations. L'application de cette technique aux instruments de musique est un cas particulier du contrôle de sources à signaux harmoniques. La différence avec un moteur à vitesse de rotation constante (par exemple) est que le signal est stationnaire à court terme mais que la fréquence fondamentale change en fonction des notes jouées.

Dans le domaine de la facture instrumentale, les luthiers s'évertuent depuis des siècles à concevoir des instruments de musique suffisamment puissants pour être bien entendus au sein de l'orchestre et par le public. Il peut être néanmoins nécessaire de modifier le niveau sonore et/ou le timbre de l'instrument dans certaines situations. Dans le cas des instruments de type cuivre, le son peut être atténué ou modifié à l'aide d'une sourdine qui est généralement insérée dans le pavillon de l'instrument de musique. Cet objet, existant sous diverses formes, influence à la fois le timbre, la puissance du son rayonné et la façon de jouer du musicien.

Un des premiers croquis de sourdine remonte à 1635 où Mersenne reproduit une sourdine de trompette. L'instrument et sa sourdine sont alors principalement utilisés pour les musiques religieuses. La vente de cet objet s'intensifie considérablement au début du XX^{e} siècle conjointement à la naissance du jazz. Les musiciens s'en servent principalement pour produire des effets sonores tel que l'effet "wah-wah" mis en valeur chez Duke Ellington. Cela peut aussi être un moyen de réduire le niveau sonore rayonné afin de pouvoir jouer sans déranger l'entourage. Plus récemment, l'entreprise Yamaha commercialise la sourdine Silent Brass[1] permettant de confiner l'énergie acoustique dans une trompette. Le son est capté par un

[1] Yamaha Silent Brass - bestbrass.com/about/shinji_hamanaga.html (2022).

microphone placé dans la sourdine pour être transmis aux oreilles du musicien par des écouteurs.

Un impact inévitable de ces sourdines sur l'instrument est la modification du jeu du musicien. Le joueur doit ainsi adapter sa manière de souffler pour pouvoir jouer. En outre, lorsque l'intention du musicien est seulement de réduire la puissance acoustique de son instrument, le timbre de ce dernier est également dénaturé. L'introduction d'un dispositif modifiant l'intensité, le timbre et la directivité du son produit par le trombone permettrait d'éviter ces inconvénients.

L'objectif général de la thèse est d'étudier la faisabilité d'un contrôle actif sur un instrument de type cuivre qui génère un fort niveau. Le timbre naturel de l'instrument doit être conservé et la façon de jouer du musicien ne doit pas être influencée. Dans ce travail, un prototype composé de transducteurs est assimilé à une "sourdine active externe". Le contrôle doit permettre de :

- réduire la puissance acoustique produite par le trombone,
- modifier la directivité de l'instrument pour, par exemple, diriger le son vers le musicien,
- limiter l'impact du contrôle actif sur la jouabilité du musicien et donc sur l'impédance d'entrée de l'instrument.

Par ailleurs, la source à contrôler (source primaire) est un trombone et le contrôle est assuré par un ensemble de haut-parleurs. Le contrôle ne s'effectue cependant pas en temps réel, aucun contrôleur n'est implémenté. L'efficacité du contrôle est évaluée en simulant un contrôle actif de manière différée à partir de modèles théoriques, de modèles numériques et de résultats de mesures.

Dans un premier temps, un état de l'art des recherches menées jusqu'à aujourd'hui concernant le trombone, les sourdines et le contrôle actif est réalisé. Le Chapitre 2 présente l'état de l'art du fonctionnement du trombone, de l'excitation au rayonnement de l'instrument. Les sourdines habituellement utilisées pour modifier le son produit par l'instrument sont présentées puis quelques prototypes de sourdines actives sont examinés. Les différentes stratégies de contrôle actif existantes sont parcourues. Plusieurs prototypes de contrôle actif développés sur différents instruments de musique sont ensuite analysés.

Le trombone utilisé pour le travail de thèse est caractérisé expérimentalement dans le Chapitre 3. Le débit produit par l'instrument de musique, considéré comme une source ponctuelle, est notamment estimé pour dimensionner les haut-parleurs effectuant le contrôle. La position du centre acoustique de l'instrument est mesurée afin de comprendre l'effet du positionnement des haut-parleurs de contrôle.

Cela permet d'étudier un contrôle actif de la puissance acoustique au Chapitre 4. La théorie du contrôle optimal en puissance est adaptée au système étudié, ce qui permet une étude paramétrique des performances pour différents systèmes de contrôle. La mise en place d'une expérience permet de prévoir le comportement d'un contrôle réel et des simulations numériques éclairent certains phénomènes observés expérimentalement mais non décrits par les modèles analytiques.

Un contrôle de la directivité est étudié au Chapitre 5. Des zones d'écoute et de silence dans un premier temps et des directivités cibles dans un second temps sont reproduites pour concentrer l'énergie sonore vers le musicien. Le principe du contrôle en puissance est ainsi adapté à ce nouveau type de contrôle. Des mesures et des simulations numériques permettent de confirmer les prédictions du modèle théorique.

Les limites technologiques des haut-parleurs de contrôle sont également estimées dans chacun de ces chapitres. Cela permet de proposer une solution de contrôle actif applicable dans une situation de jeu réelle à partir de la mesure du débit du trombone (présentée au Chapitre 3).

Chapitre 2

État de l'art

L'étude du contrôle du rayonnement d'un trombone par un système actif nécessite de connaître le principe de fonctionnement de l'instrument, des sourdines déjà proposées aux musiciens et du contrôle actif de manière générale. Une connaissance des différents systèmes de contrôle actifs appliqués aux instruments de type cuivre est également nécessaire pour aborder le problème posé dans ce travail.

Le trombone et les instruments de la famille des cuivres sont premièrement présentés. L'évolution historique de la perce du trombone est rappelée, l'impédance d'entrée ainsi que le rayonnement de l'instrument sont ensuite considérés.

Un rappel des recherches sur les sourdines conçues pour les cuivres est ensuite réalisé. Celles-ci se partagent en deux catégories, les sourdines passives et les sourdines actives. De nombreuses études ont été menées autour des sourdines passives utilisées par les musiciens au moins depuis le XVII^{e} siècle. Cependant, il existe assez peu de publications sur les sourdines actives, la recherche sur ces dernières en est encore au stade de la genèse.

Les principes généraux du contrôle actif sont finalement présentés. Plusieurs études autour du contrôle en champ libre sont premièrement décrites, de manière à mieux appréhender les effets d'un contrôle sur un trombone. L'état de l'art se concentre enfin sur la recherche concernant le contrôle actif des instruments de musique.

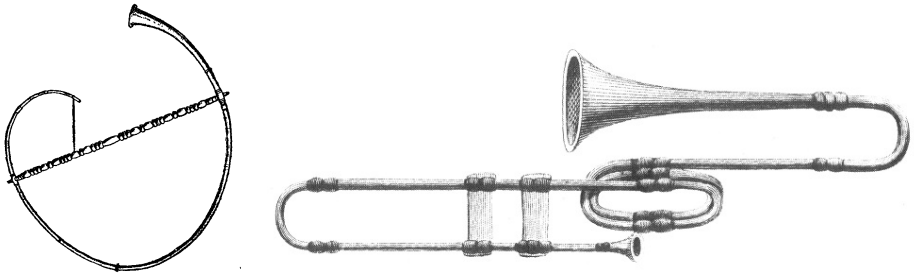
2.1 Trombone

Un état de l'art de la bibliographie sur le trombone est premièrement dressé autour des points suivants :

1. la constitution générale du trombone,
2. son principe de fonctionnement,
3. son rayonnement (niveau, spectre, directivité),
4. son impédance d'entrée.

2.1.1 Constitution générale

Les origines du trombone et de la trompette remontent à l'antiquité où le buccin permet de conduire les troupeaux d'animaux [MS72]. Celui-ci est utilisé par les Étrusques, peuple ayant vécu dans le centre de la péninsule italienne du IX^{e} au I^{er} siècle avant J.-C. Cet instrument à vent a une forme semi-circulaire et sa perce est conique (Figure 2.1.1a).



(a) (b)

Figure 2.1.1 : Illustration d'un buccin, instrument à vent datant de l'antiquité dont la forme rappelle la lettre « G » [Bro22] (a) et gravure d'un saqueboute [Gad22] (b). Cet ancêtre du trombone est apparu au moyen-âge.

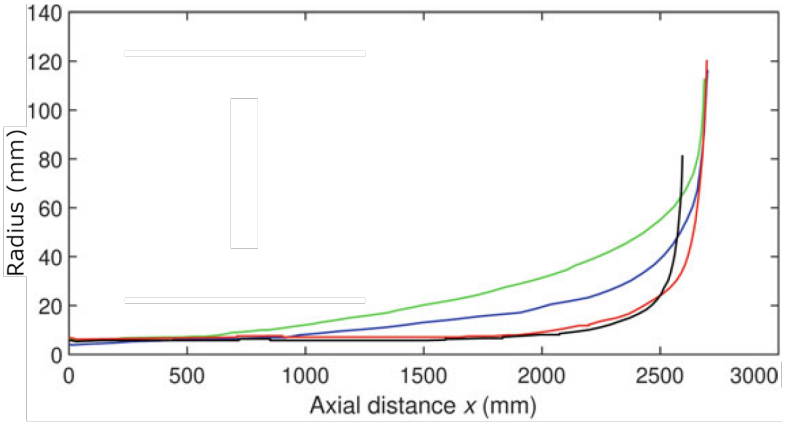
Au XIV^{e} siècle, le saqueboute (Figure 2.1.1b) dont le diamètre de la perce est plus petit que celui du trombone est utilisé principalement pour les musiques religieuses [Her97]. Son pavillon est évasé et petit sur les plus anciens modèles et devient de plus en plus grand au fil du temps jusqu'à devenir le trombone actuel mais sans coulisse, celle-ci apparaissant au milieu du XVI^{e} siècle. Cet instrument de musique ne portera cependant le nom de trombone (d'origine italienne) qu'à partir du XVIII^{e} siècle. Sa forme reste globalement inchangée depuis la seconde moitié du XVI^{e} siècle.

La perce du trombone montrée sur la Figure 2.1.2b reste étroite sur la majeure partie de sa longueur. Cet instrument est de forme cylindrique sur 1.5 m puis s'élargit de plus en plus rapidement jusqu'au pavillon [CGM20]. La nature du profil de la perce est déterminée par le mode de fonctionnement pratique de l'instrument. Sur le trombone, l'utilisation d'une longue coulisse rend indispensable qu'une fraction importante de la longueur du tube soit de diamètre constant - contrairement à d'autres instruments de la famille des cuivres comme le baryton ou le tuba de Wagner montrés sur la Figure 2.1.2 dont la perce croît plus progressivement avant d'atteindre le pavillon qui s'évase rapidement.

2.1.2 Excitation

L'étude se porte maintenant sur la production d'une note jouée avec un instrument de musique de la famille des cuivres. Les lèvres vibrantes du musicien (Figure 2.1.3a) permettent de transformer la pression

(a)



(b)

Figure 2.1.2 : Photographie de quatre instruments de musique de la famille des cuivres (a). De gauche à droite : baryton, tuba de Wagner, trombone basse, trombone ténor [CGM20]. Perces du baryton (vert), du tuba de Wagner (bleu), du trombone basse (rouge) et du trombone ténor (noir) [CGM20] (b).

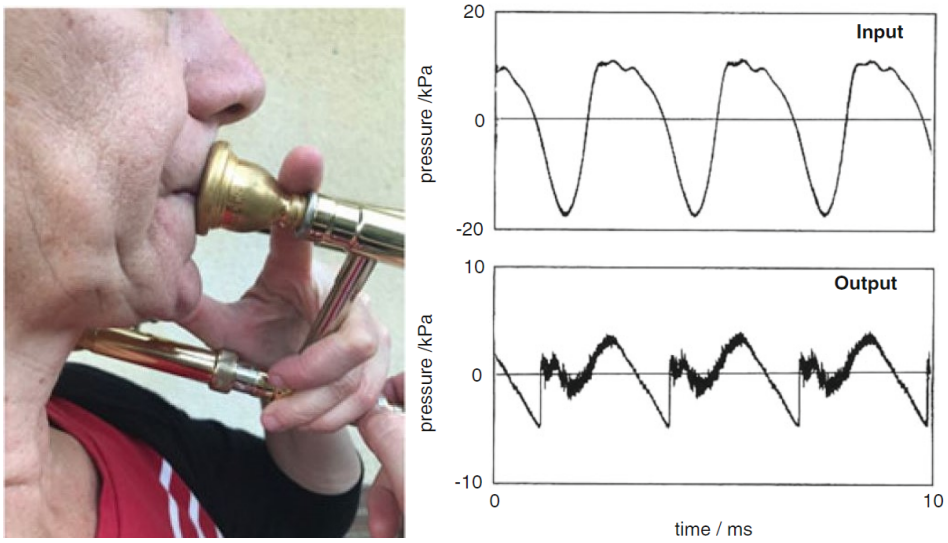
constante de la bouche en pression oscillante par l'effet de valve [Bou+13 ; CGM20]. Il existe un seuil de pression à partir duquel l'auto-oscillation est générée à une fréquence particulière appelée fréquence de seuil (l'étude de ces seuils est donnée par une analyse de stabilité linéaire dans [Mat+21]). Cette auto-oscillation peut générer différents types de régimes d'oscillation dont le régime périodique utilisé pour produire une note de musique.

Le trombone peut générer un niveau sonore d'environ 140 dBSPL dans l'embouchure mais est réduit d'environ 40 dB au niveau des oreilles du musicien. L'auto-oscillation provoquée par la bouche du musicien est périodique et permet de rayonner un spectre d'harmoniques pairs et impairs, dont la fréquence fondamentale se situe autour de la fréquence du pic de l'impédance d'entrée visé par le musicien en fonction du régime d'oscillation choisi (par exemple, le 1er pic de l'impédance d'entrée correspond au jeu en 1er régime). Le registre des fréquences fondamentales du trombone tenor se situe entre Mi2 ($f =$ 82.4 Hz) et Si$_\flat 4$ ($f =$ 466 Hz) (notation grégorienne). Celui des fréquences fondamentales du trombone basse va de Si$_\flat 1$ ($f =$ 58.2 Hz) à Si$_\flat 4$ ($f =$ 466 Hz).

2.1.3 Propagation dans le résonateur

La Figure 2.1.3 montre la photo de l'embouchure d'un trombone et l'évolution du signal temporel au sein de cet instrument. Le signal de pression est quasiment sinusoïdal à l'embouchure alors qu'il est distordu et atténué plus loin dans le corps du trombone. Ce raidissement de l'onde est caractéristique de la propagation non linéaire dans la colonne d'air et s'agrandit à mesure que le niveau de jeu du musicien augmente, comme le montre la Figure 2.1.4.

L'effet de raidissement de la forme de l'onde augmente les forces relatives des harmoniques de rang supérieur [Hir+96]. Une différence de timbre est alors à noter lorsque le musicien joue une note dont la nuance est faible (*pianissimo*, *piano*, *mezzo piano*) comparé à une note dont la nuance est forte (*mezzo forte*, *forte*, *fortissimo*). L'approximation linéaire de la théorie de la propagation du son n'est alors plus adéquate pour décrire un instrument de type cuivre joué à une nuance de jeu égale ou supérieure au *mezzo forte*. La distorsion de la forme d'onde de pression due à la propagation non-linéaire est la cause principale du son "cuivré" caractéristique des trompettes et des trombones.
Temporellement, le son cuivré se traduit par une onde avec une amplitude négative maximale environ



(a) (b)

Figure 2.1.3 : Embouchure de trombone avec les lèvres du joueur [CGM20] (a). Pression acoustique interne dans un trombone joué avec une nuance *fortissimo* (b). En haut : pression à l'embouchure, en bas : pression interne à la sortie de la section coulissante (environ 1 m avant le pavillon) [GP97 ; CGM20].

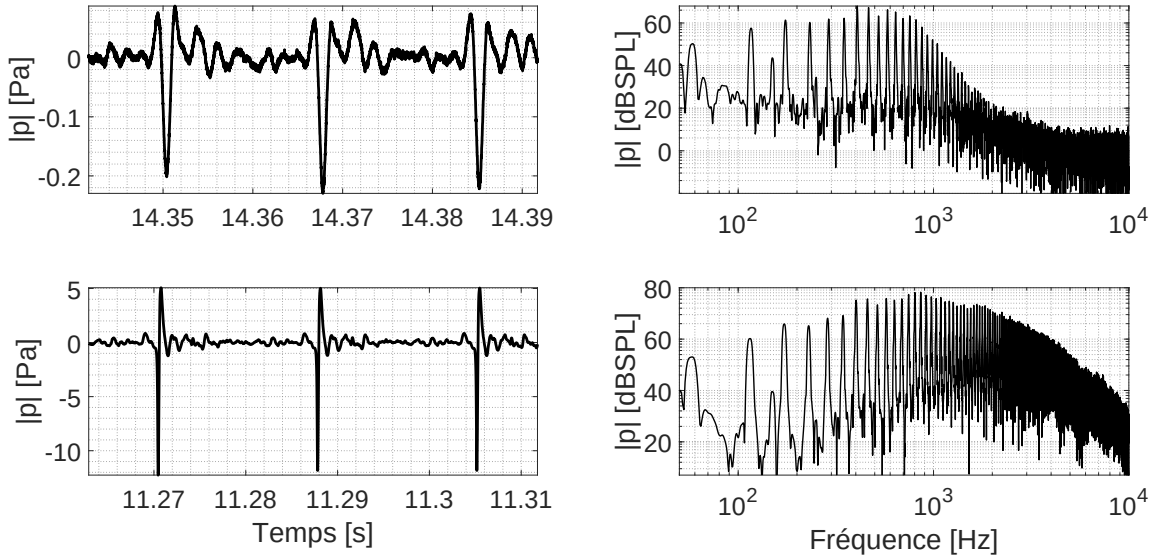


Figure 2.1.4 : Mesure du signal de pression pour la note $\text{Si}_\flat 1$ ($f = 58.2$ Hz) pour plusieurs nuances de jeu à 1 m. En haut à gauche : signal temporel de la note pour une nuance de jeu *piano* et en haut à droite : spectre correspondant. En bas à gauche : signal temporel de la note pour une nuance de jeu *fortissimo* et en bas à droite : spectre correspondant. La mesure a été effectuée dans le cadre de cette thèse avec un musicien.

deux fois supérieure à l'amplitude positive maximale (Figure 2.1.4). Le module de la pression efficace pour le cas de la Figure 2.1.4 est 50 fois plus important pour la nuance de jeu *fortissimo* par rapport à la nuance de jeu *piano* (soit une différence 34 dB). En regardant le spectre pour les 2 cas étudiés, la différence se situe au niveau de l'amplitude des harmoniques renforcées vers les hautes fréquences pour la nuance de jeu *fortissimo* comparé à la nuance de jeu *piano* où l'amplitude des harmoniques est

négligeable à partir de 1500 Hz. L'enveloppe des harmoniques couvre ainsi davantage de fréquences pour un cas où la nuance de jeu est élevée.

2.1.4 Rayonnement

Que ce soit le trombone ténor ou basse, son registre est plus grave que celui d'une trompette : la note la plus basse jouée par un trombone possède une fréquence fondamentale de 58.2 Hz alors que la plus haute est de 466 Hz. L'énergie produite par l'instrument peut ainsi s'étendre des basses aux très hautes fréquences comme le montre le spectre de la Figure 2.1.4 où la note $\text{Si}_\flat 1$ ($f = 58.2$ Hz) est jouée. Le filtre traduisant l'effet du rayonnement par le pavillon du trombone est de type passe-haut (dû à la forme du pavillon) dont la fréquence de coupure se situe à 1000 Hz [Bea12]. Alors que le contenu fréquentiel en dessous de la coupure est assez stable, celui au-dessus de la coupure est extrêmement variable en fonction du niveau d'entrée (comme démontré ci-dessus).

Concernant la directivité de l'instrument, Eyring *et al.* [Eyr13] montrent que le trombone est omnidirectionnel jusqu'à environ 500 Hz (Figure 2.1.5). Au-delà de 500 Hz, l'instrument de musique devient progressivement directif.

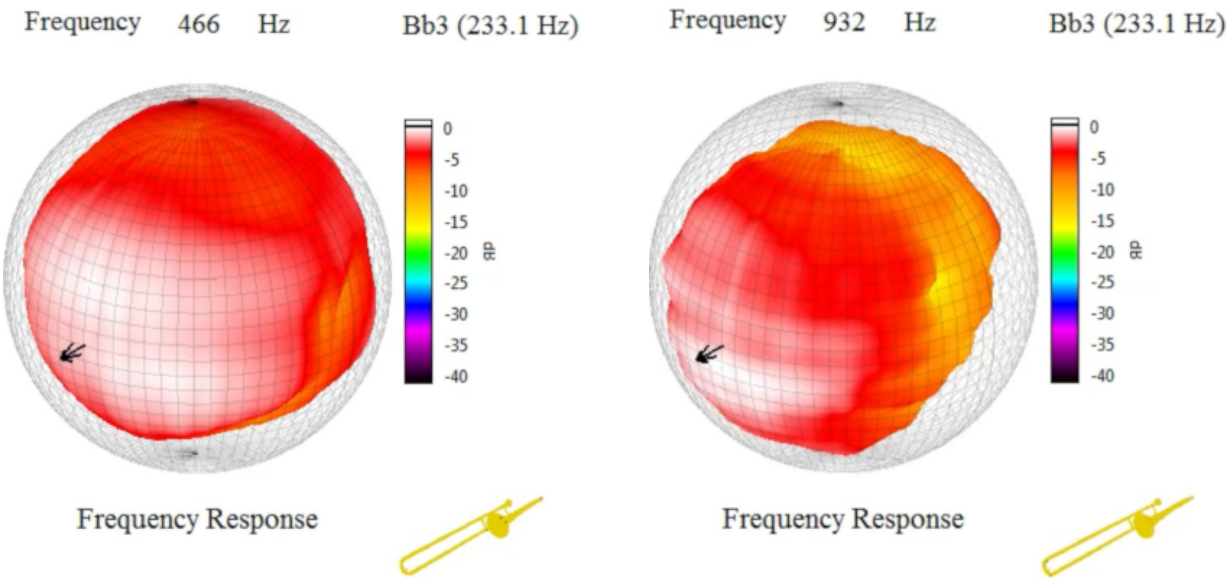
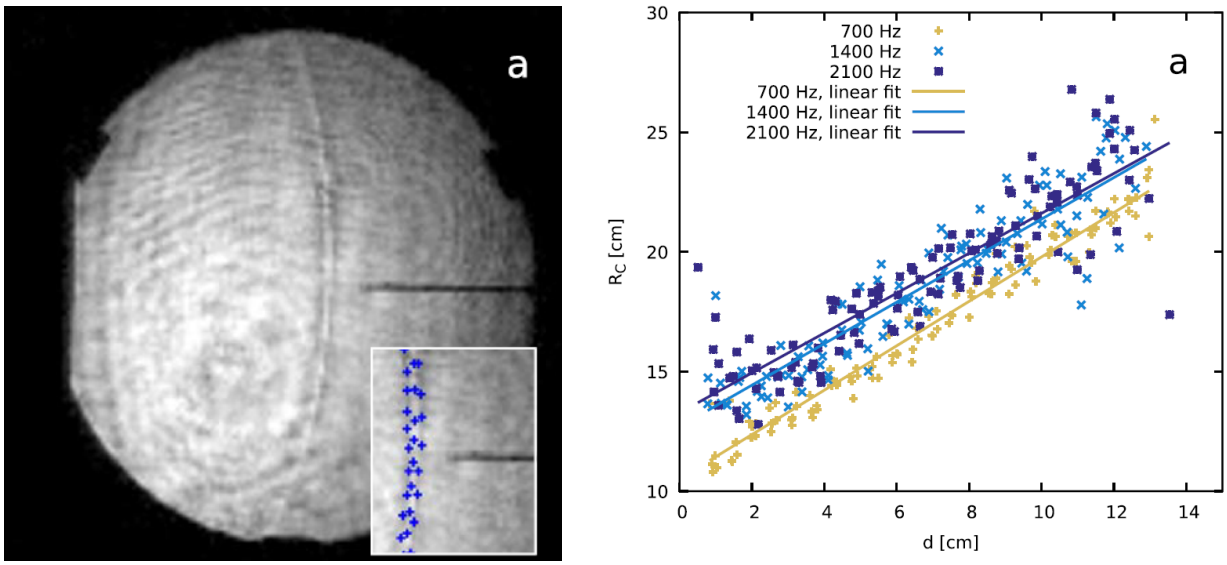


Figure 2.1.5 : Estimation de la directivité du trombone pour une mesure effectuée lorsque la note jouée est $\text{Si}_\flat 2$ ($f = 116.5$ Hz) [Eyr13]. À gauche : harmonique 4, à droite : harmonique 8.

Cela permet néanmoins de considérer la source primaire comme une source ponctuelle aux basses fréquences dont le front d'onde se courbe avec la fréquence comme le démontre Rendón dans le cas d'une trompette (Figure 2.1.6). Celui-ci effectue une mesure de l'onde de choc rayonnée par la méthode optique de Schlieren [Ren+18]. Il est alors montré que plus le rayon de courbure est élevé, plus le front d'onde est plat et plus le centre du cercle se situe vers l'intérieur du pavillon de la trompette. La position du centre acoustique de l'onde rayonnée semble ainsi davantage se déplacer vers l'intérieur de l'instrument à mesure que la fréquence augmente.

2.1.5 Impédance d'entrée

Il est théoriquement possible de reproduire le son d'un instrument (naturel) de type cuivre avec seulement un tuyau relié à un entonnoir [Nie+08 ; Kau+15]. Le matériau de l'instrument n'importe pas, tant qu'il est suffisamment rigide ; seule la géométrie compte. La propagation de l'onde à l'intérieur du



(a) (b)

Figure 2.1.6 : Image de Schlieren d'une onde de choc rayonnée par une trompette (a). Le pavillon est visible sur le bord gauche de la surface du miroir et le microphone de la sonde est visible sur le côté droit. L'encart en bas à droite montre la manière dont la géométrie d'une partie du front d'onde est numérisée [Ren+18]. Rayon de courbure R_C en fonction de la distance depuis le pavillon de la trompette d pour trois fréquences différentes [Ren+18] (b). Plus le rayon de courbure est élevé, plus le front d'onde est plat et plus le centre du cercle se situe vers l'intérieur du pavillon de la trompette.

tube s'effectue de la manière suivante : l'onde se propage dans le tube puis est réfléchie en sortie de tube ouvert avec un changement de signe, créant un nœud de pression. L'entrée du tube fermée par les lèvres du musicien provoque une réflexion sans changement de signe, créant un ventre de pression. Ces conditions limites ne peuvent être satisfaites que si la longueur L du tube correspond à un nombre impair du quart de la longueur d'onde (dans le cas d'un tube sans pavillon). Les longueurs d'ondes possibles s'expriment donc telles que :

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1}, \tag{2.1}$$

avec n entier non nul. La série de fréquences correspondantes est donnée par :

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{(2n-1)c}{4L} = f_1, 3f_1, 5f_1, \ldots, \tag{2.2}$$

avec $f_1 = c/4L$ et c la célérité du son. Les résonances d'un tube fermé/ouvert (harmoniques impairs) se rapprochent de celles du trombone (Figure 2.1.7) où les fréquences de résonance du cuivre apparaissent aux pics et creux de son impédance d'entrée. C'est à partir d'une de ces résonances que le musicien crée une auto-oscillation générant un spectre d'harmoniques pairs et impairs. La célérité du son étant proportionnelle à la racine carrée de la température, les fréquences de résonance et donc la justesse de l'instrument dépendent ainsi beaucoup de la température interne de l'instrument.

L'impédance de rayonnement de l'instrument de musique (différente de celle d'un tube droit, en raison du pavillon) contribue à amortir les pics de résonance de l'impédance d'entrée (effet des pertes par rayonnement) et à les décaler en fréquence (effet de la correction de longueur).

Pour le pavillon seul, Eveno *et al.* évaluent l'erreur induite par l'approximation des ondes planes et la compare à une solution analytique pour le rayonnement d'une sphère [HR03] donnée par Hélie et Rodet

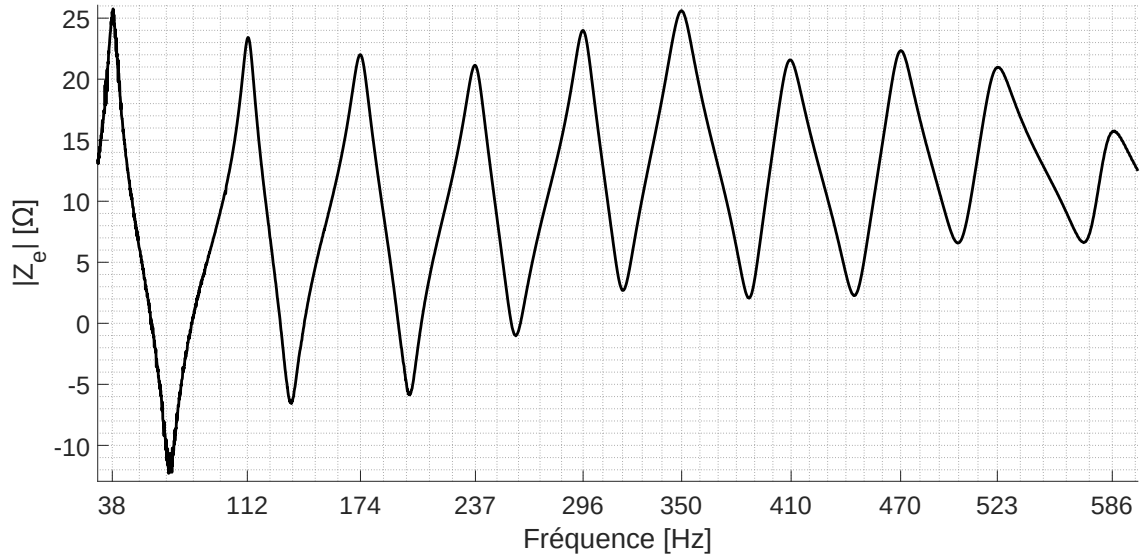


Figure 2.1.7 : Mesure du module de l'impédance d'entrée d'un trombone pBone. La mesure a été effectuée dans le cadre de cette thèse avec un capteur d'impédance [Dal01a ; Dal01b].

(Figure 2.1.8) [Eve+12].

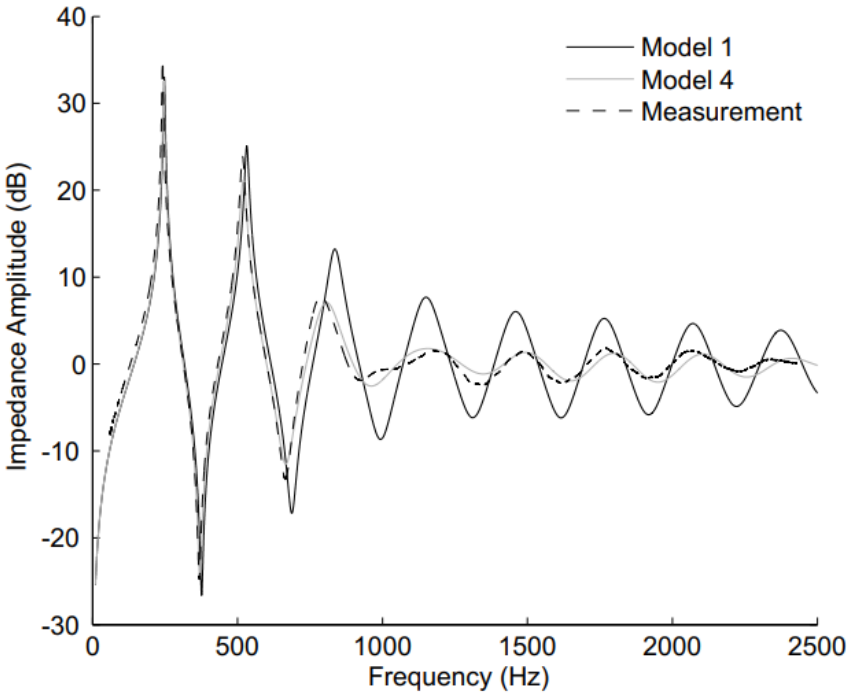


Figure 2.1.8 : Comparaison entre la mesure de l'impédance d'entrée du pavillon du trombone (ligne pointillée) et deux modèles : plan (en noir) et sphérique (en gris) [Eve+12].

Le faible écart entre théorie et expérience aux hautes fréquences montre que le modèle sphérique permet une meilleure prédiction de l'impédance. L'amplitude des pics sont en outre beaucoup plus faibles pour la propagation sphérique que pour la propagation plane. Le modèle de rayonnement sphérique estime ainsi le comportement du pavillon avec une meilleure précision et les différences entre le modèle et la mesure sont très faibles pour les 3 premiers pics et ne dépassent pas 25 cents jusqu'au pic n°8.

Insérer une sourdine dans le pavillon du trombone modifie l'impédance d'entrée de l'instrument et fortement son rayonnement. Il est alors nécessaire d'étudier l'impact de la sourdine sur le trombone.

2.2 Sourdines

Le comportement du trombone peut être modifié en insérant une sourdine à l'intérieur du pavillon de l'instrument. La sourdine a deux rôles pour un musicien : elle peut réduire le niveau du son rayonné par l'instrument pour ne pas gêner le voisinage et modifie également le timbre de l'instrument.

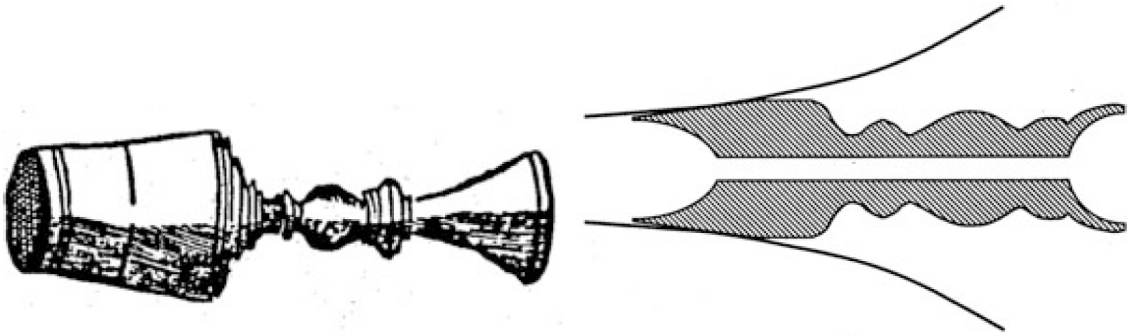
Un état de l'art est mené sur les sourdines utilisées pour les trompettes et les trombones. Il présente :

1. les principales sourdines présentes sur le marché, qui sont pour la plupart des sourdines passives,
2. l'état des recherches autour des sourdines actives.

2.2.1 Sourdines passives

À ce jour, les instruments de type cuivre sont joués à l'aide de sourdines passives (sans apport d'énergie). Les sourdines sont des objets introduits dans le pavillon de l'instrument qui modifient la géométrie interne du pavillon et réduisent sa surface rayonnante. Cela diminue la puissance acoustique émise et modifie également l'amplitude et la fréquence des pics de l'impédance d'entrée du résonateur.

La Figure 2.2.1a reproduit le dessin d'une sourdine de trompette tirée de l'Harmonicorum libri XII de Mersenne [Mer35 ; CGM20]. Mersenne ne donne aucune information sur la géométrie interne de la sourdine, mais elle était probablement similaire à la sourdine moderne basée sur des dessins du XVIII^{e} siècle présentée par la Figure 2.2.1b. Cette sourdine est conçue pour s'adapter étroitement au pavillon, et le rayonnement acoustique se fait par l'ouverture tubulaire le long de l'axe.



(a) (b)

Figure 2.2.1 : Illustration d'une sourdine de trompette baroque par Mersenne [Mer35] (a) et vue en coupe d'une sourdine de trompette à motif baroque dans le pavillon d'une trompette de 1632 par Hainlein [Pyl91] (b).

Il existe différents types de travaux sur les sourdines passives, soit pour les classifier [CS91 ; Cau16], soit pour les caractériser expérimentalement [Bac76] ou pour les modéliser [YN17]. Selon les instruments, ces sourdines sont regroupées dans différentes familles. Sluchin [CS91] distingue les sourdines passives suivant trois catégories :

1. une catégorie "de sourdines fixées à l'intérieur du pavillon",
    - "par des lames de liège qui préservent un passage entre l'intérieur du pavillon et l'extérieur de la sourdine (sourdine sèche ou straight mute en anglais, Figure 2.2.2)",

- "par un anneau de liège qui obstrue totalement le pavillon. La sourdine est percée tout le long et remplace la partie en aval du pavillon (sourdines wah-wah (Figure 2.2.2), solotone, whisper, son bouché)",

2. une catégorie "de sourdines tenues contre le pavillon, soit par la main (plunger), soit directement accrochées (bucket, felt hat), soit fixées sur un pied (derby, hat)",

3. une catégorie "constituée des deux combinaisons précédentes. Il en résulte soit une seule sourdine (bol ou cup mute), soit un couplage entre les deux modèles (petite sèche, plunger (Figure 2.2.2) ou solotone + hat par exemple)".

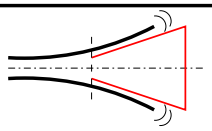
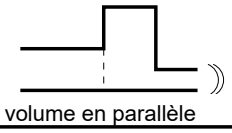
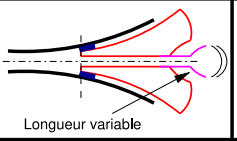
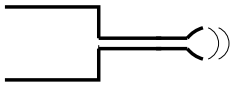
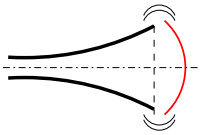
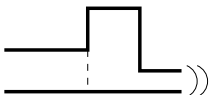
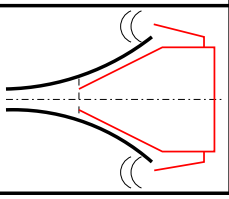
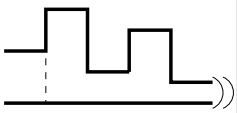
Catégorie	type sourdine	Géométrie	Schéma équivalent	Effet sur la pression rayonnée	Effet sur l'impédance
(1)	Sèche(straight)		 volume en parallèle	Passe-haut	Ajout d'un pic parasite
	Wawa (harmon)	 Longueur variable	 Tube en série		Non étudié dans la littérature
(2)	Plunger et Derby, Bucket,...		 volume en parallèle	Passe-bas	Non étudié dans la littérature
(3)	Bol (cup mute)			Complexe	Non étudié dans la littérature

Figure 2.2.2 : Synthèse des sourdines les plus courantes pour les trois catégories.

L'impact des sourdines peut être mesuré expérimentalement sur la pression rayonnée par l'instrument de musique, sur les transitoires lorsqu'une note est jouée et sur l'impédance d'entrée de l'instrument. L'effet attendu d'une sourdine passive est de diminuer le niveau sonore émis par l'instrument ou de modifier le timbre (donc le spectre de la pression rayonnée). Il est possible de mesurer dans un premier temps le spectre obtenu en situation de jeu et ce pour différentes sourdines. Ces résultats sont donnés dans [GV11] et montrent une diminution du niveau sonore de 5 à 15 dB environ.

Pour s'affranchir du musicien, des mesures de fonctions de transfert sont réalisées entre un microphone à l'intérieur du pavillon à 10 cm de son extrémité et un microphone situé en dehors à 30 cm du pavillon [Bac76]. Les fonctions de transfert obtenues (Figure 2.2.3) montrent que les sourdines étudiées (sèche, bol et Harmon mute) créent un effet de filtrage passe-haut et une modification du spectre aux plus hautes fréquences.

Caussé et Sluchin [CS91] montrent que la présence d'une sourdine modifie la directivité de l'instrument dans le cas d'un trombone, y compris aux fréquences moyennes (500 Hz) pour lesquelles le trombone sans sourdine est quasiment omnidirectionnel. Les sourdines sèche et velvet montrent une directivité

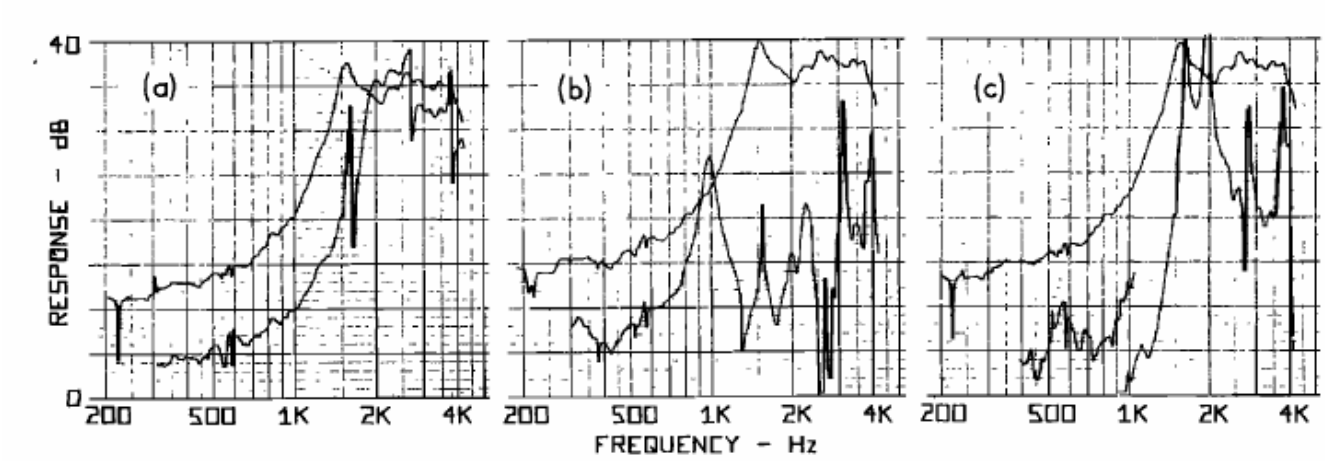


Figure 2.2.3 : Fonctions de transfert mesurées pour trois sourdines sur une trompette [Bac76]. Sourdine sèche (a), sourdine bol (b) et Harmon mute (c). Courbe supérieure : sans sourdine, courbe inférieure : avec sourdine.

légèrement marquée aux plus hautes fréquences (4000 Hz), alors que les sourdines wah-wah et bol présentent une directivité plus marquée avec des lobes bien identifiables.

Les auteurs comparent également les impédances d'entrée sur trompette sans et avec sourdine ([CS91], Figure 2.2.4). La présence de la sourdine fait apparaître un pic parasite entre les deux premiers pics et augmente les amplitudes de l'impédance à partir du 8^{e} pic (900 Hz). Ce pic parasite est liée à la résonance de Helmholtz de la cavité de la sourdine. Il crée une plage de fréquences où l'instrument est plus difficile à jouer. Cela déstabilise le jeu du musicien notamment lorsqu'il souhaite émettre la note pédale[1] de l'instrument. Les fréquences correspondant aux maxima d'amplitude de l'impédance varient légèrement (44 cents pour le 1er pic Tableau 2.2.1).

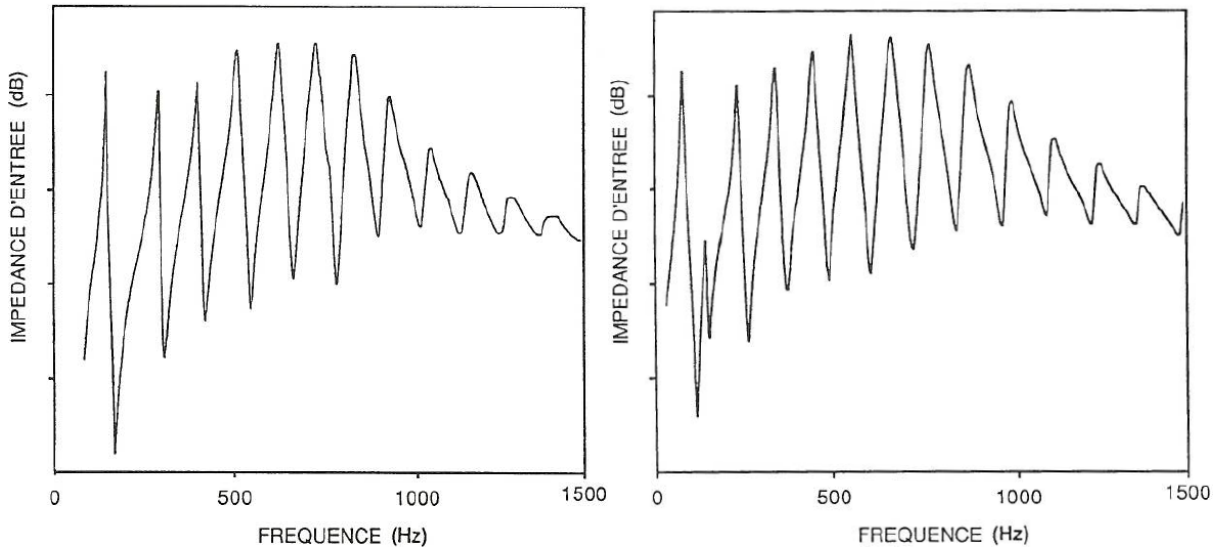


Figure 2.2.4 : Impédances d'entrée d'une trompette sans sourdine (a) et avec sourdine (b) [CS91].

[1]Une note pédale a la hauteur du son fondamental de sa série harmonique - en.wikipedia.org/wiki/Pedal_tone (2022).

Pic	1	Parasite	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δf [Hz]	3	∅	6	5	3	2	2	2	6	7	11

Tableau 2.2.1 : Décalage fréquentiel Δf (en Hz) des pics d'impédance d'une trompette sans et avec sourdine [CS91].

Le comportement des différentes sourdines existantes a été présenté. Celles-ci modifient le niveau sonore, le spectre et l'impédance d'entrée de l'instrument de musique. Une sourdine active permettrait de combiner les effets classiques d'une sourdine et le contrôle de l'amplitude et des fréquences des pics de résonance de l'impédance d'entrée de l'instrument.

2.2.2 Sourdines actives

Un impact commun à toutes les sourdines est la possible modification de l'impédance d'entrée de l'instrument qui altère la façon de jouer de l'instrument [Bac76 ; CS82]. Le musicien doit donc adapter sa façon de jouer. Une sourdine équipée de haut-parleurs et de microphones peut espérer résoudre ce problème. La sourdine active peut théoriquement modifier le niveau, le spectre, la directivité et l'impédance d'entrée de l'instrument selon l'objectif.

En 1995, Yamaha commercialise la sourdine Silent Brass™ (Figure 2.2.5) qui permet de jouer d'un cuivre tout en confinant l'énergie acoustique à l'intérieur de l'instrument. Le son est capté par un microphone dans la sourdine puis transmis par des écouteurs jusqu'aux oreilles du joueur. Le son écouté par le musicien est alors très légèrement modifié par la présence de la sourdine.

Figure 2.2.5 : Photographie de la sourdine Yamaha Silent Brass™ [Mil22].

Meurisse *et al.* tentent de contrôler l'impédance d'entrée d'un trombone par une sourdine active [Meu14 ; Meu+15]. Le pic parasite (Figure 2.2.6) créé par l'ajout d'une sourdine modifie la justesse de certaines notes : la Figure 2.2.7 montre le spectrogramme d'une gamme descendante jouée au trombone où $\mathrm{Si}_\flat 1$ (58 Hz) et $A1$ (55 Hz) apparaissent respectivement soit comme des notes à fréquences variables (roulement visible sous la forme d'oscillations des composantes harmoniques) ou comme des notes dont la durée est faible. En utilisant un système de contrôle actif au sein de la sourdine sèche (contrôle du champ interne) mettant un œuvre un système à rétroaction (Figure 2.2.8a), Meurisse parvient à modifier l'impédance d'entrée de l'instrument (Figure 2.2.8b), ce qui facilite le jeu pour les notes les plus graves [Meu+15].

En 2018, Ayrault *et al.* proposent un autre modèle de sourdine active montée dans le pavillon d'une trompette simplifiée (tube cylindrique connecté à un pavillon exponentiel) (Figure 2.2.9, [Ayr+18]). La sourdine contient 6 haut-parleurs montés en couronne sur un support inséré dans le pavillon (Figure 2.2.9b). Une modélisation utilisant des matrices de transfert permet de prédire l'impédance d'entrée

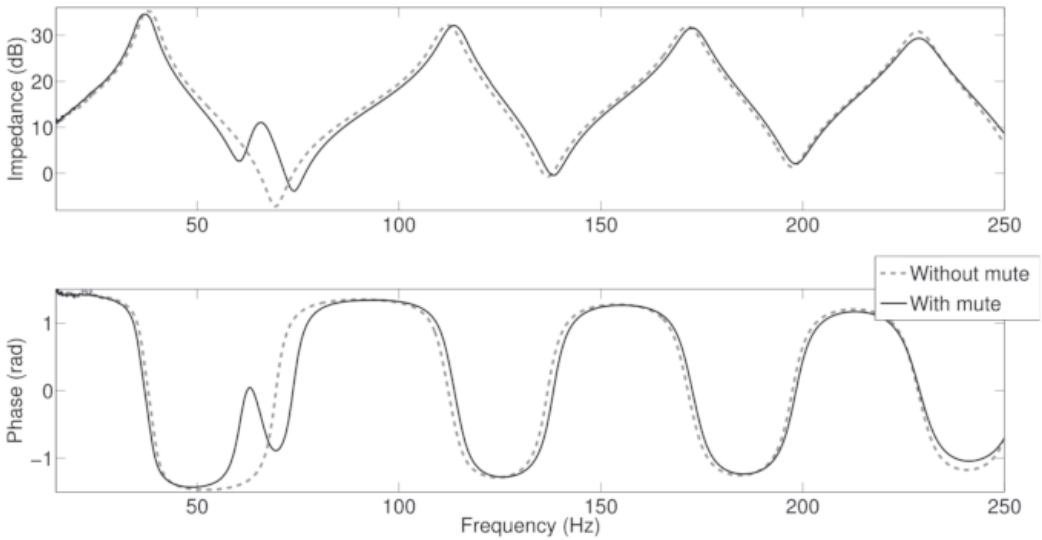


Figure 2.2.6 : (En haut) Module de l'impédance d'entrée d'un trombone en position $Si_\flat 1$ sans sourdine (ligne grise pointillée) et avec la sourdine active sans contrôle appliqué (ligne noire pleine). (En bas) Phase de l'impédance d'entrée [Meu+15].

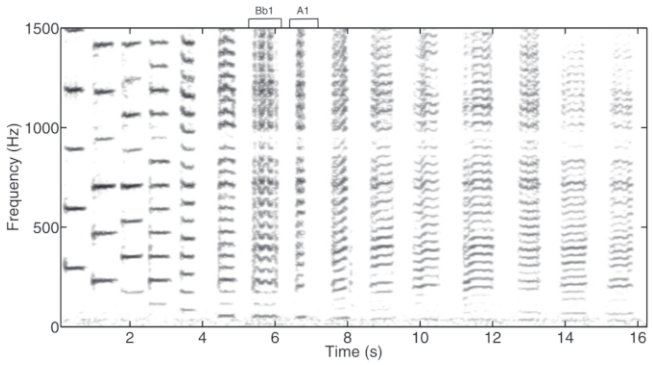


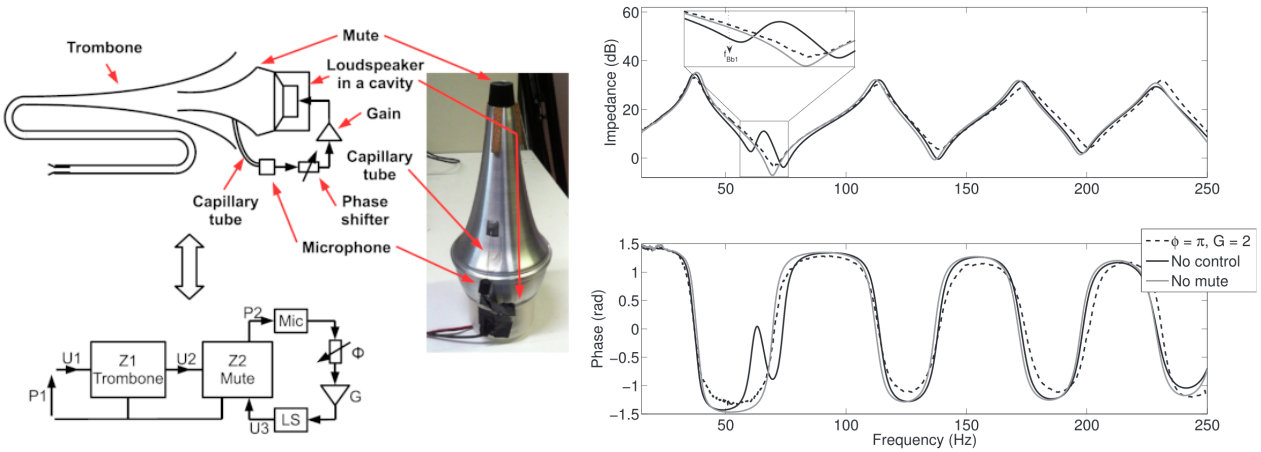
Figure 2.2.7 : Spectrogramme d'une gamme descendante jouée au trombone en présence d'une sourdine passive sèche ordinaire [Meu+15].

de l'instrument et la pression acoustique rayonnée par celui-ci lors d'un contrôle actif optimal. L'impact de ce dernier sur l'impédance d'entrée de l'instrument est faible en fréquence et en amplitude quand le contrôle vise à diminuer le niveau rayonné. Quand l'objectif du contrôle est d'augmenter le niveau sonore rayonné, l'amplitude des pics d'impédance est significativement modifiée. Cela a pour effet de rendre l'instrument plus facile à jouer.

2.2.3 Conclusion

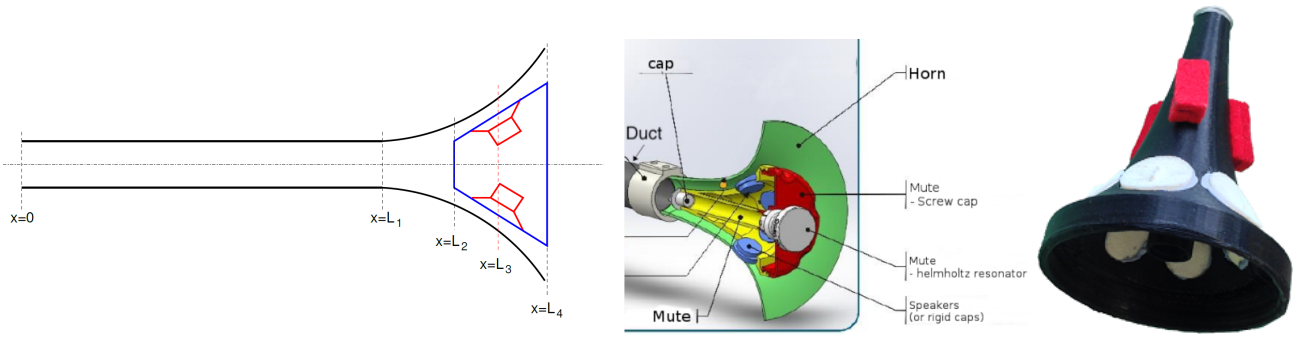
Les sourdines passives permettent de réduire le niveau sonore rayonné par l'instrument (de 5 à 15 dB) et de modifier son timbre, ce qui est l'un des objectifs du système de contrôle actif étudié lors de cette thèse (Chapitre 4). L'impédance d'entrée de l'instrument est en outre altérée par l'ajout de la sourdine : un pic parasite apparait notamment entre le premier et le second pic.

Il convient alors d'étudier différentes techniques de contrôle actif existantes qui peuvent être mises en place pour contrôler la puissance du trombone sans modifier son impédance d'entrée. Cela revient à contrôler l'impédance de rayonnement en sortie du pavillon. Une sourdine idéale qui n'a pas d'impact sur l'impédance d'entrée de l'instrument possède une impédance de rayonnement à partie réelle nulle (pas de puissance dissipée dans le milieu extérieur) et à partie imaginaire égale à celle de l'impédance de rayonnement initiale (pas de modification des fréquences de jeu).



(a) (b)

Figure 2.2.8 : Schéma d'une sourdine sèche avec microphone, haut-parleur et système de contrôle insérés dans le pavillon d'un trombone [Meu14] ((a), en haut à gauche). Photographie de la sourdine active ((a), à droite). Circuit électrique équivalent du trombone couplé à la sourdine de contrôle ((a), en bas à gauche). Module de l'impédance d'entrée d'un trombone en position $Si_\flat 1$ sans sourdine (ligne grise pleine), avec une sourdine normale (ligne noire pleine) et avec une sourdine active (ligne noire pointillée), et zoom sur le pic d'impédance supplémentaire ((b), en haut). Phases de l'impédance d'entrée [Meu+15] ((b), en bas).



(a) (b) (c)

Figure 2.2.9 : Schéma de principe d'une trompette simplifiée et d'une sourdine active [Ayr+18] (a) et schéma détaillé du pavillon et de la sourdine en coupe [BC17] (b). Prototype de la sourdine active [BC17] (c).

Contrôler la directivité de l'instrument est un autre objectif de ce travail (Chapitre 5) et aucune sourdine ne propose actuellement un tel contrôle sur un instrument de type cuivre.

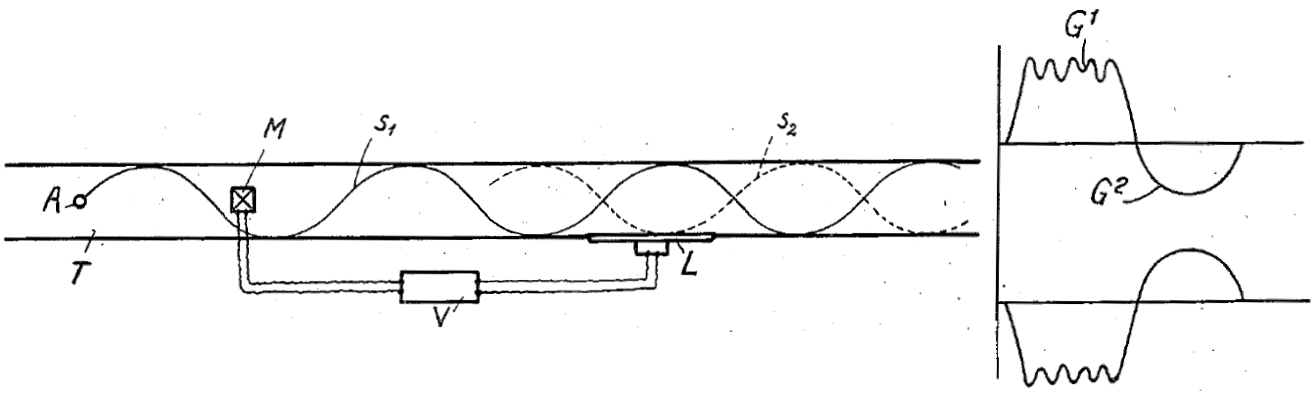
2.3 Contrôle actif

Le contrôle actif est une technologie utilisée dans un grand nombre de domaines [Gui09]. Plusieurs applications se retrouvent dans la vie quotidienne comme pour les casques actifs réduisant le bruit acoustique environnant ou pour le contrôle du son émis par des ventilations ou des cheminées. Cette thèse s'intéresse à un contrôle pouvant s'appliquer aux instruments de musique de la famille des cuivres. De façon à proposer un contrôle actif de la puissance acoustique rayonnée et la directivité de l'instrument, il est intéressant de faire un état de l'art sur :

1. le contrôle actif en champ libre,
2. l'application du contrôle actif aux instruments de musique.

2.3.1 Principe initial

Le principe du contrôle actif est breveté en 1934 par Paul Lueg ([Lue34], Figure 2.3.1). À l'origine, le but du contrôle actif est la réduction de bruits parasites comme les bruits de moteurs ou de ventilations dans les usines. Un microphone, un haut-parleur et un déphaseur sont installés de manière à capter l'onde dans un tube puis de la reproduire en opposition de phase tout en prenant en compte le décalage spatial entre émetteur et récepteur. Ce contrôle utilise une commande prédictive (*feedforward* en anglais) ne se basant que sur le comportement de l'onde primaire captée par le microphone placé en amont [Meu14].



(a) (b)

Figure 2.3.1 : Schéma du contrôle actif d'un conduit cylindrique avec un capteur et un actionneur (a) et évolution temporelle de la source primaire ainsi que de la source secondaire [Lue34] (b).

D'autres études sont menées dans les décennies suivantes et concernent principalement le contrôle de terminaisons [Ols53], [Swi73], [GKR85]. On distingue en général deux familles, l'une mettant en œuvre un système de contrôle placé à l'extrémité du guide et ne permettant pas l'écoulement de l'air, l'autre utilisant des transducteurs montés en paroi du guide et permettant l'écoulement de l'air. Ces recherches ne sont néanmoins pas applicables au travail de thèse qui s'intéresse à un contrôle actif externe à l'instrument mais pourraient cependant être utilisées dans le cas d'un contrôle interne au résonateur.

Un contrôle actif peut être vibratoire, vibroacoustique ou acoustique. Un contrôle purement acoustique est conçu lors de cette thèse. Le contrôle peut alors s'effectuer :

- en cavité (casque audio, cabine automobile, ...),
- en guides d'ondes (modes d'une clarinette [Meu+14], conduits d'échappement de grands ventilateurs [Pap+17], ...),

- en champ libre (minimisation de la puissance acoustique d'un système [Nel+87], synthèse d'un champ sonore sphérique [Lec17], ...). Cette thèse s'intéresse à ce type de contrôle. Le but est alors de minimiser la puissance rayonnée du trombone ou de modifier sa directivité.

2.3.2 Contrôle en champ libre

Le contrôle actif en champ libre permet de modifier le rayonnement de l'instrument pour mettre en place un contrôle de la puissance ou un contrôle de la directivité de l'instrument.

2.3.2.1 Contrôle en puissance

Les recherches autour du contrôle de la puissance acoustique de sources sonores sont présentées. Quelques applications comme le contrôle d'une ventilation ou d'une cheminée industrielle sont décrites dans cette section.

Dans les années 1980, les progrès réalisés dans le domaine du traitement du signal et de l'électronique ont permis de mettre au point des dispositifs actifs pour supprimer le bruit et les vibrations. En 1976, Kempton présente le résultat d'une étude sur les interférences d'un multipôle sur un monopôle et discute de la possibilité d'un contrôle actif en champ libre [Kem76]. Un modèle de contrôle actif dont le but est la minimisation de la puissance acoustique d'un système est proposé par Nelson [Nel+87] et développé dans plusieurs ouvrages [NE92 ; HS97].

Swinbanks conçoit en 1984 un silencieux fonctionnant dans la gamme de fréquences 20-100 Hz pour le contrôle d'une turbine à gaz [Swi84] (Figure 2.3.2). La limite supérieure de fonctionnement est dictée par le diamètre de la sortie d'échappement, puisque les silencieux actifs sont plus efficaces lorsque les dimensions globales sont petites par rapport aux longueurs d'onde à contrôler. Le contrôle effectué par feedback permet une réduction de la puissance acoustique de 10 dB entre 20 et 50 Hz.

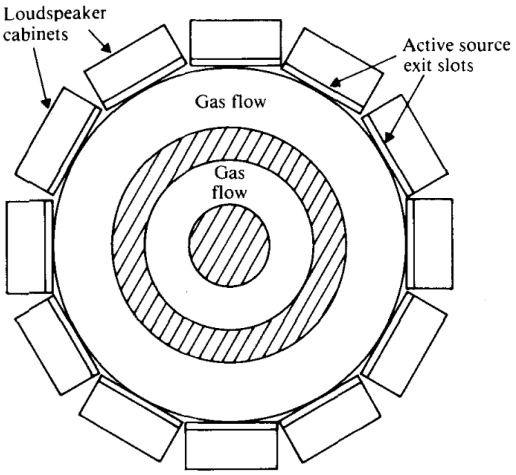


Figure 2.3.2 : Configuration d'un atténuateur actif de turbine à gaz. Les haut-parleurs placés à l'extérieur de la turbine sont pilotés par des amplificateurs séparés, avec un signal commun [Swi84].

Une étape de la conception d'un système de contrôle actif consiste à trouver les meilleurs emplacements des sources secondaires et des capteurs d'erreur en fonction de la distribution de la source primaire et de son spectre. En 1997, Martin et Roure montrent comment une méthode peut être développée pour optimiser les emplacements des transducteurs dans le cas d'un rayonnement en champ libre d'une source primaire à partir d'une minimisation au sens des moindres carrés [MR97]. Il est également démontré comment cette base de données de mesures peut être utilisée pour choisir un bon compromis entre le nombre et les emplacements des capteurs d'erreur. Cette méthode est ensuite appliquée à deux sources acoustiques réelles, un dipôle et un transformateur électrique [MR98] (Figure 2.3.3). Le champ primaire

des deux sources mesuré dans une chambre anéchoïque est utilisé pour déterminer les configurations de contrôle actif par simulation numérique. Ensuite, la disposition de l'actionneur et du capteur d'erreur est testée dans une expérience de commande active impliquant les deux sources primaires. Il est ainsi possible de réduire globalement et de manière significative le son rayonné par une petite source primaire jusqu'à 300 Hz avec deux couches de trois haut-parleurs décalés de la source primaire et sept microphones d'erreur situés tout autour. L'adéquation entre la simulation et les résultats expérimentaux atteste que l'optimisation est efficace (au moins 10 dB d'atténuation jusqu'à 300 Hz).

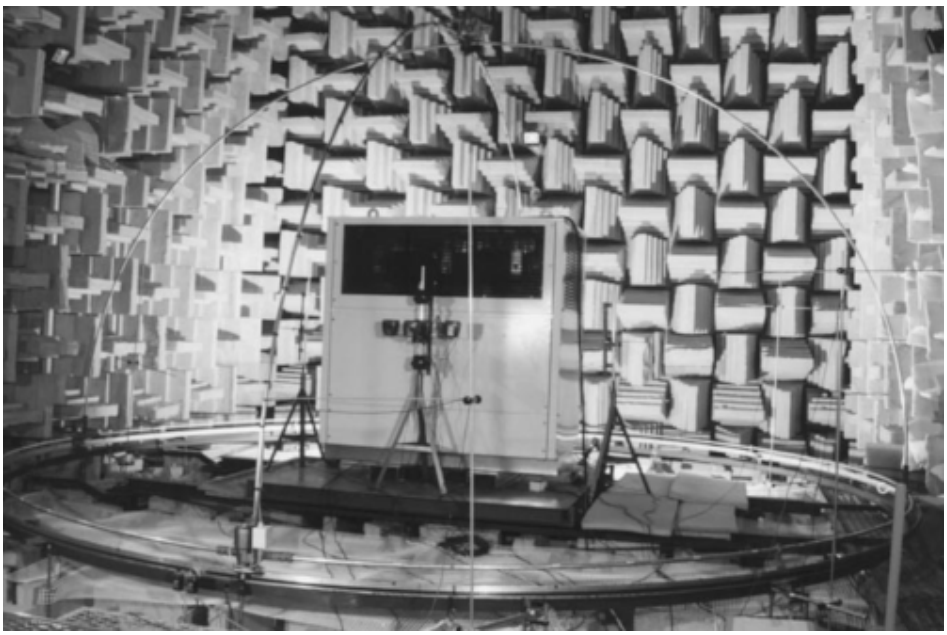


Figure 2.3.3 : Mesure du bruit rayonné par un transformateur électrique avec une antenne de microphones [MR98].

Le débit à appliquer aux sources secondaires pour effectuer le contrôle peut être calculé pour plusieurs types de sources (monopôle, multipôle). Le contrôle actif avec des monopôles est majoritairement utilisé pour sa simplicité de modélisation, de mise en place et pour sa robustesse. Dans un grand nombre d'articles, l'objectif est de contrôler le bruit émis par des transformateurs électriques ou des ventilateurs par des sphères ou des cercles de monopôles [Nel+87 ; QH00 ; GS03].

Les recherches des dernières années menées sur les conduites d'air montrent ainsi qu'il est possible d'effectuer un contrôle en puissance d'un instrument de musique dont le niveau sonore rayonné est important. Le signal émis par le trombone est en effet commun à celui du ventilateur : un signal périodique donnant un spectre de raies. Il reste cependant à savoir s'il est possible d'effectuer un contrôle actif avec des actuateurs petits et légers pour ne pas encombrer le musicien en situation de jeu. Il reste également à savoir s'il est possible d'effectuer un contrôle sur la directivité de l'instrument.

2.3.2.2 Contrôle de la directivité

Les notions de base de la production d'une directivité désirée sont premièrement rappelées. Le diagramme de directivité d'une source correspond au module de la pression rayonnée à une distance et une fréquence données pour plusieurs positions angulaires. Une source est directive lorsqu'elle rayonne davantage d'énergie vers une direction particulière.

L'étude se focalise premièrement sur un cas où le nombre de sources est faible et que la géométrie de ces dernière est simple (monopôles, dipoles, quadripoles) Cela permet de procéder à une approche analytique pour obtenir une directivité cible. La Figure 2.3.4 présente plusieurs types de directivités : monopolaire, dipolaire, cardioïde, supercardioïde.

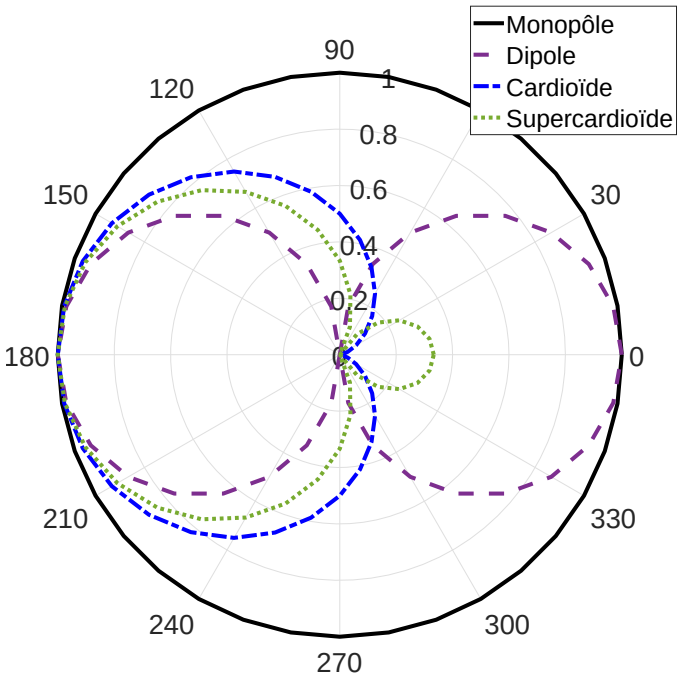


Figure 2.3.4 : Diagrammes de directivité : monopolaire (ligne continue), dipolaire (tirets/pointillés), cardioïde (pointillés) et supercardioïde (tirets).

Contrôler les interférences acoustiques entre plusieurs sources permet de créer une directivité désirée. La directivité d'une source résulte d'une combinaison de sources simples [Ber54]. Elle dépend ainsi de la différence en amplitude et en phase de la pression acoustique générée entre ces sources simples [Ols73]. Il est par conséquent possible de créer une directivité cardioïde à partir de deux sources en opposition de phase et en ajoutant à une des sources un retard correspondant au temps de vol entre les deux sources (Figure 2.3.5, [Sta12]).

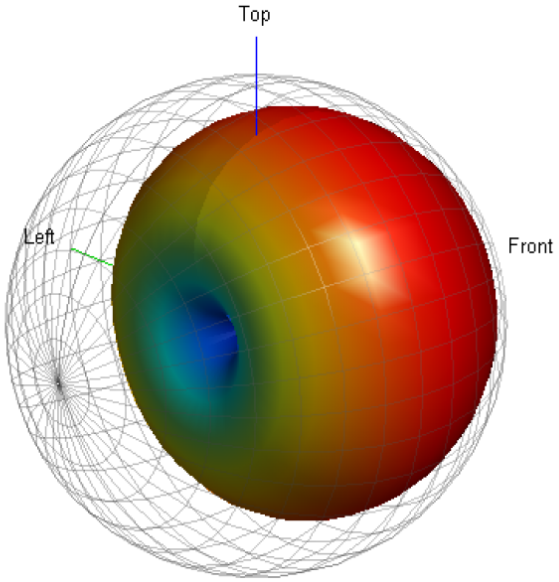


Figure 2.3.5 : Diagrammes de directivité cardioïde en 3 dimensions (3D). L'étude numérique est effectuée par une méthode d'éléments de frontière (BEM) pour simuler la directivité d'un système électroacoustique basses fréquences composé de 3 sources sonores similaires placées en ligne [Sta12].

Le contrôle à partir d'interférences entre sources simples peut être étendu à N sources pour produire une directivité dont l'ordre de complexité augmente. Cela permet par exemple de créer un faisceau principal dans une direction souhaitée. Il faut pour cela contrôler les amplitudes et phases des débits de chaque monopôle en fonction de leur espacement [VSV96]. Une application de cette technologie (nommée "beamforming" en anglais) est l'utilisation de réseaux de haut-parleurs dans les églises ou les gares ferroviaires. Le but est alors de créer un faisceau acoustique pour diriger le son du plafond vers le sol afin d'éviter des réverbérations du plafond.

2.3.2.3 Contrôle de champ sur un réseau de microphones

Dans le cas où le nombre et la position des sources de contrôle sont complexes, le contrôle d'une source primaire s'effectue à partir de N sources secondaires et M récepteurs. Les fonctions de transfert entre le débit de chaque source et la pression au niveau des récepteurs permet de définir des débits optimaux à appliquer aux sources secondaires pour effectuer un contrôle désiré. Il est alors envisageable de mettre en place un contrôle à partir de M récepteurs placés par exemple sur une sphère autour de la source primaire. Un état de l'art autour de la création d'un champ sonore donné dans l'espace et des zones d'écoute personnalisées (sound zones en anglais) est présenté, respectivement dans cette section et la suivante.

Camras est le premier à proposer un modèle de synthèse de champ en 1967 [Cam67]. L'objectif est alors de recréer une salle de concert dans une cabine téléphonique placée au milieu de cette salle. Les surfaces sont alors recouvertes de microphones directifs orientés vers l'extérieur du volume. L'espace sonore de la salle de concert est reproduit à l'aide d'un réseau de haut-parleurs dont la directivité est orientée vers l'intérieur. Plusieurs expériences ont été réalisées avec un système à 12 canaux. Les études ont porté sur les effets de la taille du volume de la cabine, l'espacement et la distribution des microphones, le "grossissement" de l'espace, l'utilisation de petits haut-parleurs peu coûteux pour les canaux multiples et de grands haut-parleurs moins nombreux pour les basses, les environnements d'écoute à forte absorption et les effets d'un nombre fini de canaux.

C'est en 1993 qu'apparaît un premier formalisme proposé par Berkhout *et al.* [BVV93]. Un champ sonore est mesuré sur une scène par des microphones directifs. Ils sont ensuite extrapolés électroniquement loin de la scène pour être émis de nouveau dans la salle par un ou plusieurs réseaux de haut-parleurs comme illustré par la Figure 2.3.6. Le système proposé vise à reproduire le plus fidèlement possible le champ sonore original. La théorie sous-jacente est basée sur l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz.

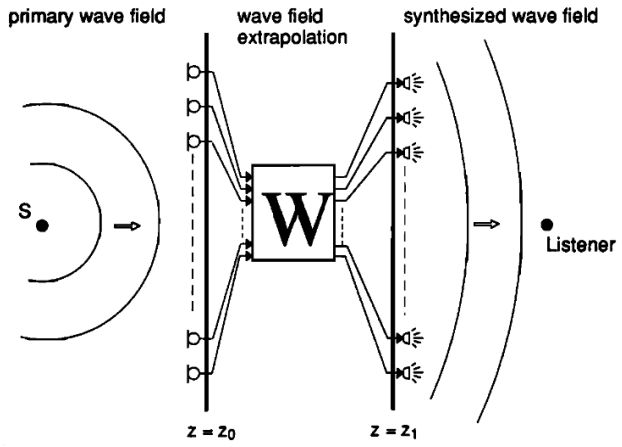


Figure 2.3.6 : Schéma de l'implémentation de la synthèse de champ par extrapolation du champ sonore primaire [BVV93].

La base de la synthèse de champ est décrite par le principe de Huygens, selon lequel tout point d'un front d'onde peut être considéré comme une source secondaire. Ce principe a été quantifié par Kirchhoff pour donner l'équation de Kirchhoff-Helmholtz. Cette équation indique que la pression acoustique peut être calculée à l'intérieur d'un volume V exempt de source si l'on connaît à la fois la pression et la vitesse acoustique en tout point d'écoute sur la surface S de ce volume. La notion de repliement spatial pour des sources discrètes est déterminée.

En 1996, Kirkeby *et al.* tentent de reproduire des champs sonores par un traitement numérique du signal en utilisant seulement quelques haut-parleurs [Kir+96]. Les entrées des haut-parleurs sont calculées à partir de signaux enregistrés et filtrés à travers une matrice de filtres numériques causaux ayant des

réponses impulsionnelles finies. Ces filtres sont calculés en inversant, au sens des moindres carrés, une matrice qui contient les fonctions de transfert électroacoustiques des haut-parleurs vers les microphones. Le concept de régularisation de la matrice est abordé pour obtenir une inversion matricielle dont le conditionnement est réduit. La technique est illustrée par un exemple utilisant quatre haut-parleurs pour reproduire un champ sonore enregistré avec trois microphones. Le champ sonore original est reproduit lorsque le champ enregistré contient uniquement des fréquences dont la longueur d'onde est supérieure à la distance entre 2 microphones.

La méthode de pressure matching (adaptation de la pression) est étudiée par Olivieri *et al.* en 2015 [Oli+15]. L'objectif est de générer les filtres numériques requis par un ensemble de haut-parleurs afin de reproduire un champ sonore souhaité. Les performances du système dépendent du champ cible et du facteur de régularisation imposé (permettant de limiter le conditionnement de la fonction coût). Plusieurs simulations numériques et une expérience en salle anéchoïque sont effectuées (Figure 2.3.7). Un microphone mesure les réponses en fréquence (FRF) des signaux envoyés par un réseau linéaire de 16 haut-parleurs placé sur une table tournante. Cette dernière permet de mesurer les FRF en 36 points autour du réseau. Les auteurs proposent d'améliorer la méthode en sélectionnant pour chaque fréquence les points de contrôle qui contribuent à la fonction coût du pressure matching. La directivité cible est comparée à celle résultant du contrôle pour évaluer la performance du contrôle. Il est démontré que la méthode proposée permet un contrôle précis de la réponse du champ reproduit à l'emplacement de l'auditeur. Le facteur de régularisation doit néanmoins être suffisamment important pour garantir la robustesse du système sur une large gamme de fréquences pour l'expérience. La méthode pourrait s'étendre ensuite à d'autres géométries de points de contrôle.

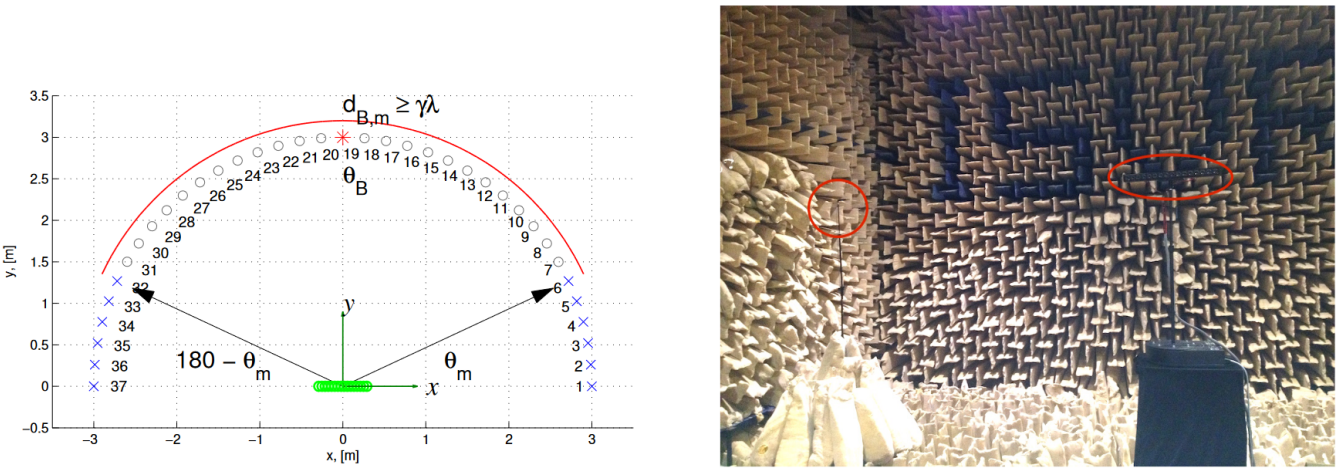


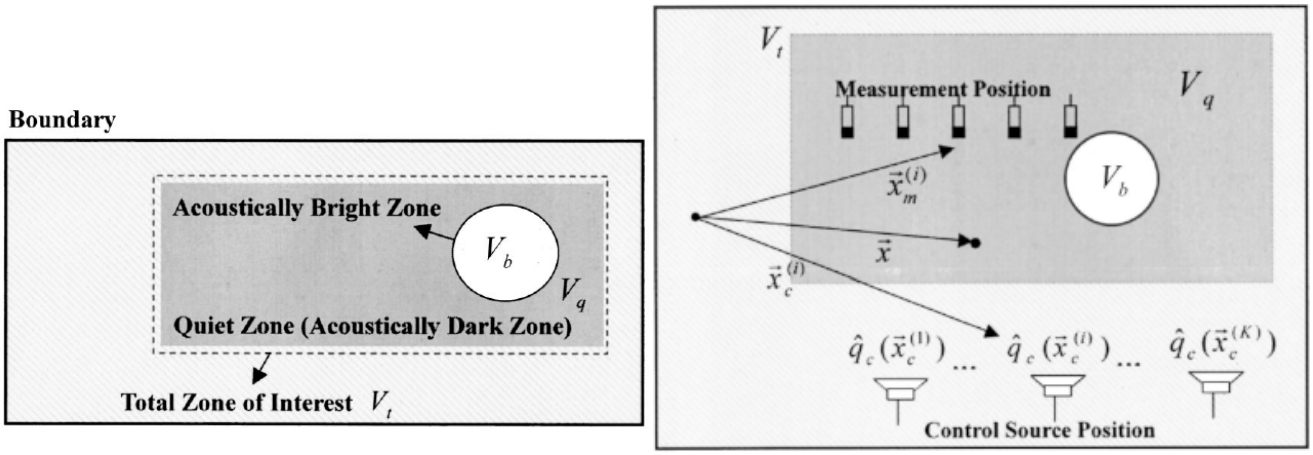
Figure 2.3.7 : Sélection des points de contrôle pour chaque fréquence (à gauche). Les croix bleus correspondent aux points sélectionnés par l'algorithme pour créer la zone de silence. Microphone et réseau de haut-parleurs dans la salle anéchoïque de l'ISVR pour la mesure de réponses des signaux d'entrée (à droite). [Oli+15].

Il existe maintenant un grand nombre d'applications analytiques de synthèse de champ (dont certaines sont décrites dans [Ahr12]). Un dérivé de cette méthode consiste à créer plusieurs zones sonores dans un espace. Il est ainsi possible de produire des sons différents dans chaque espace à partir d'un ou plusieurs réseaux de haut-parleurs et de microphones. Ce concept est étudié dans la section suivante.

2.3.2.4 Contrôle de champ dans des zones d'écoute personnalisées

Le concept de zones d'écoute personnalisées ("Sound Zones" en anglais) apparaît autour des années 2000. Choi et Kim proposent en 2002 de générer une "zone acoustiquement lumineuse" dans un espace

[CK02]. La bright zone est définie comme le volume où l'énergie acoustique est plus élevée que dans les autres espaces (Figure 2.3.8a). Une méthode est proposée pour générer une bright zone en contrôlant plusieurs sources monopolaires. Deux types de fonctions de coût liées au contrôle sont définis : l'un est le rapport entre l'énergie acoustique obtenue dans la bright zone et la puissance d'entrée et l'autre exprime le contraste acoustique entre la bright et la dark zone (zone acoustiquement sombre). Grâce à une analyse de la matrice des fonctions de transfert entre sources et récepteurs (Figure 2.3.8b), les débits optimaux des monopôles sont obtenus.



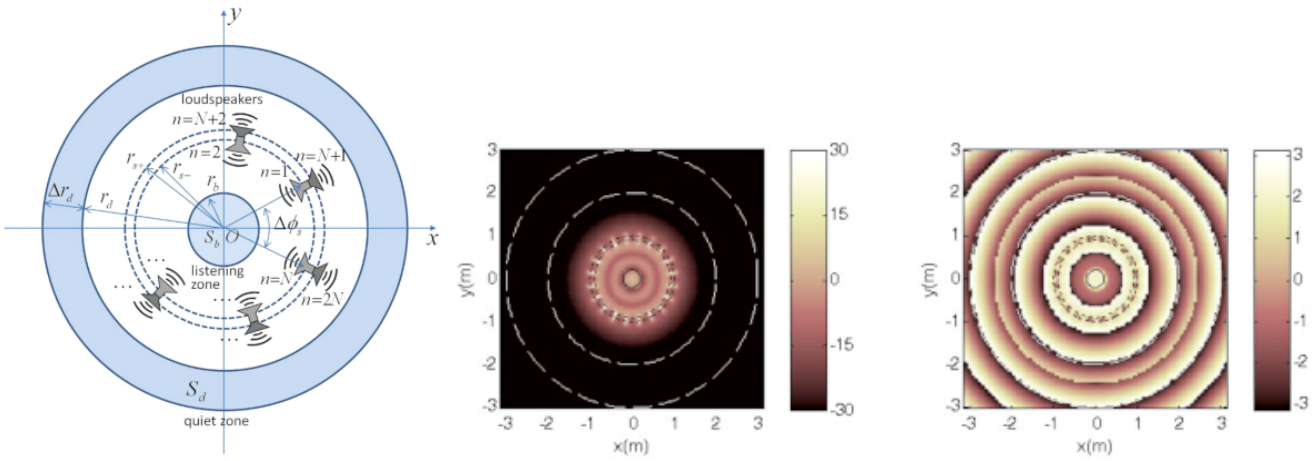
(a) (b)

Figure 2.3.8 : Schéma des zones (a) et définition des variables acoustiques (b) : V_b : volume de la bright zone, V_q : volume de la dark zone, V_t : volume de la zone totale d'intérêt, $\vec{x}_c^{(i)}$: position de la source de contrôle i, $\vec{x}_m^{(i)}$: position du capteur i, et $\hat{q}_c(\vec{x}_c^{(i)})$: débit de la source de contrôle i [CK02].

En 2008, Choi *et al.* présentent ensuite les limites de chaque méthode de contrôle [Cho+08]. Ils proposent alors une nouvelle stratégie de contrôle qui combine à la fois la minimisation de l'erreur spatiale entre la pression désirée et la pression dans la bright zone et le contraste acoustique entre la bright et la dark zone en une seule fonction objective. L'introduction d'une technique de pondération spatiale continue permet un contrôle précis du champ sonore avec la forme souhaitée de la distribution d'énergie. Les résultats sont meilleurs que ceux basés sur la technique d'optimisation des moindres carrés.

Chang & Jacobsen [CJ12] appliquent le principe des zones acoustiques pour générer un champ sonore contrôlé pour les auditeurs situés à l'intérieur d'un réseau circulaire de haut-parleurs sans perturber sensiblement les personnes situées à l'extérieur du réseau (Figure 2.3.9a).

Pour atteindre cet objectif, un réseau de 20 paires de haut-parleurs d'un diamètre d'environ 1 m est mis en place. Plusieurs méthodes d'optimisation sont étudiées : un contrôle par contraste acoustique, un pressure matching dans la bright zone et une combinaison de ces deux méthodes. Le contraste acoustique et l'écart entre le champ sonore souhaité et le champ sonore généré dans la bright zone sont les deux indicateurs de performance utilisés. Il est démontré que ce système offre une différence de plus de 40 dB entre les deux zones et une erreur spatiale (entre la pression désirée et la pression obtenue dans la bright zone) d'environ -20 dB à des fréquences inférieures à la fréquence de Nyquist (environ 600 Hz). Pour des fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist, une différence d'environ 20 dB entre les deux zones et une erreur spatiale de moins de 10 dB ont été obtenues. Le meilleur compromis est ainsi obtenu avec une méthode qui combine la maximisation du contraste avec la réduction de l'erreur dans la bright zone (Figure 2.3.9b).



(a) (b)

Figure 2.3.9 : Réseau circulaire à double couche de haut-parleurs avec une bright (S_b) et une dark (S_d) zone (a) et champ sonore obtenu à 500 Hz (b) : (à gauche) niveau de pression acoustique par rapport au niveau au centre et (à droite) phase [CJ12].

En 2015, Betlehem *et al.* font un état de l'art des différentes méthodes proposées autour des zones sonores [Bet+15]. La conception de haut-parleurs directifs est présentée et les avantages de l'utilisation de réseaux de sources directionnelles pour la reproduction sonore sont illustrés, tels qu'un meilleur contrôle des champs sonores sur de vastes zones et une réduction du nombre total de haut-parleurs, ce qui en fait une solution adaptée à la création de zones sonores personnelles.

Vindrola étudie en 2021 l'implémentation de zones acoustiques dans un habitacle de voiture dans [Vin21] (Figure 2.3.10). L'objectif est de créer des zones d'écoutes pour chaque passager. Plusieurs sources et récepteurs sont placés sur chaque appui-tête dans le but d'être le plus proche possible des oreilles de chaque passager. La méthode de "forced pressure matching" est développée afin de réduire le temps de calcul sans altérer les performances du contrôle. Elle permet de forcer les filtres de contrôle qui n'ont pas besoin d'être calculés en temps réel. Le contraste acoustique, l'écart entre le champ sonore souhaité et le champ sonore généré dans la bright zone et l'effort à appliquer aux haut-parleurs sont analysés. Un contraste acoustique de 35 dB et une erreur de reproduction moyenne très faible (10^{-4}) sont obtenus théoriquement et expérimentalement entre deux zones situées au niveau du conducteur et du passager avant. Il est également montré que le système reste performant avec seulement 8 microphones d'erreur installés dans la voiture (2 par oreilles).

Le concept de zones d'écoute personnalisées peut être appliqué au contrôle de la directivité du trombone (présenté plus tard en Chapitre 5). Il est par exemple possible d'imposer une pression nulle à l'avant du pavillon du trombone (donc devant le musicien) sans interférer avec la pression rayonnée par le trombone à l'arrière (donc vers le musicien).

2.3.3 Application aux instruments de musique

Plusieurs applications de contrôle actif sur des instruments de musique sont finalement étudiées. Il est d'abord question de contrôles appliqués aux instruments à cordes, puis aux percussions et enfin aux instruments à vent. Comme le travail de cette thèse porte sur le contrôle des instruments de la famille des cuivres, une distinction est faite entre le contrôle d'un bois et celui d'un cuivre pour cette dernière partie.

Figure 2.3.10 : Prototype d'implémentation de zones d'écoute personnalisées dans un habitacle de voiture avec un réseau de haut-parleurs et un réseau de microphones dans une chambre semi-anéchoïque [Vin21].

2.3.3.1 Cordes

Boutin propose en 2008 de modifier les paramètres d'un chevalet de violon par contrôle actif [BB08]. Le chevalet modifie l'excitation fournie par les vibrations des cordes, notamment en fonction de sa masse et de sa rigidité. Ainsi, en changeant sa réponse en fréquence, le timbre de l'instrument est modifié. Cela permet de changer la position et la forme d'un pic (appelé "bridge hill") autour de 2.5 kHz en plaçant 2 actuateurs et 1 accéléromètre grâce à une correction par feedback. Ces résultats ont été obtenus en contrôlant un chevalet simplifié. Une telle correction a également été effectuée sur un chevalet réel et a permis d'entendre des modifications de timbre dans le son produit par le violon.

McPherson présente en 2010 le piano à résonateur magnétique [McP10], un instrument hybride installé dans un piano à queue comme l'illustre la Figure 2.3.11. Le son est produit sans haut-parleurs à l'aide d'actionneurs électromagnétiques qui agissent directement sur les cordes du piano, permettant de produire un sustain infini et des notes allant crescendo à partir du silence. Une approche par feedback permet de détecter les vibrations des cordes à partir d'un capteur sur la table d'harmonie. Les sons générés par les actionneurs peuvent atteindre des amplitudes similaires à celles du piano traditionnel mais il est impossible de reproduire l'attaque rapide produite par un marteau de piano. Les touches contenant trois cordes ne peuvent avoir qu'un seul capteur et un seul actionneur, ce qui rend le problème du contrôle plus difficile. L'orientation des actionneurs ne permet qu'un contrôle sur l'axe vertical, ce qui rend impossible une annulation parfaite de tous les sons rayonnés.

En 2016 Benacchio *et al.* mettent en place un contrôle actif modal avec un actionneur piézoélectrique placé sur le chevalet d'une guitare classique [Ben+16]. Cette technique est comparée à une méthode de synthèse sonore. Les auteurs montrent qu'un avantage de la synthèse est de permettre la modification des paramètres du modèle jusqu'à des limites extrêmes impossibles à atteindre avec le contrôle actif modal, qui est limité par la qualité du calcul, l'énergie nécessaire pour atteindre une cible de contrôle, et les exigences du temps réel. Cependant, la synthèse ne permet pas de jouer ou d'écouter le son comme celui d'un instrument réel. Pour être réaliste, la synthèse sonore nécessite un modèle physique très complexe (corde pincée, table d'harmonie, rayonnement sonore, etc.). C'est l'inverse avec le contrôle actif modal qui ne nécessite que la connaissance des modes de vibration de la table d'harmonie. Un modèle physique complet de l'instrument n'est pas nécessaire pour que le son rayonné par l'instrument soit réaliste car les

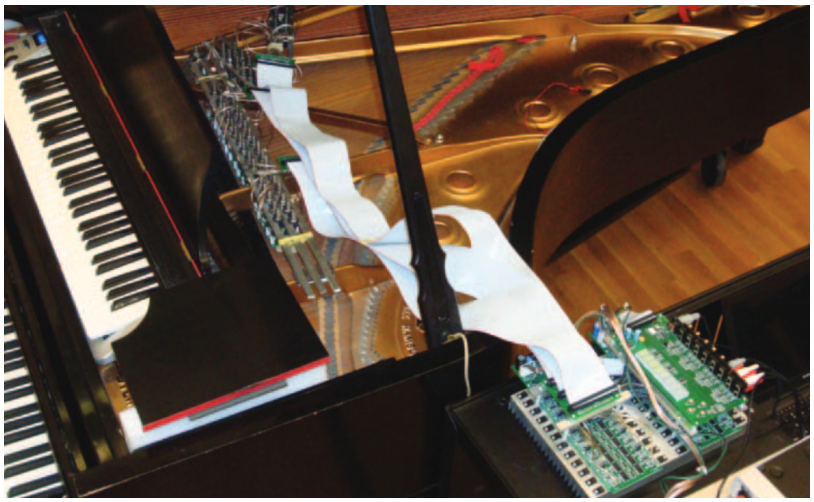


Figure 2.3.11 : Montage expérimental du piano à résonateur magnétique dans un piano à queue de concert Steinway D [McP10].

modifications sont effectuées sur la table d'harmonie. Le son est donc émis directement par l'instrument, ce dernier étant toujours jouable.

Les modes peuvent ainsi être contrôlés à partir d'un contrôle interne placé dans ou sur la structure vibrante. Certains prototypes proposant ce type de contrôle actif ont été commercialisés récemment. Le système Hyvibe[2] permet par exemple de moduler le son d'une guitare à partir de pots vibrants installés sur la table d'harmonie de l'instrument. Il est ainsi possible de rajouter des effets ou de créer des boucles sonores sans utiliser de haut-parleur. Le rayonnement sonore de la guitare reste ainsi "naturel".

2.3.3.2 Percussions

Boutin modifie les résonances d'un xylophone à partir d'un contrôle actif en 2015 [BBP15]. Le contrôle modifie la vibration de la structure avec des actuateurs piézoélectriques. Cela est effectué en modifiant les pics de résonance d'une barre de xylophone, dont la fonction de transfert est une superposition de trois modes propres de flexion. Le premier pic de résonance est en outre décalé d'un demi-ton au maximum. Cette méthode permet à l'interprète d'ajuster le degré de modification appliqué par le contrôleur aux résonances de la structure.

Un gong d'opéra chinois avec des non-linéarités géométriques a été étudié expérimentalement par Jossic *et al.* [Jos+17]. La mise en place d'un contrôle permet de modifier l'amortissement du mode fondamental de la structure. Cette méthode donne de bons résultats pour des régimes à petites amplitudes une fois que la fréquence instantanée du mode atteint une gamme de fréquence stabilisée (Figure 2.3.12).

Plus généralement, Jossic développe dans sa thèse de doctorat un contrôleur prenant en compte les non-linéarités présentes dans le comportement du gong [Jos18]. Parmi les différents phénomènes provenant de non-linéarités géométriques, un glissement fréquentiel est mis en avant sur plusieurs modes de vibration. D'autres non-linéarités ont été également étudiées comme la distorsion harmonique ou les résonances internes. L'interaction entre les résonances internes et le phénomène de glissement fréquentiel est étudiée expérimentalement en régime libre, permettant le développement d'un modèle d'ordre réduit pour décrire le mode fondamental de l'instrument.

[2]Système Hyvibe - www.hyvibeguitar.com (2022).

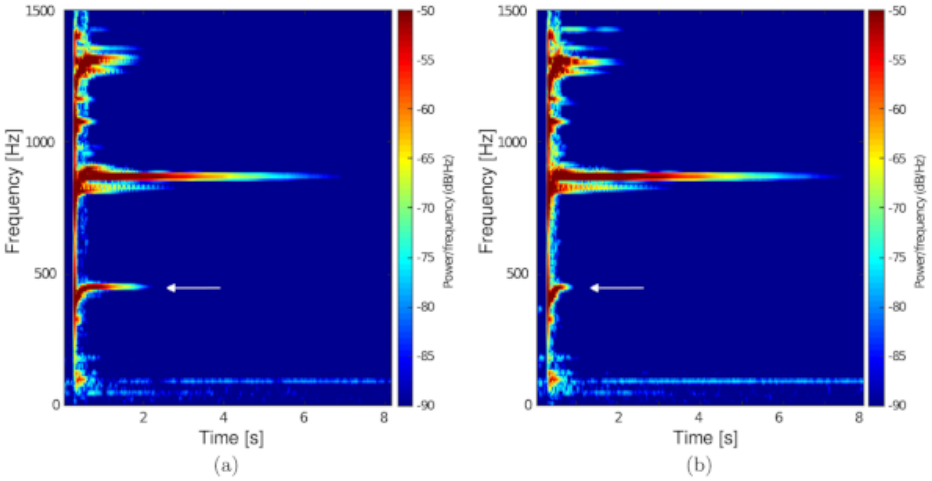


Figure 2.3.12 : Spectrogramme du son du gong d'opéra chinois lorsqu'il est frappé avec un maillet à un angle de 63° dans le cas (a) sans contrôle et (b) avec contrôle basé sur une augmentation de 200 % du taux d'amortissement du mode fondamental à 449 Hz (localisé par la flèche blanche) [Jos+17].

En 2020 et 2021, Wijnand *et al.* proposent une application du contrôle actif des instruments de percussion [Wij+20 ; Wij21]. Une loi de contrôle du courant d'un haut-parleur modifiant les fréquences de plusieurs modes d'une membrane de tom est proposée. La loi de contrôle est testée numériquement sur un modèle contenant un nombre fini de modes, cette mesure étant souvent difficile à réaliser en pratique. Un dispositif d'observation est conçu pour modifier les fréquences des N modes de vibration d'une membrane de tom, en utilisant uniquement une mesure de la pression à l'intérieur de la cavité du tambour. Lors de sa thèse, Wijnand utilise le système de contrôle *Coala* développé à l'IRCAM [CM18] permettant notamment d'effectuer un contrôle modal d'instruments de musique avec une latence d'environ 50-100 μs selon la complexité du calcul.

2.3.3.3 Vents

Un état de l'art est premièrement fait autour de contrôles actifs effectués sur les instruments de la famille des bois. L'état de la recherche autour du contrôle actif des cuivres est finalement rappelé.

Bois

L'approche du contrôle optimal présenté par Nelson [Nel+87] a été mise en œuvre dans la création d'une flûte contrôlée activement par Jean Guérard dans le cadre de son doctorat [Gué98]. La Figure 2.3.13 montre le dispositif expérimental composé de cinq microphones montés dans les parois d'un tube cylindrique. Cela permet de mesurer séparément les ondes aller et retour du tube (comme dans [Mel+12]). Un signal approprié envoyé au haut-parleur de contrôle permet d'annuler l'onde réfléchie, le comportement acoustique du cylindre ressemblant alors à celui d'un tube infiniment long. La flûte peut dans ce cas jouer par l'ajout de filtres numériques utilisés pour reproduire les fonctions de réflexion correspondant à différents modèles de trous ouverts et fermés sur une vraie flûte.

En 2014, Meurisse *et al.* simulent un contrôle actif modal sur les auto-oscillations générées par une clarinette simplifiée [Meu+14] (Figure 2.3.14). Un modèle espace-état est alors développé pour décrire le comportement auto-oscillant du tube. Ce contrôle permet d'ajuster l'amortissement et la fréquence de résonance du système. Cela a pour impact de modifier la hauteur du son produit par l'instrument, l'amplitude des harmoniques du son et le seuil d'oscillation. Le contrôle entraîne néanmoins des modifications involontaires des amplitudes des résonances non contrôlées. L'augmentation de la fréquence et/ou de l'amortissement de la première résonance a parfois en outre entraîné une réduction de son

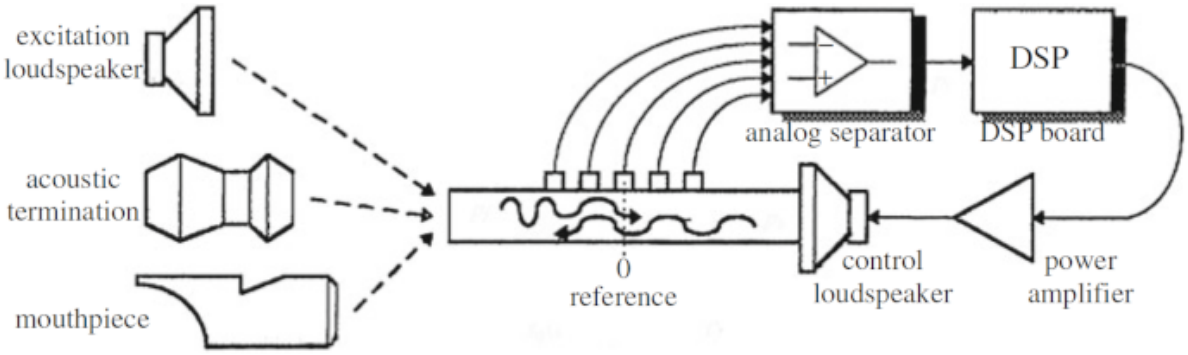


Figure 2.3.13 : Montage expérimental pour le contrôle actif d'une flûte [Gué98].

amplitude, ceci conduisant à un changement de registre de la note produite. Cet effet est le même que celui résultant de l'ouverture d'un trou de registre dans un instrument à vent réel.

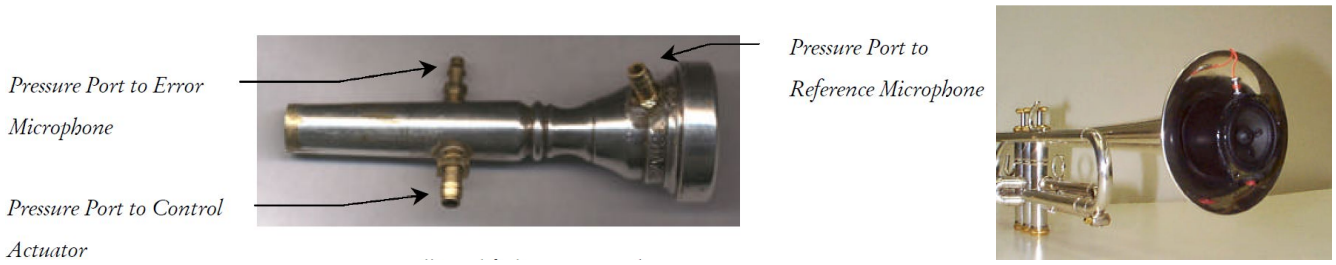
Figure 2.3.14 : Un tube cylindrique relié en entrée à un bec de clarinette basse avec une anche permet de reproduire le comportement d'une clarinette basse simplifiée (haut). Ce tube est équipé d'un système de contrôle composé d'un microphone et d'un haut-parleur (vue détaillée dans le coin haut droit). Le montage est schématisé en bas [Meu+14 ; Meu14].

Buys *et al.* tentent de créer un instrument à vent hybride en utilisant un haut-parleur pour exciter un tube cylindrique [BSL17]. Les résultats montrent que les techniques de contrôle au niveau de l'embouchure conservent la pression de fermeture et les seuils d'oscillation. L'interaction entre le haut-parleur et le tube est compensée par un filtre à rétroaction (feedback) tandis que la réponse du haut-parleur est corrigée par un filtre à action directe. Cependant, la gamme dynamique de l'instrument hybride est limitée par les seuils de bruit et de saturation introduits par le système de contrôle. Le bruit commence à dominer le son produit par l'instrument hybride en dessous de 12 Pa. En revanche, au-dessus de 300 Pa, le son commence à saturer. Une autre limite du prototype est qu'une oscillation instable apparaît lorsque la pression dans l'embouchure devient trop élevée, ce qui altère le timbre produit (le son n'est plus celui attendu pour une clarinette). Cette altération n'est observée ni dans les simulations ni sur un instrument réel.

Cuivres

Dans le cadre de ses études, Pickett tente d'appliquer plusieurs méthodes de contrôle actif sur une trompette [Pic98]. Un premier contrôle consiste à capter le son et le contrôler au niveau de l'embouchure (Figure 2.3.15a). Un second contrôle est cette fois externe à l'instrument de musique : la source secondaire

est placée proche du pavillon devant l'instrument (Figure 2.3.15b). Un contrôle est ainsi possible mais seulement théoriquement. La limite technologique de ce travail se situe au niveau de la capacité pour le haut-parleur à produire un débit suffisant. Celui-ci doit pouvoir générer un débit capable de maitriser celui produit à l'intérieur de la trompette pour le premier contrôle. Il en est de même pour le contrôle externe à l'instrument où le haut-parleur est de surcroit trop lourd.



(a) (b)

Figure 2.3.15 : Embouchure modifiée d'une trompette pour un contrôle actif interne (a) et haut-parleur suspendu devant le pavillon de la trompette pour un contrôle externe à l'instrument [Pic98] (b).

Plus récemment, Ayrault *et al.* ont réalisé une étude portant sur l'effet d'un contrôle actif sur le rayonnement d'un guide d'ondes [Ayr+16]. L'objectif est cette fois de réduire la puissance rayonnée par un contrôle actif avec deux sources secondaires situées à l'extérieur de l'instrument. L'impact sur la puissance rayonnée, sur la directivité ainsi que sur l'impédance d'entrée est analysé. L'étude théorique montre que la directivité peut être modifiée en ajoutant un retard temporel aux sources secondaires. Cela vient cependant impacter et réduire fortement l'atténuation en puissance souhaitée. La sourdine active a une influence significative mais assez légère sur l'impédance d'entrée de l'instrument en décalant le pic d'une dizaine de cents vers les hautes fréquences et en augmentant l'amplitude de l'impédance d'environ 1 dB (Figure 2.3.16).

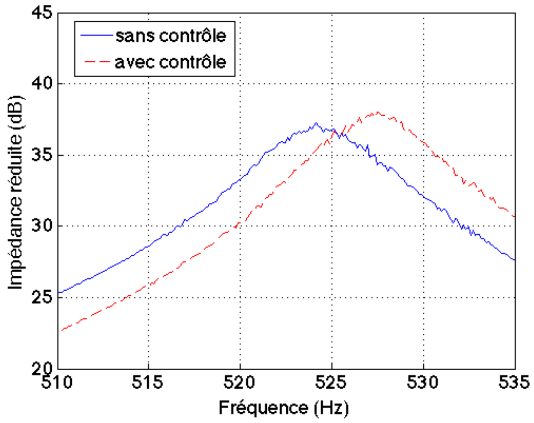
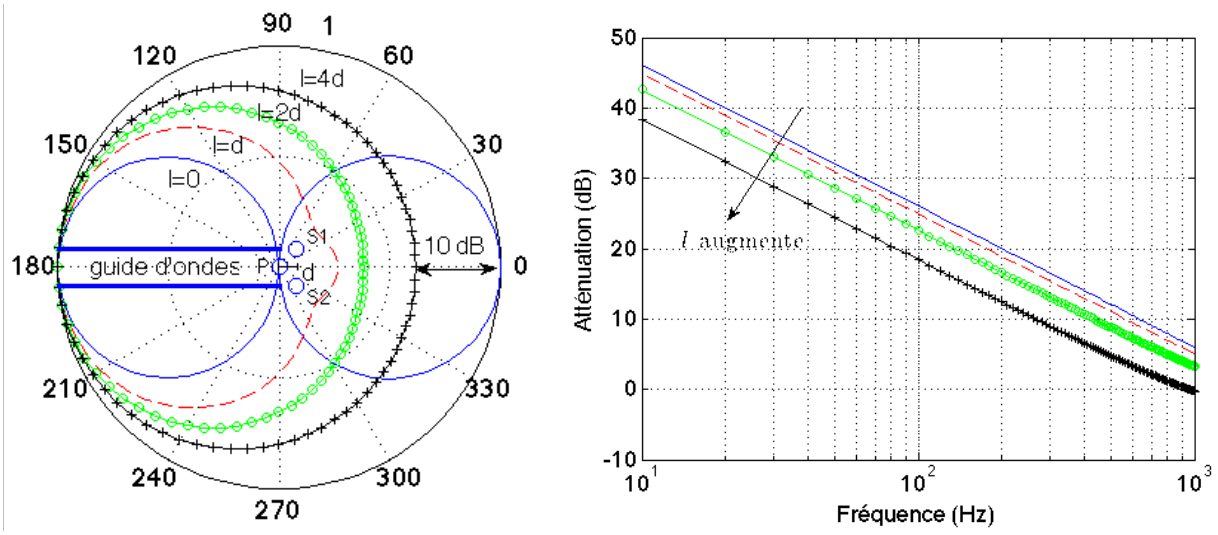


Figure 2.3.16 : Troisième pic de résonance de l'impédance d'entrée d'un guide d'onde cylindrique avec et sans contrôle par deux sources secondaires [Ayr+16].

La synthèse proposée ci-dessus présente un grand nombre de manière d'effectuer un contrôle actif sur les instruments de musique. Cela permet de créer de nouveaux instruments ou de rendre hybrides d'autres instruments. Le contrôle actif permet d'atténuer ou d'amplifier une bande de fréquence choisie et ainsi faciliter le jeu du musicien. La majorité des contrôles sont cependant internes, ce qui nécessite une implémentation du système de contrôle sur ou dans l'instrument, alors que très peu de contrôles sont externes à celui-ci.

Ayrault *et al.* étudient ensuite le contrôle d'un guide d'onde en ajoutant un retard $\delta t = \frac{l}{c}$ (avec l la distance choisie) au signal de la source secondaire. Ceci permet de faire varier à la fois la directivité

(Figure 2.3.17a) et l'atténuation en puissance (Figure 2.3.17b) du champ rayonné par la source primaire [Ayr+16].



(a) (b)

Figure 2.3.17 : Directivité (a) et atténuation de la puissance (b) théoriques du champ acoustique rayonné par une source primaire ponctuelle contrôlée par deux sources secondaires ponctuelles pour plusieurs retards (d étant la distance entre la source primaire et le centre du cercle des sources secondaires) [Ayr+16].

Sans retard (Figure 2.3.17a), la directivité du champ rayonné possède une forme dipolaire. Lorsque le retard ajouté correspond au temps de vol (sur l'axe horizontal) entre la source primaire et la source secondaire, la directivité obtenue est cardioïde. Ensuite, la directivité devient supercardioïde lorsque le retard augmente et l'atténuation en puissance diminue (Figure 2.3.17b). S'il est nécessaire de modifier à la fois la directivité et le niveau sonore, un compromis est alors à trouver entre la modification de la directivité et l'atténuation en puissance.

2.4 Conclusion

L'objectif de cette thèse est de concevoir un système de contrôle actif modifiant le rayonnement sonore du trombone. Sa contribution est plus étendue qu'une sourdine passive classique : en plus de réduire la puissance de l'instrument sans modifier la façon de jouer du musicien (donc l'impédance d'entrée), le système doit également pouvoir modifier la directivité de l'instrument et par exemple diriger le rayonnement acoustique vers le musicien. L'état de l'art effectué ci-dessus montre que la technologie concernant le contrôle actif connait un intérêt certain et une vitesse de développement accrue depuis 30 ans. Il est alors envisageable de concevoir un tel système de contrôle au regard des possibilités technologiques actuelles. Toutefois, peu de contrôles externes aux instruments de musique ont été développés. Les contrôles proposés sont essentiellement internes et contrôlent les modes de l'instrument. L'objectif de chaque contrôle est différent :

- un contrôle interne modifie le fonctionnement intrinsèque de la source,
- un contrôle externe modifie le rayonnement de la source et influence éventuellement le fonctionnement de la source.

La source primaire à contrôler (ici le trombone) produit un fort niveau sonore dont le rayonnement est considéré comme omnidirectionnel aux basses fréquences. Insérer une sourdine dans le pavillon de l'instrument provoque un décalage des pics de l'impédance d'entrée de l'instrument et crée un pic parasite aux basses fréquences. Un contrôle externe permettrait d'avoir une faible influence sur l'impédance d'entrée de l'instrument de musique [Ayr+16]. Dans ce cas, les sources secondaires ne doivent cependant pas être séparées d'une distance de plus d'une demi-longueur d'onde de la source primaire pour développer un contrôle externe efficace, ce qui limitera son efficacité en haute fréquence.

Afin de réaliser un tel contrôle, il est nécessaire de bien connaître la source primaire, en particulier le débit du trombone, la position de son centre acoustique équivalent et sa directivité. Le chapitre suivant a pour objet de compléter l'état de l'art existant.

Chapitre 3

Caractérisation de la source primaire

Dans ce chapitre, la source primaire (trombone) est caractérisée expérimentalement pour préparer le travail présenté par la suite. L'objectif est de déterminer le débit produit par le trombone en sortie de pavillon. Cette grandeur, peu étudiée dans la recherche autour des instruments de type cuivre, permet d'estimer la faisabilité technologique du contrôle actif (aux Sections 4.5 et 5.4). Il est nécessaire en outre de connaitre la position du monopôle équivalent de la source primaire afin d'étudier les différents contrôles actifs développés aux Chapitres 4 et 5.

3.1 Estimation du débit

La puissance acoustique rayonnée par le trombone a été étudiée par Miśkiewicz [MR94] et Weinzierl [Wei+18]. Les résultats obtenus montrent que pour un trombone ténor, la puissance moyenne mesurée à la nuance pianissimo est de 82 dB SWL (65 dBSPL à 1 m en moyenne) alors qu'elle est de 112 dB SWL (95 dBSPL à 1 m en moyenne) lorsque le trombone est joué à la nuance fortissimo (en moyenne pour plusieurs notes jouées entre Ré2 ($f = 73$ Hz) et La4 ($f = 440$ Hz)). Pour un trombone basse, la valeur minimale mesurée est $L_W = 72$ dB SWL (55 dBSPL à 1 m en moyenne) et la valeur maximale atteinte est $L_W = 112$ dB SWL. Le débit produit au niveau du pavillon du trombone n'a cependant jamais été étudié.

Le débit du trombone q_0 est estimé expérimentalement à partir d'une mesure en situation de jeu réel avec un musicien [Cav+19a]. La source équivalente au trombone est alors considérée comme un monopôle comme l'illustre la Figure 3.1.1.

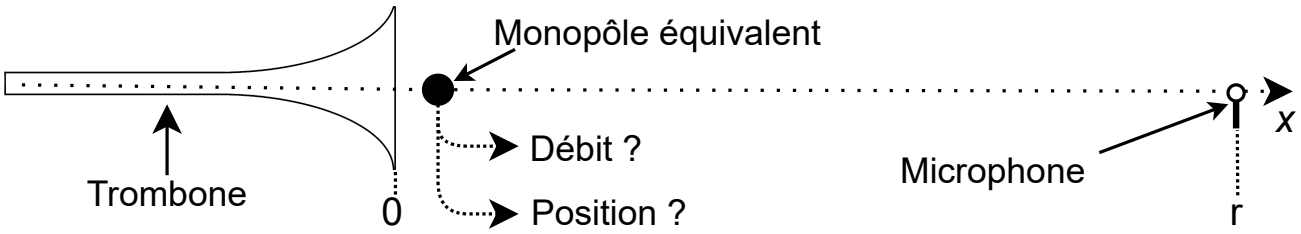


Figure 3.1.1 : Schéma de principe pour la mesure du débit du trombone, considéré comme une source ponctuelle. Sa position et son débit sont estimés en fonction de la fréquence.

Sachant que le trombone est omnidirectionnel au moins jusqu'à 500 Hz [ELS14], la pression $\boldsymbol{p_0}$ rayonnée aux positions $\boldsymbol{r}$ par la source primaire de débit $\boldsymbol{q_0}$ peut être exprimée comme :

$$\boldsymbol{p_0} = \boldsymbol{g_0} q_0, \tag{3.1}$$

où :

$$g_0(\boldsymbol{r}) = \frac{jk\rho c\ e^{-jk(r-r_0)}}{4\pi(r-r_0)}, \tag{3.2}$$

avec ρ la masse volumique de l'air, r la distance entre le point d'observation et le pavillon du trombone et r_0 la position du centre acoustique du monopôle équivalent ($\boldsymbol{g_0}$ est un vecteur contenant les valeurs de g_0 évaluées à chaque point d'observation où est mesurée la pression).

L'évolution du module de la pression rayonnée étant inversement proportionnelle à la distance, le débit de la source primaire est estimé par une minimisation au sens des moindres carrés à partir de :

$$q_0 = \boldsymbol{g_0}^{+}\boldsymbol{p_0}, \tag{3.3}$$

où le pseudo-inverse (exposant $+$) du vecteur $\boldsymbol{g_0}$ se résout par :

$$\boldsymbol{g_0}^{+} = [\boldsymbol{g_0}^{H}\boldsymbol{g_0}]^{-1}\boldsymbol{g_0}^{H}. \tag{3.4}$$

et l'exposant "H" est la transposée hermitienne (complexe conjugué) du vecteur.

Le propagateur $\boldsymbol{g_0}$ est donné par l'Équation (3.2), la pression rayonnée par l'instrument de musique est mesurée en plusieurs points d'observation dans l'axe du pavillon.

3.1.1 Protocole expérimental

Une mesure de la pression rayonnée par un trombone tenor est mise en place. Cette mesure permet d'estimer le débit q_0 pour chaque harmonique des 19 notes jouées par un tromboniste. Ces notes jouées à une nuance *fortissimo* englobent l'ensemble des notes du registre d'un trombone tenor (c'est-à-dire la gamme diatonique jouée sur deux octaves de Fa2 ($f_0 = 87$ Hz) à Fa4 ($f_0 = 348$ Hz), Si$_\flat$1 ($f_0 = 58$ Hz), et les quatre notes Si$_\flat$2 ($f_0 = 117$ Hz), Si$_\flat$3 ($f_0 = 233$ Hz) et Si$_\flat$4 ($f_0 = 466$ Hz)). La pression rayonnée est dans un premier temps mesurée par 12 microphones (Bruel & Kjaer, 1/4" [BK22]) positionnés logarithmiquement dans l'axe de l'instrument sur 4 m (Figure 3.1.2, longueur maximale de la chambre sourde). Les microphones fixés sur une fine barre de métal sont placés dans l'axe principal de propagation du rayonnement du trombone (à [0.20 ;0.33 ;0.5 ;0.75 ;1.00 ;1.25 ;1.50 ;1.75 ;2.00 ;2.50 ;3.00 ;3.50] m depuis la bouche du pavillon).

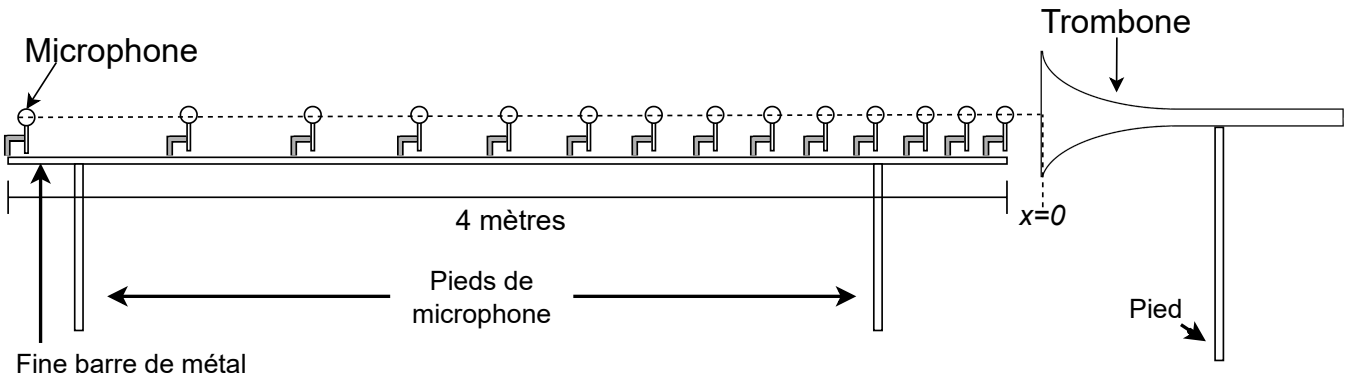


Figure 3.1.2 : Schéma de principe de la mesure : les microphones sont arrangés de manière logarithmique pour minimiser l'erreur sur l'estimation du débit (calculée à partir de la mesure de la décroissance logarithmique du niveau sonore en fonction de la distance).

L'expérience se déroule dans une chambre sourde pour minimiser la réflexion des parois ou de tout autre objet et de disposer d'un rapport signal/bruit important. La fréquence de coupure de la salle est estimée à 150 Hz. En dessous de cette fréquence, la pression mesurée est impactée par les modes de salle. L'analyse se concentre sur les 6 premiers harmoniques du signal pour étudier les notes jouées par le trombone entre 150 et 2736 Hz (gamme de fréquence étudiée par la suite lors de l'étude du contrôle actif).

Le support des microphones (pieds, fine barre de métal et pinces sur la Figure 3.1.2) possède un diamètre suffisamment petit pour supposer que la diffraction est négligeable dans la gamme de fréquences étudiée (voir Figure 3.1.3). Le trombone est placé sur un support afin qu'il soit colinéaire avec la ligne de microphones. Ce support est réglable sur les 3 axes afin d'ajuster la position de l'instrument. Ce dernier est tenu par la main et l'épaule du musicien assis sur un tabouret. Le trombone n'est pas totalement fixé afin que le musicien puisse jouer aisément. La coulisse de l'instrument étant posée sur un trépied, le musicien peut incliner le trombone de haut en bas et de gauche à droite.

Figure 3.1.3 : Le musicien tient le trombone simplement posé sur un trépied. L'inclinaison de l'instrument est vérifiée sur les 3 axes pour que le trombone soit dirigé dans l'axe des microphones.

Le spectre de la pression rayonnée par le trombone est affiché sur la Figure 3.1.4 lorsque la note $\text{Si}_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) est jouée. La valeur du module du pic de pression est mesurée pour les 40 premiers harmoniques de la note qui contiennent la majeure partie de l'énergie du signal. Le niveau maximal mesuré dans l'axe ne dépasse pas 110 dBSPL pleine bande à 1 m.

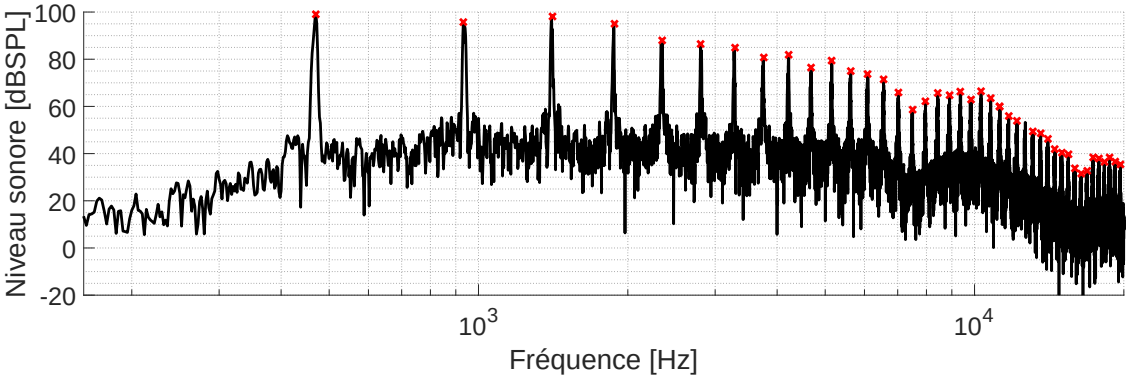


Figure 3.1.4 : Spectre de la note $\text{Si}_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) à 1 m avec un niveau d'entrée *fortissimo*. Les croix rouges matérialisent l'estimation d'amplitude pour chaque harmonique.

Pour valider le modèle de la décroissance du niveau sonore en fonction de la distance (Équation (3.1)),

l'évolution du module de la pression en fonction de la distance est montrée sur la Figure 3.1.5 pour les six premiers harmoniques de la note $\text{Si}_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz).

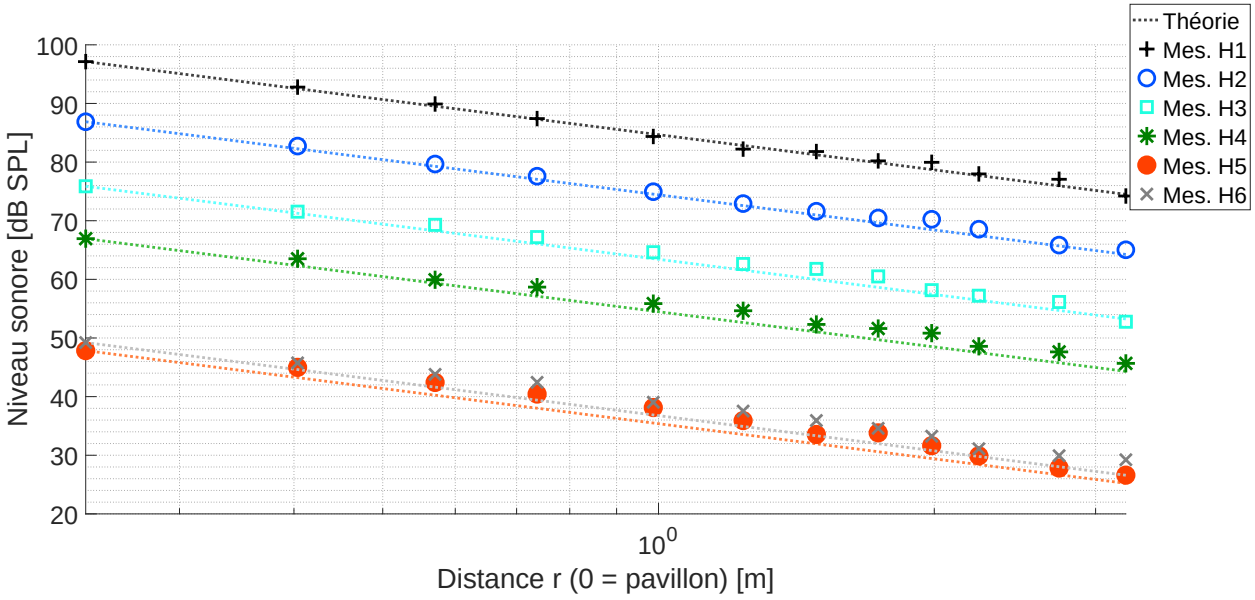


Figure 3.1.5 : Mesure de la décroissance du niveau sonore en fonction de la distance pour les six premiers harmoniques H1 à H6 de la note $\text{Si}_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) avec 12 microphones placés de 0.20 m à 3.5 m. Les lignes pointillées représentent le niveau de pression sonore théorique $L_p = L_{p0} - 20\log(r)$ avec L_{p0} le niveau sonore à 0.2 m du trombone.

La décroissance du niveau sonore en fonction de la distance montre quelques fluctuations (Figure 3.1.5), notamment pour la pression mesurée par les 6 microphones les plus éloignées de la source primaire. Ceux-ci sont trop influencés par les réflexions dans la salle et ne peuvent donc pas être pris en compte. Ces perturbations sont dues à la grille au sol (provoquant des vibrations, des diffractions et des réflexions) utilisée comme plancher pour le musicien et permettant de placer les microphones. Les réflexions et diffractions proviennent aux basses fréquences des dièdres formant les murs de la salle et aux moyennes fréquences des lampes placées au plafond. Il est également considéré que les récepteurs doivent être positionnés à au moins $d = 4a^2/\lambda$ [Foo14], avec a le rayon du piston et $\lambda = c/f$, soit $d = \frac{c}{2\pi f_{\text{min}}} \simeq 0.36$ m (avec $f_{\text{min}} \simeq 150$ Hz la fréquence de coupure de la chambre anéchoïque dépassant la plus basse fréquence fondamentale du trombone) pour être en champ libre. Deux microphones (placés à 0.20 et 0.33 m) sont donc trop proches du pavillon. Il est donc choisi d'utiliser 5 microphones placés entre 0.5 et 1.5 m de la source pour estimer le débit.

3.1.2 Résultats

Les résultats d'estimation du débit affichés sur la Figure 3.1.6 donnent un aperçu du comportement du trombone pour un niveau d'entrée élevé (*fortissimo*) : le débit maximal pour un harmonique atteint environ $q_0 \simeq 5.10^{-3}$ m^3.s^{-1} vers 400 Hz pour décroitre ensuite avec la fréquence (10^{-6} à 10 kHz). La puissance acoustique correspondante à 400 Hz est $L_W = 103$ dB SWL (avec $L_W = 10\log(W/10^{-12})$ et $W = \frac{\rho c q_0^2 k^2}{8\pi}$). Il est important de noter que q_0 est évalué en faisant l'hypothèse que $r_0 = 0$ (monopôle équivalent placé dans le plan du pavillon). Le débit q_0 varie au maximum de ± 10 % si r_0 varie entre -20 et 20 cm. En outre, la valeur du débit est potentiellement sur-estimée aux hautes fréquences où le modèle monopolaire n'est plus adéquat pour le rayonnement directif du trombone (présenté en Section 2.1).

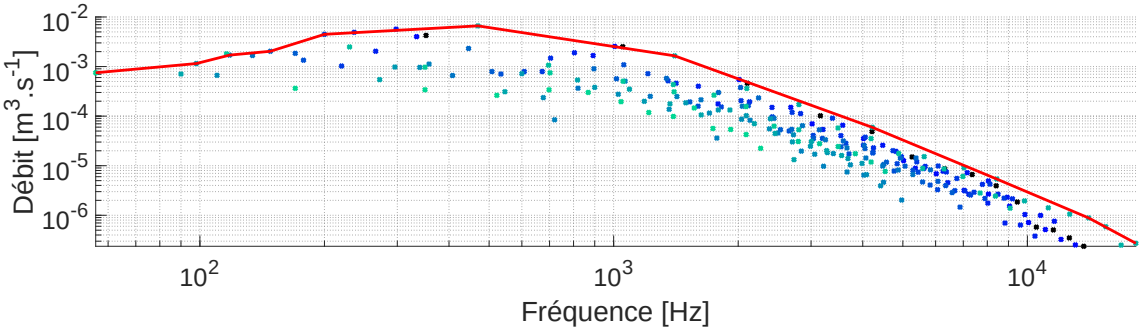


Figure 3.1.6 : Enveloppe du débit maximal du trombone (ligne continue) des 6 premiers harmoniques de 19 notes (points en couleurs).

L'estimation du débit est nécessaire pour évaluer les limites électroacoustiques de chaque haut-parleur de contrôle en fonction de la note et du niveau sonore produit par le trombone. Plus le débit de la source primaire est élevé, plus la puissance électrique à imposer aux haut-parleurs de contrôle augmente [Nel+87]. Il est en outre nécessaire de connaître la position du monopôle équivalent au trombone en fonction de la fréquence, la théorie présentée au Chapitre 4 faisant l'hypothèse que les sources utilisées pour le contrôle actif sont assimilables à des monopôles.

3.2 Estimation du centre acoustique

La détermination et la mesure du centre acoustique d'une source est sujet à de nombreuses études depuis plus de 50 ans. Ando démontre qu'il est possible de mesurer la position du centre acoustique d'un haut-parleur monté dans un cylindre [And68]. Deux microphones placés devant le système sonore permettent de déduire la position du centre acoustique en comparant la propagation théorique d'un monopôle au déphasage mesuré entre les 2 récepteurs. Effectuer une minimisation au sens des moindres carrés entre la pression mesurée et la pression théorique en fonction de la distance est la méthode principalement utilisée pour estimer la position du centre acoustique d'une source.

Il est en outre important de connaitre la position du centre acoustique des microphones lors de mesures expérimentales. Barrera-Figueroa, Rasmussen et Jacobsen proposent une méthode pour estimer le centre acoustique de microphones de laboratoire [BRJ06]. Une paire de microphones est étudiée numériquement et expérimentalement et permet d'émettre et de recevoir un signal de type sinus glissant. La mesure de l'impédance de transfert électrique de cette paire de microphones à quatre distances différentes permet de déduire la position du centre acoustique du récepteur. Celle-ci est estimée par une méthode des moindres carrés appliquée à l'évolution de la pression en fonction de la distance. L'estimation résultante étant perturbée par des réflexions dans la salle, les auteurs proposent une méthode pour négliger ces réflexions lors de la mesure à partir d'une fenêtre de sélection temporelle de "Tukey". L'estimation de la position du centre acoustique s'effectue donc sur un signal ne dépassant pas 2 ms. La Figure 3.2.1 montre que cette technique permet d'obtenir un résultat plus lisse et précis (ligne continue) de la position du centre acoustique du microphone qu'à l'origine (pointillés).

La position du centre acoustique peut également être mesurée pour un instrument de musique (Figure 3.2.2a) par une décomposition en harmoniques sphériques à l'aide d'une sphère de microphones [SV15 ; SV16 ; Sha+17]. La pression étant mesurée en 3 dimensions, une position optimale de la source est estimée en minimisant l'erreur entre la pression issue d'un modèle monopolaire et la pression mesurée. L'auteur trouve que pour une trompette, la source équivalente se situe proche du pavillon quelque soit la fréquence. La méthode n'est cependant pas assez précise pour pouvoir conclure sur la position du centre

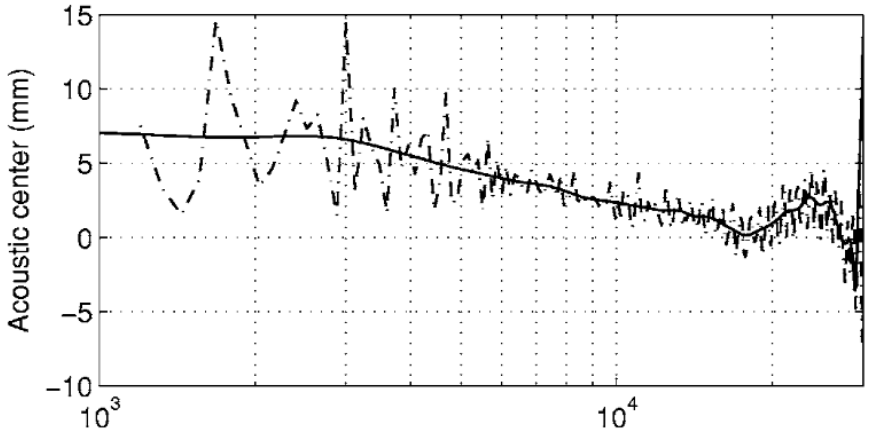
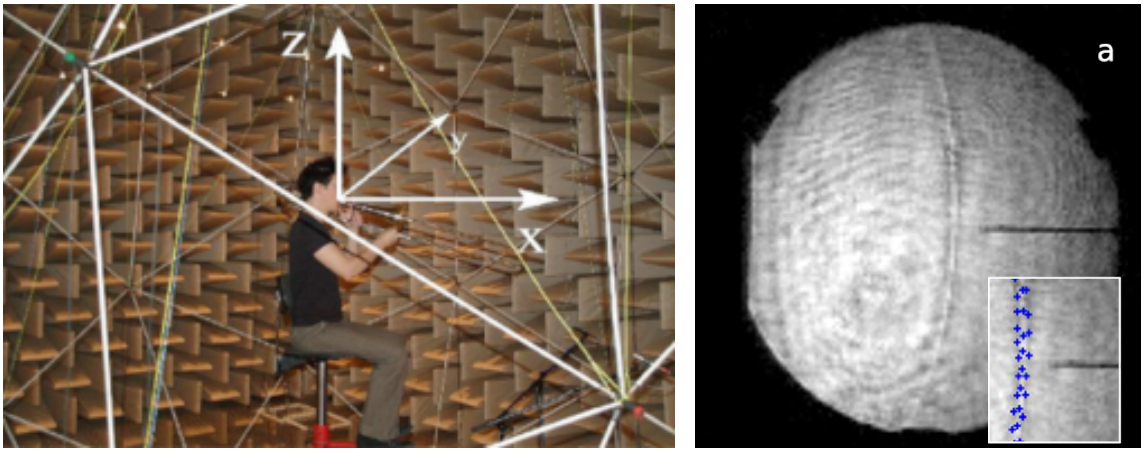


Figure 3.2.1 : Comparaison entre les estimations traitées (ligne continue) et brutes (pointillés) de la position du centre acoustique en fonction de la fréquence pour le microphone Bruel & Kjaer 4160 [BRJ06].

acoustique. Celle-ci est de plus en plus difficile à prédire lorsque la fréquence augmente (les auteurs trouvent une différence de 7 cm en comparant deux méthodes de minimisation à 700 Hz).

La position du centre acoustique du trombone pourrait en outre être déterminée expérimentalement à l'aide de la méthode proposée par [Ren+18] pour la caractérisation du rayonnement de la trompette (Figure 3.2.2b). Pour 3 fréquences testées, Rendón *et al.* estiment que la position de celui-ci se décale vers l'intérieur du pavillon de la trompette à mesure que la fréquence du son joué augmente.



(a) (b)

Figure 3.2.2 : Prise microphonique sphérique de l'onde rayonnée par un trombone basse [SV16] (a) et image de Schlieren d'une onde de choc rayonnée par une trompette [Ren+18]. Le pavillon de ce dernier est sur la gauche avec une sonde à droite (b).

Les différentes recherches montrent que la position du centre acoustique varie avec la fréquence. Les différents articles ne s'accordent cependant pas sur l'évolution de la position en fonction de la fréquence : celle-ci tend à rentrer dans le pavillon de l'instrument à mesure que la fréquence augmente dans [Ren+18] alors qu'elle stagne autour du pavillon dans [SV15 ; Sha+17] pour une trompette. La section suivante présente l'estimation du centre acoustique du trombone réalisée dans le cadre de cette thèse, pour les pour les 6 premiers harmoniques de plusieurs notes.

3.2.1 Résultats

La pression rayonnée par le trombone est mesurée par 12 microphones positionnés dans l'axe de l'instrument sur 4 mètres. Le protocole expérimental est le même que celui présenté en Section 3.1.1

pour la mesure du débit du trombone. Cette mesure permet d'estimer le centre acoustique r_0 pour chaque harmonique d'un ensemble de notes jouées dans le registre de jeu usuel (de $B_\flat 1$ à $B_\flat 4$). Chaque note est jouée crescendo afin de pouvoir évaluer la position du centre acoustique en fonction de la dynamique de l'instrument. Cette mesure n'est pas l'objectif premier de la thèse. La méthode utilisée est simple et n'utilise que des microphones situés devant et dans l'axe du trombone. Cela permet d'obtenir une première estimation de la position du centre acoustique du trombone en fonction de la fréquence.

La position optimale du centre acoustique est définie en minimisant l'erreur entre la pression définie par l'Équation (3.1) pour un tirage linéaire de 1000 positions de r_0 entre -15 cm et $+10$ cm et la pression mesurée (Figure 3.2.3).

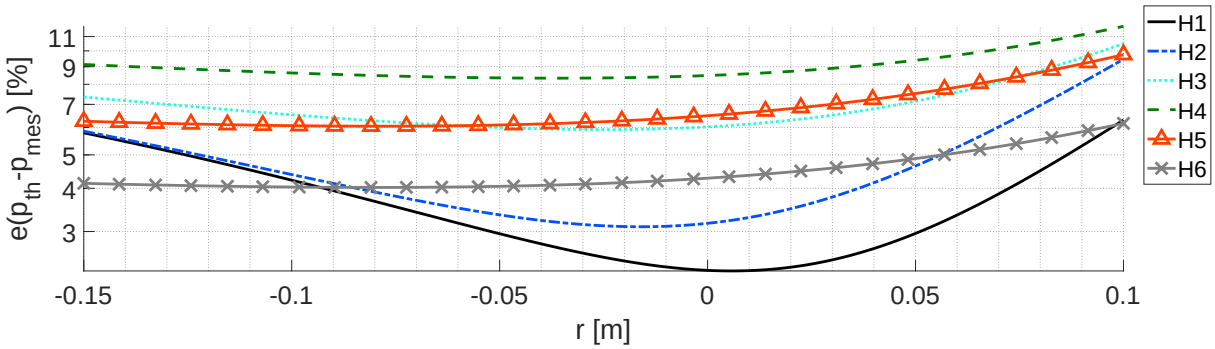


Figure 3.2.3 : Erreur entre la pression théorique p_{th} (Équation (3.1)) et la pression mesurée p_{mes} pour les 6 premiers harmoniques de la note $Si_\flat 3$ ($f = 466$ Hz) en fonction de la position r issue du modèle théorique.

Le débit du trombone q_0 est alors représenté en fonction de son centre acoustique r_0 sur la Figure 3.2.4 pour la note $Si_\flat 3$ ($f = 466$ Hz). Pour chaque point, les incertitudes sur le débit et le centre acoustique sont définies comme deux fois l'écart-type calculé sur 4 échantillons de mesure pour la même note et le même niveau sonore.

Chaque position de centre acoustique est à priori comprise entre -10 et 2 cm. Le centre acoustique du trombone se rapproche de l'embouchure à mesure que la fréquence augmente comme cela a été montré pour une trompette par Rendón et al. [Ren+18]. Pour la note $Si_\flat 3$ ($f = 466$ Hz), la source primaire se situe donc sur une bande de 12 cm de longueur. La position du centre acoustique est montrée pour la note $Si_\flat 2$ ($f = 233$ Hz) par la Figure A.1.1 en annexe A. Les résultats sont plus resserrés autour vers 0 cm que pour la note $Si_\flat 3$ ($f = 466$ Hz), la source primaire étant alors proche du pavillon aux basses fréquences. La position du centre acoustique est sensiblement au même endroit entre les harmoniques 2 et 3. La position du centre acoustique pour les notes dont la fondamentale est inférieure à 150 Hz (en-dessous de la fréquence de coupure basse de la chambre sourde) ne sont pas montrées.

Les incertitudes atteignant au maximum ± 2 cm montrent que ces résultats sont à prendre avec beaucoup de précaution. Comme discuté dans la Section 3.1.2, les microphones ne peuvent ni être trop proches, ni trop loin de la source primaire lors de la mesure en salle anéchoïque (pour ne pas être en champ proche et pour avoir un rapport signal/bruit suffisant). Le nombre de microphones devant le trombone est alors réduit à seulement 5 microphones. Il apparait ensuite que plusieurs réflexions dans la salle ne permettent pas d'obtenir une décroissance du niveau sonore parfaitement similaire au modèle en $1/r$. Il conviendrait alors d'effectuer une nouvelle mesure en plaçant par exemple des microphones tout autour du trombone (et pas seulement devant ce dernier) pour diminuer les incertitudes de mesure (comme présenté dans [SV15], Figure 3.2.2a). Au vu des dimensions de la chambre anéchoïque, il est néanmoins

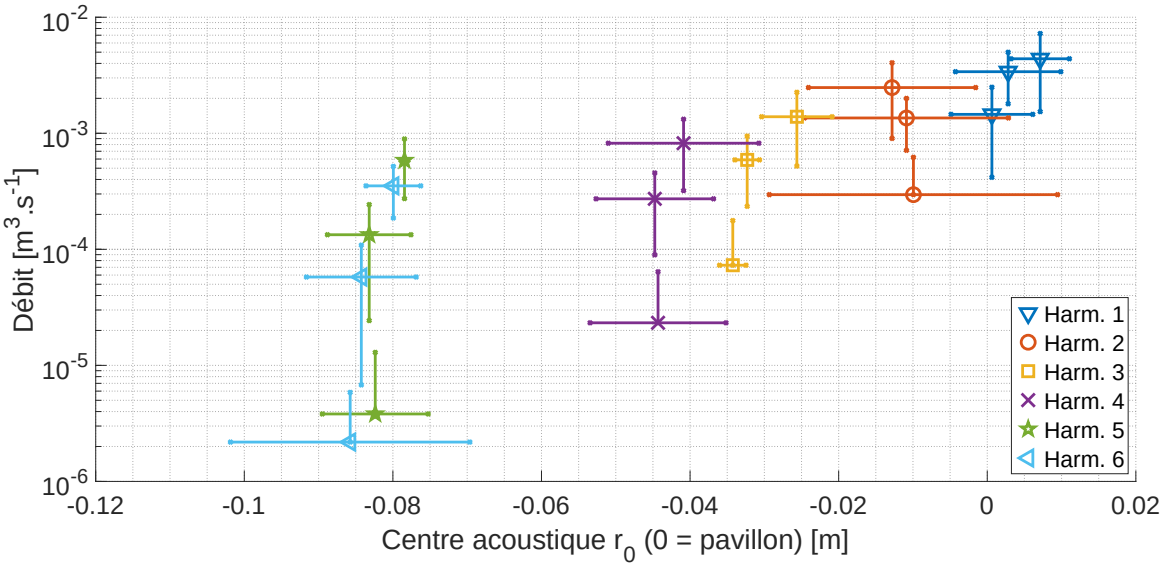


Figure 3.2.4 : Débit du trombone q_0 en fonction du centre acoustique r_0 pour les 6 premiers harmoniques de la note $Si_\flat 3$ ($f = 466$ Hz) et pour trois niveaux d'entrée différents (piano, mezzo forte et forte). L'incertitude représentée correspond à deux fois l'écart-type de l'estimation.

difficile d'obtenir une grande distance en champ lointain sans être gêné par les dièdres en-dessous de 150 Hz.

3.2.2 Simulations numériques

Une étude numérique permet de vérifier les résultats expérimentaux présentés à la Figure 3.2.4. Les mesures présentées ci-dessus indiquent que la position du centre acoustique rentre dans le trombone à mesure que la fréquence augmente entre 2 et -10 cm par rapport au plan du pavillon. Deux modèles (un modèle numérique par éléments finis (FEM) sur *Comsol* puis par éléments de frontière (BEM) sur *Akabak*) sont développés. L'estimation de la position du centre acoustique pour plusieurs sources et les problèmes rencontrés pour chaque méthode sont ensuite décrits.

3.2.2.1 Définition des modèles

L'objectif de chaque modèle numérique est de calculer la pression produite par le système étudié en plusieurs points dans l'axe du pavillon de l'instrument virtuel et de déduire la position du centre acoustique de la source primaire par une minimisation au sens des moindres carrés de la pression issue de la propagation théorique d'un monopôle (Équation (3.1)) et celle simulée numériquement.

Méthode par éléments finis

Un modèle axisymétrique 2D du système est conçu par éléments finis (FEM) avec COMSOL Multiphysics ®. Une source primaire produisant des ondes planes avec un débit q_{in} est placée à l'embouchure de l'instrument (à gauche sur la Figure 3.2.5). La géométrie du trombone est définie par une succession du tubes, cônes et pavillons (présentation détaillée en annexe A dans la Section A.2). Les pertes visco-thermiques à la surface des parois ne sont pas prises en compte. Une couche de type PML (Perfectly Matched Layer) adaptée au bord du domaine reproduit l'air entourant l'instrument comme un domaine infini ouvert et non réfléchissant.

Figure 3.2.5 : Niveau sonore émis par un tuyau relié à un trombone par FEM sur *Comsol*. La source primaire est à l'extrémité gauche de la partie interne du trombone (en rouge). Le pavillon se situe à droite.

Méthode par éléments de frontière

La conception du modèle défini par éléments de frontière (BEM) sur *Akabak* est similaire à celle étudiée par éléments finis sur *Comsol*. Le rayonnement de l'instrument est simulé par un piston plan. L'étude du rayonnement se fait cette fois en champ libre infini, il n'y a donc pas besoin de définir de PML pour prendre en compte la géométrie externe du trombone. La géométrie est également définie en 2D axisymétrique, le modèle est alors simulé en 3D (Figure 3.2.6) où un trombone simplifié (similaire au modèle FEM) est défini.

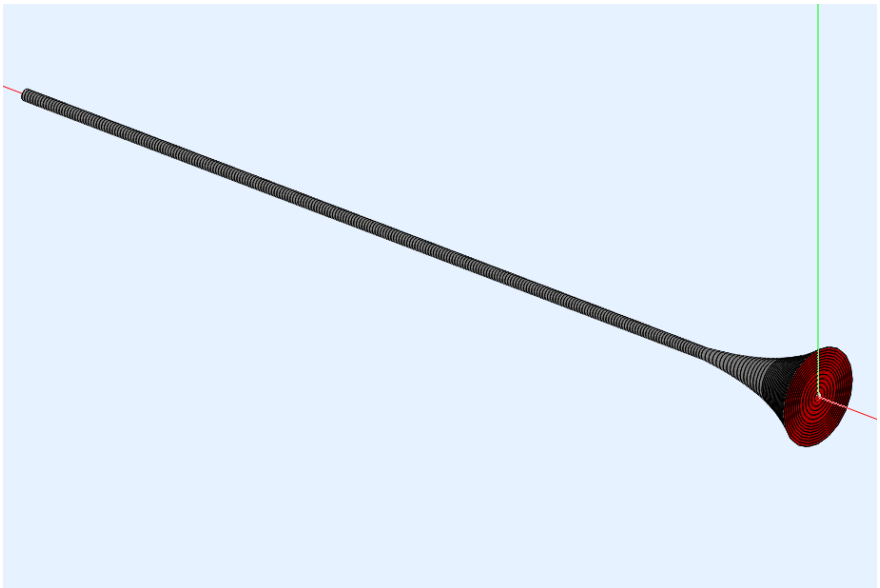


Figure 3.2.6 : Étude du rayonnement acoustique d'un guide avec *Akabak* : géométrie 3D du trombone (similaire au modèle FEM).

Le maillage correspondant demande moins de temps de calcul que pour un modèle similaire en FEM : il n'y a pas besoin de mailler l'espace en champ libre. Il faut cependant respecter une distance minimale entre deux points d_{min} telle que :

$$d_{\text{min}} = \frac{c}{10.f_{\text{max}}}, \tag{3.5}$$

où f_{max} est la fréquence maximale étudiée.

3.2.2.2 Résultats

La position du centre acoustique d'une source primaire est estimée pour un tuyau droit relié à un pavillon dans un premier temps. L'étude est renouvelée dans un second temps avec un obstacle cylindrique placé à 5 cm devant le pavillon de l'instrument pour étudier l'influence d'un haut-parleur de contrôle comme décrit en Section 4.4.

Tuyau + pavillon

La géométrie du système est montrée à la Figure 3.2.5 pour le modèle FEM et à la Figure 3.2.6 pour le modèle BEM.

La Figure 3.2.7 présente l'évolution de la position du centre acoustique estimé en fonction de la fréquence pour les 2 modèles. Aux basses fréquences (< 1 kHz), les deux modèles conduisent à un centre acoustique dont la position est estimée devant le pavillon. À la fréquence de 466 Hz, les résultats expérimentaux estiment la position du centre acoustique à 0.5 cm ($\pm$ 0.5 cm) et les modèles numériques prévoient un centre acoustique positionné à 3 cm (BEM) et environ 4 cm (FEM). Aux fréquences supérieures à 1 kHz, la position du centre acoustique estimée expérimentalement diminue. Le modèle FEM confirme cette tendance : le centre acoustique se situe à l'intérieur du pavillon (de plus en plus à mesure que la fréquence augmente) alors que le modèle BEM positionne le centre acoustique environ dans le plan du pavillon. Le front d'onde rayonné est cependant plan en BEM au lieu de suivre la géométrie de l'instrument, ce qui rend impossible l'obtention de valeur négative pour l'estimation de la position du centre acoustique avec ce modèle. Malgré cela, même ce modèle simplifié estime à priori correctement la position du centre acoustique jusqu'à 1 kHz.

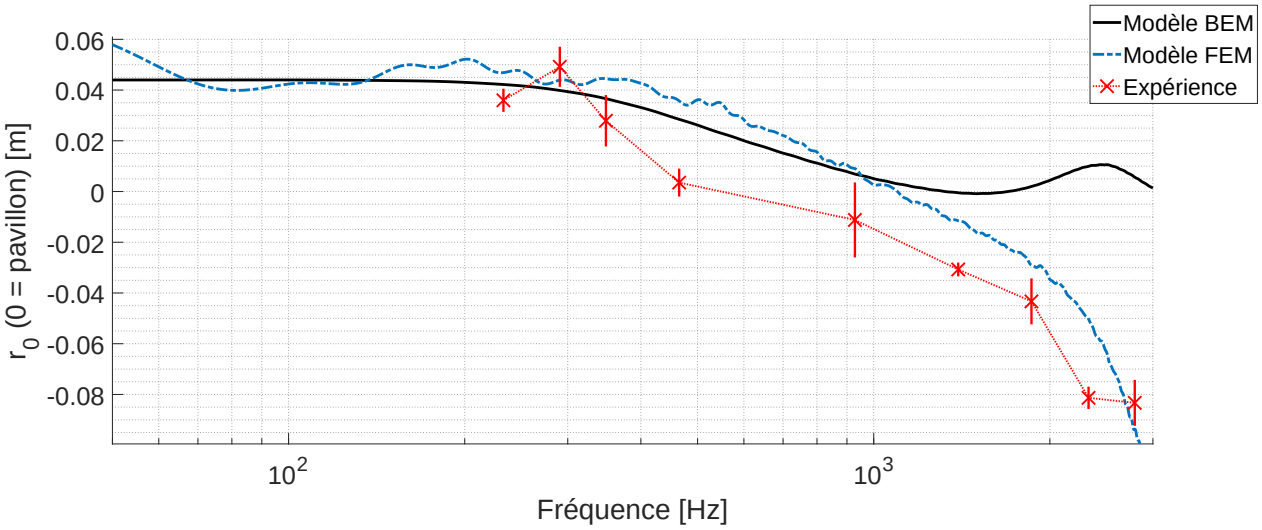
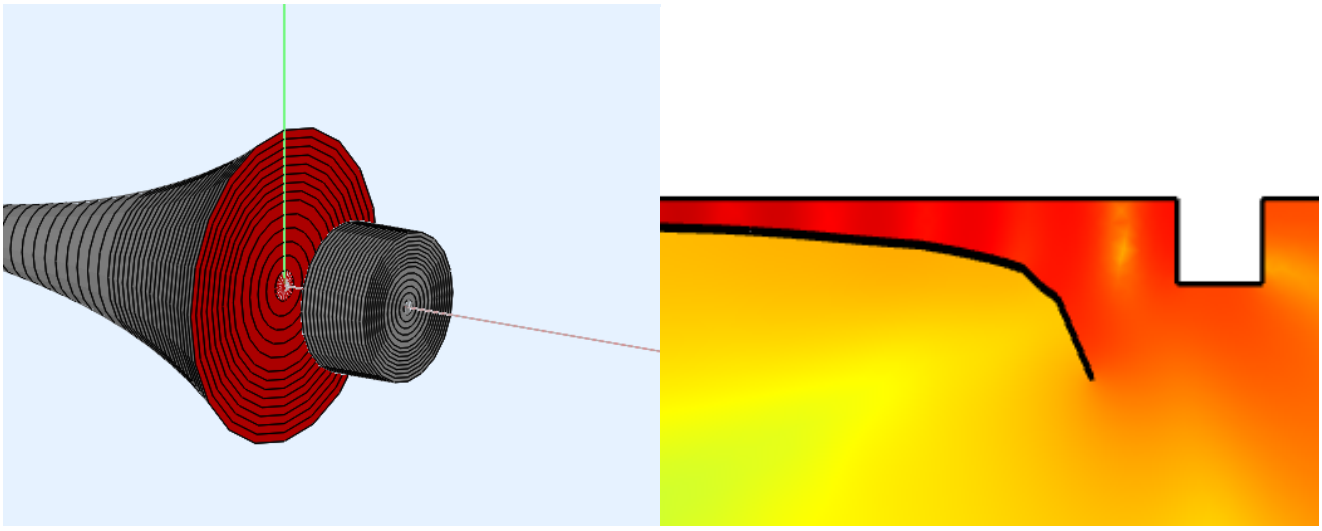


Figure 3.2.7 : Position du centre acoustique par rapport au pavillon en fonction de la fréquence en FEM (*Comsol*) et en BEM *(Akabak)* pour un tuyau relié à un trombone. L'étude numérique est comparée aux résultats expérimentaux à partir de 150 Hz (fréquence de coupure basse de la salle anéchoïque).

Le modèle FEM est préféré au modèle BEM car il décrit le rayonnement de manière plus réaliste. Celui-ci indique que la position du centre acoustique rentre à l'intérieur du trombone quand la fréquence augmente de 5 cm à -10 cm comme pour le modèle expérimental. En ce qui concerne le modèle FEM, les résultats pourraient se rapprocher davantage des résultats expérimentaux en effectuant une mesure plus précise de la géométrie de l'instrument.

Tuyau + pavillon + obstacle

Selon Nelson [Nel+87], les haut-parleurs de contrôle doivent se situer proche du pavillon de l'instrument pour effectuer un contrôle actif efficace [Nel+87]. De la même manière que dans [Pic98], une source secondaire peut être placée dans l'axe du pavillon. Le Chapitre 4 indique qu'un haut-parleur placé à proximité du pavillon du trombone a un impact sur la position du centre acoustique équivalent à la source primaire. Ce cas est alors étudié numériquement (Figure 3.2.8) où un cylindre rigide, fermé à ses deux extrémités est placé devant le pavillon.



(a) (b)

Figure 3.2.8 : Géométrie étudiée pour le modèle par BEM sur *Akabak* (a) et pression rayonnée par un tuyau relié à un trombone devant un obstacle placé à 5 cm par FEM sur *Comsol* (b).

La position du centre acoustique résultant est montrée sur la Figure 3.2.9. Le résultat est similaire quelque soit le modèle aux basses fréquences. La position du centre acoustique varie entre 5 cm à 50 Hz et -4 cm à 3 kHz dans le 2 cas. Pour les 2 modèles, un pic est observé (2 kHz pour le modèle BEM, 2,6 kHz pour le modèle FEM) et traduit un rapprochement de la source équivalente l'obstacle.

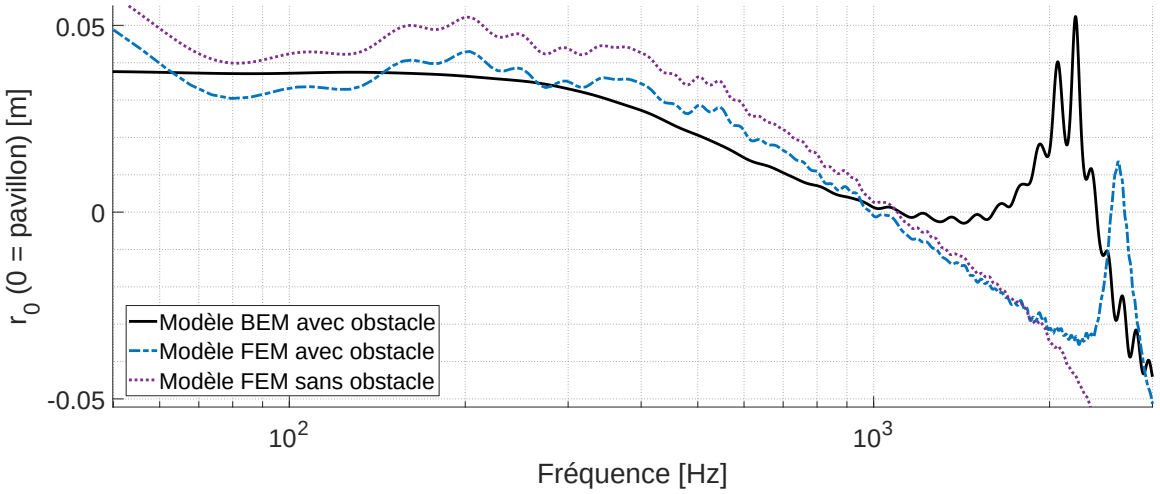


Figure 3.2.9 : Position du centre acoustique par rapport au pavillon en fonction de la fréquence en FEM (*Comsol*) et en BEM *(Akabak)* pour un tuyau relié à un trombone devant un obstacle placé à 5 cm.

En comparant les résultats obtenus à l'aide du modèle FEM avec et sans obstacle, le haut-parleur ne

semble que peu impacter la position du centre acoustique avant 2 kHz, mais impacte ensuite fortement la position de la source primaire qui s'éloigne de son pavillon. L'existence d'un obstacle devant le pavillon rapproche les centres acoustiques et laisse penser que le contrôle actif pourrait dans ce cas être plus efficace au-dessus de 1 kHz.

Les résultats des modèles confirment la tendance montrée par la mesure présentée en Section 3.2.1. Le centre acoustique rentre dans le pavillon du trombone à mesure que la fréquence augmente. L'estimation de la position du centre acoustique à partir du modèle FEM confirme cette tendance. La position du centre acoustique du trombone semble très peu impactée par l'obstacle placé à 5 cm du pavillon avant 2 kHz. L'efficacité du contrôle actif est dépendante de la position entre la source primaire et la source secondaire [Nel+87]. Celle-ci serait ainsi réduite à mesure que la fréquence augmente si les haut-parleurs de contrôle sont placés seulement autour du pavillon de l'instrument. Placer un haut-parleur devant le pavillon doit augmenter l'efficacité du contrôle par un rapprochement du centre acoustique équivalent.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, l'état de l'art sur les propriétés du trombone (débit, centre acoustique, directivité) a été confirmé et complété pour certaines caractéristiques par de nouvelles mesures. Cette section en fait la synthèse.

Cet instrument possède un registre de jeu dont la fondamentale se situe entre 50 Hz et 500 Hz. De pianissimo à fortissimo, le trombone émet une puissance acoustique contenue entre 82 SWL et 112 SWL. La mesure du débit réalisé dans cette thèse a permis de déterminer son comportement fréquentiel : le débit de sortie présente un maximum de $q_0 = 5.10^{-3}$ m^3.s^{-1} à 400 Hz (fréquence pure) lorsque l'instrument est joué à un fort niveau.

Plusieurs questions ont émergé concernant l'estimation de la position du centre acoustique équivalent au trombone. Les nouveaux résultats expérimentaux et numériques obtenus dans ce travail ne permettent pas de définir très précisément la position de ce dernier mais confirment les recherches précédentes sur son évolution avec la fréquence. La position du monopôle équivalent se situe à priori entre 10 cm à l'intérieur du pavillon jusqu'à 2 cm devant le pavillon. La position du centre acoustique du trombone pourrait être calculée théoriquement plus précisément par une approche multimodale [GDF21]. Il apparait ensuite qu'une mesure de la position du centre acoustique en salle anéchoïque n'est pas simple. La précision de la mesure est dépendante des réflexions dans la salle (grille au sol, lampes au plafond, salle non anéchoïque en dessous de 150 Hz), du bruit de fond et de la position des microphones. Ces derniers ne doivent en effet être ni trop proches de la source, ni trop proches des mousses absorbantes qui forment les murs de la salle. La mesure pourrait être réalisée de nouveau dans une salle plus anéchoïque aux basses fréquences et/ou avec une mesure par triangulation.

Chapitre 4

Contrôle de la puissance

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le principe et la faisabilité technologique d'un contrôle actif utilisant des sources secondaires (haut-parleurs) placées devant ou autour du pavillon de l'instrument. Ce contrôle doit réduire la puissance acoustique émise par le trombone en n'ayant qu'un impact minime sur la jouabilité de l'instrument de musique. Un contrôle optimal étant considéré, aucun contrôleur en temps réel n'est implémenté.

Un état de l'art autour du contrôle en puissance d'une source acoustique est premièrement établi afin de constituer les aspects théoriques du contrôle développé lors de ce travail en Section 4.1. Le système étudié est ensuite présenté dans la Section 4.2 avant de développer la théorie sous-jacente aux différentes stratégies de contrôle actif. La Section 4.3 est consacrée à l'évaluation des performances des différentes stratégies de contrôle, à l'observation de l'impact de ce dernier sur l'impédance d'entrée de l'instrument et à l'effet du mouvement du musicien autour du système de contrôle. Le contrôle de la puissance acoustique en situation réelle (trombone et haut-parleurs) est évalué à l'aide de mesures effectuées dans une salle anéchoïque dans la Section 4.4. L'effet du contrôle sur l'impédance d'entrée de l'instrument est ensuite étudié pour évaluer l'impact de ce contrôle sur le jeu du musicien. Enfin, la Section 4.5 traite des limites technologiques des haut-parleurs utilisés comme sources secondaires afin de proposer un système pouvant être utilisé pour des applications musicales réelles.

4.1 État de l'art

Un état de l'art autour du contrôle actif de la puissance a été présenté en Section 2.3.2.1. La présente section présente l'état de l'art de la théorie permettant d'estimer le débit optimal d'une source secondaire pour contrôler une source primaire.

Dans [Nel+87], Nelson propose d'effectuer un contrôle (actif) en puissance d'une source primaire en utilisant plusieurs monopôles répartis de façon régulière autour de la source primaire (2, 3 (triangle) et 4 (tétraèdre) sources secondaires). Le débit optimal minimisant la puissance rayonnée du système est donné pour chaque source secondaire par :

$$q_{s_i} = -A^{-1}b, \tag{4.1}$$

où les expressions de A et b sont détaillés ci-dessous.

Dans le cas d'un contrôle avec deux sources secondaires :

$$A = \frac{1}{2}z_0 \begin{bmatrix} 1 & \text{sinc}(kd) \\ \text{sinc}(kd) & 1 \end{bmatrix}, \tag{4.2}$$

$$b = \frac{1}{2}q_p(\omega)z_0 \begin{bmatrix} \text{sinc}(kr) \\ \text{sinc}(kr) \end{bmatrix}, \tag{4.3}$$

avec $z_0 = \frac{\omega^2\rho}{4\pi c}$, $\omega = 2\pi f$, q_p le débit de la source primaire, r la distance entre la source primaire et une source secondaire et d la distance entre deux sources secondaires. Le débit optimal pour chaque source secondaire est donc :

$$q_{s_1}(\omega) = q_{s_2}(\omega) = -q_p(\omega)\frac{\text{sinc}(kr)}{1 + \text{sinc}(kd)}. \tag{4.4}$$

Cette expression est ensuite généralisée par Bolton dans [BGB95] pour N sources secondaires :

$$q_s = -q_p\frac{\text{sinc}(kr)}{\sum_{i=1}^{N}\text{sinc}(k|r_{s_1} - r_{s_i}|)}, \tag{4.5}$$

avec N le nombre de sources secondaires et $|r_{s_1} - r_{s_i}|$ la distance séparant la première source secondaire de la source secondaire i.

Les articles [BGB95 ; BBG00 ; QH00] font la comparaison de l'efficacité d'un contrôle effectué soit par un monopôle, soit par un multipôle (somme d'harmoniques sphériques). Le contrôle actif avec un multipôle est théoriquement plus efficace pour une atténuation en puissance en champ lointain par rapport à un cercle de monopôles. Ceci est vrai pour une source primaire qui est maîtrisée (en terme de centre acoustique, de débit, de fréquence). Si la source primaire possède plusieurs centres acoustiques, il devient potentiellement compliqué d'utiliser un multipôle. Qiu et Hansen étudient l'impact de la rotation d'une source secondaire quadripolaire par rapport à un point d'observation [QH00]. Ils démontrent qu'en faisant varier l'angle entre 0 à 45°, l'atténuation varie de 65 à 0 dB.

Bolton étudie l'impact du nombre de sources secondaires sur l'atténuation en puissance de la source primaire [BGB95]. Il étudie l'influence du nombre de monopôles secondaires situés sur un cercle autour de la source primaire (Figure 4.1.1). On remarque qu'il y a certaines fréquences impossibles à atténuer (pour $kh = n\pi$, h étant la distance entre la source primaire et la source secondaire). Pour $kh \leq \pi$, une limite d'atténuation en amplitude est atteinte à partir de 4 sources secondaires. Dans cette bande de fréquence, les longueurs d'ondes étant grandes, l'ensemble des sources secondaires devient l'équivalent

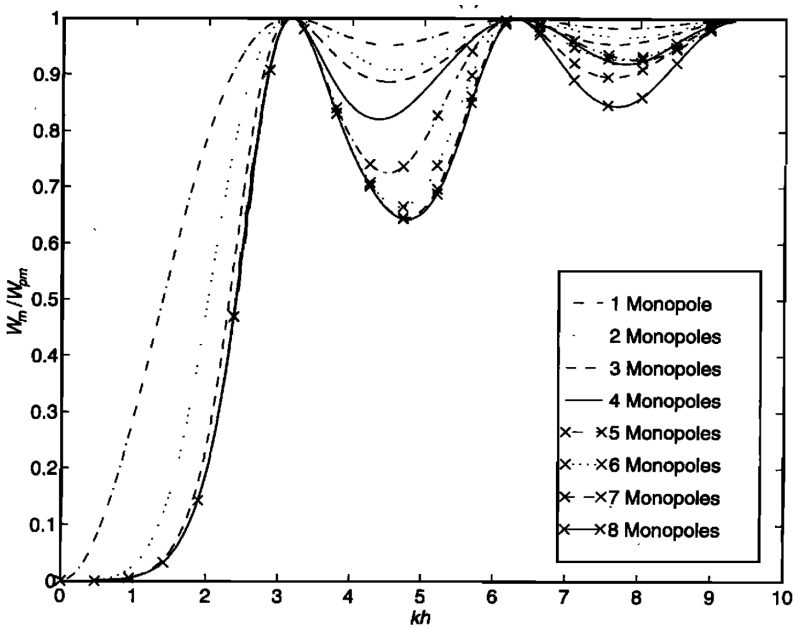


Figure 4.1.1 : Inverse de l'atténuation en puissance d'un monopôle contrôlé par N monopôles placés sur un cercle de rayon h autour de la source primaire pour un sinus de 250 Hz. L'atténuation est nulle lorsque $\frac{W_m}{W_{pm}} = 1$ [BGB95].

d'un cercle monopolaire continu à partir de 7 sources. L'atténuation diminue ensuite à mesure que kh augmente quelque soit le nombre de haut-parleurs mais augmente avec celui-ci.
Après avoir effectué un contrôle actif en utilisant deux, trois et quatre sources secondaires monopolaires [Nel+87], Nelson conclut que l'atténuation de la puissance totale ne peut être effectuée que si les sources secondaires sont séparées de la première source d'une distance inférieure à $\lambda/2$ de la fréquence considérée. Qiu explique que l'atténuation du champ sonore devient faible lorsque $kh > 2\pi$ ([QH00], Figure 4.1.1). Il faut donc que la source secondaire soit le plus proche possible de la source primaire afin d'obtenir une atténuation efficace dans une bande fréquentielle la plus large possible.

Ayrault *et al.* étudient un système composé de deux monopôles secondaires séparés d'une distance $\sqrt{d^2 + h^2}$ d'un monopôle primaire, qui est contrôlé en fonction d'un retard ajouté (Figure 4.1.2, $l = 0,\ d,\ 2d,\ 4d$) [Ayr+16]. Le retard permet de contrôler la directivité mais au détriment de l'atténuation en puissance.

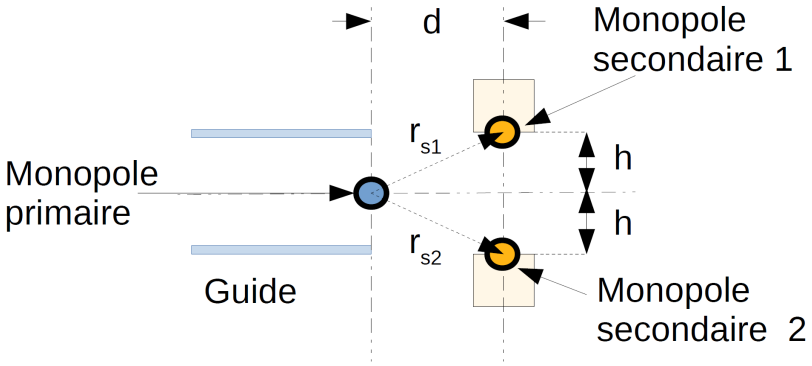


Figure 4.1.2 : Schéma du principe de l'expérience d'un monopôle primaire contrôlé par deux monopôles secondaires [Ayr+16].

4.2 Théorie

Cette section présente le système étudié et les aspects théoriques du contrôle. Les signaux pilotant les sources secondaires sont estimés afin de minimiser la puissance rayonnée.

4.2.1 Système étudié

Le système étudié est un trombone équipé de N_s haut-parleurs de contrôle placés près du pavillon. La pression rayonnée par les sources est mesurée à l'aide de M récepteurs. La Figure 4.2.1 montre un exemple comprenant la source primaire s_0 (source équivalente de l'instrument), 2 sources secondaires s_1 et s_2 et un récepteur r_1. Sur cet exemple, chaque source secondaire est séparée du centre de la source primaire par la même distance h, toutes les sources secondaires étant placées sur un anneau. Plus généralement, ces sources peuvent être placées n'importe où près du pavillon. Un exemple de montage expérimental est présenté sur la Figure 4.4.2 pour un trombone en plastique.

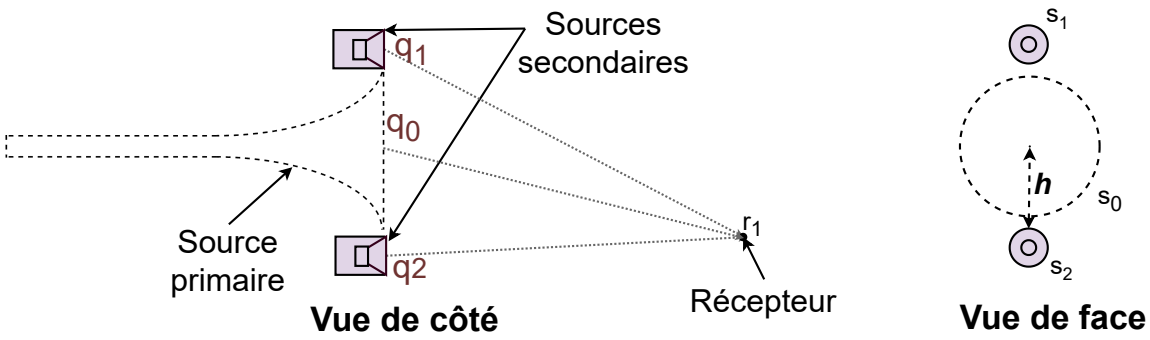


Figure 4.2.1 : Système étudié composé d'un trombone considéré comme la source primaire s_0 de débit q_0, de N_s haut-parleurs considérés comme des sources secondaires s_i de débits $\boldsymbol{q_s}$ et de M récepteurs ($N_s = 2$, $M = 1$ dans cette figure).

Le contrôle optimal consiste à appliquer un filtre de contrôle :

$$\boldsymbol{w} = \frac{\boldsymbol{x_s^W}}{x_0}, \tag{4.6}$$

où x_0 est le signal de référence caractérisant la source primaire (par exemple le débit q_0) et $\boldsymbol{x_s^W}$ est le signal de commande des sources secondaires dont le but est de réduire la puissance de la source primaire.

En fonction de la configuration, le filtre optimal $\boldsymbol{w}$ est estimé comme suit :

1. la théorie du contrôle actif est d'abord développée avec toutes les sources considérées comme de simples monopôles. Les commandes optimales à appliquer aux sources secondaires sont développées de manière analytique comme décrit dans [Nel+87]. Cette approche appelée "estimation de la puissance par une technique de champ proche" (comme proposé par Nelson) est utilisée pour optimiser le nombre et la position des sources secondaires dans la Section 4.3.

2. Dans la Section 4.4, des sources réelles (trombone excité par un haut-parleur à compression comme source primaire et haut-parleurs de contrôle comme sources secondaires) sont considérées pour un montage expérimental. Les commandes optimales à appliquer aux sources secondaires sont alors définies en fonction du transfert reliant les tensions des sources primaire et secondaire aux pressions des récepteurs [NE92 ; Koe01]. Cette approche est appelée "estimation de la puissance par une technique en champ lointain".

3. La dernière configuration s'intéresse à un trombone joué par un musicien. Dans ce cas, le débit du trombone est estimé à partir de la mesure de la pression rayonnée par l'instrument (voir Section 4.5). Ceci permet de déduire les commandes optimales à appliquer aux sources secondaires tel que présenté dans la Section 4.2.2.3.

4.2.2 Minimisation de la puissance

4.2.2.1 Estimation de la puissance par une technique de champ proche

Dans cette partie, on suppose que le système est composé de $N_s + 1$ sources idéales (monopôles) comme défini sur la Figure 4.2.2.

Figure 4.2.2 : Système étudié composé d'une source primaire de débit q_0 (monopôle équivalent au rayonnement d'un trombone), de N_s sources secondaires de débit $\boldsymbol{q_s}$ ($N_s = 6$ dans cette figure).

Le vecteur de débit $\boldsymbol{q}$ est défini par :

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} q_0(\omega) \\ q_1(\omega) \\ \vdots \\ q_N(\omega) \end{bmatrix}, \tag{4.7}$$

où $q_n(\omega)$ est le débit de la source n, avec $n = 0$ pour la source primaire et $n = 1 \rightarrow N_s$ pour les sources secondaires. La pression produite sur chaque source (vue comme un récepteur) par l'ensemble des autres sources est définie par :

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{Z}\boldsymbol{q}, \tag{4.8}$$

où le vecteur $\boldsymbol{p}$ d'ordre N est représenté par :

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} p_0(\omega) \\ p_1(\omega) \\ \vdots \\ p_{N_s}(\omega) \end{bmatrix}, \tag{4.9}$$

et la matrice $\boldsymbol{Z}$ d'ordre N_sxN_s est définie comme suit :

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} Z_{00}(\omega) & Z_{01}(\omega) & \cdots & Z_{0N_s}(\omega) \\ Z_{10}(\omega) & Z_{11}(\omega) & \cdots & Z_{1N_s}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N_s0}(\omega) & Z_{N_s1}(\omega) & \cdots & Z_{N_sN_s}(\omega) \end{bmatrix}, \tag{4.10}$$

où :

$$Z_{ij} = jk\rho c \frac{e^{-jkr_{ij}}}{4\pi r_{ij}}, \tag{4.11}$$

avec r_{ij} la distance entre les sources i et j. Le vecteur des impédances de transfert entre la source primaire et chaque source secondaire correspond à :

$$\boldsymbol{z_{0s}} = \begin{bmatrix} Z_{00}(\omega) \\ Z_{01}(\omega) \\ \vdots \\ Z_{0N_s}(\omega) \end{bmatrix}, \tag{4.12}$$

tandis que la matrice d'impédance de transfert entre chaque source secondaire est exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{Z_{ss}} = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & \cdots & Z_{N_s1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1N_s}(\omega) & \cdots & Z_{N_sN_s}(\omega) \end{bmatrix}. \tag{4.13}$$

Nelson [Nel+87] montre que le débit optimal à appliquer aux sources secondaires minimisant la puissance de la source primaire peut s'écrire :

$$\boldsymbol{q_s^W} = -\boldsymbol{A_0}^{-1}\boldsymbol{b_0}, \tag{4.14}$$

avec :

$$\boldsymbol{A_0} = \frac{1}{2}\Re\{\boldsymbol{Z_{ss}}\}, \tag{4.15}$$

et :

$$\boldsymbol{b_0} = \frac{1}{2}\Re\{\boldsymbol{z_{0s}}\}q_0, \tag{4.16}$$

où $\Re$ désigne la partie réelle. Dans un cas où une régularisation de la matrice $\boldsymbol{A_0}$ est ajoutée [YN99], l'Équation (4.15) devient :

$$\boldsymbol{A_0} = \frac{1}{2}\Re\{\boldsymbol{Z_{ss}}\} + \beta\boldsymbol{I}, \tag{4.17}$$

avec β le facteur de régularisation ($\beta = 0$ pour retrouver l'expression de l'Équation (4.15)) et $\boldsymbol{I}$ la matrice identité.

Le filtre de contrôle est ainsi défini par :

$$\boldsymbol{w_0} = \frac{\boldsymbol{q_s^W}}{q_0}. \tag{4.18}$$

Le calcul de la puissance acoustique lorsque la source primaire est contrôlée par les sources secondaires peut être écrit comme suit :

$$W = \frac{1}{2}\boldsymbol{q}^H\Re\{\boldsymbol{Z}\}\boldsymbol{q}. \tag{4.19}$$

4.2.2.2 Estimation de la puissance par une technique en champ lointain

Une source primaire (trombone) et des sources secondaires (haut-parleurs) réelles sont considérées dans cette partie. Comme la matrice de transfert d'impédance $\boldsymbol{Z}$ entre chaque source définie par l'Équation (4.11) ne peut pas être mesurée facilement en pratique (à cause de la difficulté de mesure du débit), les fonctions de transfert entre la tension d'excitation des sources et la pression en champ lointain sont mesurées. La Figure 4.2.3 montre un exemple comprenant le trombone comme source primaire s_0, 6 sources secondaires s_1 à s_6 et un récepteur r_1.

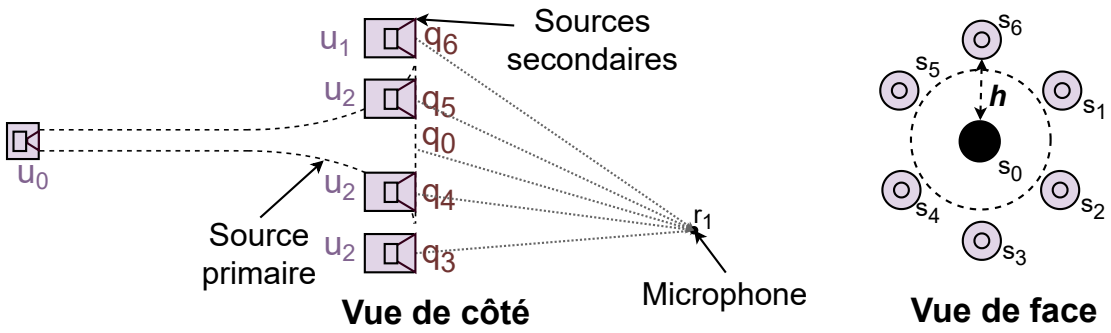


Figure 4.2.3 : Système étudié composé d'un trombone comme source primaire de débit q_0 excité par un haut-parleur dont la tension d'entrée est définie par u_0. Le contrôle est effectué par N_s haut-parleurs comme sources secondaires de débits $\boldsymbol{q_s}$ déduits des tensions d'entrée $\boldsymbol{u_s}$. Le système est enfin composé de M récepteurs ($N_s = 6$, $M = 1$ dans cette figure).

La pression de la source primaire $\boldsymbol{p_0}$ s'écrit telle que :

$$\boldsymbol{p_0} = \begin{bmatrix} p_{01}(\omega) \\ p_{02}(\omega) \\ \vdots \\ p_{0M}(\omega) \end{bmatrix}, \tag{4.20}$$

où M est le nombre de microphones. La pression produite par les sources secondaires $\boldsymbol{p_s}$ est donnée par :

$$\boldsymbol{p_s} = \begin{bmatrix} p_{s1}(\omega) \\ p_{s2}(\omega) \\ \vdots \\ p_{sM}(\omega) \end{bmatrix}. \tag{4.21}$$

Dans un cas expérimental, comme q_0 ne peut pas être mesuré facilement de manière directe, le trombone est modifié et est excité par un haut-parleur à compression. Le haut-parleur et le trombone sont reliés par un tube d'adaptation (présenté dans la Section 4.4.1). La pression rayonnée par ce trombone adapté s'écrit :

$$\boldsymbol{p_0} = \boldsymbol{h_0} u_0 = \begin{bmatrix} h_{01} \\ h_{02} \\ \vdots \\ h_{0M} \end{bmatrix} u_0, \tag{4.22}$$

où $\boldsymbol{h_0}$ est la fonction de transfert entre la tension aux bornes des sources et la pression mesurée par les récepteurs.

La pression des sources secondaires $\boldsymbol{p_s}$ est développée telle que :

$$\boldsymbol{p_s} = \boldsymbol{H_s u_s} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1N} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & H_{M2} & \cdots & H_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix}, \tag{4.23}$$

avec $\boldsymbol{u_s}$ la tension des sources secondaires (N_s sources secondaires) et $\boldsymbol{H_s}$ la matrice des fonctions de transfert entre la tension aux bornes des sources et la pression mesurée par les récepteurs.

L'objectif est de trouver les tensions optimales des sources secondaires $\boldsymbol{u_s^W}$ en fonction de la tension de la source primaire u_0 minimisant une fonction de coût. Afin de minimiser la puissance rayonnée par le système, la puissance W est estimée à partir de la pression mesurée avec M microphones placés en champ lointain sur une sphère de rayon r avec des pas d'angle constants $\Delta\theta$ pour l'azimut et $\Delta\phi$ pour l'élévation comme le montre la Figure 4.2.4.

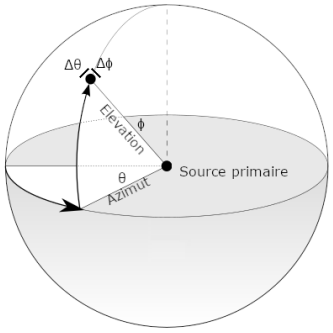


Figure 4.2.4 : Référentiel 3D pour calculer la pression rayonnée sur une sphère.

La puissance W correspond à l'intégrale de l'intensité acoustique $\boldsymbol{I(r)}$:

$$W = \int_S \boldsymbol{I(r)} \boldsymbol{dS}, \tag{4.24}$$

avec $\boldsymbol{I(r)}$ l'intensité acoustique définie telle que :

$$\boldsymbol{I(r)} = \frac{1}{2} \Re \left[\hat{p}(\boldsymbol{r}) . \hat{v}^*(\boldsymbol{r}) \right], \tag{4.25}$$

avec $\hat{p}(r)$ la pression acoustique $p(r,t)$ et $\hat{v}^*(r)$ le complexe conjugué de la vitesse $\hat{v}(r)$. L'élément de surface variable $\boldsymbol{dS}$ s'exprime tel que :

$$\boldsymbol{dS} = r^2 \sin(\boldsymbol{\theta}) \Delta\theta \Delta\phi. \tag{4.26}$$

La pression étant calculée numériquement en champ lointain en N points équitablement répartis en coordonnées sphériques, la puissance acoustique est définie par :

$$W(r,\theta,\phi) = \frac{1}{2} \sum_{i=1,j=1}^{N_\theta, N_\phi} \frac{p(\theta_i,\phi_j).p^*(\theta_i,\phi_j)}{Z_c} dS, \tag{4.27}$$

avec $p^*(\theta_i,\phi_j)$ le complexe conjugué de $p(\theta_i,\phi_j)$, $Z_c = \rho c$ l'impédance caractéristique de l'air et $p(\boldsymbol{r})$ la superposition de la pression des sources primaire et secondaires :

$$p(\boldsymbol{r}) = p_0(\boldsymbol{r}) + \sum_{i=1}^{N_s} p_i(\boldsymbol{r}). \tag{4.28}$$

Pour M microphones placés sur une sphère de rayon r avec $\Delta\theta$ et $\Delta\phi$ constants, une approximation discrète de l'Équation (4.27) est donnée par :

$$W \simeq r^2 \Delta\theta \Delta\phi \Big(\boldsymbol{s}[\boldsymbol{p_0} + \boldsymbol{p_s}] \Big)^H \Big(\boldsymbol{s}[\boldsymbol{p_0} + \boldsymbol{p_s}] \Big), \tag{4.29}$$

où l'exposant ^{H} est la transposition hermitienne du vecteur et $\boldsymbol{s}$ est une matrice MxM définie par :

$$s_{ij} = \sqrt{|\sin(\theta_i)|} \delta_{ij}, \tag{4.30}$$

avec une matrice identité δ_{ij}. La fonctionnelle à minimiser devient :

$$J_1 = \Big(\boldsymbol{s}[\boldsymbol{p_0} + \boldsymbol{p_s}]\Big)^H \Big(\boldsymbol{s}[\boldsymbol{p_0} + \boldsymbol{p_s}]\Big), \tag{4.31}$$

pour finalement prendre la forme suivante :

$$J_1 = \boldsymbol{u_s}^H \boldsymbol{A_1} \boldsymbol{u_s} + \boldsymbol{u_s}^H \boldsymbol{b_1} + \boldsymbol{b_1}^H \boldsymbol{u_s} + c_1, \tag{4.32}$$

où :

$$\boldsymbol{A_1} = \boldsymbol{H_s}^H \boldsymbol{S} \boldsymbol{H_s}, \tag{4.33}$$

avec $\boldsymbol{S}$ une matrice MxM définie par :

$$S_{ij} = |\sin(\theta_i)| \delta_{ij}, \tag{4.34}$$

et :

$$\boldsymbol{b_1} = \boldsymbol{H_s}^H \boldsymbol{S} \boldsymbol{h_0} u_0, \tag{4.35}$$

et enfin :

$$c_1 = u_0^* \boldsymbol{h_0}^H \boldsymbol{S} \boldsymbol{h_0} u_0, \tag{4.36}$$

u_0^* étant le complexe conjugué de u_0. Dans un cas où une régularisation de la matrice $\boldsymbol{A_1}$ est ajoutée [YN99], l'Équation (4.33) devient :

$$\boldsymbol{A_1} = \boldsymbol{H_s}^H \boldsymbol{S} \boldsymbol{H_s} + \beta \boldsymbol{I}. \tag{4.37}$$

Pour minimiser la puissance W, la tension secondaire optimale à appliquer provient de la fonction quadratique développée par l'Équation (4.32) et connaît une solution unique donnée par [NE92] :

$$\boldsymbol{u_s^W} = -\boldsymbol{A_1}^{-1} \boldsymbol{b_1}. \tag{4.38}$$

Le filtre de contrôle correspondant est alors défini tel que :

$$\boldsymbol{w_1} = \frac{\boldsymbol{u_s^W}}{u_0}. \tag{4.39}$$

4.2.2.3 Application à un trombone joué par un musicien

Lorsque l'instrument est joué par un tromboniste, le filtre optimal $\boldsymbol{w_2} = \frac{\boldsymbol{u_s^W}}{q_0}$ doit être connu et le débit q_0 doit être estimé indirectement pour déduire $\boldsymbol{u_s^W}$. Le filtre $\boldsymbol{w_2}$ est déduit des résultats de la Section 4.2.2.2. En effet, en écrivant que :

$$\boldsymbol{w_2} = \boldsymbol{w_1} \frac{u_0}{q_0}, \tag{4.40}$$

pour un haut-parleur à compression remplaçant le tromboniste, le problème est d'estimer $\frac{u_0}{q_0}$ lorsque le trombone est excité par un haut-parleur.

En supposant que la source primaire est un monopôle et que sa position est connue, $\frac{u_0}{q_0}$ est estimé par :

$$\frac{u_0}{q_0} = \frac{u_0}{\boldsymbol{p_0}} \frac{\boldsymbol{p_0}}{q_0} = \boldsymbol{h_0}^+ \boldsymbol{g_0}, \tag{4.41}$$

avec $\boldsymbol{g_0}$ le propagateur théorique d'un monopôle et $\frac{u_0}{\boldsymbol{p_0}}$ donné par les fonctions de transfert entre la tension aux bornes des sources et la pression mesurée au niveau des microphones. Cela conduit à :

$$\boldsymbol{w_2} = \boldsymbol{w_1} \boldsymbol{h_0}^+ \boldsymbol{g_0}. \tag{4.42}$$

4.3 Simulations

Dans cette section, les sources primaire et secondaires sont limitées à des sources théoriques (monopôles, tube dans un espace infini). Le débit optimal est donné par l'Équation (4.14). Cela permet d'étudier l'impact :

1. du nombre et de la position des sources secondaires,
2. du contrôle sur l'impédance de rayonnement de la source primaire,
3. de la position de la source primaire par rapport au système de contrôle.

4.3.1 Impact du nombre et de la position des sources secondaires

Cette partie porte sur le choix de la position et du nombre de sources secondaires (limitées aux monopôles [Nel+87]) qui seront utilisées par la suite afin d'optimiser l'atténuation en puissance :

$$\mathrm{Att}_W = 10 \log_{10} \frac{W_0}{W_{\mathrm{tot}}}, \tag{4.43}$$

avec la puissance de la source primaire W_0 et la puissance totale W_{tot}, toutes deux calculées à partir de la pression estimée numériquement avec l'Équation (4.27). Cinq configurations de sources secondaires sont étudiées et représentées sur la Figure 4.3.1. Les distances $\boldsymbol{h}$ ont été choisies pour des raisons pratiques lors de l'expérience développée en Section 4.4. La distance $h_r = 0.16$ m permet de placer les haut-parleurs sur un anneau à fleur du pavillon du trombone dont le rayon est de 0.105 m alors que la distance $h_f = 0.05$ m est choisie pour placer un haut-parleur de contrôle proche du pavillon du trombone sans obstruer le guide d'ondes.

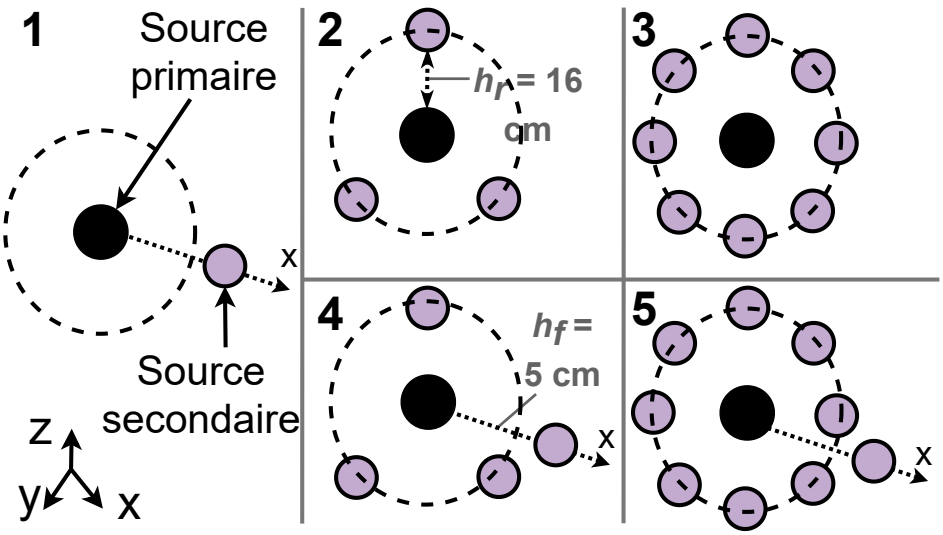


Figure 4.3.1 : Cinq configurations pour le contrôle actif de l'atténuation en puissance : les sources secondaires sont positionnées autour de la source primaire soit sur un anneau à $h_r = 0.16$ m soit devant cette dernière à $h_f = 0.05$ m. $\boldsymbol{h}$ regroupe les distances entre chaque source secondaire et la source primaire.

L'atténuation en puissance pour chaque cas est illustrée par la Figure 4.3.2 qui montre que l'augmentation du nombre de sources secondaires (de 3 à 8 sources - cas **2** et **3**) réparties sur un anneau autour de la source primaire génère presque la même atténuation dans la gamme des basses fréquences. Comme

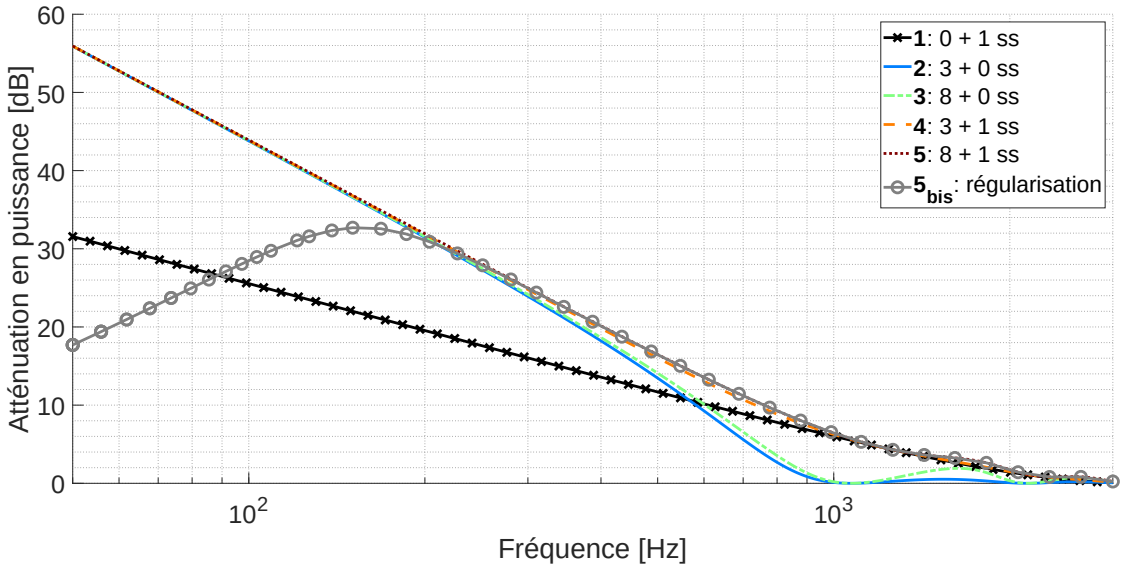


Figure 4.3.2 : Atténuation en puissance Att_W avec un modèle monopolaire pour les 5 cas de contrôle en puissance présentés dans la Figure 4.3.1. L'effet de la régularisation ($\beta = 200$) pour le cas **5** est montré avec la courbe en pointillés avec cercles.

le montre [BGB95], l'atténuation en puissance n'augmente presque plus au-delà de 4 monopôles équitablement répartis autour de la source primaire. Le cas **3** (8 sources) permet néanmoins de réduire le débit nécessaire à appliquer à chaque source comme le montre la Figure 4.3.3(a). La configuration **3** augmente légèrement l'atténuation Att_W au-dessus de $kh = n\pi$ ($f \simeq 1000$ Hz) mais cette augmentation n'est pas significative au vu de la complexité supplémentaire du système.

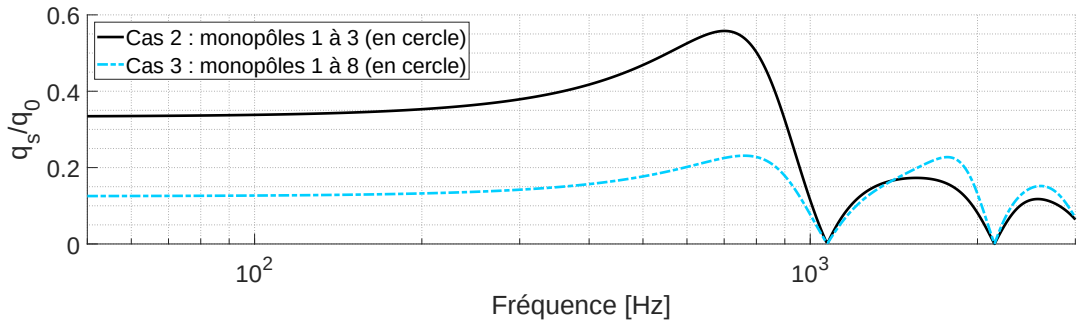
Aux basses fréquences, le débit q_1 est égal à $-q_0$ lorsqu'il n'y a qu'une seule source secondaire, alors que le débit requis est divisé par le nombre de sources avec N_s sources secondaires (Figure 4.3.3a). En hautes fréquences, q_1 diminue au fur et à mesure que l'atténuation en puissance Att_W tombe à 0 à $kh = n\pi$.

Pour les cas particuliers où les sources secondaires ne sont pas régulièrement réparties autour de la source primaire, l'inversion matricielle favorise les sources secondaires placées sur l'anneau aux basses fréquences (cas **4** et **5**). En raison d'un conditionnement très élevé aux basses fréquences qui apporte des valeurs singulières à la matrice, le débit requis par la source secondaire placée devant la source primaire est donc quasiment nul dans cette bande de fréquence. Celui-ci devrait être plus élevé que celui des autres sources secondaires aux basses fréquences. Pour une étude théorique sur la faisabilité du contrôle, il est donc nécessaire de régulariser $\boldsymbol{A_0}$ avant de faire l'inversion de matrice comme expliqué dans [NY99 ; YN99].

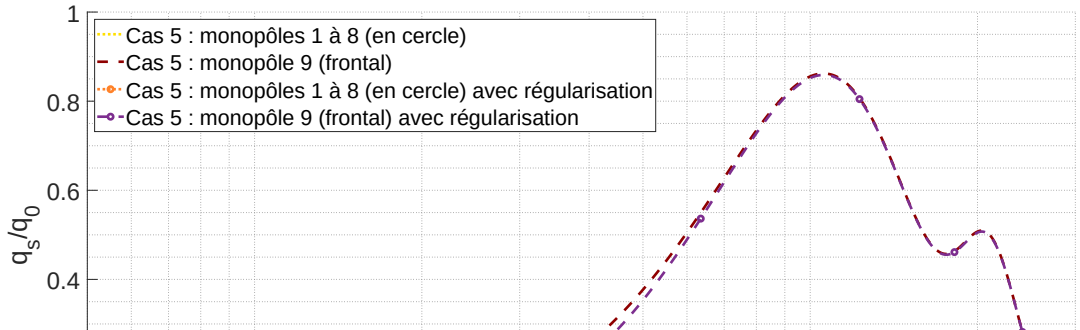
L'ajout d'une source secondaire dans l'axe et à proximité de la source primaire (cas **4** et **5**) augmente Att_W autour de $kh = n\pi$ jusqu'à 6 dB, permettant une meilleure atténuation en puissance. Il est intéressant de voir que pour ces deux cas, la source secondaire la plus proche doit fournir un débit plus important comme le montre la Figure 4.3.3(b). Dans le cas d'un contrôle avec une seule source secondaire (cas **1**), l'effet du contrôle est d'autant plus marqué vers les hautes fréquences que la source secondaire est proche de la source primaire.

4.3.2 Impact sur les impédances de rayonnement et d'entrée

Un objectif de ce travail de thèse est de mettre en place un contrôle ayant un impact réduit sur l'impédance d'entrée de l'instrument. Une étude théorique est effectuée afin d'estimer dans un premier temps



(a)



(b)

Figure 4.3.3 : Rapport des débits $\frac{q_s}{q_0}$ avec un modèle monopolaire. (a) : $\frac{q_s}{q_0}$ est représenté pour chaque source secondaire respectivement pour les cas **2** et **3**. (b) : la ligne en tirets représente la source secondaire placée devant la source primaire et la ligne en pointillés représente une source secondaire placée sur l'anneau (les débits sont égaux pour les sources sur l'anneau) pour le cas **5**, sans et avec régularisation.

quels sont les effets du contrôle sur l'impédance de rayonnement d'un tube rayonnant en espace infini. Ceci permet ensuite de déduire les conséquences du contrôle sur l'impédance d'entrée de l'instrument.

L'impact du contrôle a été étudié de manière analytique dans un travail précédent [Ayr+16] : la source primaire est un tube de rayon $a = 16.75$ mm rayonnant dans un espace infini contrôlé par deux monopôles placés à une distance $h = 16$ mm. Le contrôle diminue la partie réelle de l'impédance de rayonnement et augmente ainsi l'amplitude des pics de résonance de l'impédance d'entrée (de 1.5 dB au maximum sur les 3 premiers pics). Par ailleurs, la correction de longueur effective du résonateur diminue, ceci augmentant les valeurs de fréquences de résonance (1.5 Hz au maximum sur les 3 premiers pics, correspondant à une variation relative d'au maximum 5 cents, ce qui est considéré comme négligeable).

Cette sous-section a pour but d'étendre cette étude en simulant l'impact du contrôle sur l'impédance de rayonnement et l'impédance d'entrée d'un tube puis d'une succession de tuyaux cylindriques avec une sortie de forme pavillonnaire, contrôlé par N_s sources secondaires dans chacun des cas.

4.3.2.1 Pression et impédance secondaire

Le système se compose d'un tube rayonnant en espace infini [CK16] contrôlé par N_s monopoles secondaires (Figure 4.3.4). L'objectif est de savoir comment l'impédance de rayonnement de la source primaire est modifiée par le rayonnement des sources secondaires.

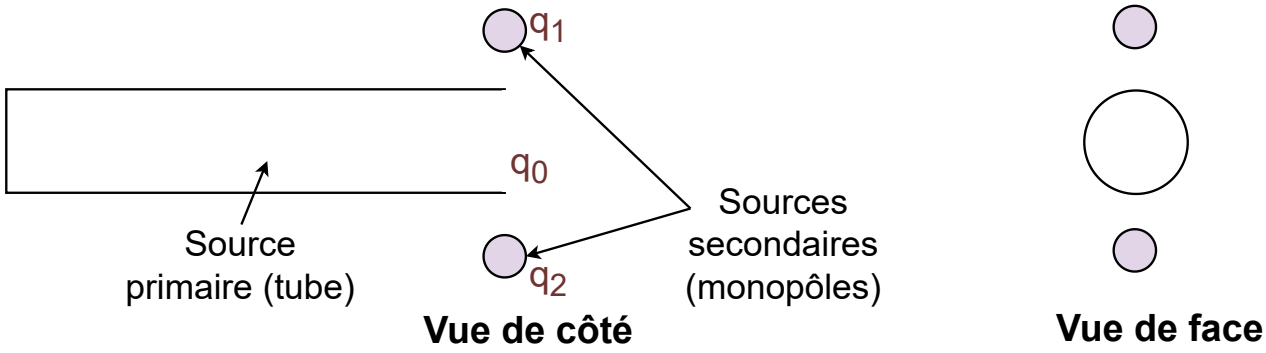


Figure 4.3.4 : Système étudié composé d'un tube comme source primaire de débit q_0. Le contrôle est effectué par N_s monopôles secondaires de débits $\boldsymbol{q_s}$.

L'impédance de rayonnement après contrôle Z_{rc} correspond à la somme de l'impédance de rayonnement sans contrôle Z_{r0} (définie par l'Équation (A.2)) d'un terme lié au contrôle ΔZ :

$$Z_{rc} = Z_{r0} + \Delta Z. \tag{4.44}$$

La pression rayonnée par les sources secondaires au niveau de la source primaire (en sortie de tube) s'écrit :

$$p_{0s} = \sum_{i=1}^{N_s} z_{0s}(i) q_s^W(i) = \boldsymbol{z_{0s}^T}.\boldsymbol{q_s^W}, \tag{4.45}$$

avec $\boldsymbol{z_{0s}}$ défini par les Équations (4.11) et (4.12) et $\boldsymbol{q_s^W}$ le débit optimal donné par l'Équation (4.14).

La pression ajoutée par les sources secondaires sur la source primaire est donc :

$$p_{0s} = \boldsymbol{z_{0s}^T}(-\boldsymbol{A_0^{-1}}.\boldsymbol{b_0}) = -\frac{1}{2}\boldsymbol{z_{0s}^T}\boldsymbol{A_0^{-1}}\Re\{\boldsymbol{z_{0s}}\}q_0, \tag{4.46}$$

où la modification ΔZ est donnée par :

$$\Delta Z = \frac{p_{0s}}{q_0} = -\frac{1}{2}\boldsymbol{z_{0s}^T}\boldsymbol{A_0^{-1}}\Re\{\boldsymbol{z_{0s}}\}. \tag{4.47}$$

L'impédance de rayonnement Z_{r0} pour une calotte sphérique est décrite dans la Section A.2.2 par l'Équation (A.3). L'impédance de rayonnement de la source primaire dans le cas d'un contrôle par N_s sources secondaires s'écrit ainsi :

$$Z_{rc} = Z_0 + j\omega\frac{\rho\Delta\ell}{S} - \frac{1}{2}\boldsymbol{z_{0s}^T}\boldsymbol{A_0^{-1}}\Re\{\boldsymbol{z_{0s}}\}. \tag{4.48}$$

4.3.2.2 Effet sur l'impédance de rayonnement

L'impact du contrôle sur l'impédance de rayonnement est estimé pour les 5 cas de contrôle en puissance étudiés dans la section précédente (Section 4.3.1, Figure 4.3.1). La Figure 4.3.5 présente la partie réelle de Z_{rc} normalisée par $Z_c ka^2$ avec :

$$\alpha_c = \frac{\Re\{Z_{rc}\}}{Z_c ka^2}, \tag{4.49}$$

et la partie imaginaire de Z_{rc} par :

$$\beta_c = \frac{\Im\{Z_{rc}\}}{Z_c ka}, \tag{4.50}$$

les deux parties étant définies à partir de l'Équation (A.2). Sans contrôle : $\alpha_c = 1/4$ et $\beta_c = 0.6133$.

Un piston de rayon $a = 0.1$ m est simulé pour cette étude. La Figure 4.3.5 compare Z_{rc} à Z_{r0} lors d'un contrôle en puissance par les différentes configurations de sources secondaires introduites par la Figure 4.3.1.

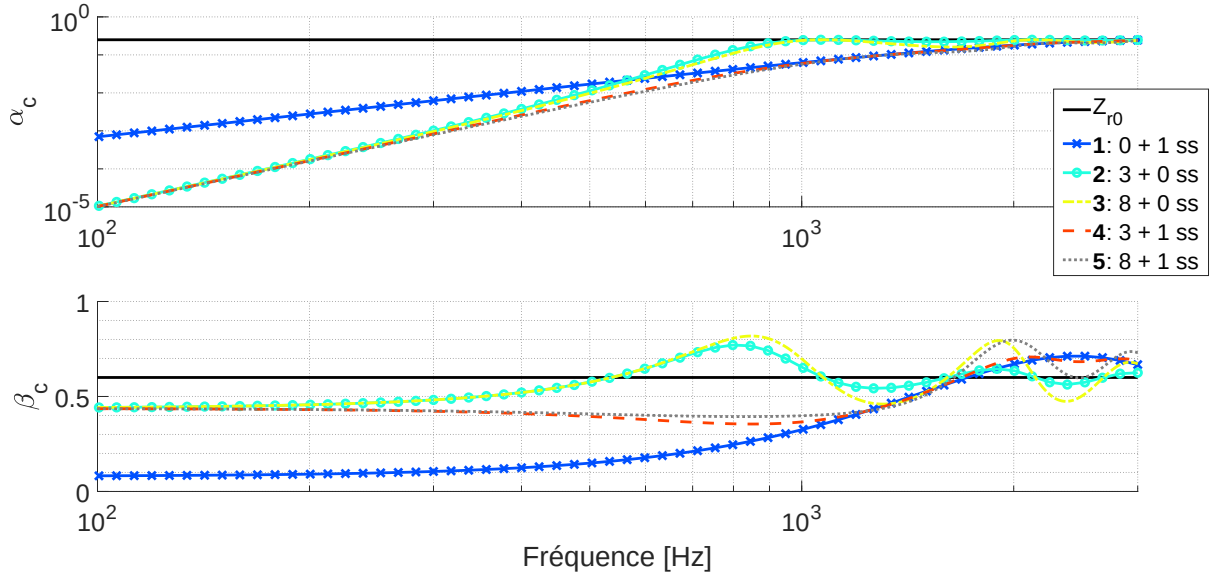


Figure 4.3.5 : Parties réelle et imaginaire normalisées des impédances sans (Z_{r0}) et avec (Z_{rc}) contrôle α_c (Équation (4.49)) et β_c (Équation (4.50)). Les 5 cas de contrôle en puissance étudiés sont présentés par la Figure 4.3.1.

La partie réelle normalisée α_c se réduit proportionnellement à l'efficacité du contrôle pour chaque cas. Par exemple pour le cas **2** (3 sources secondaires placées à $h = 0.16$ m), la partie réelle de l'impédance de rayonnement de la source primaire avec contrôle se rapproche fortement de celle sans contrôle à partir de 1000 Hz, fréquence à partir de laquelle l'atténuation en puissance est nulle.

Aux basses fréquences (jusqu'à 500 Hz ici), le contrôle actif réduit la longueur effective du résonateur proportionnellement à la distance entre la source primaire et les sources secondaires effectuant le contrôle, ceci augmentant les valeurs des fréquences de résonance du tube. Des variations locales apparaissent néanmoins aux plus hautes fréquences autour de $kh = n\pi$ pour les cas **2** et **3** mais ne dépassent pas 33 % de la correction de longueur sans contrôle.

4.3.2.3 Effet sur l'impédance d'entrée

Ayant l'expression analytique de l'impédance de rayonnement avec contrôle Z_{rc} pour N_s sources secondaires, il est possible de remonter à l'impédance d'entrée à l'aide de l'état de l'art fait en Section 2.1.5 et du modèle présenté en Section A.2.2 en annexe A. Un modèle composé exclusivement d'une série de tuyaux cylindriques est simulé afin de déduire l'impédance d'entrée de l'instrument. L'impédance d'entrée sans contrôle est montrée sur la Figure A.2.4 de la Section A.2.

Le montage de la Figure A.2.2, composé d'un tuyau en plastique relié à un trombone (présenté dans

la Section A.2.1), est simulé par un série de 35 tuyaux cylindriques respectant pour chaque transfert la matrice indiquée par l'Équation (A.4). Les impédances d'entrées avec et sans contrôle sont estimées à partir des impédances de rayonnement correspondantes (Équations (A.2) et (4.48)). Les trois premières résonances de l'impédance d'entrée de ce montage sont montrées sur la Figure 4.3.6.

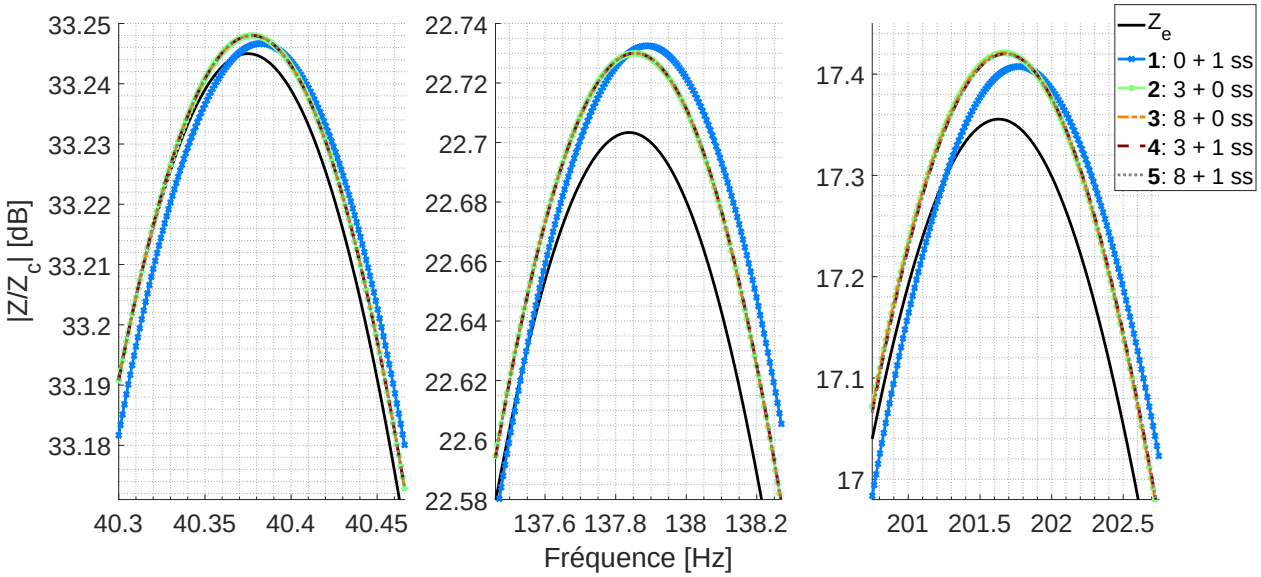


Figure 4.3.6 : Module de l'impédance d'entrée réduite sans contrôle (Z_e) et avec contrôle (Z_{ec}) pour les 3 premières résonances de l'instrument dont le rayonnement est simulé respectivement par les Équations (A.2) et (4.48). Les 5 cas de contrôle en puissance présentés dans la Figure 4.3.1 sont étudiés.

Le contrôle augmente de manière négligeable l'amplitude (au plus 0.06 dB) et la fréquence (au plus 0.2 Hz) légèrement l'amplitude des 3 premiers pics de résonance. Le cas **1** où la source secondaire est placée à $h = 0.05$ m de la source primaire est étudié en détail : le Tableau 4.3.1 présente pour les 10 premiers pics de Z_e l'écart en amplitude en dB (estimé à partir de la partie réelle de Z_e) et l'écart en fréquence en cents (estimé lorsque la partie imaginaire de Z_e passe par 0 aux résonances) entre les situations avec et sans contrôle. Les tableaux B.1.1 et Tableau B.1.2 (annexe B.1) donnent pour les 10 premiers pics de Z_e l'écart en amplitude et en fréquence pour les 5 cas présentés en Figure 4.3.1. Le cas de contrôle **1** est celui impactant le plus l'impédance d'entrée de la source primaire. Cela suppose que l'impact est principalement lié à la source secondaire la plus proche de la source primaire.

Pic n°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
f (Hz)	40	138	201	295	355	440	497	594	652	742
ΔA (dB)	<0.1	0.1	<0.1	0.2	0.3	0.6	0.5	0.8	1.1	1.9
Δf (cent)	<1	<1	1.2	1.6	4.4	3.3	4.5	2.8	7.7	9.2

Tableau 4.3.1 : Écarts d'amplitude (ΔA) et de fréquence (Δf) théoriques pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone relié à un tuyau sans et avec contrôle pour le cas **1** avec une source secondaire placée à 0.05 m de la source primaire.

La différence en amplitude s'accroit à mesure que la fréquence augmente avec par exemple une différence de 1.9 dB pour le 10^e pic de Z_e ($f = 740$ Hz). L'écart fréquentiel est quasiment négligeable sur les 3 premiers pics de Z_e. Celui-ci augmente à mesure que la fréquence augmente avec par exemple un écart d'environ 10 cents pour le 10^e pic ($f = 653$ Hz). L'impact du contrôle de la puissance sur l'impédance

d'entrée est faible au moins jusqu'à la 8^e résonance du guide d'onde où l'écart en amplitude ne dépasse pas 1 dB et l'écart fréquentiel ne dépasse pas 5 cents.

En résumé, l'ajout d'un contrôle réduit la partie réelle de l'impédance de rayonnement de l'instrument et diminue sa correction de longueur aux basses fréquences. Cela augmente l'amplitude des pics de résonance de l'impédance d'entrée et la fréquence de ces derniers aux basses fréquences. Il faut cependant noter que ce contrôle externe semble avoir un impact très léger sur l'amplitude et la fréquence des pics de l'impédance d'entrée lorsque la sortie de l'instrument est de forme pavillonnaire (il en va de même pour un tube fin).

4.3.3 Impact de la position de la source primaire

Dans un cas réel où le système de contrôle n'est pas fixé sur le trombone, la position du musicien et de son trombone peut évoluer avec le temps. Cela impacte directement l'efficacité du contrôle.

Dans cette partie, les sources primaire et secondaire sont limitées aux monopôles [Nel+87] tels que présentés dans la Section 4.2.2.1. L'étude se porte sur l'impact de la position de la source primaire par rapport aux sources secondaires sur l'atténuation en puissance du contrôle. L'étude est effectuée avec une source primaire dont la position est répartie aléatoirement en 1000 points dans un hémisphère. Le centre de cette dernière correspond à la position de la source primaire et son rayon est $r_{\text{hs}} = 0.1$ m comme l'illustre la Figure 4.3.7, indiquant également la position des sources secondaires pour le cas **5**.

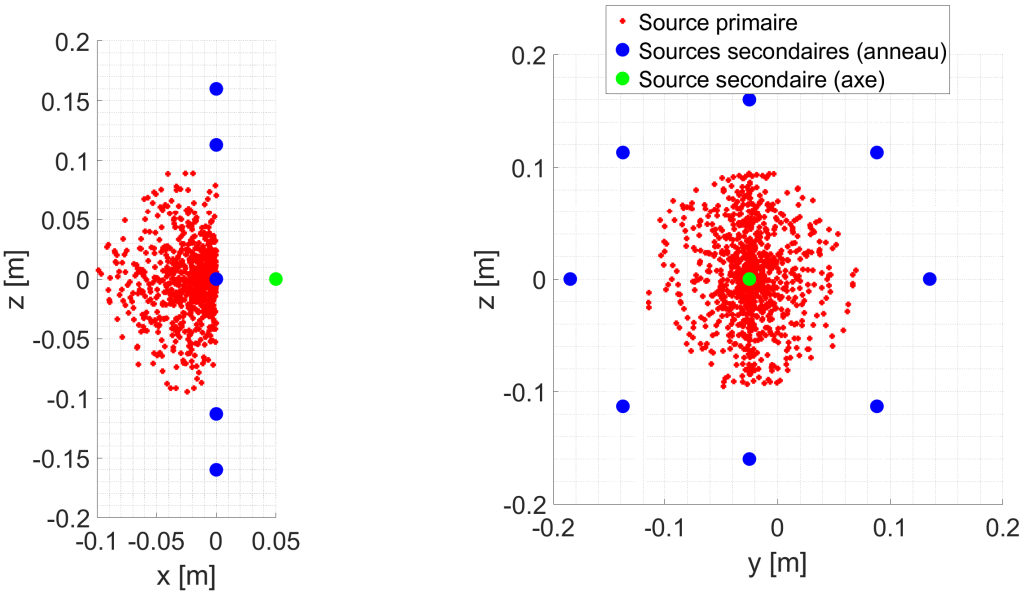


Figure 4.3.7 : Position de la source primaire pour 1000 points répartis aléatoirement dans un hémisphère de rayon $r_{\text{hs}} = 0.1$ m (points rouges), de 8 sources secondaires (points bleus) placées sur un anneau à $h = 0.16$ m par rapport à la position initiale de la source primaire et d'une source secondaire (point vert) placée à $h = 0.05$ m. Gauche : vue de côté, droite : vue de face.

L'atténuation en puissance calculée à partir de l'Équation (4.43) permet de déduire une atténuation en puissance moyenne $\overline{\text{Att}_W}$ sur les 1000 tirages. L'atténuation en puissance la plus faible et la plus forte sont estimées pour chaque fréquence. Elles sont représentées respectivement par $\text{Att}_W^{\text{min}}$ et $\text{Att}_W^{\text{max}}$. Une première étude est effectuée lorsque le filtre $\boldsymbol{w_0} = \frac{\boldsymbol{q_s^W}}{q_0}$ n'est estimé qu'à partir de la position d'origine de la source primaire. Le filtre de contrôle est dans ce cas "fixe". Dans une seconde étude, le filtre $\boldsymbol{w_0}$ est recalculé à chaque nouvelle position de la source primaire. Le filtre est alors "adaptatif".

4.3.3.1 Filtre de contrôle fixe

L'étude se porte dans un premier temps dans une situation où le filtre de contrôle est fixe quelque soit la position de la source primaire. Celui-ci est défini auparavant pour une position fixe de la source primaire et des sources secondaires. Dans un cas expérimental, le filtre serait donc estimé à partir d'une mesure préalable et appliqué par la suite quelque soit la position du musicien. Les cas **1** (1 source secondaire placée à $h_f = 0.05$ m, Figure 4.3.8) et **5** (8 sources placées à $h_r = 0.16$ m et une placée à $h_f = 0.05$ m, Figure 4.3.9) sont étudiés.

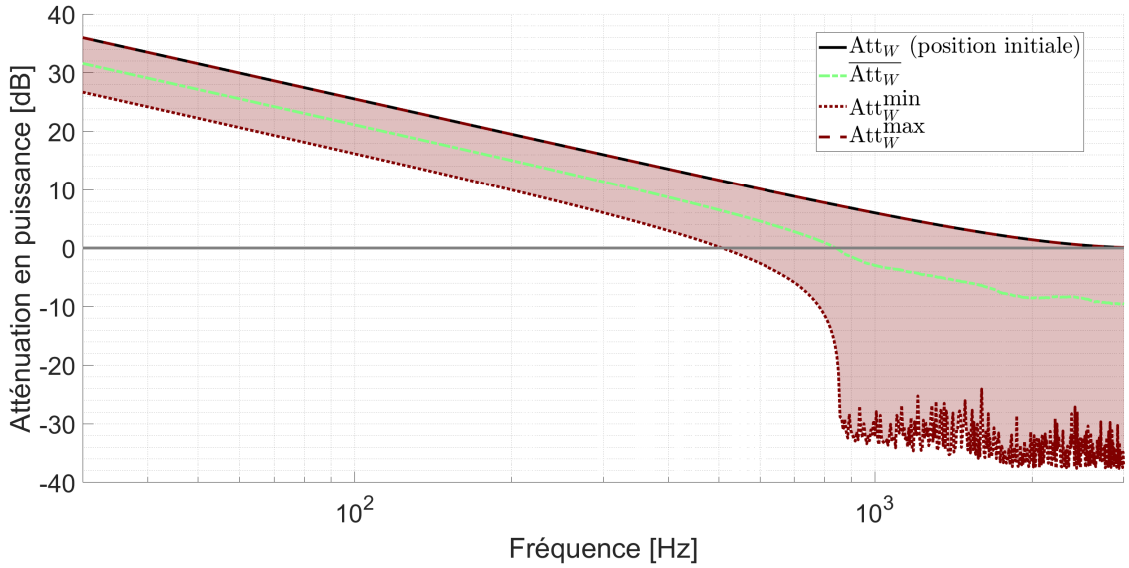


Figure 4.3.8 : Atténuation en puissance pour le cas **1** avec un filtre de contrôle fixe (Att_W initiale : ligne noire continue). La ligne verte tirets/pointillés représente l'atténuation en puissance moyenne $\overline{\mathrm{Att}_W}$. Les courbes rouges correspondent à $\mathrm{Att}_W^{\min}$ (pointillées) et $\mathrm{Att}_W^{\max}$ (tirets).

Si le musicien s'écarte aléatoirement jusqu'à 10 cm de la position initiale, l'atténuation en puissance moyenne $\overline{\mathrm{Att}_W}$ est inférieure de 4 dB par rapport à Att_W initiale et $\mathrm{Att}_W^{\min}$ est plus petit de 10 dB aux basses fréquences. Cet écart augmente progressivement avec la fréquence. Une variation de la position de la source primaire autour du point de référence dégrade ainsi l'atténuation jusqu'à 10 dB aux basses fréquences, et plus quand la fréquence augmente pour le cas **1**.

Le cas **5** présente une chute d'atténuation moyenne plus forte par rapport à la référence (14 dB) pour diminuer jusqu'à 6 dB avec la fréquence. L'atténuation minimum $\mathrm{Att}_W^{\min}$ perd jusqu'à 18 dB d'efficacité en atténuation. La variation de la position de la source primaire rapproche les cas **1** et **5** en termes d'efficacité moyenne d'atténuation en puissance : l'écart d'efficacité entre les 2 cas diminue nettement aux basses fréquences (de 30 dB lorsque la position de la source primaire est fixe à 6 dB lorsque la position est variable). La variation de la position de la source primaire réduit donc drastiquement le gain d'atténuation apportée par une optimisation du nombre de sources secondaires et de leur placement.

4.3.3.2 Filtre de contrôle adaptatif

L'étude concerne maintenant une situation particulière où le filtre de contrôle s'adapte à chaque position de la source primaire. Celui-ci est redéfini à chaque tirage. Dans un cas expérimental, le filtre serait donc estimé en temps réel en fonction de la position du musicien en chaque instant. Les cas **1** (Figure 4.3.10) et **5** (Figure 4.3.11) sont étudiés.

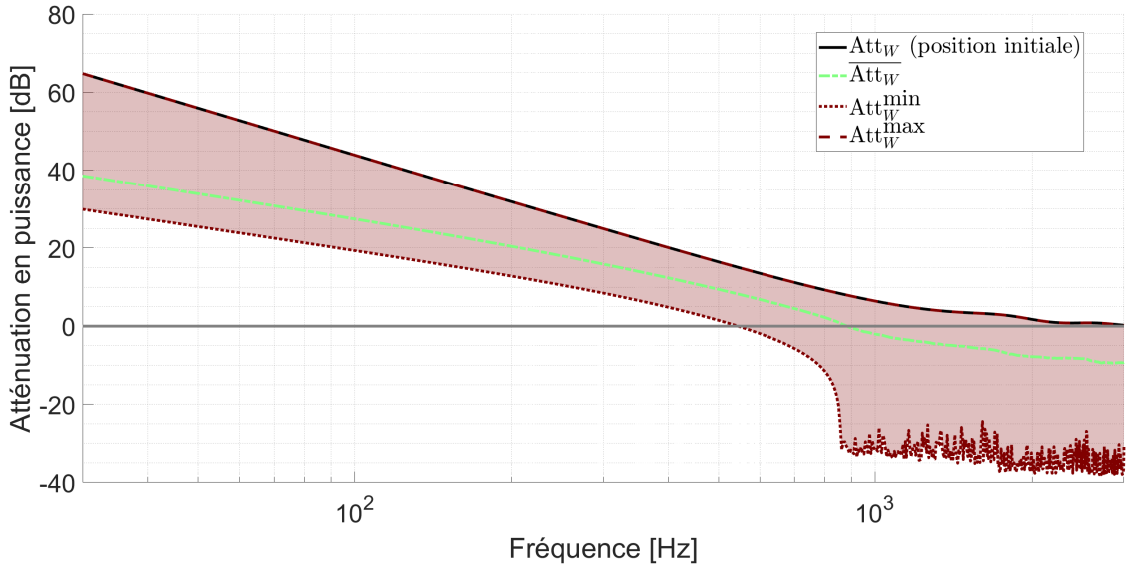


Figure 4.3.9 : Atténuation en puissance pour le cas **5** avec un filtre de contrôle fixe (Att_W initiale : ligne noire continue). La ligne verte tirets/pointillés représente l'atténuation en puissance moyenne $\overline{\mathrm{Att}_W}$. Les courbes rouges correspondent à $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{min}}$ (pointillées) et $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{max}}$ (tirets).

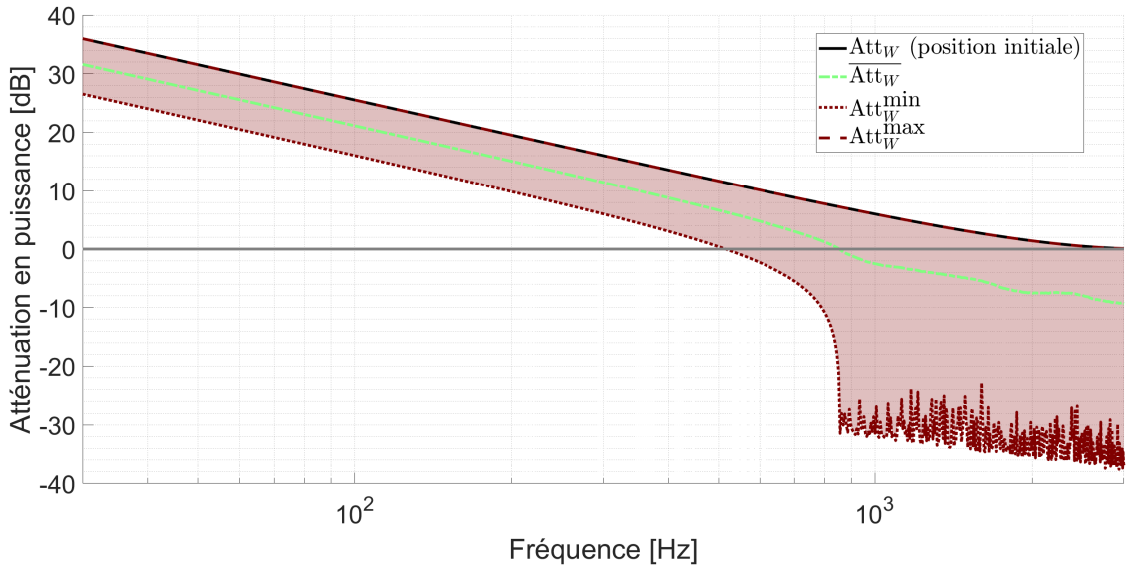


Figure 4.3.10 : Atténuation en puissance pour le cas **1** avec un filtre de contrôle adaptatif (Att_W initiale : ligne noire continue). La ligne verte tirets/pointillés représente l'atténuation en puissance moyenne $\overline{\mathrm{Att}_W}$. Les courbes rouges correspondent à $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{min}}$ (pointillées) et $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{max}}$ (tirets).

Les résultats sont similaires à la situation où le filtre de contrôle est fixe pour le cas **1**. Il n'y a qu'une seule source secondaire pour effectuer le contrôle sur une source primaire dont la position est variable. L'inversion matricielle résultante est alors équivalente que le filtre de contrôle soit fixe ou adaptatif.

Le filtrage adaptatif permet de maintenir l'efficacité du contrôle lié à l'augmentation du nombre de sources pour le cas **5**. La perte d'efficacité par rapport à la référence est même très faible (3 dB), $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{min}}$ est seulement 10 dB en dessous de la référence et l'atténuation peut même augmenter (+4 dB pour $\mathrm{Att}_W^{\mathrm{max}}$). Cela est dû à la proximité permanente (quand la position de la source primaire varie) d'une

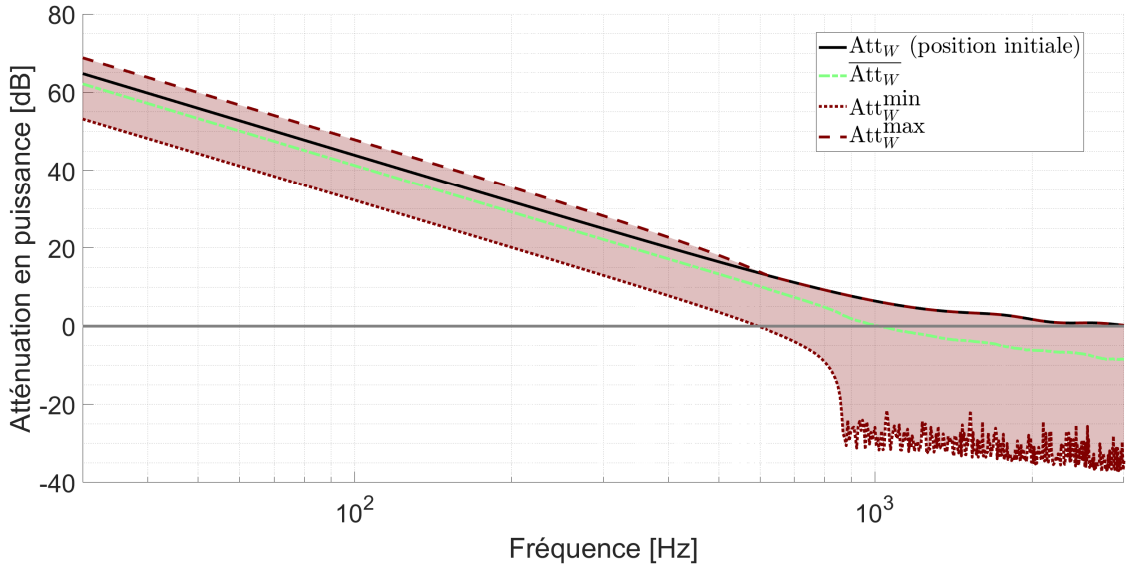


Figure 4.3.11 : Atténuation en puissance pour le cas **5** avec un filtre de contrôle adaptatif (Att_W initiale : ligne noire continue). La ligne verte tirets/pointillés représente l'atténuation en puissance moyenne $\overline{\mathrm{Att}_W}$. Les courbes rouges correspondent à $\mathrm{Att}_W^{\min}$ (pointillées) et $\mathrm{Att}_W^{\max}$ (tirets).

source secondaire.

4.3.3.3 Discussion

Deux résultats sont mis en avant lorsque la source primaire se déplace au maximum de 10 centimètres autour de sa position initiale. Premièrement, l'efficacité du contrôle ne change pas que le filtre de contrôle soit fixe ou qu'il s'adapte en temps réel à la position de la source primaire s'il n'y a qu'une seule source secondaire (cas **1**). La raison est que la position initiale de la source primaire correspond au cas où l'atténuation en puissance est la meilleure. Deuxièmement, le filtre adaptatif prend du sens lorsque plusieurs sources secondaires sont positionnées autour de la source primaire avec une atténuation moyenne supérieure de 20 dB entre 50 et 500 Hz pour le cas **5** entre le filtre fixe et adaptatif. Ce dernier calcule l'inversion matricielle pour chaque nouvelle position et permet d'optimiser le débit produit par chaque source secondaire pour que l'efficacité du contrôle soit améliorée.

Cette étude confirme que la distance h entre la source primaire et les sources secondaires est un élément clé de l'efficacité du contrôle. Quelque soit le cas étudié, l'atténuation en puissance moyenne est faible au-dessus de 900 Hz lorsque la position de l'instrument de musique varie de manière aléatoire autour du système de contrôle (de 10 cm au maximum pour cette étude). En ce qui concerne les fréquences inférieures à 900 Hz, le contrôle est plus efficace lorsque les sources secondaires sont réparties de la manière la plus dispersée possible autour des positions possibles de la source primaire. Les cas particuliers où l'atténuation en puissance est importante sont ceux où la position de la source primaire est proche d'une des sources secondaires. Sans régularisation appliquée à la fonction coût, le débit requis pour la source secondaire la plus proche est systématiquement bien plus important que celui requis pour les autres sources secondaires.

4.3.4 Synthèse

Pour résumer les différentes simulations numériques, l'impact de la position et du nombre de sources montre que le contrôle est davantage efficace vers les hautes fréquences à mesure que les sources secon-

daires se rapprochent de la source primaire. Au-delà de 4 sources secondaires, augmenter le nombre de sources n'augmente que très peu l'atténuation en puissance mais réduit l'effort sur les sources secondaires - dans un cas où la position de la source primaire est fixe par rapport aux sources secondaires.

L'étude de l'impact du contrôle sur les impédances de rayonnement et d'entrée de l'instrument montre qu'un contrôle externe appliqué à un trombone semble avoir un impact négligeable sur les premiers pics de résonance de l'instrument.

Enfin, si la distance entre la source primaire et les sources secondaires varie au cours du temps, alors augmenter le nombre de sources secondaires et les disperser dans l'espace permet de maintenir l'efficacité du contrôle. Le contrôle peut néanmoins produire une amplification de la puissance aux hautes-fréquence pour certaines positions de la source primaire et des sources secondaires. Un compromis est donc à définir entre l'atténuation en puissance souhaitée, le nombre de sources secondaires et la distance séparant la source primaire des sources secondaires.

Ces études sont cependant réalisées pour un cas idéal avec des sources ponctuelles ou des tuyaux cylindriques qui ne représentent pas le rayonnement du trombone aux moyennes et hautes fréquences. Une mesure des réponses en fréquence des différentes sources (trombone, haut-parleurs) va permettre de confronter le modèle théorique aux résultats expérimentaux.

4.4 Expérience

Le système est maintenant étudié expérimentalement. Le but est d'estimer le filtre de contrôle $\boldsymbol{w_1} = \frac{\boldsymbol{u_s^W}}{u_0}$ (Équation (4.39)) entre les tensions d'excitation des haut-parleurs de contrôle et du haut-parleur excitant le trombone. La tension optimale des sources secondaires $\boldsymbol{u_s^W}$ définie par l'Équation (4.38) est estimée à partir des fonctions de transfert mesurées entre la tension au niveau du haut-parleur relié au trombone et des haut-parleurs de contrôle et la pression mesurée au niveau des récepteurs. L'impact du contrôle expérimental sur l'impédance d'entrée sera également évalué.

4.4.1 Protocole expérimental

L'expérience se déroule dans la chambre anéchoïque du LAUM. Le dispositif expérimental est constitué par un trombone (pBone) connecté à un tuyau en plastique de 1 m excité par un haut-parleur à compression *Faital HF10AK* (Figures 4.4.1 et 4.4.2). Une première configuration se compose de 8 haut-parleurs de contrôle *Beyma 3FR30Nd* placés autour du pavillon du trombone, sur un anneau de 0.16 m de rayon dont le centre correspond à celui du pavillon du trombone. Une seconde configuration comporte un autre haut-parleur de contrôle placé devant le pavillon à $h_f = 0.05$ m comme dans le cas **5** de la Figure 4.3.1.

Tous les haut-parleurs sont excités par un sinus glissant entre 40 Hz et 3 kHz. La fréquence basse limite est choisie à partir de la plus basse fréquence fondamentale jouée par le trombone (c'est-à-dire $Si_\flat 1$, $f_0 = 58$ Hz). La fréquence la plus élevée se situe autour de 3 kHz où le contrôle optimal n'est plus efficace comme le montre la Figure 4.3.2.

Les pressions acoustiques sont mesurées en 614 points répartis sur une sphère de rayon $r = 1.94$ m, avec $\Delta\phi = 10°$ et $\Delta\theta = 10°$. En pratique, seuls 10 récepteurs (microphones 1/2" : *B&K 4190* et *GRAS 40-AG*) sont positionnés sur une tige en quart de cercle tandis que le trombone et les sources secondaires sont placés sur une table tournante (Figure 4.4.1). Cette dernière est déplacée tous les 10° sur 360°. La pression ne peut donc être mesurée que sur la moitié supérieure de la sphère. Le trombone et l'anneau de sources secondaires sont ensuite retournés afin que les microphones puissent mesurer la pression sur la moitié inférieure de la sphère. L'estimation de la puissance est alors calculée à partir de l'Équation (4.27) en supposant que la table tournante et le cadre supportant les sources (recouverts de mousse absorbante) n'influencent pas le rayonnement acoustique.

4.4.2 Minimisation de la puissance

L'atténuation en puissance résultant du contrôle en champ lointain estimé dans la Section 4.2.2.2 est évaluée expérimentalement. La Figure 4.4.3 montre l'atténuation en puissance pour un cas avec 8 haut-parleurs de contrôle sur un anneau à $h_r = 0.16$ m. Elle compare les résultats théoriques et expérimentaux obtenus à partir de deux séries de mesures. Les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés sur la Figure 4.4.4.

Pour le cas d'un contrôle avec 8 sources, l'expérience s'accorde qualitativement avec la théorie à partir de 200 Hz, malgré un écart de 6 dB qui diminue quand la fréquence augmente. L'atténuation minimale se situe comme prévu à $kh = \pi$ ($f = 1$ kHz). En-deçà, les comportements divergent avec une légère amplification atteignant 3 dB.

Pour les fréquences inférieures à 200 Hz, l'écart entre les résultats expérimentaux et théoriques augmente à mesure que la fréquence diminue. Cette différence peut être expliquée par plusieurs sources d'erreur :

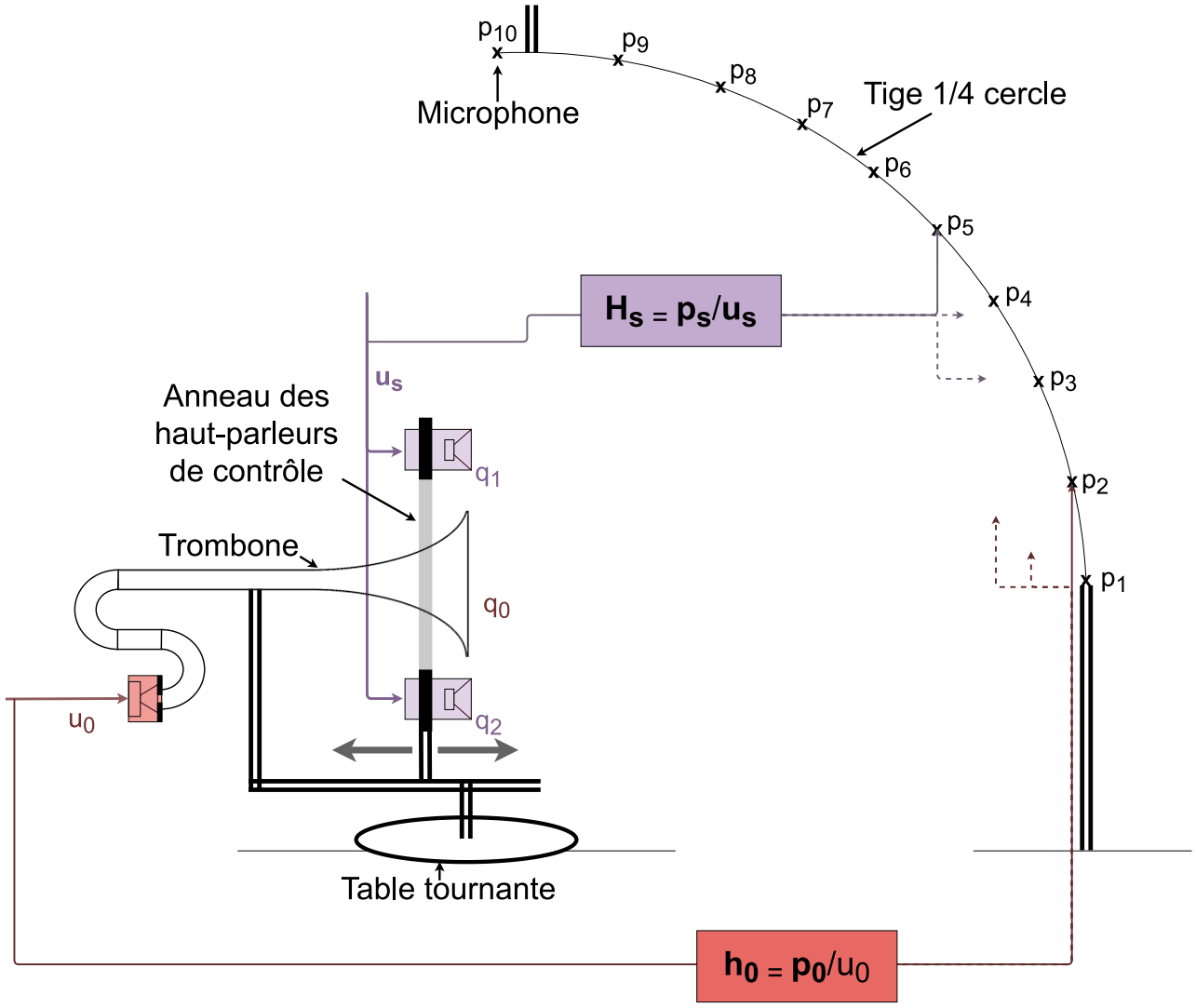


Figure 4.4.1 : Présentation simplifiée du dispositif expérimental pour un cas avec 2 sources secondaires. Les fonctions de transfert $\boldsymbol{H_s}$ et $\boldsymbol{h_0}$ entre la tension d'alimentation des sources et la pression mesurée aux récepteurs sont représentées par des schémas blocs.

un faible rapport signal/bruit (RSB), la variation de la distance source/récepteur, la variation de la température et la présence de modes de salle.

Tout d'abord, le RSB a été estimé à 37 dB autour de 100 Hz. Le bruit de fond est principalement électrique et diminue avec la fréquence, ce qui conduit à un impact plus important aux basses fréquences. Ce faible RSB influence l'inversion de matrice (réalisée avec la commande backslash sur MATLAB). Le conditionnement de $\boldsymbol{A_1}$ atteint effectivement environ 10^5 en dessous de 350 Hz et diminue à 10^2 dans les hautes fréquences. Ce conditionnement élevé justifie pourquoi l'inversion matricielle ne peut permettre d'atteindre une atténuation en puissance équivalente à celle théorique. De plus, des modes de salle sont présents jusqu'à 140 Hz. Certains microphones peuvent être situés sur des nœuds, ce qui induit également un faible RSB et des variations locales (fréquentiellement) de l'atténuation en puissance résultante en dessous de 200 Hz expliquant probablement les oscillations visibles sur les courbes expérimentales.

Deuxièmement, le centre acoustique du trombone se déplace à priori à l'intérieur du trombone lorsque la fréquence augmente [Ren+18]. De plus, lorsque les sources secondaires tournent sur 360°, la distance entre chaque récepteur et chaque source varie. Par ailleurs, la mesure de la pression en tout point de

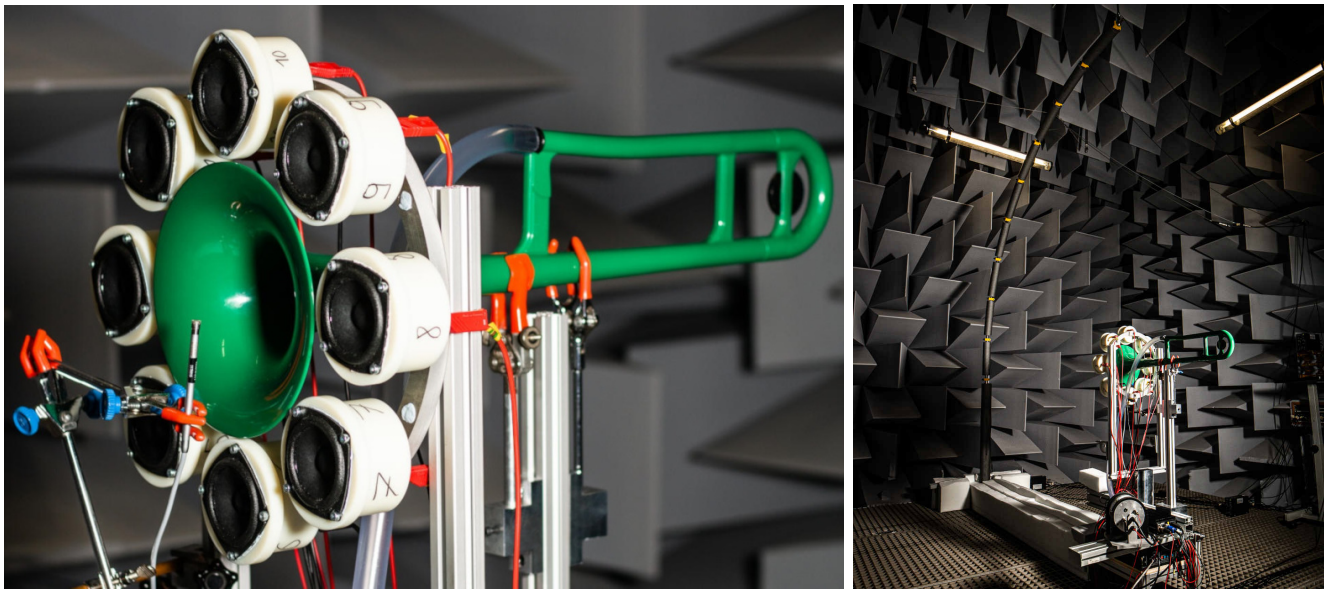


Figure 4.4.2 : Source primaire contrôlée par 8 haut-parleurs de contrôle placés sur un anneau autour du pavillon (à gauche). 10 microphones placés à 2 mètres du trombone mesurent l'onde rayonnée par chaque source (à droite).

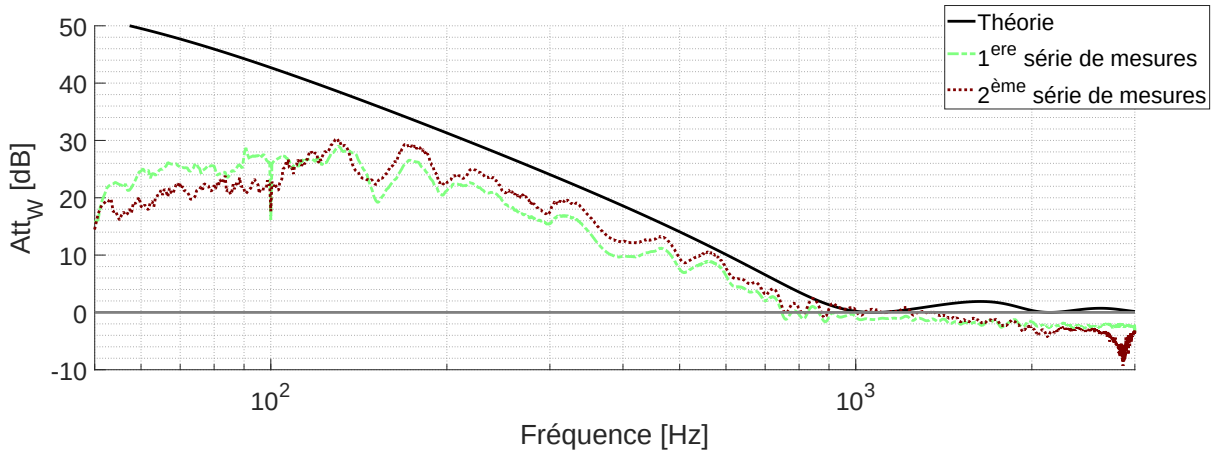


Figure 4.4.3 : Atténuation en puissance Att_W pour le cas **3** (8 sources). Théorie : $h_r = 0.16$ m (ligne continue). Mesure (sur 2 séries, lignes en pointillés et en tirets) : 8 haut-parleurs de contrôle sont placés sur un anneau à $h_r = 0.16$ m comme indiqué dans la Figure 4.4.2.

la sphère dure au moins 5 heures. La température de la pièce varie pendant ce temps d'environ 4 °C, entraînant une variation de la célérité du son. Ces trois types de variation génèrent une erreur de phase par rapport à la théorie, estimée à 0.026 rad à 100 Hz, qui induit des variations locales de l'atténuation en puissance en fonction de la fréquence.

Ces sources d'erreur ont été simulées en ajoutant un bruit aléatoire gaussien en amplitude et en phase sur les propagateurs théoriques $\boldsymbol{g_0}$ et $\boldsymbol{G_s}$ (entre les sources primaire ou secondaires et les récepteurs) induisant un RSB de 34 dB à 100 Hz. Cet ajout d'un bruit artificiel permet d'ajuster la théorie aux résultats expérimentaux d'atténuation en puissance (ligne continue avec des croix sur la Figure 4.4.4). L'atténuation expérimentale peut également être retrouvée en ajoutant un terme de régularisation $\beta = 200$ à $\boldsymbol{A_0}$ (Équation (4.17)) sans bruit aléatoire ajouté (ligne en tirets sur la Figure 4.4.4). Il est choisi pour la suite de cette partie que seul un bruit soit rajouté à la théorie pour ne pas rajouter de paramètre

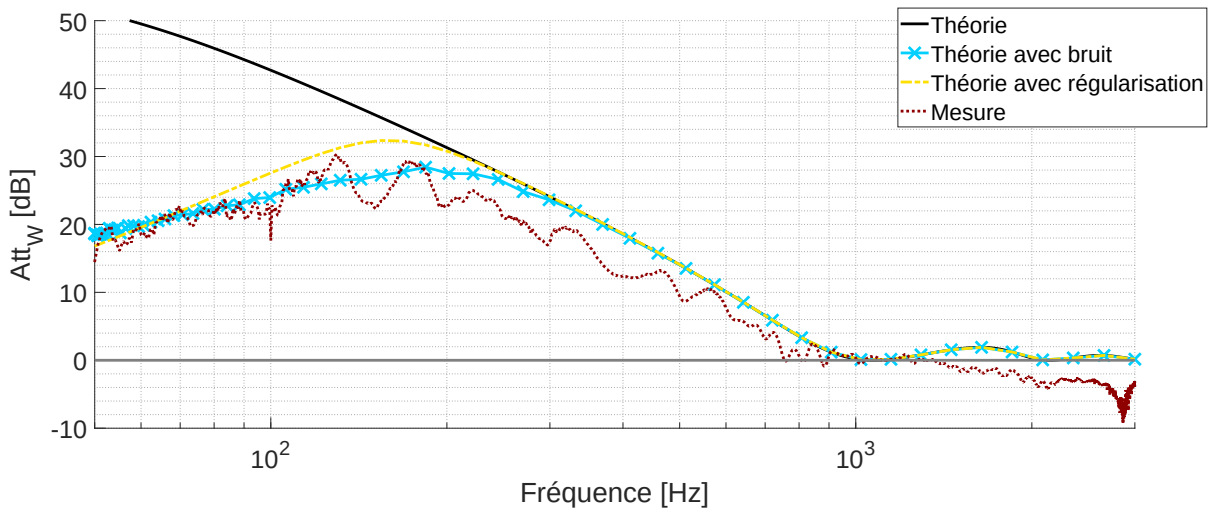


Figure 4.4.4 : Atténuation en puissance Att_W pour le cas **3** (8 sources). Théorie : $h_r = 0.16$ m sans bruit aléatoire (ligne continue), avec bruit aléatoire (ligne continue avec croix) ou avec une régularisation ($\beta = 200$, ligne en tirets). Mesure (lignes en pointillés) : 8 haut-parleurs de contrôle sont placés sur un anneau à $h_r = 0.16$ m comme indiqué dans la Figure 4.4.2.

de régularisation à la fonction coût.

Lorsqu'une neuvième source est ajoutée à $h_f = 0.05$ m sur l'axe principal de rayonnement du trombone, l'atténuation en puissance est représentée sur la Figure 4.4.5. Malgré le bruit ajouté dans les propagateurs théoriques, une différence est encore présente aux basses fréquences jusqu'à 200 Hz, ce qui est similaire au cas étudié précédemment avec 8 haut-parleurs de contrôle. Au-delà de 2 kHz, l'atténuation est nulle, avec une légère augmentation de l'amplification jusqu'à 5 dB.

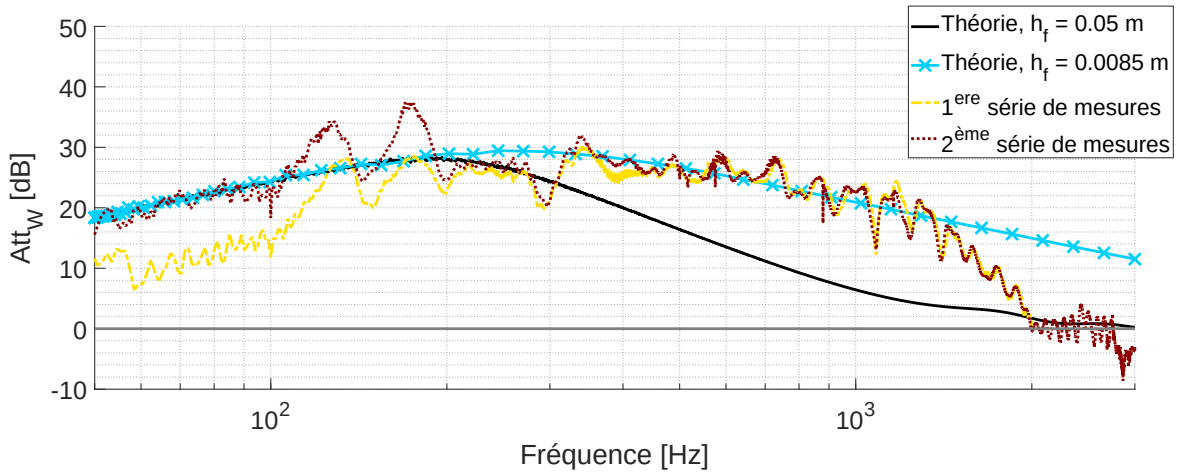


Figure 4.4.5 : Atténuation en puissance Att_W pour le cas **5** (9 sources). Théorie avec bruit aléatoire : $h_r = 0.16$ m et $h_f = 0.05$ m (ligne continue) ou $h_f = 0.0085$ m (ligne continue avec croix). Mesure (sur 2 séries, lignes tirets et pointillés) : 8 haut-parleurs de contrôle sont placés sur un anneau à $h_r = 0.16$ m et un neuvième à $h_f = 0.05$ m devant le trombone.

L'atténuation estimée par le modèle expérimental (lignes en tirets et en pointillés) est supérieure à l'atténuation théorique (ligne continue) entre 350 Hz et 2000 Hz. Cet écart peut être expliqué par une modification du champ rayonné par la source primaire due à la position de la neuvième source secondaire proche du pavillon du trombone ($h_f = 0.05$ m). En faisant l'hypothèse que la source primaire est située à

$h_f = 0.0085$ m du haut-parleur 9, le modèle bruité aléatoirement utilisant des monopoles (ligne continue avec des croix dans la Figure 4.4.5) est en accord avec les résultats expérimentaux pour des fréquences comprises entre 50 et 1500 Hz. La position centrale acoustique du haut-parleur de contrôle serait située à quelques centimètres devant sa membrane comme indiqué dans [Ure98 ; CJA15]. La distance effective entre le centre acoustique du trombone et la neuvième source serait ainsi plus petite que la distance physique. Cette hypothèse pourrait expliquer la sur-atténuation estimée expérimentalement mais doit être étudiée plus en profondeur.

Pour vérifier cette hypothèse, l'atténuation en puissance d'un trombone avec un seul haut-parleur de contrôle devant le pavillon est étudiée numériquement. Un modèle axisymétrique 2D (schéma sur la Figure 3.2.8b, méthode développée en Section 3.2.2) du système est conçu par éléments finis (FEM) avec COMSOL Multiphysics ® et utilisé pour valider le modèle expérimental.

Une source primaire produisant des ondes planes avec un débit q_{in} est placée à l'embouchure de l'instrument. Une source secondaire de débit q_{ss} est modélisée comme un piston monté dans une enceinte close. Celle-ci est considérée comme omnidirectionnelle aux basses fréquences. La source est placée à $h_f = 0.05$ m devant l'instrument. Le diamètre de sa membrane fait 0.076 m, celui de son enceinte 0.1 m et sa longueur est de 0.05 m. Les pertes viscothermiques à la surface des parois ne sont pas prises en compte. Une PML (Perfectly Matched Layer) adapté au bord du domaine reproduit l'air entourant l'instrument comme un domaine infini ouvert et non réfléchissant. Comme pour le protocole expérimental, l'atténuation en puissance est estimée sur des points de pression également répartis autour de la source en champ lointain avec l'Équation (4.27). Le résultat de cette simulation est présenté avec la Figure 4.4.6.

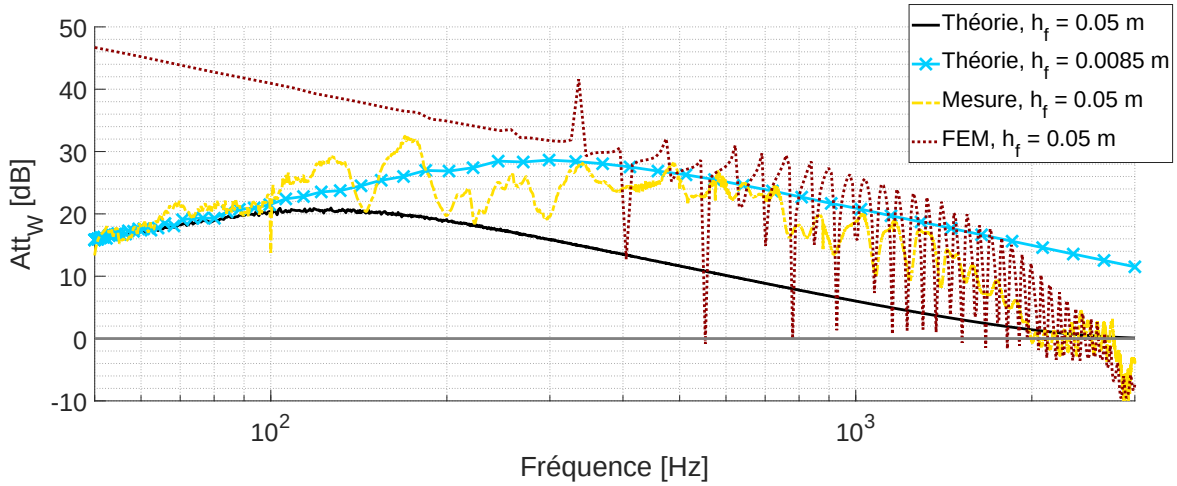


Figure 4.4.6 : Atténuation en puissance Att_W pour le cas **1** (1 source). Théorie avec bruit aléatoire : $h_f = 0.05$ m (ligne continue) ou $h_f = 0.0085$ m (ligne avec croix). Mesure (ligne en tirets) : 1 haut-parleur de contrôle placé devant le trombone à $h_f = 0.05$ m. FEM sans bruit ajouté (ligne en pointillés) : $h_f = 0.05$ m.

L'atténuation en puissance estimée par la FEM correspond en moyenne à celle de l'expérience de 500 Hz à 3 kHz pour un cas avec 1 source placée à $h_f = 0.05$ m. Une différence peut être observée aux positions des pics et des creux qui est due à l'absence d'amortissement au sein du modèle numérique de l'instrument.

Les atténuations en puissance de la FEM et de l'expérience ne correspondent pas à celles du modèle analytique. La source secondaire doit être placée à $h_f = 0.0085$ m dans le modèle analytique pour

correspondre en moyenne au modèle FEM sur la bande [400 - 1300] Hz. Cela suggère que les sources équivalentes primaire et secondaires se rapprochent lorsqu'une source secondaire est située devant et près du pavillon de l'instrument. Une série de mesures additionnelles (effectuée dans le cadre de l'étude du contrôle de la directivité) permet d'observer l'impact du centre acoustique sur le contrôle en puissance en annexe B.2. Un décalage apparait encore une fois entre la théorie et l'expérience que la source secondaire devant le pavillon du trombone soit proche ($h_f = 0.05$ m) ou éloignée ($h_f = 0.45$ m) du pavillon de l'instrument.

Cette section apporte deux résultats. L'expérience est premièrement en adéquation avec la théorie entre 200 et 2000 Hz lors d'un contrôle avec 8 haut-parleurs de contrôle ou plus généralement lors d'un contrôle avec des sources secondaires placées sur un anneau autour du trombone. Deuxièmement, la théorie sous-estime l'atténuation en puissance produite dans cette bande fréquentielle lorsqu'une source est placée dans l'axe principal de propagation du trombone. L'hypothèse avancée est que la position du centre acoustique cette source et de la source primaire sont plus proches expérimentalement que théoriquement (avec un modèle monopolaire).

4.4.3 Impact sur l'impédance d'entrée

L'atténuation en puissance pour différents montages ayant été étudiée, cette section étudie l'impact du contrôle externe sur l'impédance d'entrée de l'instrument. Les études théorique ou expérimentale précédentes (en Section 4.3.2 et dans [Ayr+16]) ont montré qu'un contrôle externe a un très faible impact sur les premiers pics de l'impédance d'entrée de l'instrument. Dans cette étude, la source secondaire ayant le plus d'impact sur l'impédance d'entrée est celle placée le plus près du pavillon du trombone. Le cas **1** de la Figure 4.3.1 où un seul haut-parleur de contrôle est placé à $h_f = 0.05$ m de la source primaire est donc étudié. L'impédance d'entrée n'est pas mesurée en présence du contrôle mais est prédite à partir de mesures de fonctions de transfert.

4.4.3.1 Procédure

La Figure 4.4.7 montre le montage expérimental utilisé pour l'estimation de l'impédance d'entrée avec contrôle. La source primaire est reliée à un capteur d'impédance [Dal01a ; Dal01b] sur une cavité arrière avec une pression p_{0r} et menant à un résonateur dont la pression devant le capteur d'impédance est p_{0f}. L'impédance d'entrée du résonateur est estimée sans contrôle à partir des mesures présentées en Section A.2.3 par la Figure A.2.4.

Dans un cas général avec N_s sources secondaires, celles-ci sont alimentées par une tension $\boldsymbol{u_s}$, émettant un débit $\boldsymbol{q_s}$ et générant une pression $\boldsymbol{p_{s_f}}$ devant le capteur d'impédance :

$$\boldsymbol{p_{s_f}} = \boldsymbol{H_{s_f}} \boldsymbol{u_s}, \tag{4.51}$$

où :

$$\boldsymbol{H_{s_f}} = \boldsymbol{Z_{0_s}} \boldsymbol{H_{q_s}}, \tag{4.52}$$

avec $\boldsymbol{Z_{0_s}} = \boldsymbol{q_s^{-1}} \boldsymbol{p_{s_f}}$ l'impédance de transfert et $\boldsymbol{H_{q_s}} = \frac{\boldsymbol{q_s}}{\boldsymbol{u_s}}$ la réponse en débit des sources secondaires. Dans une situation de contrôle, la pression en face du capteur d'impédance est :

$$p'_f = p_{0_f} + \sum_{i=1}^{N_s} p_{i_f} = p_{0_f} + \boldsymbol{Z_{0_s}} \boldsymbol{H_{q_s}} \boldsymbol{u_s}. \tag{4.53}$$

L'impédance devient donc :

$$Z_{ec} = \frac{p'_f}{q'_{0_r}} = Z_e + \boldsymbol{Z_{0_s}} \boldsymbol{H_{q_s}} \frac{\boldsymbol{u_s}}{q'_{0_r}}, \tag{4.54}$$

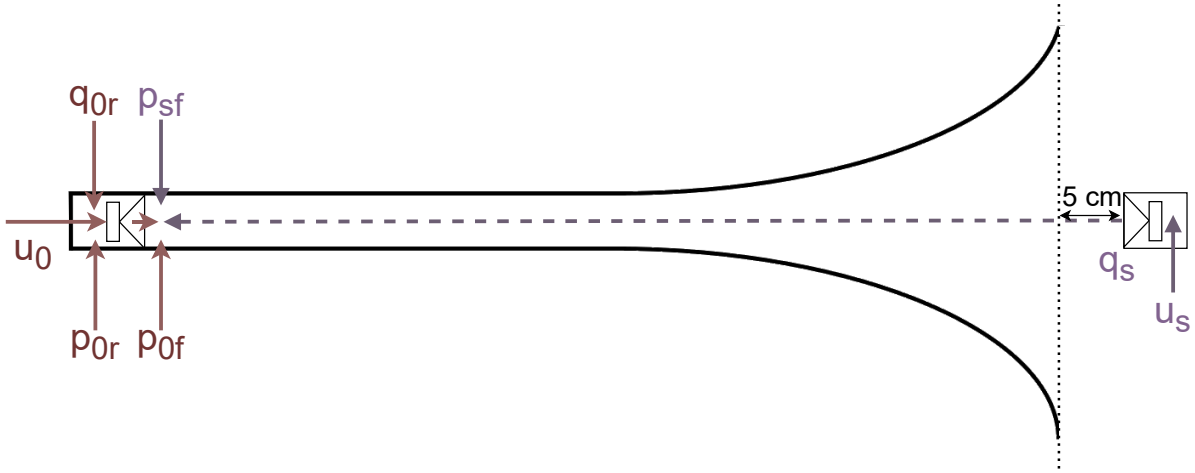


Figure 4.4.7 : Présentation simplifiée du montage expérimental d'un contrôle avec un capteur d'impédance connecté au tuyau en plastique de 1 mètre relié au trombone. Un haut-parleur de contrôle est placé à 0.05 m du pavillon du trombone.

où q'_{0_r} est le débit de la source primaire en présence du contrôle. En supposant que le rayonnement des sources secondaires n'affecte pas le débit de la source primaire, ce dernier peut alors s'écrire $q'_{0_r} = q_{0_r}$.

Sachant que la tension secondaire correspond à $\boldsymbol{u_s^W} = u_0 \boldsymbol{w_1}$, il est possible d'écrire :

$$\frac{\boldsymbol{u_s}}{q'_{0_r}} = \frac{u_0 \boldsymbol{w_1}}{q_{0_r}} = \frac{\boldsymbol{w_1}}{H_{q_{0_r}}}. \tag{4.55}$$

L'impédance avec contrôle s'écrit donc :

$$Z_{ec} = Z_e + Z_{0_s} \frac{\boldsymbol{H_{q_s}}}{H_{q_{0_r}}} \boldsymbol{w_1}. \tag{4.56}$$

L'Équation (A.5) permet alors d'écrire :

$$Z_{ec} = Z_e (1 + \frac{\boldsymbol{H_{s_f}}}{H_{0_f}} \boldsymbol{w_1}), \tag{4.57}$$

avec $\boldsymbol{H_{s_f}} = \frac{\boldsymbol{p_{s_f}}}{\boldsymbol{u_s}}$ la réponse en pression de la source secondaire à l'avant du capteur d'impédance.

Une difficulté lors de la mesure de l'impédance d'entrée en présence du contrôle est que le haut-parleur installé dans le capteur d'impédance est celui utilisé pour exciter la source primaire. Celui-ci rayonne un niveau beaucoup plus faible que celui utilisé lors de la mesure présentée en Section 4.4.2 et ne peut donc pas être utilisé pour effectuer la mesure de la pression en champ lointain sur une sphère de microphones placés à 2 m. Z_e est ainsi mesuré indépendamment du contrôle lorsque le capteur d'impédance (présenté dans [Dal01a ; Dal01b]) excite le montage du trombone relié à un tuyau de 1 mètre alors que H_{s_f}, H_{0_f} et w_1 sont respectivement estimés en présence du contrôle lorsque le montage est excité par le haut-parleur à compression *Faital HF10AK*.

4.4.3.2 Résultats

L'impact du contrôle de la puissance acoustique sur l'impédance d'entrée est montré sur la Figure 4.4.8 avec un capteur d'impédance connecté au tuyau en plastique de 1 mètre relié au trombone comme le montre la Figure 4.4.2.

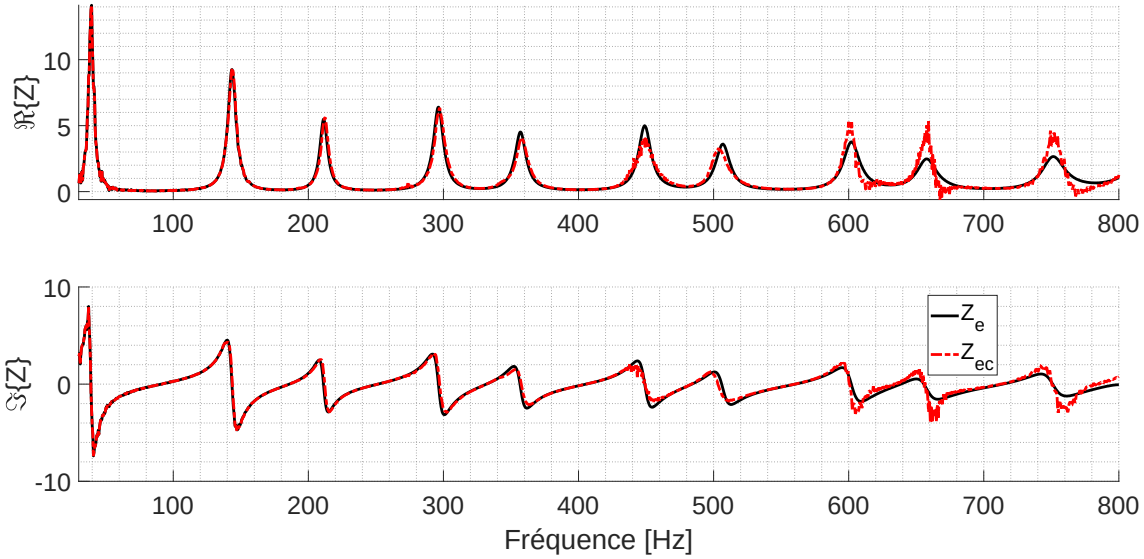


Figure 4.4.8 : Parties réelles $\Re\{Z\}$ et imaginaires $\Im\{Z\}$ de l'impédance d'entrée expérimentale sans contrôle (Z_e - ligne continue) et avec contrôle (Z_{ec} - ligne en tirets). Un seul haut-parleur de contrôle est placé à 0.05 m du pavillon du trombone (cas **1**).

L'écart d'amplitude de l'impédance d'entrée sans et avec contrôle est défini pour chaque pic à partir de leur partie réelle. L'écart de fréquence est estimé lorsque les parties imaginaires passent par 0 aux résonances. Ces écarts sont donnés en dB pour l'amplitude et en cents pour la fréquence dans le Tableau 4.4.1.

Pic n°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
f (Hz)	39	143	211	297	357	450	505	602	659	752
ΔA (dB)	<0.1	0.1	0.2	0.1	0.9	1.7	0.8	2.9	6.6	4.8
Δf (cent)	<1	1.1	2.2	1.6	1.5	0.5	3.1	1.3	0.9	0.7

Tableau 4.4.1 : Écarts d'amplitude (ΔA) et de fréquence (Δf) pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée du trombone sans et avec contrôle pour un cas avec un haut-parleur placé à 0.05 m du pavillon (cas **1**).

Si l'on considère les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée du trombone dans le cas d'un haut-parleur placé à 0.05 m du pavillon, l'écart maximal de fréquence est d'environ 3 cents pour le septième pic (contre 9 cents au maximum dans la théorie présentée en Section 4.3.2) et le décalage d'amplitude atteint 6,6 dB pour le neuvième (contre 2 dB au maximum en théorie). Globalement, la théorie et la mesure indiquent que l'impact du contrôle de la puissance sur l'impédance d'entrée est presque inexistant jusqu'à la cinquième résonance du trombone.

Les valeurs plus élevées d'impédances aux hautes fréquences dues au contrôle rendent le trombone légèrement plus facile à jouer comme cela est démontré dans [Meu+15]. Cela aurait pour conséquence de produire un timbre différent à ces fréquences. Néanmoins, l'impact du contrôle pour plusieurs positions de la coulisse du trombone devrait être étudié pour valider ces premiers résultats.

4.4.4 Synthèse

Pour conclure, la mesure et le modèle analytique sont en accord à partir de 200 Hz lorsque les haut-parleurs de contrôles sont uniquement sur un anneau autour du trombone. La divergence aux basses fréquences est due à diverses limites expérimentales modélisables par l'ajout de bruit au modèle ou d'une régularisation. Lorsqu'un haut-parleur de contrôle est rajouté devant le pavillon du trombone, l'atténuation en puissance est sous-estimée par la théorie, qui suggère un rapprochement des centres acoustiques du trombone et de ce haut-parleur (hypothèse qui devra être confirmée).

Le contrôle a un impact très faible sur les premiers pics de l'impédance d'entrée de l'instrument, de l'ordre de 3 cents de déviation maximale en fréquence et de moins de 2 dB de déviation d'amplitude pour les fréquences inférieures à 600 Hz, l'effet sur le jeu du musicien est donc très limité.

Une étude numérique prenant en compte des pertes viscothermiques dans la partie interne de l'instrument permettrait d'étudier l'impact du contrôle sur l'impédance d'entrée de celui-ci en fonction de la distance h_f entre le pavillon et le haut-parleur de contrôle placé devant. L'impact du diamètre de la membrane du haut-parleur de contrôle pourrait également être étudié. Il est supposé que l'impact du contrôle se réduit à mesure que la distance h_f augmente et qu'augmenter le diamètre de la membrane du haut-parleur doit augmenter l'impact du contrôle sur Z_e.

4.5 Faisabilité technologique

Le but de cette partie est d'évaluer la puissance électrique nécessaire à appliquer aux haut-parleurs de contrôle et leur déplacement de leur partie mobile lorsque le trombone est joué par un musicien au lieu d'être excité par un haut-parleur.

Le système de contrôle (anneau de sources secondaires + celle située devant le trombone) n'est pas nécessairement attaché au trombone. Le poids des haut-parleurs de contrôle n'est donc pas étudié dans cette partie, la Section 4.3.3 démontrant cependant dans ce cas que l'efficacité de l'atténuation en puissance est réduite lorsque le musicien se déplace.

Le débit du haut-parleur est défini selon ses paramètres T&S [Sma72] et peut donc être comparé à celui requis pour un contrôle du trombone avec une nuance de jeu *fortissimo*. L'étude se porte :

1. sur la puissance électrique requise comparée à celle nominale du haut-parleur,
2. sur le déplacement requis confronté au déplacement maximal du diaphragme du haut-parleur.

Le haut-parleur utilisé lors de la mesure présentée en Section 4.4 et étudié dans cette partie est un *Beyma 3FR30Nd* avec une fréquence de résonance F_s de 188 Hz, une puissance nominale W_{nom} de 30 W, une impédance d'entrée Z_e de 6.4 Ω, une surface effective S_d de 0.003 m^2 et une excursion maximale x_{max} de 4.5 mm.

4.5.1 Puissance électrique

Un contrôle est simulé lorsque la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) représentée sur la Figure 3.1.4 est jouée. Cette note produit le plus haut niveau sonore global par rapport aux autres notes mesurées. 8 haut-parleurs de contrôle sont placés à $h = 0.16$ m de la source primaire (cas **3**). L'atténuation en puissance correspondante est affichée sur la Figure 4.3.2. La puissance électrique d'entrée requise pour un haut-parleur de contrôle i dépend de sa tension de contrôle optimal $\boldsymbol{u_s^W}$ et peut être exprimée comme suit :

$$W_i = \frac{1}{Z_s} \sum_{\omega_j=1}^{N_\omega} |\boldsymbol{u_i^W}(\omega_j)|^2, \tag{4.58}$$

avec $\boldsymbol{u_i^W} = q_0 \boldsymbol{w_2}$ la tension optimale pour le haut-parleur i telle que définie dans la Section 4.2.2.3, ω_j la pulsation centrale des pics des harmoniques du signal de contrôle envoyé au haut-parleur, N_ω le nombre d'harmoniques et Z_s l'impédance nominale du haut-parleur.

La Figure 4.5.1 confirme comme la Figure 4.3.3 que le débit nécessaire (et donc la tension nécessaire) pour chaque haut-parleur diminue lorsque la fréquence augmente. Cette figure indique la tension optimale à appliquer à chaque haut-parleur de contrôle. Il est possible de remonter au débit requis pour chaque haut-parleur de contrôle à partir des paramètres T&S de ce dernier et de le comparer au débit du trombone estimé pour plusieurs notes par le protocole développé en Section 3.1. Celui-ci correspond au rapport théorique affiché sur la Figure 4.3.3a.

La puissance d'entrée à appliquer aux haut-parleurs est théoriquement répartie de manière égale si le système de contrôle ne contient que des sources secondaires équidistantes. Pour cet exemple, la puissance W_r requise pour chaque haut-parleur placé sur l'anneau est environ $W_r = 7.1 \pm 3.5$ W, ce qui ne dépasse pas leur puissance nominale W_{nom}. Dans ce travail, la puissance d'entrée à fournir à chaque haut-parleur

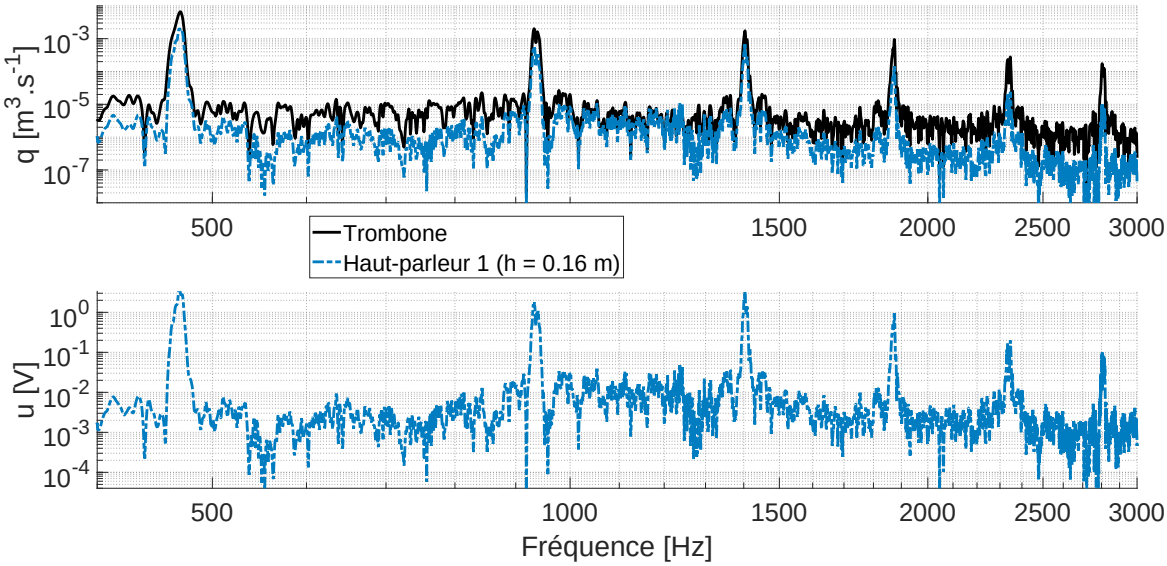


Figure 4.5.1 : Débit produit par le trombone et pour l'un des 8 haut-parleurs (en haut) et tension de ce dernier (en bas) pour contrôler la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) - cas **3** sur la Figure 4.3.1. Le haut-parleur utilisé est un *Beyma 3FR30Nd*.

peut néanmoins être différente car les mesures des tensions d'entrée et des fonctions de transfert entre sources et récepteurs impliquent des variations entre chaque source secondaire au cours de l'expérience - en raison du bruit électrique et du fait que les haut-parleurs ne sont pas exactement identiques.

Si un haut-parleur de contrôle est ajouté à $h = 0.05$ m ($8 + 1 = 9$ sources, Figure 4.5.2), W_r est réduit à 0.3 ± 0.2 W mais la puissance requise pour le haut-parleur placé devant le pavillon du trombone $W_f = 254$ W est supérieure à W_{nom}. Dans ce cas, il faudrait remplacer ce haut-parleur par un autre plus approprié (par exemple un *Morel EM 428* avec une fréquence de résonance F_s de 68 Hz, une puissance nominale W_{nom} de 150 W et une excursion maximale x_{max} de 3.0 mm), ou ajouter d'autres haut-parleurs à la même distance pour partager la puissance d'entrée requise, ou encore fixer une limite électrique à cette source pour une distorsion électroacoustique. Si une source est plus proche du pavillon que les autres, elle réduit donc fortement la puissance requise des autres sources alors que la puissance nécessaire pour cette source augmente fortement ce qui peut nécessiter un bridage.

Il est possible d'estimer théoriquement la puissance à appliquer aux haut-parleurs et leur déplacement. La réponse en débit des haut-parleurs $\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{q_s}}$ peut être estimée à partir de leurs paramètres T&S incorporés dans $\hat{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{H}_{\boldsymbol{q_s}}\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{s}}$ lors de la simulation du rayonnement des différentes sources monopolaires. La limite de ce modèle est que la position du centre acoustique de chaque source ne concorde pas entre la théorie et l'expérience. L'estimation de la puissance requise pour les sources secondaires sur l'anneau est alors cohérente ($W_r = 0.5$ W théoriquement et expérimentalement). Elle est cependant trop éloignée entre théorie et expérience lorsque la source secondaire est trop proche du pavillon ($W_f = 40$ W théoriquement au lieu de $W_f = 250$ W expérimentalement), même en changeant théoriquement la position de la source secondaire pour retrouver le centre acoustique expérimental (comme illustré sur la Figure 4.4.6). Ajouter une régularisation au modèle théorique permettrait de faire coller l'expérience à la théorie.

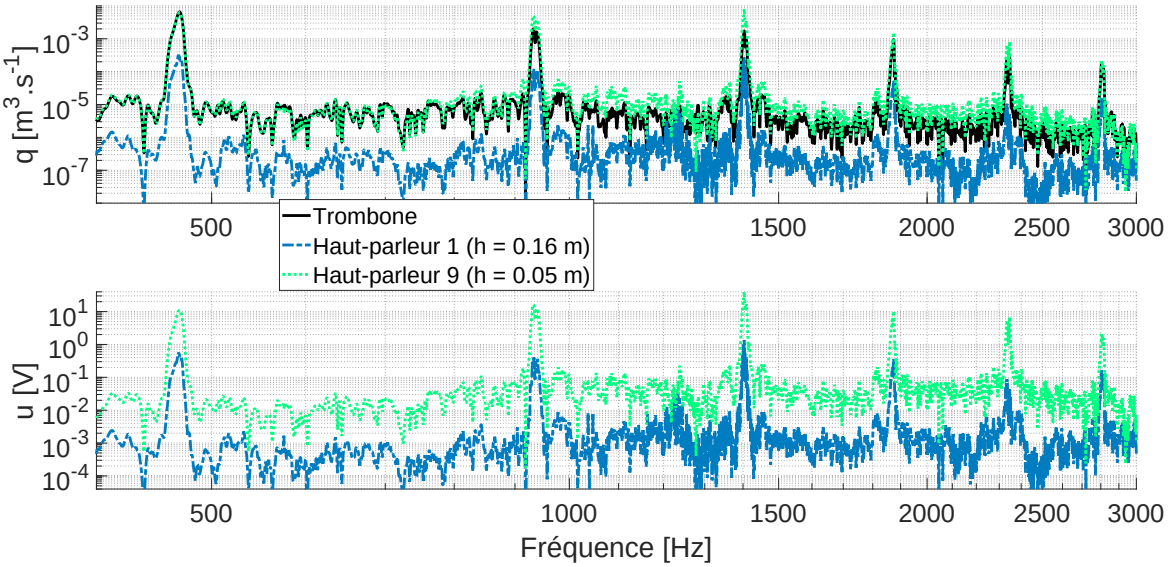


Figure 4.5.2 : Débit produit par le trombone et pour les haut-parleurs 1 et 9 (en haut) et tension de ces derniers (en bas) contrôlant la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) - cas **5** sur la Figure 4.3.1. Le haut-parleur utilisé est un *Beyma 3FR30Nd*.

4.5.2 Excursion maximale

Le cas **5** présenté sur la Figure 4.3.1 est utilisé pour observer l'excursion maximale des haut-parleurs. Le signal temporel de débit est reconstruit à partir du spectre de tension optimale calculé pour chaque note, le spectre de déplacement requis étant obtenu à partir de :

$$\boldsymbol{x_s} = \frac{\boldsymbol{v_s}}{j\omega}, \tag{4.59}$$

avec $\boldsymbol{v_s} = \frac{\boldsymbol{q_s^W}}{S_d}$. Le signal de déplacement nécessaire est ensuite comparé au déplacement maximal du haut-parleur étudié en Figure 4.5.3. Le déplacement de l'équipage mobile nécessaire est globalement plus élevé pour le haut-parleur 9 placé à $h = 0.05$ m devant le trombone qui est plus proche que les haut-parleurs 1 à 8 placés à $h = 0.16$ m sur un anneau. Ces deux excursions restent toujours inférieures au déplacement maximal du haut-parleur, quelle que soit la note. Des non-linéarités apparaissent néanmoins pour de telles excursions.

Pour les notes où la fréquence fondamentale se situe entre 130 et 200 Hz, l'inversion matricielle estime un débit plus élevé (et donc un déplacement plus important) pour les 8 haut-parleurs placés sur l'anneau pour contrôler le fondamental de cette note. L'ajout d'un terme de régularisation sur les données expérimentales (présenté par l'Équation (4.37)) permet d'imposer le même déplacement à toutes les sources secondaires aux basses fréquences. L'atténuation en puissance résultante est alors inférieure à un cas sans régularisation comme le montre la Figure 4.5.4. Avec $\beta = 0.5$, Att_W ne dépasse pas 20 dB - contrairement à un cas sans régularisation où l'atténuation maximale atteint 35 dB.

L'ajout d'un terme de régularisation ($\beta = 0.5$) réduit alors grandement le déplacement nécessaire pour chaque haut-parleur comme l'illustre la Figure 4.5.5. Celui-ci ne dépasse pas 0.7 mm quelque soit la note contrôlée et quelque soit le haut-parleur de contrôle. Cette figure montre par ailleurs que le déplacement nécessaire est toujours supérieur pour le haut-parleur le plus proche lors du contrôle d'une note lorsque l'inversion matricielle est régularisée. Il faut cependant noter que pour un contrôle en temps réel (non étudié dans ce travail), la présence de filtres électriques permettrait au préalable de séparer les couches

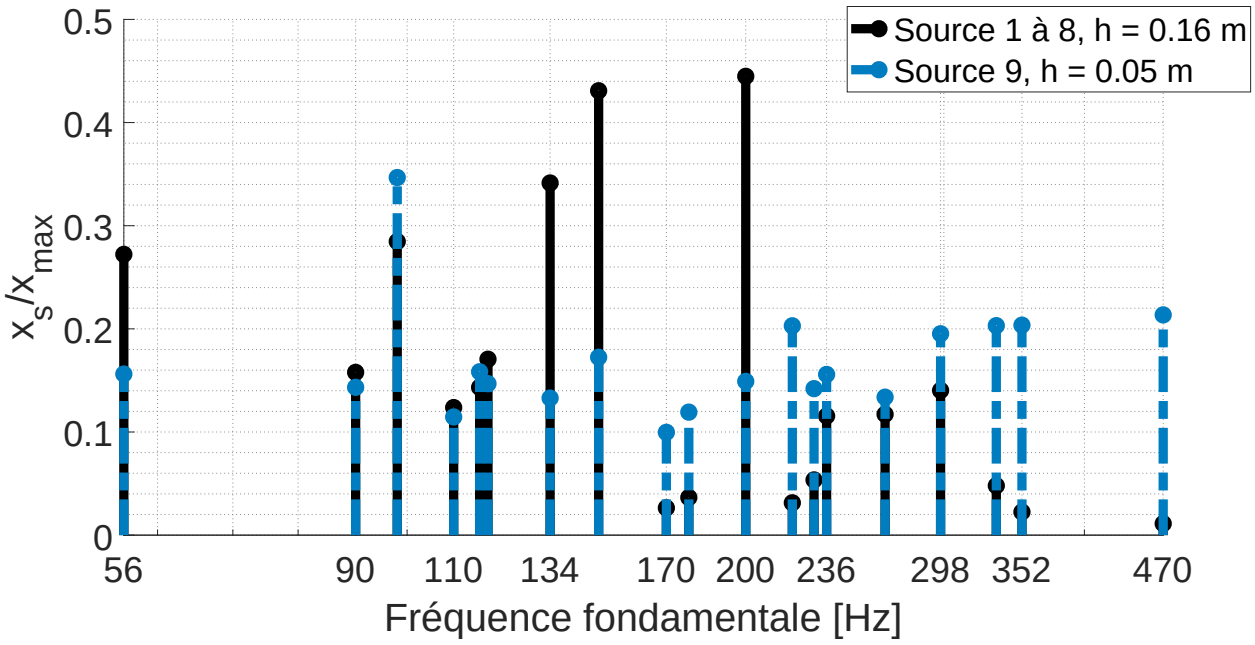


Figure 4.5.3 : Rapport d'excursion $\frac{x_s}{x_{\max}}$ entre l'excursion requise pour contrôler la note i et l'excursion maximale du haut-parleur (haut-parleurs 1 et 9) pour le cas **5** sur la Figure 4.3.1. Le haut-parleur utilisé est un *Beyma 3FR30Nd*.

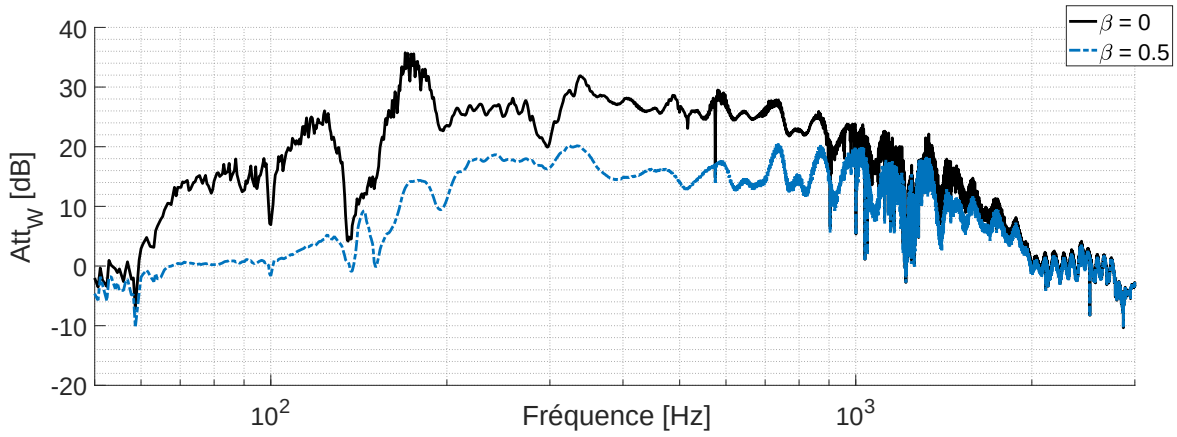


Figure 4.5.4 : Atténuation en puissance expérimentale Att_W pour le cas **5** (9 sources) : 8 haut-parleurs de contrôle sont placés sur un anneau à $h_r = 0.16$ m et un neuvième à $h_f = 0.05$ m devant le trombone. L'atténuation est calculée sans régularisation (ligne continue) et avec une régularisation de l'inversion matricielle (ligne en tirets, $\beta = 0.5$.)

de haut-parleurs par bande de fréquence. Cela aurait pour effet d'effectuer une inversion matricielle par bande de fréquence et nécessiterait donc une régularisation impactant moins l'efficacité du contrôle. Les haut-parleurs placés sur l'anneau peuvent par exemple contrôler les basses fréquences et ainsi partager équitablement le débit nécessaire. La source la plus proche effectue alors le contrôle pour les fréquences plus élevées (par exemple à partir de 400 Hz).
Le Tableau 4.5.1 résume les cas étudiés de la Figure 4.3.1 en indiquant les puissances nécessaires à appliquer aux haut-parleurs de contrôle ainsi que leur excursion maximale pour contrôler la note $Si_\flat 4$ ($f_0 =$ 466 Hz).

Pour tous les cas étudiés dans le Tableau 4.5.1, la puissance d'entrée à appliquer aux haut-parleurs de

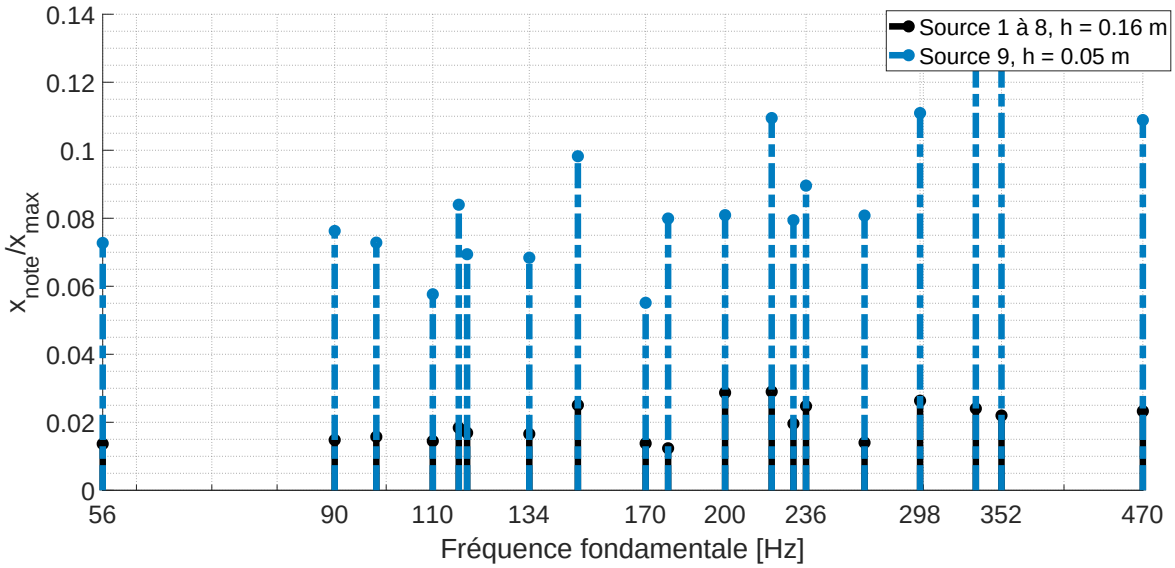


Figure 4.5.5 : Rapport d'excursion $\frac{x_s}{x_{\max}}$ entre l'excursion requise pour contrôler la note i et l'excursion maximale du haut-parleur (haut-parleurs 1 et 9) pour le cas **5** sur la Figure 4.3.1 avec une régularisation de l'inversion matricielle ($\beta = 0.5$). Le haut-parleur utilisé est un *Beyma 3FR30Nd*.

Cas	N_s (couche 1 + 2)	W_i [W]			$x_{s_{\max}}$ [mm]
		couche 1	couche 2		
		$\beta = 0$	$\beta = 0$	$\beta = 0.5$	
1	0 + 1	NA	268	126	1.0
2	3 + 0	23.7 ± 5	NA	NA	0.8
3	8 + 0	7.1 ± 3.5	NA	NA	0.4
4	3 + 1	0.5 ± 0.3	265	105.7	1.0
5	8 + 1	0.3 ± 0.2	249	91.2	1.1

Tableau 4.5.1 : Puissance requise pour les couches de haut-parleurs 1 et 2 et excursion maximale requise $x_{s_{\max}}$ selon chaque cas étudié de la Figure 4.3.1 pour le contrôle de la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz). Le haut-parleur utilisé est un *Beyma 3FR30Nd*.

contrôle est toujours le facteur limitant, x_s ne dépassant jamais environ la moitié de l'excursion maximale du haut-parleur. Un contrôle est donc réalisable en utilisant un minimum de trois haut-parleurs dans ce dernier exemple pour une nuance de jeu *fortissimo*. Dès que plusieurs couches de haut-parleurs sont utilisées, un compromis doit être trouvé pour que la puissance d'entrée du haut-parleur le plus proche de la source primaire ne dépasse pas sa puissance nominale. Le système de contrôle doit alors limiter la puissance d'entrée de ce haut-parleur. La Tableau 4.5.1 montre qu'ajouter un terme de régularisation $\beta = 0.5$ permet de diviser au moins par 2 la puissance requise pour la source placée devant le pavillon, ceci ayant pour effet de réduire l'efficacité du contrôle en puissance. Les caractéristiques du haut-parleur peuvent aussi être modifiées (Section 4.5.3) ou il est enfin possible d'ajouter d'autres sources pour partager la puissance d'entrée.

4.5.3 Ajout d'un autre modèle de haut-parleur

Cette partie a pour but de faire une estimation de la faisabilité expérimentale du contrôle lorsque celui-ci est composé de plusieurs modèles de haut-parleurs de contrôle.

La puissance électrique requise en entrée des haut-parleurs est calculée à partir de $\boldsymbol{u}_s^{\boldsymbol{W}}$. L'estimation de cette tension optimale nécessite la mesure de $\boldsymbol{H}_s$ ayant été effectuée avec un seul modèle de haut-parleur : le *Beyma 3FR30Nd* (Figure 4.4.2). La directivité et la réponse en débit étant différente en fonction du modèle de haut-parleur, seul celui utilisé au cours de la mesure décrite dans la Section 4.4.1 peut faire l'objet d'une estimation de la puissance électrique requise. Il est néanmoins possible d'estimer la puissance requise avec un autre modèle haut-parleur.

En partant des données expérimentales, la réponse en débit $\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}}$ du haut-parleur Beyma utilisé durant la mesure peut être remplacée par celle d'un autre haut-parleur. En considérant que la matrice de transfert entre la tension aux bornes des sources secondaires et la pression au niveau des récepteurs équivaut à :

$$\boldsymbol{H}_s = \frac{\boldsymbol{p}_s}{\boldsymbol{q}_s}\frac{\boldsymbol{q}_s}{\boldsymbol{u}_s} = \boldsymbol{G}_s\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}}, \tag{4.60}$$

où $\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}} = \boldsymbol{h}_{\boldsymbol{q}_{\text{Beyma}}}$ pour la réponse en débit du haut-parleur *Beyma 3FR30Nd* utilisé durant la mesure, il est possible d'estimer une impédance de rayonnement ne dépendant pas de la réponse en débit de modèle de haut-parleur avec :

$$\hat{\boldsymbol{G}}_s = \frac{\boldsymbol{H}_s}{\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}}}. \tag{4.61}$$

La matrice de transfert peut alors contenir les informations de plusieurs modèles de haut-parleur avec :

$$\hat{\boldsymbol{H}}_s = \hat{\boldsymbol{G}}_s\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}}, \tag{4.62}$$

où $\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{qs}}$ est cette fois le vecteur de la réponse en débit des différents haut-parleurs utilisés pour le contrôle.

En utilisant un nouveau haut-parleur ayant la même surface émissive que celui utilisé lors des mesures et en faisant l'hypothèse que la différence de directivité entre chaque haut-parleur est négligeable aux basses fréquences, il est possible d'estimer la puissance requise pour ce nouveau modèle de haut-parleur. Le nouvel haut-parleur étudié est un *Hertz ML 700.3* avec une fréquence de résonance F_s de 110 Hz, une puissance nominale W_{nom} de 50 W, une puissance maximale de 100 W, une impédance d'entrée Z_e de 4 Ω, une surface effective S_d de 0.003 m^2 et une excursion maximale x_{max} de 1.1 mm.

Le Tableau 4.5.2 présente les résultats d'un contrôle lorsque les haut-parleurs placés sur l'anneau (couche 1) sont des *Beyma 3FR30Nd* alors que le haut-parleur placé dans l'axe principal de propagation du rayonnement du trombone (couche 2) est un *Hertz ML 700.3*. Ce tableau résume les cas étudiés de la Figure 4.3.1 en indiquant les puissances nécessaires à appliquer aux haut-parleurs de contrôle ainsi que leur excursion maximale pour contrôler la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz).

Cas	N_s (couche 1 + 2)	W_i [W]		$x_{s_{\text{max}}}$ [mm]	
		couche 1	couche 2	couche 1	couche 2
1	$0 + 1$	NA	62.4	NA	0.9
2	$3 + 0$	23.7 ± 5	NA	0.8	NA
3	$8 + 0$	7.1 ± 3.5	NA	0.4	NA
4	$3 + 1$	0.6 ± 0.3	61.9	0.05	0.8
5	$8 + 1$	0.4 ± 0.5	56.9	0.025	0.8

Tableau 4.5.2 : Puissance requise pour les haut-parleurs placés sur l'anneau (couche 1, *Beyma 3FR30Nd*) et dans l'axe du trombone (couche 2, *Hertz ML 700.3*) et excursion maximale requise $x_{s_{\text{max}}}$ selon chaque cas étudié de la Figure 4.3.1 pour le contrôle de la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz).

Les Figures 4.3.2 et 4.4.5 montrent que les cas **1**, **4** et **5** sont ceux proposant le contrôle le plus efficace vers les hautes-fréquences. Les résultats pour la couche 2 (haut-parleur proche du pavillon) du

Tableau 4.5.2 indiquent une puissance et un déplacement inférieur par rapport à l'étude présentée par le Tableau 4.5.1. La puissance requise pour le cas **1** est de 62.4 W pour le nouveau haut-parleur. Cela dépasse sa puissance nominale (50 W). Sa puissance maximale (100 W) n'est néanmoins pas dépassée : un contrôle est alors envisageable dans cette configuration mais les non-linéarités produites par le haut-parleur sont importantes. Les cas **4** et **5** nécessitent approximativement la même puissance électrique en entrée soit environ $W_r = 0.5 \pm 0.4$ W et $W_f \simeq 59.5$ W. La puissance nécessaire ne dépasse donc pas la puissance nominale W_{nom} des haut-parleurs placés sur l'anneau (couche 1). La puissance requise pour le haut-parleur le plus proche du trombone (couche 2) est légèrement supérieure à sa puissance nominale.

Un contrôle est donc réalisable en plaçant plusieurs couches de sources secondaires et en dimensionnant chaque couche de haut-parleurs en fonction de leur puissance et de leur déplacement requis. Il est également pertinent de choisir les différents modèles de haut-parleur en ajustant fréquentiellement le débit requis pour effectuer le contrôle pour chaque couche (Figure 4.5.1) au débit produit par chaque haut-parleur.

4.6 Conclusion

Les résultats montrent qu'un contrôle actif placé à l'extérieur du trombone est faisable et peut être efficace jusqu'à 2000 Hz pour le meilleur cas d'étude avec une source proche de la sortie du pavillon ($h_f = 0.05$ m).

Plusieurs stratégies de contrôles actifs théoriques ont montré que le contrôle avec plusieurs couches d'actionneurs (par exemple 8 haut-parleurs sur un anneau et une source plus proche de l'instrument) permet d'étendre l'atténuation en puissance du trombone davantage vers les hautes fréquences.

En complément de la théorie, l'expérience a montré que le fait de placer une source secondaire très proche du pavillon du trombone modifie le champ de pression de l'instrument de telle sorte qu'il est possible d'obtenir une atténuation en puissance supérieure à celle prédite par le modèle analytique, ce dernier supposant que les sources peuvent être considérées comme des monopôles. La modification de la position du centre acoustique équivalent des sources due à leur interaction est une façon possible d'expliquer cette divergence.

Les études expérimentales sur l'impédance d'entrée de l'instrument montrent que la jouabilité de l'instrument est très légèrement affectée par le contrôle : les cinq premiers pics de résonance ne sont que très peu modifiés. Ceci peut s'expliquer en partie par la géométrie de l'instrument de musique, qui limite l'interaction d'une source secondaire - même positionnée très près du pavillon - avec l'embouchure de l'instrument. Une étude numérique permettrait d'étudier l'impact du contrôle sur l'impédance d'entrée de celui-ci en fonction de la distance h_f entre le pavillon et le haut-parleur de contrôle.

La puissance électrique à appliquer en entrée des haut-parleurs de contrôle est le facteur limitant du contrôle de puissance (et non l'excursion maximale du haut-parleur). La source secondaire la plus proche de la source primaire doit fournir la majorité de l'énergie acoustique nécessaire au contrôle actif, ce qui peut être difficile à réaliser.

Le contrôle externe mis en place permet de contrôler les harmoniques basse fréquence produits par le trombone. Pour un travail futur, une sourdine passive qui traite la gamme des hautes fréquences (à partir de 2000 Hz), peut être ajoutée pour compléter l'efficacité de ce contrôle actif. Un contrôle de la directivité de l'instrument permettrait en outre de diriger le son rayonné de l'instrument comme on le souhaite, par exemple vers le musicien. Enfin, un contrôle en temps réel pourrait être mis en œuvre, à l'aide de technologies déjà existantes comme le filtrage adaptatif [HW03]. La première étape consisterait à évaluer l'efficacité du contrôle en appliquant les filtres optimaux de manière expérimentale. Un contrôleur pourrait ensuite être utilisé pour effectuer un contrôle en temps réel (feedback ou feedforward) lorsque l'instrument est joué par une bouche artificielle ou un haut-parleur à compression.

Chapitre 5

Contrôle de la directivité

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la faisabilité du contrôle de la directivité d'un trombone. Deux méthodes de contrôle se basant sur la méthode de pressure matching sont étudiées ("adaptation de la pression" en français, [NE92]). L'une crée des zones d'écoute personnalisées ("sound zones" en anglais). Elle a pour objectif de créer une "bright zone" (zone d'écoute) et une "dark zone" (zone de silence). L'autre a pour but de reproduire un diagramme de directivité (par exemple cardioïde dont le maximum serait dirigé vers l'instrumentiste). Pour la suite du travail, la première méthode se nomme contrôle par "double zone" (zone double en français) pour être distinguée de la seconde méthode nommée contrôle par "target directivity" (directivité cible en français). Les haut-parleurs de contrôle sont placés autour et devant le pavillon de l'instrument quelque soit le formalisme étudié. Ce contrôle ne doit avoir qu'un impact minimal sur la jouabilité de l'instrument. L'étude ne porte que sur un contrôle optimal - aucun contrôleur en temps réel n'est implémenté.

Le système étudié est d'abord présenté dans la Section 5.1 avant de développer les méthodes de contrôle de la directivité utilisées pour cette étude. Les effets du contrôle par "double zone" (théorie présentée en Section 5.1.4.1) ou par une "target directivity" (théorie présentée en Section 5.1.4.2) sont évalués lorsque toutes les sources sont considérées comme des monopoles dans la Section 5.2. Pour chaque méthode, l'impact de la position des sources secondaires est évalué. L'effet du contrôle sur l'impédance d'entrée de l'instrument est ensuite étudié pour évaluer l'impact du contrôle sur le jeu du musicien. L'effet du contrôle est enfin mesuré en situation réelle (trombone et haut-parleurs) dans la Section 5.3 à l'aide de mesures effectuées dans une salle anéchoïque. Enfin, la Section 5.4 traite des limites technologiques des haut-parleurs utilisés comme sources secondaires afin de proposer un système pouvant être utilisé pour des applications musicales réelles.

5.1 Théorie

Le contrôle par zones d'écoute personnalisées permet de créer une "bright zone" et une "dark zone" à partir de N_s sources secondaires et de M récepteurs. Cette méthode peut s'appliquer au système déjà présenté en Section 4.2.1. La théorie du contrôle de la directivité appliqué au trombone se développe comme suit :

1. le système étudié (proche à celui présenté pour l'étude du contrôle en puissance) est décrit,
2. la méthode de contrôle est rappelée lorsque toutes les sources sont pilotées. Ce cas ne différencie pas la source primaire des sources secondaires : toutes les sources sont pilotées à partir d'une tension optimale [Cho+08 ; CJ12 ; Bet+15],
3. quatre indicateurs de performance sont déduits de cette théorie pour évaluer l'efficacité du contrôle,
4. les deux méthodes de contrôle appliquées au système étudié sont enfin présentées. Celui-ci prend en compte la présence du trombone comme source primaire qui ne peut pas être pilotée. Une méthode permet de créer une bright zone et une dark zone (contrôle par double zone) alors que l'autre a pour but de reproduire une directivité cible.

5.1.1 Système étudié

Comme pour le Chapitre 4 traitant du contrôle en puissance, le système étudié est un trombone équipé de N_s haut-parleurs de contrôle placés à proximité du pavillon de l'instrument. La pression rayonnée par chaque source est mesurée à l'aide de M récepteurs. La Figure 5.1.1 montre un exemple comprenant la source primaire s_0 de débit q_0 (source équivalente de l'instrument), 4 sources secondaires s_1 à s_4 de débit q_1 à q_4 et un récepteur r_1. Sur cet exemple, les sources secondaires ne sont pas à la même distance de la source primaire. Afin de favoriser l'efficacité d'un contrôle de la directivité, ces sources ne sont pas placées essentiellement sur un plan comme pour le contrôle en puissance (voir Figure 4.2.1). Si elle l'étaient, le diagramme de directivité sera alors symétrique par rapport à ce plan sauf si les sources étaient naturellement directionnelles (haut-parleur cardioïde par exemple comme dans [CE13]). Il est alors envisagé d'en placer à la fois dans le plan de la sortie du pavillon mais également dans l'axe du pavillon. Un exemple de montage expérimental pour un contrôle de la directivité est présenté sur la Figure 5.3.5.

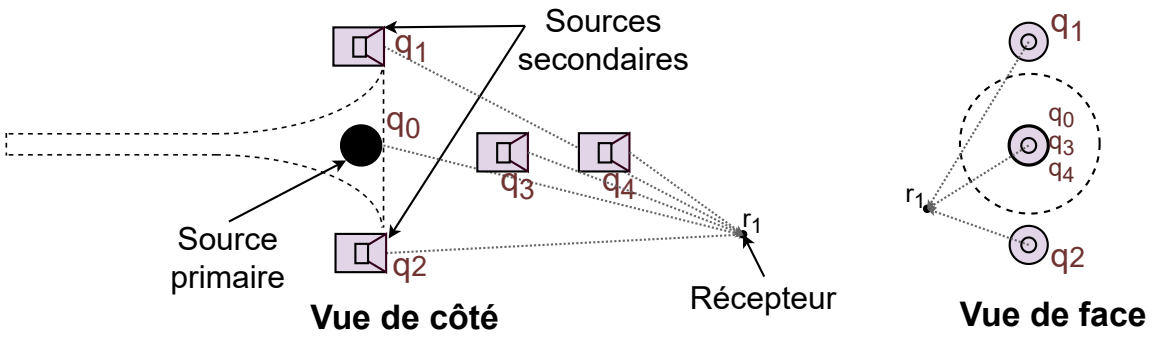
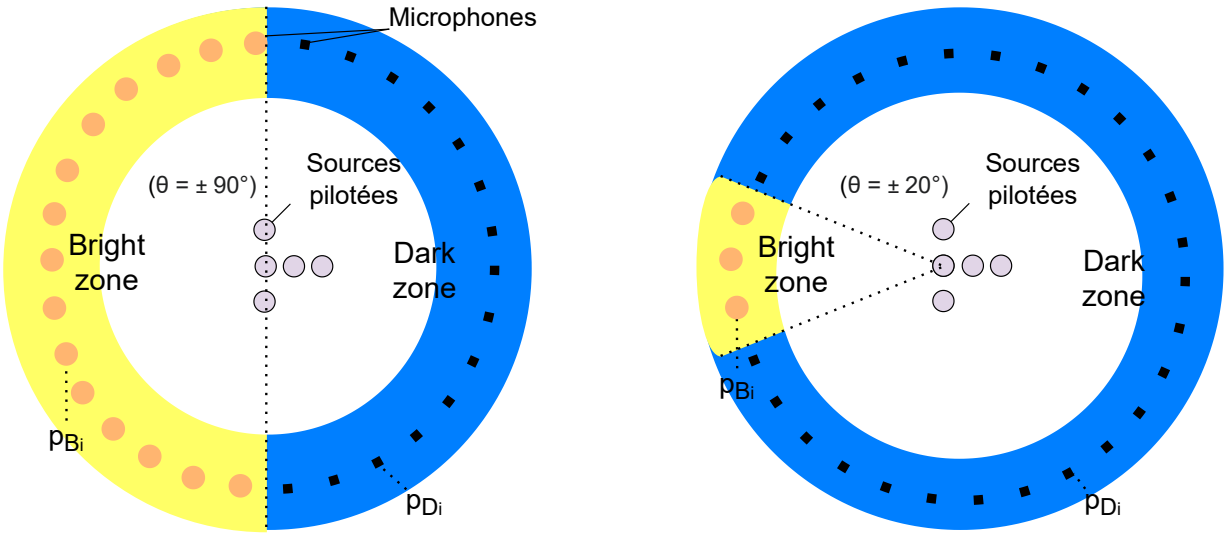


Figure 5.1.1 : Système étudié composé d'un trombone considéré comme la source primaire de débit q_0, de 4 haut-parleurs considérés comme des sources secondaires de débits $\boldsymbol{q_s}$ et de M récepteurs ($M = 1$ dans cette figure).

5.1.2 Contrôle avec sources pilotées

Le contrôle par sound zones généralement utilisé dans la littérature est premièrement décrit. Pour ce cas, toutes les sources sont pilotées par des filtres. Il n'y a donc aucune différence ici entre source primaire et source secondaire. Celles-ci génèrent un contraste acoustique entre deux zones grâce à l'action des filtres. La Figure 5.1.2 indique la position de N_s sources pilotées.

Le but du contrôle est de créer un contraste acoustique entre la bright zone B (en jaune sur la figure) et la dark zone D (en bleu sur la figure) tout en minimisant l'erreur spatiale entre la pression cible et la pression résultant du contrôle dans la bright zone. L'ensemble des deux zones est formé par les récepteurs placés autour des sources pilotées et constitue une sphère de récepteurs. La bright zone est plus ou moins large en fonction de la sélectivité angulaire souhaitée. La dark zone est complémentaire en fonction de l'angle d'ouverture θ de la bright zone. Le nombre de récepteurs placés dans chaque zone peut donc varier en fonction de l'aire occupée par chaque zone.



(a) (b)

Figure 5.1.2 : Système étudié composé de N_s sources alimentés par une tension $\boldsymbol{u}$ et de M récepteurs ($N_s = 6$, $M = 30$ dans le plan de la sphère). La bright zone est colorée en jaune et la dark zone en bleu. La bright zone est de même dimension que la dark zone ($\theta = \pm 90°$) (a) et la bright zone est plus petite que la dark zone ($\theta = \pm 20°$) (b) . La pression p_{B_i} (B_i pour le récepteur i dans la bright zone) est mesurée dans la bright zone alors que la pression p_{D_i} (D_i pour le récepteur i dans la dark zone) est mesurée dans la dark zone.

Les sources pilotées sont des haut-parleurs alimentés par une tension $\boldsymbol{u}$.

Les zones bright et dark peuvent être discrétisées avec un nombre M de points d'observation où la pression rayonnée par les sources dans la bright zone $\boldsymbol{p_B}$ s'exprime par :

$$\boldsymbol{p_B} = \begin{bmatrix} p_{B_1}(\omega) \\ p_{B_2}(\omega) \\ \vdots \\ p_{B_{M_B}}(\omega) \end{bmatrix} = \boldsymbol{H_B u}, \tag{5.1}$$

avec M_B le nombre de récepteurs placés dans la bright zone et $\boldsymbol{H_B}$ la matrice des fonctions de transfert entre la tension aux bornes des sources et la pression au niveau des récepteurs de la bright zone. La pression dans la dark zone $\boldsymbol{p_D}$ s'exprime par :

$$\boldsymbol{p_D} = \begin{bmatrix} p_{D_1}(\omega) \\ p_{D_2}(\omega) \\ \vdots \\ p_{D_{M_D}}(\omega) \end{bmatrix} = \boldsymbol{H_D}\boldsymbol{u}, \tag{5.2}$$

avec M_D le nombre de récepteurs placés dans la dark zone et $\boldsymbol{H_D}$ la matrice des fonctions de transfert entre la tension aux bornes des sources et la pression au niveau des récepteurs de la dark zone.

La pression cible (ou target en anglais) est définie telle que :

$$\boldsymbol{p_t} = \begin{cases} \boldsymbol{p_{tB}} \\ \boldsymbol{p_{tD}} = 0 \end{cases}, \tag{5.3}$$

avec $\boldsymbol{p_{tD}}$ la pression cible dans la dark zone qui est un vecteur composé uniquement de zéros ($M_D \times 1$) et $\boldsymbol{p_{tB}}$ ($M_B \times 1$) la pression cible dans la bright zone qui est une pression choisie par l'utilisateur, par exemple $\boldsymbol{p_0}$ si celui-ci souhaite que le son de l'instrument soit émis dans la bright zone. Il faut alors définir les tensions à appliquer aux sources en fonction de $\boldsymbol{p_t}$.

Une fonction coût permet de combiner la minimisation de l'erreur dans la bright zone (Équation (5.14)) à la réduction d'énergie dans la dark zone (Équation (5.13)) [CJ12] :

$$J_{\text{sz}} = \kappa \boldsymbol{p_D}^H \boldsymbol{p_D} + (1-\kappa)(\boldsymbol{p_B} - \boldsymbol{p_{tB}})^H(\boldsymbol{p_B} - \boldsymbol{p_{tB}}), \tag{5.4}$$

où κ ($0 \leq \kappa < 1$) est le facteur de pondération ("weighting factor" en anglais) déterminant la balance entre l'énergie potentielle dans la dark zone et l'erreur dans la bright zone. L'Équation (5.4) peut être développée en reprenant les expressions de la pression pour chaque zone $\boldsymbol{p_B}$ (Équation (5.1)) et $\boldsymbol{p_D}$ (Équation (5.2)). La fonctionnelle devient alors :

$$J_{\text{sz}} = \boldsymbol{u}^H \left[\kappa \boldsymbol{H_D}^H \boldsymbol{H_D} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{H_B}\right]\boldsymbol{u} + (1-\kappa)(\boldsymbol{p_{tB}}^H \boldsymbol{p_{tB}} - \boldsymbol{p_{tB}}^H \boldsymbol{H_B}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}^H \boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{p_{tB}}), \tag{5.5}$$

et peut ainsi prendre la forme suivante :

$$J_{\text{sz}} = \boldsymbol{u}^H \boldsymbol{A}_{\text{sz}} \boldsymbol{u} + \boldsymbol{u}^H \boldsymbol{b}_{\text{sz}} + \boldsymbol{b}_{\text{sz}}^H \boldsymbol{u} + \boldsymbol{c}_{\text{sz}}, \tag{5.6}$$

où :

$$\boldsymbol{A}_{\text{sz}} = \kappa \boldsymbol{H_D}^H \boldsymbol{H_D} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{H_B}, \tag{5.7}$$

et :

$$\boldsymbol{b}_{\text{sz}} = -(1-\kappa)\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{p_{tB}}, \tag{5.8}$$

et enfin :

$$\boldsymbol{c}_{\text{sz}} = (1-\kappa)\boldsymbol{p_{tB}}^H \boldsymbol{p_{tB}}. \tag{5.9}$$

Dans un cas où une régularisation de la matrice $\boldsymbol{A}_{\text{sz}}$ est ajoutée [SEC15], l'Équation (5.7) devient :

$$\boldsymbol{A}_{\text{sz}} = \kappa \boldsymbol{H_D}^H \boldsymbol{H_D} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{H_B} + \beta \boldsymbol{I}, \tag{5.10}$$

avec β le facteur de régularisation.

La fonctionnelle J_{sz} possède une valeur minimum où [NE92 ; CJ12] :

$$\frac{\partial J_{\text{sz}}}{\partial \boldsymbol{u}} = 2\Big[\kappa \boldsymbol{H_D}^H \boldsymbol{H_D} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{H_B}\Big]\boldsymbol{u} + (1-\kappa)(-\boldsymbol{p_{tB}}^H \boldsymbol{H_B} - \boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{p_{tB}}) = 0. \tag{5.11}$$

La tension optimale $\boldsymbol{u}^{\text{sz}}$ provient de la fonction quadratique développée par l'Équation (5.6) et connaît une solution unique issue de Équation (5.11) donnée par :

$$\boldsymbol{u}^{\text{sz}} = -\boldsymbol{A}_{\text{sz}}{}^{-1}\boldsymbol{b}_{\text{sz}}. \tag{5.12}$$

5.1.3 Indicateurs

Plusieurs indicateurs évaluant les performances du système en fonction des besoins de l'application visée sont définis.

Un premier indicateur permet d'évaluer le contraste acoustique entre la dark zone et la bright zone. Le rapport de la densité d'énergie potentielle moyenne entre la bright zone et celle de la dark zone permet de définir ce contraste. Il est discrétisé tel que [Cho+08] :

$$\mu = \frac{M_D}{M_B}\frac{\boldsymbol{p_B}^H \boldsymbol{p_B}}{\boldsymbol{p_D}^H \boldsymbol{p_D}}. \tag{5.13}$$

Un autre indicateur sert à évaluer l'erreur entre la pression résultant du contrôle et la pression cible en dB. L'erreur spatiale moyenne normalisée du contrôle entre le champ acoustique désiré et celui reproduit s'exprime par [Cho+08] :

$$\overline{e} = \frac{(\boldsymbol{p_{tB}} - \boldsymbol{p_B})^H (\boldsymbol{p_{tB}} - \boldsymbol{p_B})}{\boldsymbol{p_{tB}}^H \boldsymbol{p_{tB}}}. \tag{5.14}$$

Plus l'erreur $\overline{e}$ est petite, plus le champ de pression résultant du contrôle correspond à la pression cible.

Le conditionnement de la matrice est également évalué afin d'estimer les problèmes numériques lors de l'inversion matricielle. Celui-ci est déjà utilisé pour l'étude du contrôle en puissance dans le Chapitre 4. Lorsqu'une valeur optimale est estimée au sens des moindres carrés, "le mauvais conditionnement peut décrire tout calcul dont les valeurs de sortie sont très sensibles à de petits changements dans les données d'entrée. Un conditionnement élevé indique que la matrice est mal conditionnée" [Che12].

Enfin, la puissance électrique requise (Équation (4.58)) aux bornes des haut-parleurs de contrôle ainsi que le déplacement nécessaire de la membrane (Équation (4.59)) de ces derniers sont évalués à partir de la méthode développée en Section 4.5.

5.1.4 Contrôle avec une source non pilotée

La source primaire est maintenant considérée comme non pilotée, ce qui est le cas lorsque le trombone est excité par un musicien ou par un haut-parleur dont la tension est u_0. Sa pression rayonnée est alors à prendre en compte en plus de celle émise par les sources secondaires. Le système étudié se compose ainsi d'une source primaire, de N_s sources secondaires pilotées placées à une distance h de la source primaire. Les M récepteurs sont placés sur une sphère de rayon r, d'azimut θ et d'élévation ϕ. La pression en champ lointain rayonnée par la source primaire est définie par l'Équation (3.1). La pression en champ lointain produite par les sources secondaires est définie par l'Équation (4.21).

Pour la suite de l'étude, la pression cible est définie $\boldsymbol{p_t'}$ non pas comme la pression cible totale $\boldsymbol{p_t}$ mais comme la pression cible générée par les sources secondaires uniquement telle que :

$$\boldsymbol{p_t'} = \boldsymbol{p_t} - \boldsymbol{p_0}. \tag{5.15}$$

La théorie est développée :

1. pour un cas où l'objectif est de créer une bright zone (où la pression résultant du contrôle est celle de la source primaire) et une dark zone (où la pression résultant du contrôle est minimisée) [Vin21]. La différence par rapport au modèle présenté ci-dessus est qu'une source est non pilotée. Ce contrôle est nommé contrôle par double zone et sa fonctionnelle est J_{dz} ("double zone"),

2. pour un cas où l'objectif est de reproduire une directivité cible (monopolaire, dipolaire, cardioïde, ...). Ce contrôle est nommé contrôle par une directivité cible et sa fonctionnelle est J_{td} ("target directivity").

Une solution proposée dans [Vin21] permet de ne pas prendre en compte les tensions déjà connues du système (ici le signal d'entrée du trombone). Le développement suivant se base sur ce travail.

5.1.4.1 Contrôle par double zone

Le contrôle par double zone permettant de créer une bright zone et une dark zone en présence de la source primaire est maintenant décrit. La pression produite par la source primaire dans chaque zone s'exprime par :

$$\boldsymbol{p_0} = \begin{cases} \boldsymbol{p_{0B}} = \boldsymbol{h_{0B}} u_0 \\ \boldsymbol{p_{0D}} = \boldsymbol{h_{0D}} u_0 \end{cases}, \tag{5.16}$$

avec $\boldsymbol{p_{0B,D}}$ et $\boldsymbol{h_{0B,D}}$ correspondant aux éléments de $\boldsymbol{p_0}$ et $\boldsymbol{h_0}$ pour les récepteurs respectivement placés dans la bright zone et la dark zone.

Soit $\boldsymbol{H}$ la matrice des fonctions de transfert entre les tensions de la source primaire et des sources secondaires et les pressions au niveau des récepteurs quelque soit la zone :

$$\boldsymbol{H} = \Big[\boldsymbol{H_s h_0}\Big], \tag{5.17}$$

avec $\boldsymbol{H_s} = [\boldsymbol{H_{sB}} \boldsymbol{H_{sD}}]$ la matrice des fonctions de transfert entre la tension aux bornes des sources secondaires et la pression au niveau de tous les récepteurs. La pression au niveau de chaque récepteur est alors donnée par :

$$\boldsymbol{p} = \Big[\boldsymbol{H_s h_0}\Big] \begin{bmatrix} \boldsymbol{u_s} \\ u_0 \end{bmatrix}. \tag{5.18}$$

La fonctionnelle à minimiser est alors définie comme la différence entre la pression émise par chaque source et la pression cible avec :

$$J_{\text{dz}} = e^H e = (\boldsymbol{p_t} - \boldsymbol{p})^H (\boldsymbol{p_t} - \boldsymbol{p}) = \Big(\boldsymbol{p_t} - \Big[\boldsymbol{H_s h_0}\Big] \begin{bmatrix} \boldsymbol{u_s} \\ u_0 \end{bmatrix}\Big)^H \Big(\boldsymbol{p_t} - \Big[\boldsymbol{H_s h_0}\Big] \begin{bmatrix} \boldsymbol{u_s} \\ u_0 \end{bmatrix}\Big), \tag{5.19}$$

avec $\boldsymbol{p_t}$ le vecteur de la pression cible dans chaque zone. Sachant que la source primaire ne peut pas être contrôlée et qu'elle est la cible, il est possible de la soustraire de la fonctionnelle J_{dz} par :

$$J_{\text{dz}} = \Big([\boldsymbol{p_t} - \boldsymbol{p_0}] - \boldsymbol{H_s u_s}\Big)^H \Big([\boldsymbol{p_t} - \boldsymbol{p_0}] - \boldsymbol{H_s u_s}\Big). \tag{5.20}$$

Il faut alors imposer aux sources secondaires de ne pas rayonner dans la bright zone (pour ne pas perturber la pression $\boldsymbol{p_0}$) et de produire l'inverse de la pression émise par la source primaire dans la dark zone (pour y minimiser l'énergie) de telle sorte que :

$$\boldsymbol{p'_t} = \begin{cases} \boldsymbol{p'_{tB}} = 0 \\ \boldsymbol{p'_{tD}} = -\boldsymbol{h_{0D}} u_0 \end{cases}. \tag{5.21}$$

En prenant en compte le vecteur de la pression cible défini par l'Équation (5.21), la fonctionnelle introduite par l'Équation (5.19) prend la forme suivante :

$$J_{\text{dz}} = \kappa(\boldsymbol{H}_{sB}\boldsymbol{u}_s)^H(\boldsymbol{H}_{sB}\boldsymbol{u}_s) + (1-\kappa)(\boldsymbol{p}'_{tD} - \boldsymbol{H}_{sD}\boldsymbol{u}_s)^H(\boldsymbol{p}'_{tD} - \boldsymbol{H}_{sD}\boldsymbol{u}_s), \tag{5.22}$$

avec le facteur de pondération κ qui est introduit comme pour l'Équation (5.4). Cette solution est l'exact opposé des formulations présentées habituellement dans la littérature [Cho+08 ; CJ12 ; Bet+15] : le membre de gauche permet de minimiser la contribution des sources secondaires dans la bright zone alors que le membre de droite impose aux sources secondaires de produire l'opposé de la pression émise par la source primaire dans la dark zone. Le système réalise donc une réduction de niveau sonore par contrôle actif dans la "dark zone". La fonction coût se généralise ainsi par :

$$J_{\text{dz}} = \boldsymbol{u_s}^H\boldsymbol{A}_{\text{dz}}\boldsymbol{u}_s + \boldsymbol{u_s}^H\boldsymbol{b}_{\text{dz}} + \boldsymbol{b}_{\text{dz}}{}^H\boldsymbol{u}_s + \boldsymbol{c}_{\text{dz}}, \tag{5.23}$$

avec :

$$\boldsymbol{A}_{\text{dz}} = \kappa\boldsymbol{H_{sB}}^H\boldsymbol{H}_{sB} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_{sD}}^H\boldsymbol{H}_{sD}, \tag{5.24}$$

et :

$$\boldsymbol{b}_{\text{dz}} = -(1-\kappa)\boldsymbol{H_{sD}}^H\boldsymbol{p}'_{tD}, \tag{5.25}$$

et enfin :

$$\boldsymbol{c}_{\text{dz}} = (1-\kappa)\boldsymbol{p}'_{tD}{}^H\boldsymbol{p}'_{tD}. \tag{5.26}$$

Dans le cas où une régularisation de la matrice $\boldsymbol{A}_{\text{dz}}$ est ajoutée, l'Équation (5.24) devient :

$$\boldsymbol{A}_{\text{dz}} = \kappa\boldsymbol{H_{sB}}^H\boldsymbol{H}_{sB} + (1-\kappa)\boldsymbol{H_{sD}}^H\boldsymbol{H}_{sD} + \beta\boldsymbol{I}. \tag{5.27}$$

La tension secondaire optimale $\boldsymbol{u}_s^{\text{dz}}$ est obtenue en dérivant la fonction quadratique de l'Équation (5.23) par rapport à $\boldsymbol{u}_s$ et génère une solution unique donnée par :

$$\boldsymbol{u}_s^{\text{dz}} = -\boldsymbol{A}_{\text{dz}}{}^{-1}\boldsymbol{b}_{\text{dz}}. \tag{5.28}$$

Le filtre de contrôle correspondant est défini par :

$$\boldsymbol{w}^{\text{dz}} = \frac{\boldsymbol{u}_s^{\text{dz}}}{u_0}. \tag{5.29}$$

5.1.4.2 Contrôle par une directivité cible

Il est possible d'appliquer la méthode du pressure matching à une directivité cible imposée (monopolaire, dipolaire, cardioïde, ...). Il suffit alors de reprendre le modèle développé en Section 5.1.4.1 en ne considérant plus qu'une seule zone : la bright zone B recouvre l'ensemble des récepteurs ($\boldsymbol{h_{0B}} = \boldsymbol{h_0}$). L'objectif est alors de minimiser une fonction coût par rapport à une pression cible, définie comme la directivité cible pondérant la pression émise par la source primaire. La pression cible $\boldsymbol{p}'_t$ peut se redéfinir à partir de la bright zone donnée dans l'Équation (5.15) :

$$\boldsymbol{p}'_t = \boldsymbol{p_0}\mathscr{D} - \boldsymbol{p_0} = \boldsymbol{h_0}u_0(\mathscr{D}-1), \tag{5.30}$$

avec $\mathscr{D}$ la directivité cible. Si $\mathscr{D} = 1$, c'est-à-dire si la directivité cible correspond au rayonnement initial du trombone, l'Équation (5.30) équivaut à l'Équation (5.21), les sources secondaires devant alors être inactives. La fonction coût se développe de la même manière qu'en Section 5.1.4.1 en changeant la pression cible $\boldsymbol{p}'_{tB}$ par la pression cible $\boldsymbol{p}'_t$. Il vient alors :

$$J_{\text{td}} = (\boldsymbol{p}'_t - \boldsymbol{H}_{sB}\boldsymbol{u}_s)^H(\boldsymbol{p}'_t - \boldsymbol{H}_{sB}\boldsymbol{u}_s), \tag{5.31}$$

ce qui peut être réécrit sous la forme suivante :

$$J_{\text{td}} = \boldsymbol{u_s}^H \boldsymbol{A}_{\text{td}} \boldsymbol{u_s} + \boldsymbol{u_s}^H \boldsymbol{b}_{\text{td}} + \boldsymbol{b}_{\text{td}}^H \boldsymbol{u_s} + \boldsymbol{c}_{\text{td}}, \tag{5.32}$$

avec :

$$\boldsymbol{A}_{\text{td}} = \boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{H_B}, \tag{5.33}$$

et :

$$\boldsymbol{b}_{\text{td}} = -\boldsymbol{H_B}^H \boldsymbol{p}'_t, \tag{5.34}$$

et enfin :

$$\boldsymbol{c}_{\text{td}} = \boldsymbol{p}'^H_t \boldsymbol{p}'_t. \tag{5.35}$$

Dans un cas où une régularisation de la matrice $\boldsymbol{A}_{\text{td}}$ est ajoutée, l'Équation (5.33) devient :

$$\boldsymbol{A}_{\text{td}} = \boldsymbol{H_{sB}}^H \boldsymbol{H_{sB}} + \beta \boldsymbol{I}. \tag{5.36}$$

La tension secondaire optimale $\boldsymbol{u}_s^{\text{td}}$ provient de la fonction quadratique développée par l'Équation (5.32) et connaît une solution unique donnée par :

$$\boldsymbol{u}_s^{\text{td}} = -\boldsymbol{A}_{\text{td}}^{-1} \boldsymbol{b}_{\text{td}}. \tag{5.37}$$

Le filtre de contrôle correspondant est défini tel que :

$$\boldsymbol{w}^{\text{td}} = \frac{\boldsymbol{u}_s^{\text{td}}}{u_0}. \tag{5.38}$$

5.2 Évaluation numérique des performances

Afin d'évaluer les performances du contrôle, cette section fait l'étude numérique de l'impact des paramètres suivants :

1. la pression cible sur le contrôle,
2. la position des sources secondaires sur le contrôle,
3. le facteur de pondération κ sur l'efficacité du contrôle,
4. le paramètre de régularisation β lors de l'inversion matricielle,
5. l'effet du contrôle de la directivité sur le contrôle en puissance,
6. l'effet du contrôle de la directivité sur l'impédance d'entrée du trombone.

La source primaire et les sources secondaires sont assimilées à des monopôles. Les filtres optimaux utilisés sont donnés par l'Équation (5.29) pour un contrôle par double zone et par l'Équation (5.38) pour un contrôle par directivité cible.

5.2.1 Impact de la pression cible

Cette partie porte sur l'impact de la pression cible sur l'efficacité du contrôle et sur le module du filtre de contrôle nécessaire à appliquer aux sources secondaires. L'objectif est d'estimer quelles sont les limites du contrôle pour le système étudié (nombre de haut-parleurs limité et position des sources fixes) en fonction de la complexité de la pression cible.

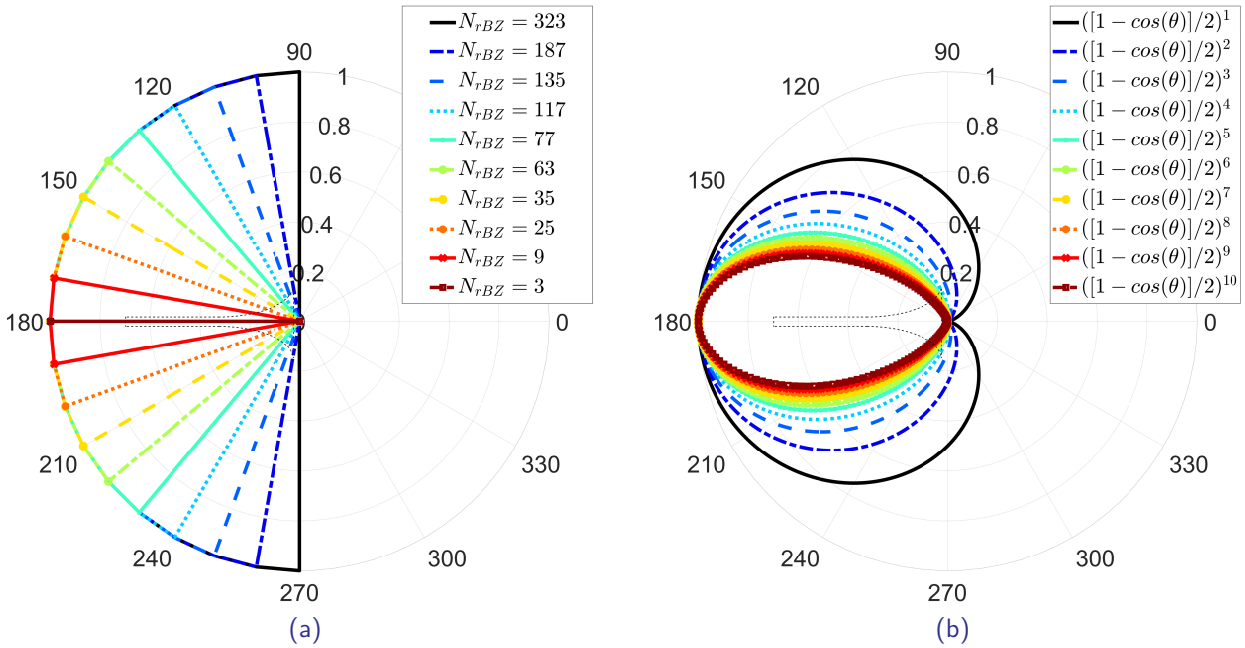
Le système de contrôle étudié est le suivant : 4 sources secondaires sont placées à $h_r = 0.16$ m de la source primaire et 4 autres sont placées sur son axe à $h_f = [0.05, 0.15, 0.25, 0.35]$ m (schéma de la Figure 5.2.2). Les différentes pressions cible sont présentées à la Figure 5.2.1. L'amplitude correspond à p_0 dans la bright zone en amplitude et en phase. L'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ résultant du contrôle est montrée par les Figures 5.2.3 et 5.2.4.

La Figure 5.2.1a affiche un diagramme de directivité où la pression cible évolue d'une bright zone prenant la moitié de la surface de la sphère à quelques récepteurs sur la sphère. Plus le contrôle est directif vers 180°, plus la pression cible est exigeante quelque soit le type de contrôle. Le module du champ de pression est maximal vers l'embouchure du trombone quelque soit l'élévation ϕ.

La Figure 5.2.1b montre l'évolution d'une pression cible pour différents ordres d'une fonction de directivité $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ à $\mathscr{D}^{10}$. Pour chaque cas, la pression est maximale du côté de l'embouchure.

L'erreur augmente logiquement avec l'ordre de complexité de la pression cible (Figure 5.2.3). Ces résultats traduisent la difficulté qu'a le système à effectuer ce type de contrôle avec seulement 8 sources pour 614 récepteurs si la pression cible est exigeante. Pour un contrôle par double zone, la répartition de ces récepteurs dans chaque zone est de moins en moins équilibrée (de 323 à 3 récepteurs dans la bright zone) à mesure que la complexité de la pression cible augmente, ceci produisant une erreur spatiale moyenne normalisée plus importante.

Imposer une directivité plutôt que 2 zones produit une erreur globalement plus faible (Figure 5.2.4). Le module la pression cible augmente alors progressivement avec l'angle et non de manière abrupte comme avec un contrôle par double zone où la valeur normalisée du module passe de 0 à 1 entre les deux zones.



(a) (b)

Figure 5.2.1 : Diagramme de directivité qui évolue d'une bright zone prenant la moitié de la surface de la sphère à une ligne, avec N_{rBZ} le nombre de récepteurs dans la bright zone (a) et pour une pression cible dont la complexité évolue d'un cardioïde allant de $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ à $\mathscr{D}(\theta)^{10}$ (b).

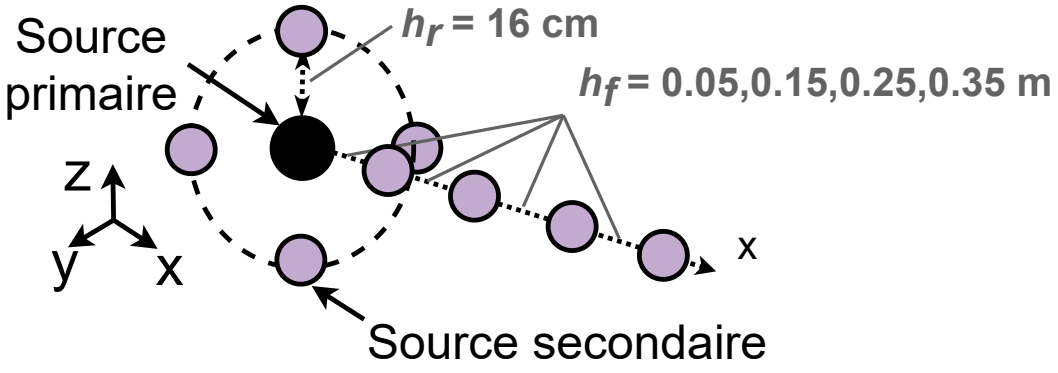


Figure 5.2.2 : Configuration étudiée pour l'impact de la pression cible sur le contrôle de la directivité : 4 sources secondaires sont placées à $h_r = 0.16$ m de la source primaire sur une couronne et 4 autres sont placées en ligne à $h_f = [0.05, 0.15, 0.25, 0.35]$ m.

Il est également pertinent d'observer le module du filtre de contrôle à appliquer aux sources secondaires pour ce cas théorique et ainsi prédire à quel point ces sources ont une influence sur le champ de pression résultant du contrôle. Il a été vu au Chapitre 4 que la source secondaire la plus proche de la source primaire est celle qui nécessite l'amplitude du filtre de contrôle le plus important pour effectuer le contrôle. La Figure 5.2.5 montre le module du filtre de contrôle à appliquer à la source secondaire la plus proche de la source primaire ($h_f = 0.05$ m) pour une pression cible qui évolue d'une bright zone prenant la moitié de la surface de la sphère à quelques récepteurs sur la sphère. Il est à noter que les sources secondaires placées à $h_f = 0.15; 0.25$ m ont un effort aussi important que pour la source la plus proche quelque soit le cas étudié. Un effort moins important est imposé aux autres sources qui ont une importance réduite pour effectuer le contrôle (sources trop éloignées ou placées dans le même plan).

Un contrôle par double zone impose un effort supérieur à celui de la source primaire en-dessous de 1500

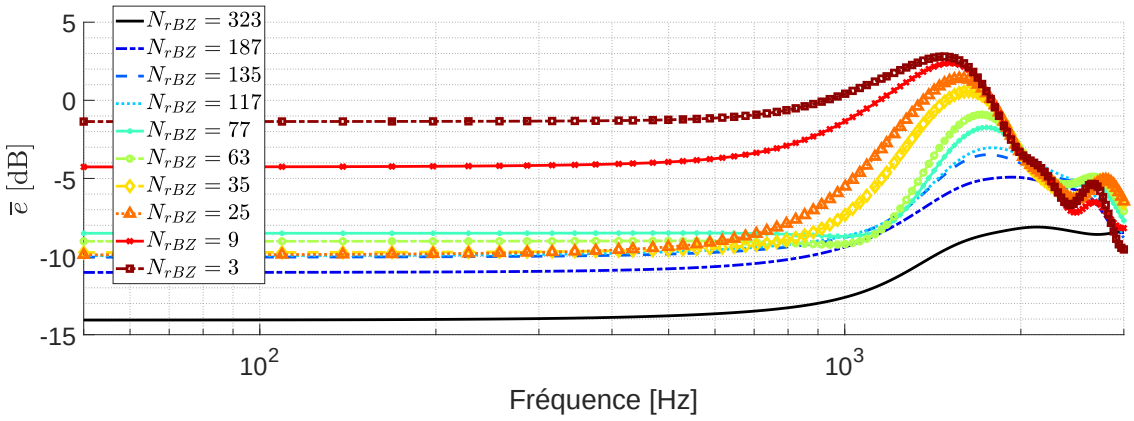


Figure 5.2.3 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression cible et la pression résultant d'un contrôle imposant une bright zone qui évolue d'une zone prenant la moitié de la surface de la sphère à une ligne sur la sphère. Le système étudié est présenté à la Figure 5.2.2.

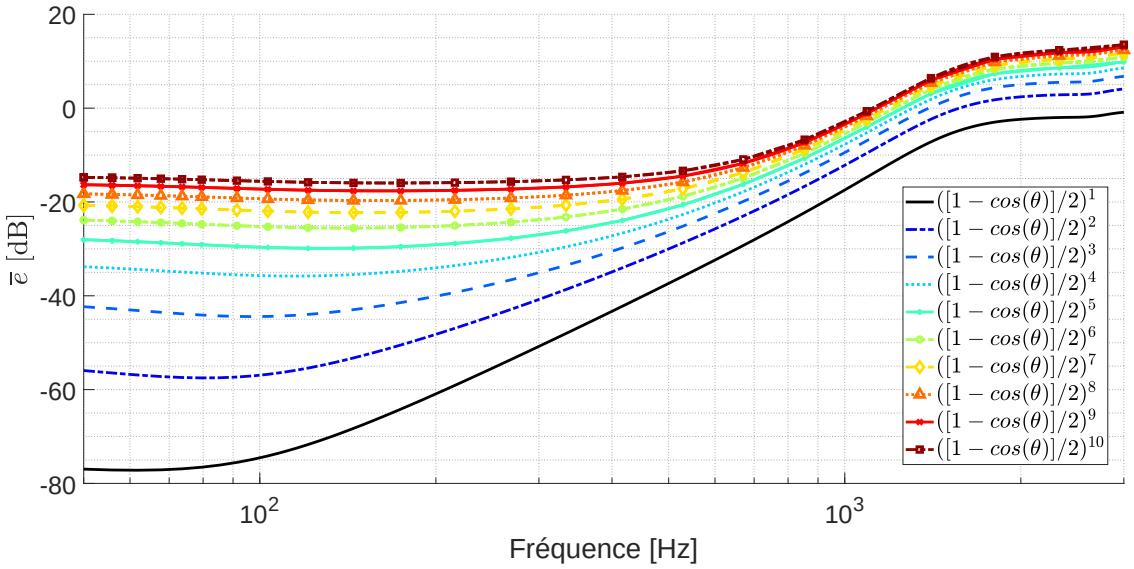


Figure 5.2.4 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression cible et la pression résultant d'un contrôle dont la complexité de la pression cible évolue pour un cardioïde allant de $(\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2})^1$ à $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^{10}$. Le système étudié est présenté à la Figure 5.2.2.

Hz. Quelque soit la complexité du contrôle, le module du filtre de contrôle ne descend pas en-dessous de 10^3 à 50 Hz. Cela rend donc le contrôle difficilement réalisable aux très basses fréquences. L'impédance de rayonnement de la source primaire est potentiellement altérée dès lors que la pression produite par les sources secondaires est largement supérieure à celle de la source primaire (sujet abordé en fin de section). La Figure 5.2.6 montre le module du filtre de contrôle à appliquer à la source secondaire la plus proche de la source primaire pour une pression cible imposant un cardioïde allant de $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ à $\mathscr{D}(\theta)^{10}$.

Un contrôle par directivité cible impose un module du filtre de contrôle important en-dessous de 1000 Hz. À 50 Hz, le module du filtre de contrôle est de 20 pour $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ et de 6.10^3 pour $\mathscr{D}(\theta)^{10}$. La variation de complexité du contrôle apporte cette fois une différence importante sur le module du filtre de contrôle à imposer aux sources secondaires. Le module du filtre de contrôle reste très élevé et dans les mêmes ordres de grandeur que pour un contrôle par double zone lorsque le diagramme de directivité

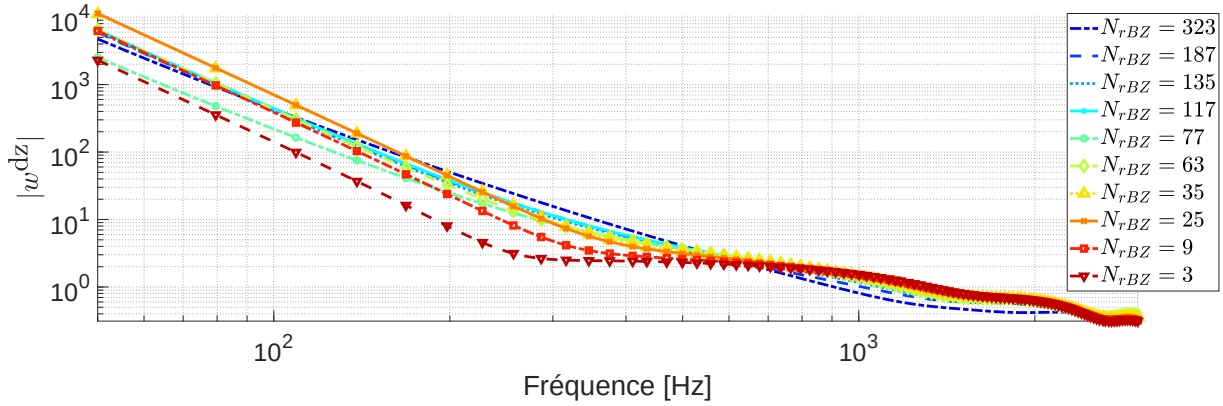


Figure 5.2.5 : Module du filtre de contrôle à appliquer à la source secondaire la plus proche de la source primaire résultant d'un contrôle imposant une bright zone qui évolue de la moitié de la surface de la sphère à quelques récepteurs sur la sphère. Le système étudié est présenté à la Figure 5.2.2.

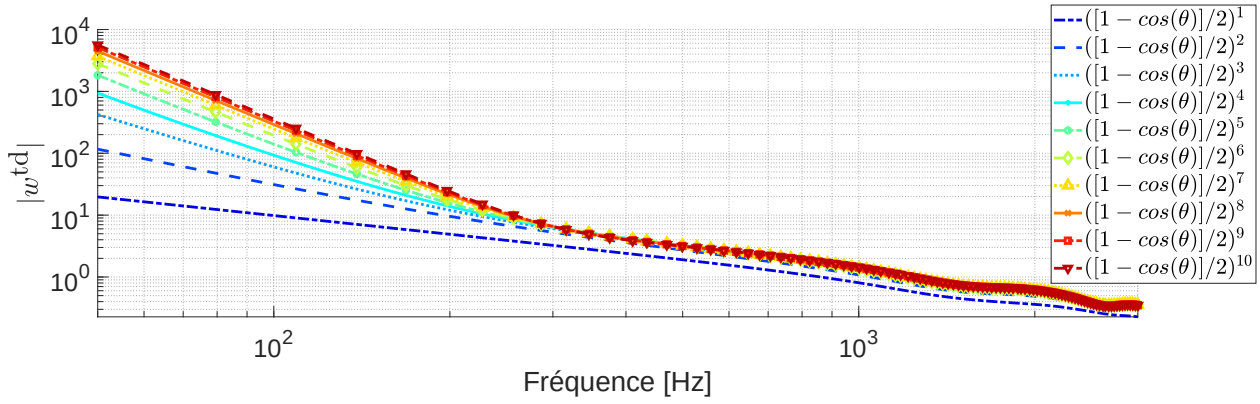


Figure 5.2.6 : Module du filtre de contrôle à appliquer à la source secondaire la plus proche de la source primaire résultant d'un contrôle dont la complexité de la pression cible évolue pour un cardioïde allant de $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ à $\mathscr{D}(\theta)^{10}$. Le système étudié est présenté à la Figure 5.2.2.

cible est très étroit. Lorsque que la directivité est d'un ordre de complexité moins élevé, le contrôle est alors envisageable et l'impact sur l'impédance de rayonnement de la source primaire est réduit (analyse effectuée en Section 5.2.6).

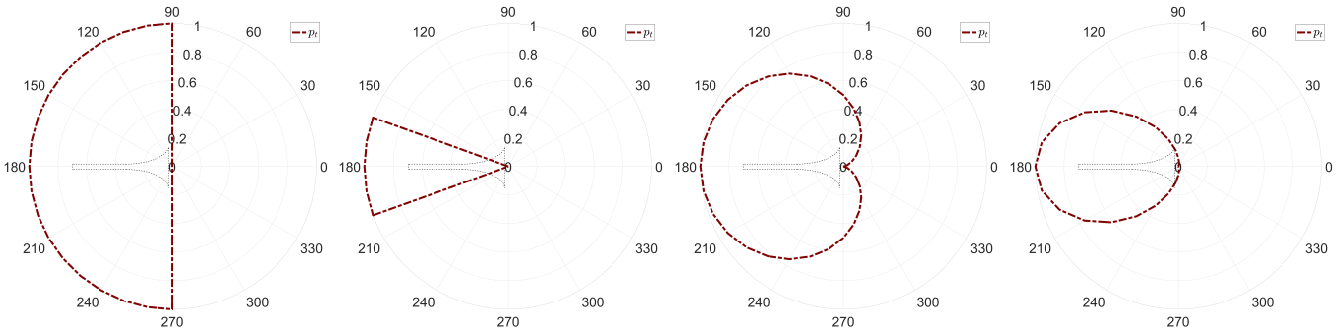
5.2.2 Impact de la position des sources secondaires

Cette partie porte sur le choix de la position et du nombre de sources secondaires qui sont utilisées par la suite afin d'optimiser le contrôle de la directivité. Dans un souci de simplicité, chaque contrôle par double zone est premièrement présenté puis s'ensuit chaque contrôle par directivité cible.

Pour la suite de ce travail, il est choisi de comparer l'efficacité des deux méthodes de contrôle lorsque la répartition spatiale de la pression cible est presque similaire. 4 pressions cibles sont donc étudiées pour un contrôle :

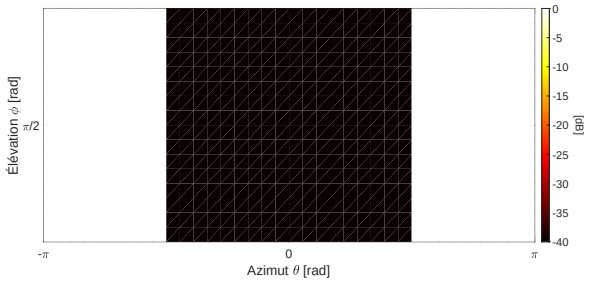
1. par double zone imposant une bright zone large ($-\frac{\pi}{2} \geq \theta \geq \frac{\pi}{2}, \forall\phi$, Figures 5.2.7a et 5.2.8a),
2. par double zone imposant une bright zone étroite ($160° \leq \theta \leq 200°, 70° \leq \phi \leq 110°$, Figures 5.2.7b et 5.2.8b),
3. par directivité cible imposant $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$, Figures 5.2.7c et 5.2.8c,

4. par directivité cible imposant $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$, Figures 5.2.7d et 5.2.8d.

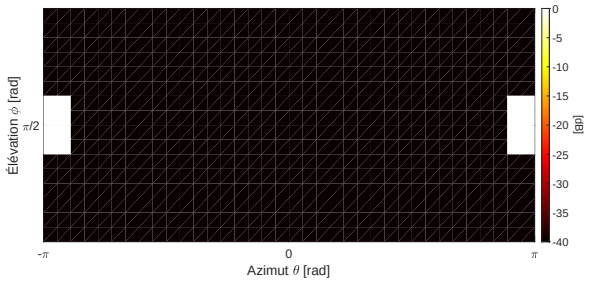


(a) (b) (c) (d)

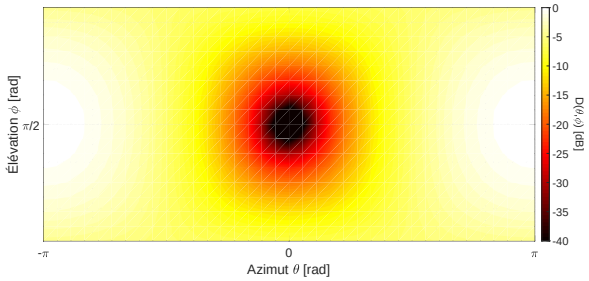
Figure 5.2.7 : Diagramme de directivité pour une pression cible : bright zone large vers l'arrière ($\theta = \pm 90°$) (a), bright zone étroite vers l'arrière ($\theta = \pm 20°$)(b), cardioïde ($\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$) (c) et cardioïde directif ($\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$) (d).



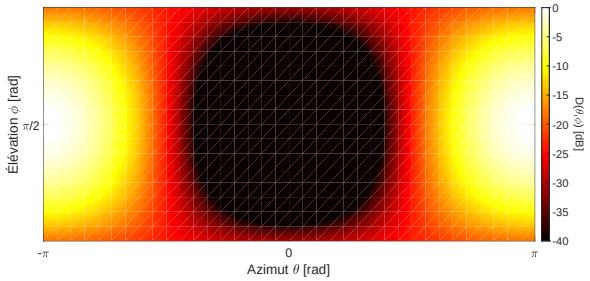
(a) Double zone : bright zone large



(b) Double zone : bright zone étroite



(c) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$



(d) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$

Figure 5.2.8 : Pression target en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ (Équation (5.40)) pour 4 contrôles différents développés en Sections 5.1.4.1 et 5.1.4.2.

Plusieurs configurations de position et de nombre de sources secondaires sont étudiées. Les distances ont été choisies pour des raisons pratiques lors de l'expérience développée en Section 5.3. La distance d_{HP} entre chaque haut-parleur détermine la fréquence avant repliement spatial $f_{\text{HP}} = \frac{c}{2d_{\text{HP}}}$ [BVV93]. La fréquence maximale d'efficacité d'un contrôle en puissance (présenté par le Chapitre 4) ne dépasse pas 3 kHz. Cette fréquence maximale est également choisie pour l'étude du contrôle de la directivité. L'espacement théorique entre chaque haut-parleur ne doit donc pas être inférieur à $d_{\text{HP}} = 0.085$ m pour éviter tout repliement spatial. Pour éviter que les enceintes des haut-parleurs ne se touchent lors de l'expérience, la distance entre deux haut-parleurs de contrôle est cependant 0.10 m. La distance $h_r = 0.16$ m permet de placer les haut-parleurs sur un anneau à fleur du pavillon du trombone alors que

la distance $h_f = 0.05$ m est choisie pour placer le haut-parleur de contrôle le plus proche du pavillon du trombone sans obstruer le guide d'ondes.

La Figure 5.2.9 présente 2 cas d'étude pour évaluer l'efficacité du contrôle avec :

(**1**) 2 sources situées à $h_f = 0.05, 0.15$ m de la source primaire,

(**2**) 4 sources secondaires placées à $h_r = 0.16$ m et 4 sources secondaires placées en ligne à $h_f = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35$ m de la source primaire.

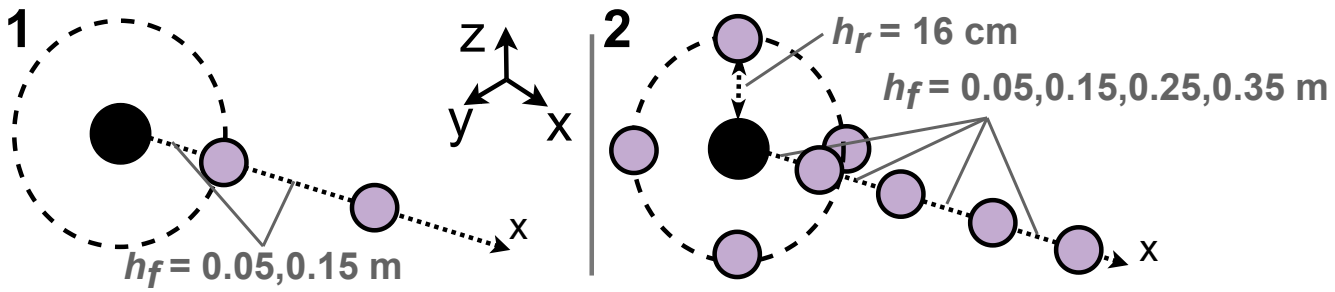


Figure 5.2.9 : Deux configurations étudiées pour l'impact du nombre et de la position des sources secondaires sur le contrôle de la directivité : les sources secondaires sont positionnées autour de la source primaire soit sur un anneau, soit devant cette dernière.

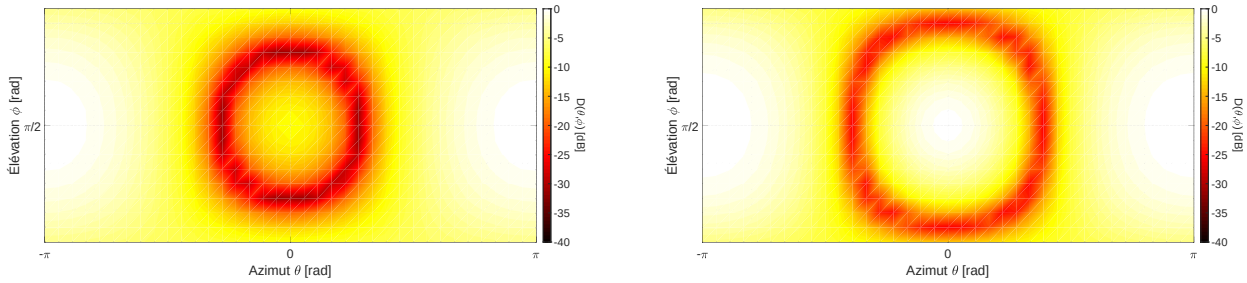
Cas 1

La Figure 5.2.10 représente les fonctions de directivité après contrôle à 200 Hz pour le cas **1** (2 sources secondaires en ligne) avec $|p(\theta, \phi)|$ le module de la pression pour chaque récepteur placé sur la sphère en fonction de θ et ϕ et $|p_{\text{max}}|$ le module de la pression dans l'axe du pavillon à l'avant du trombone. Cela permet notamment d'estimer le contraste créé pour un contrôle à partir d'une directivité cible, l'indicateur μ ne pouvant pas estimer un contraste acoustique lorsqu'une seule zone est définie (Équation (5.13)).

Les champs de pression résultant du contrôle respectent les consignes lorsqu'une directivité cible de type cardioïde est imposée ($\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$) avec une différence de 15 dB entre les points extremums sur la sphère. Ce n'est pas le cas des fonctions de directivité résultant des contrôles imposant une directivité plus marquée ($\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$), une bright zone large ou étroite : le contrôle ne peut pas imposer une pression nulle à 0° en imposant une pression maximale à l'exact opposé sur la sphère à 180°. Le nombre de sources secondaires est alors trop petit par rapport à la complexité de la pression cible. La Figure 5.2.11 représente l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant de chaque contrôle dans la bright zone.

L'indicateur $\overline{e}$ montre que l'erreur spatiale moyenne normalisée augmente avec la fréquence lorsqu'un contrôle est effectué à partir d'une directivité cible. L'erreur dans la bright zone d'un contrôle par double zone est globalement constante avec la fréquence. L'erreur est minimale lorsque la pression cible est un cardioïde aux basses fréquences. À partir de 650 Hz, la minimisation est légèrement meilleure pour un contrôle double zone large (-9 dB contre -6 dB à 2 kHz). La Figure 5.2.12 montre le contraste acoustique μ pour chaque contrôle par double zone.

L'indicateur μ est de 10 dB aux basses fréquences puis descend progressivement à 4 dB aux hautes fréquences pour la méthode imposant une bright zone large. Pour la méthode imposant une bright zone étroite, μ varie entre 1 dB et 7 dB. Il apparait donc que la différence de taille entre les deux zones affecte



(a) Double zone : bright zone large

(b) Double zone : bright zone étroite

(c) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$

(d) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$

Figure 5.2.10 : Fonction de directivité après contrôle à 200 Hz en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour le cas **1** avec les 4 méthodes de contrôle.

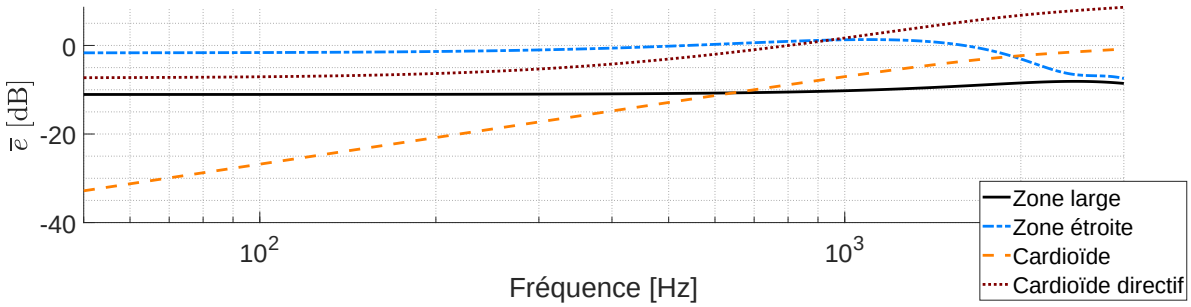


Figure 5.2.11 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant du contrôle (cas **1**) lorsque la bright zone est large (ligne continue), étroite (ligne en tirets/pointillés), lorsque la target est un cardioïde (ligne en pointillés), un cardioïde directif (ligne en tirets).

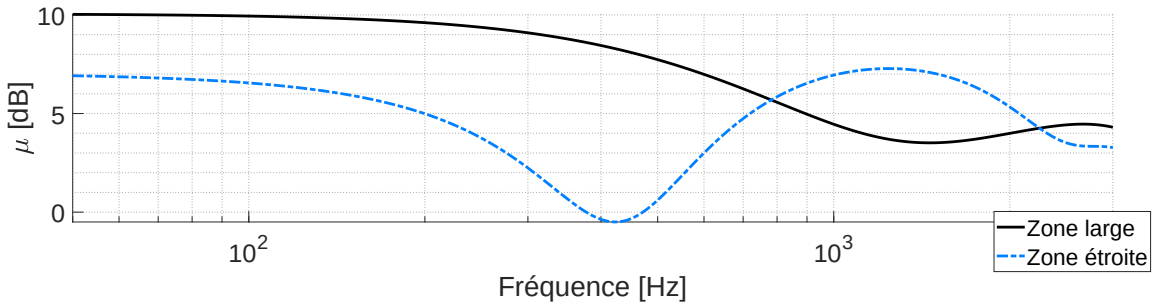
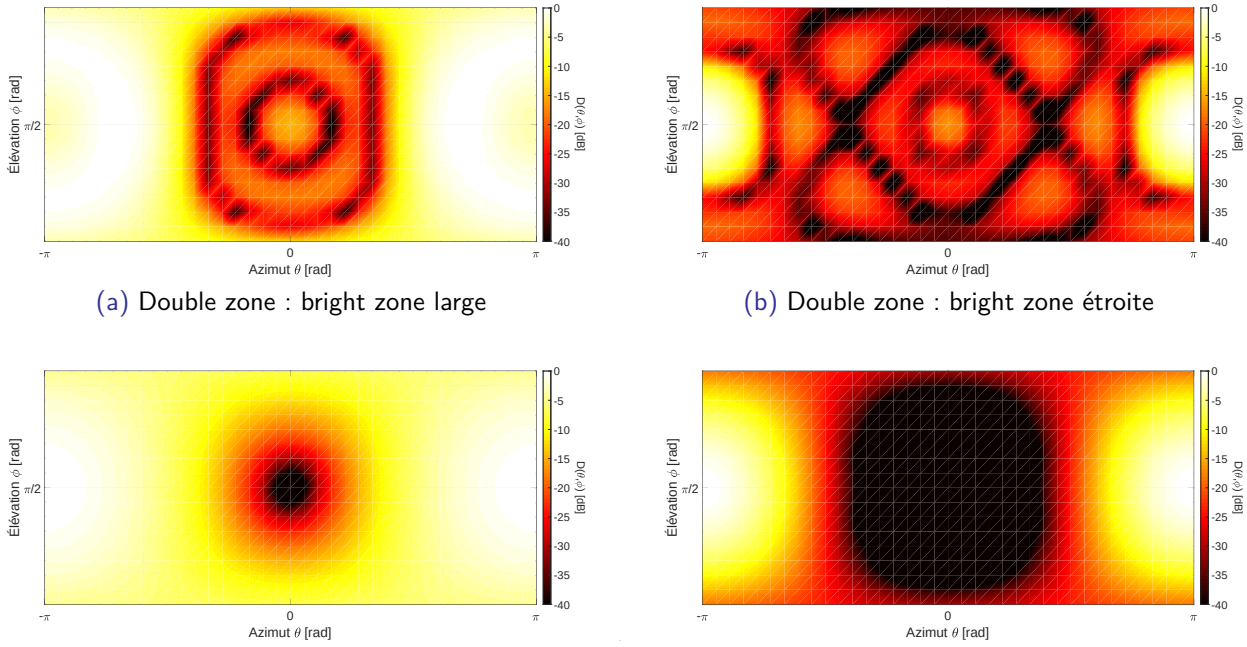


Figure 5.2.12 : Contraste acoustique μ pour le cas **1** lorsque la bright zone est large (ligne continue) ou étroite (ligne en tirets/pointillés).

le contraste avec une diminution de celui-ci lorsque la bright zone est étroite aux basses fréquences. Le contrôle perd ensuite en efficacité avec la fréquence quelque soit la taille des zones.

Cas 2

La Figure 5.2.13 montre les fonctions de directivité après contrôle à 200 Hz pour le cas **2** (4 sources secondaires placées à $h_r = 0.16$ m et 4 sources secondaires placées en ligne).



(a) Double zone : bright zone large

(b) Double zone : bright zone étroite

(c) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$

(d) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$

Figure 5.2.13 : Fonction de directivité après contrôle à 200 Hz en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour le cas **2** avec les 4 méthodes de contrôle.

Les champs de pression résultant du contrôle respectent les consignes quelque soit la pression cible avec une différence d'au moins 20 dB entre les points extremums sur la sphère. L'écart brutal de pression quand un contrôle par double zone est imposé amène une variation importante de la pression au sein de la dark zone. La Figure 5.2.14 représente l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant de chaque contrôle dans la bright zone.

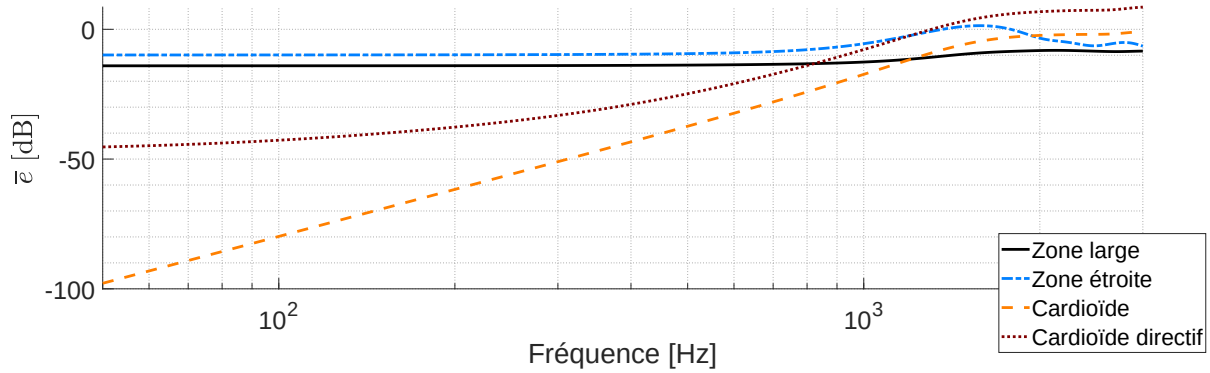


Figure 5.2.14 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant du contrôle pour le cas **2** lorsque la bright zone est large (ligne continue) ou étroite (ligne en tirets/pointillés), lorsque la target est un cardioïde (ligne en pointillés) ou un cardioïde directif (ligne en tirets).

Les résultats sont similaires entre le cas **1** et **2** avec une amélioration des performances pour le cas **2** notamment pour les contrôles imposant une directivité cible. Augmenter le nombre de sources secondaires permet d'imposer une pression cible davantage exigeante. Ce constat n'est pertinent que pour les configurations étudiées pour ce travail où tous les récepteurs sont répartis de manière équitable sur la sphère. La Figure 5.2.15 montre le contraste acoustique μ pour chaque contrôle par double zone.

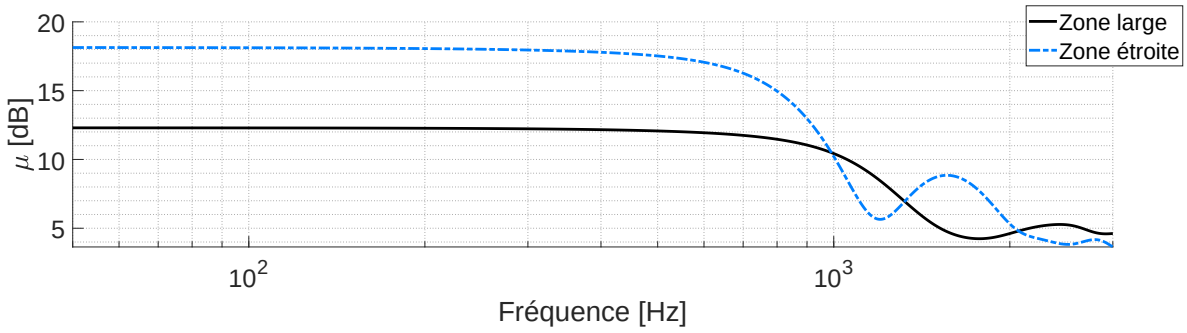


Figure 5.2.15 : Contraste acoustique μ pour le cas **2** lorsque la bright zone est large (ligne continue) ou étroite (ligne en tirets/pointillés).

Le contraste μ augmente avec le nombre de sources secondaires faiblement dans le cas **1** ($+2$ dB aux basses fréquences) et plus nettement lorsque la bright zone est étroite ($+11$ dB). Cela confirme qu'un nombre plus élevé de sources secondaires est requis lorsque la complexité de la pression cible augmente.

L'influence de l'espacement entre chaque source secondaire placée en ligne dans l'axe du pavillon est présenté à la Figure 5.2.16 où μ est estimé pour un contrôle par double zone lorsque la position des sources varie entre $d_{\text{HP}} = 0.05$ m et $d_{\text{HP}} = 0.30$ m.

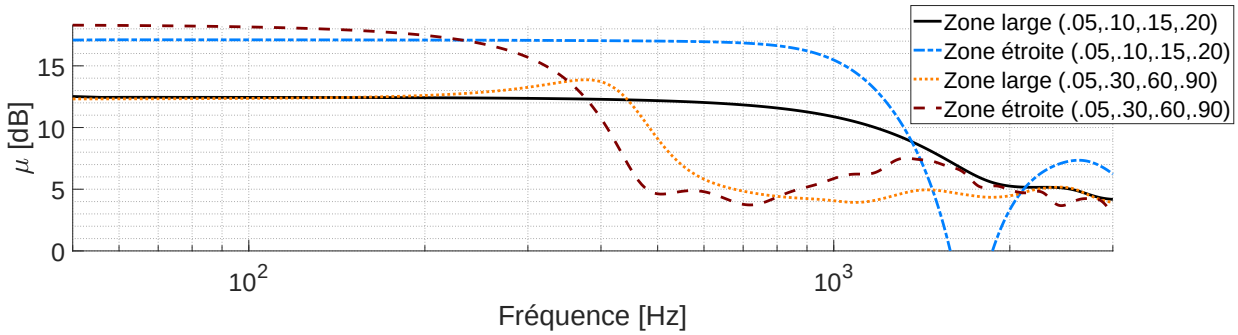


Figure 5.2.16 : Contraste acoustique μ lorsque la bright zone est large (lignes continue et pointillés) et lorsque la bright zone est étroite (lignes en tirets/pointillés et en tirets). 4 sources secondaires sont placées à $h_r = 0.16$ m et 4 autres sont placées en ligne à $h_f = 0.05$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.05$ m (lignes continue et en tirets/pointillés) ou à $d_{\text{HP}} = 0.30$ m (lignes en pointillés et en tirets).

Le contraste μ le plus élevé et le plus étendu en fréquence est celui obtenu pour un contrôle en zone étroite avec des sources secondaires proches. Pour ce contrôle, l'espacement des sources ne permet pas d'augmenter significativement le contraste et perd de son efficacité pour les fréquences supérieures à 300 Hz. En revanche, l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ ne varie que peu aux basses fréquences lorsque la position des sources varie entre $d_{\text{HP}} = 0.05$ m et $d_{\text{HP}} = 0.30$ m (Figure C.2.1 en annexe C.2). Le contrôle perd cependant en efficacité dans les hautes fréquences à mesure que l'espacement entre les sources augmente et donc lorsque les sources secondaires s'éloignent de la source primaire.

Augmenter le nombre de sources secondaires permet ainsi d'accentuer le contraste acoustique quelque soit la méthode de contrôle. Cela permet également de répartir l'effort à appliquer à chaque haut-parleur pour effectuer le contrôle. La pression cible est davantage respectée avec un plus grand nombre de sources secondaires. La bande de fréquence pour laquelle le contraste est élevé est plus large quand l'ensemble des sources secondaires se rapprochent de la source primaire. Il est à noter que si les sources secondaires sont localisées uniquement sur un plan orthogonal à l'axe à partir duquel la pression cible est définie, un contrôle est possible mais est forcément symétrique par rapport au plan où sont placées les sources. Il apparait qu'un contrôle par directivité cible permet d'obtenir une meilleure minimisation de l'erreur spatiale par rapport à un contrôle par double zone. Il en résulte à priori que le son perçu par l'auditeur est plus fidèle au son émis par le trombone.

5.2.3 Impact du facteur de pondération

L'impact du facteur de pondération κ est étudié pour un contrôle imposant une bright zone large pour le cas **2** avec $\kappa = 0.1, 0.5, 0.9$. Les résultats pour un contrôle imposant une bright zone étroite sont affichés en annexe C.2 par les Figures C.2.2 et C.2.3. Les Équations (5.13) et (5.22) indiquent que le contraste acoustique μ est favorisé lorsque κ est petit (le terme de la dark zone de l'Équation (5.22) est alors favorisé) : la pression dans la dark zone se rapproche alors de 0. À l'inverse, la minimisation de l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression de la source primaire et la pression cible dans la bright zone est favorisée lorsque κ est grand (Équation (5.14)). La Figure 5.2.18 montre en effet que le module de la pression dans la dark zone est davantage atténué lorsque κ est petit.

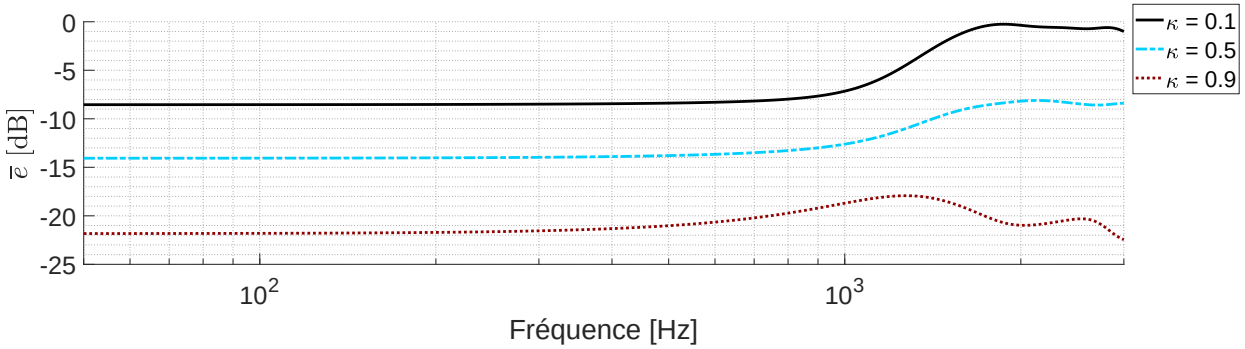


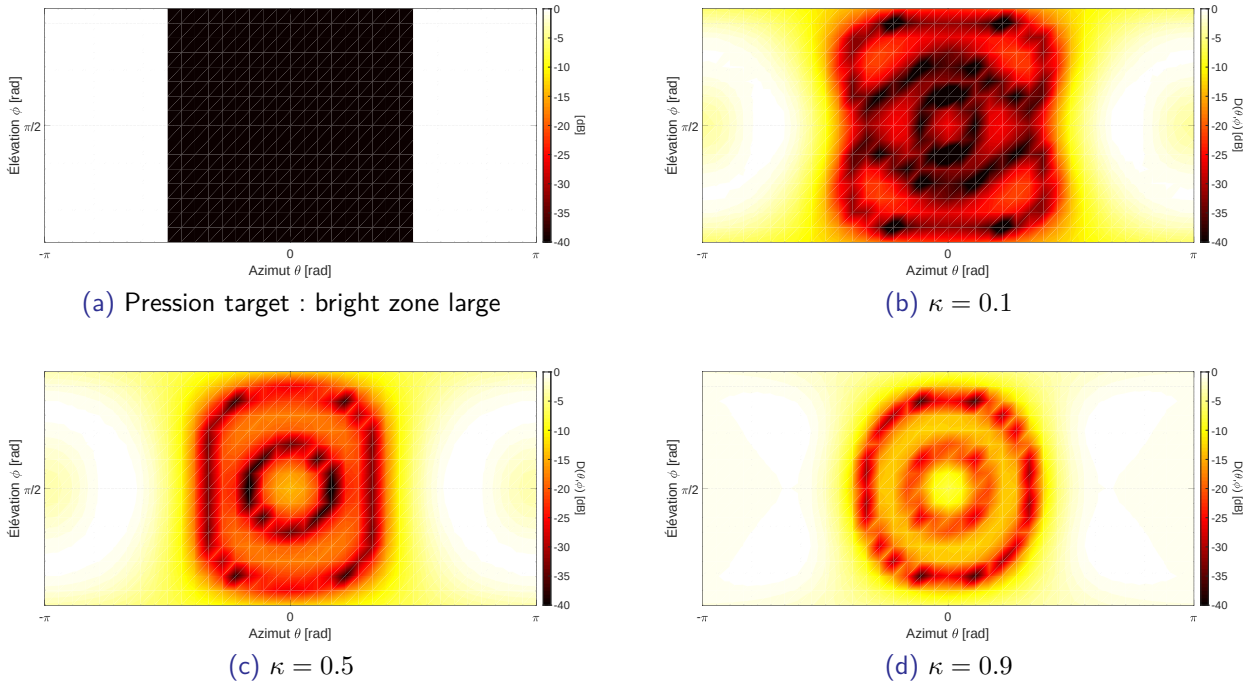
Figure 5.2.17 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant du contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) avec $\kappa = 0.1, 0.5, 0.9$ pour le cas **2**.

Lorsque une bright zone large est imposée, l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ diminue effectivement lorsque κ augmente, avec une différence de 15 dB entre le cas où $\kappa = 0.1$ et celui où $\kappa = 0.9$ (Figure 5.2.17). Il en est de même lorsque la bright zone est étroite avec une minimisation qui est moins importante. Le contraste acoustique évalué à partir de l'Équation (5.13) est montré sur la Figure 5.2.19.

Le contraste acoustique μ est le plus élevé lorsque κ est petit. Lorsque la bright zone est étroite, μ est constant et chute après 400 Hz quelque soit la valeur de κ. Ce facteur n'a que peu d'impact sur μ lorsque la bright zone est beaucoup plus petite que la dark zone. Lorsque les zones ont le même nombre de récepteurs, la valeur optimale de κ est donc 0.5 pour à la fois minimiser l'erreur dans la bright zone et maximiser le contraste acoustique.

5.2.4 Impact du paramètre de régularisation

L'impact du terme de régularisation β dans l'Équation (5.27) est étudié pour un contrôle imposant une bright zone large ($\theta = 90°$) pour le cas **2**. La régularisation permet de réduire le nombre de



(a) Pression target : bright zone large (b) $\kappa = 0.1$

(c) $\kappa = 0.5$ (d) $\kappa = 0.9$

Figure 5.2.18 : Champ de pression désiré (a) et champ de pression théorique résultant du contrôle pour différents facteurs de pondération κ à 200 Hz (b, c, d) en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour un contrôle avec la méthode décrite en Section 5.1.4.1 pour le cas **2**.

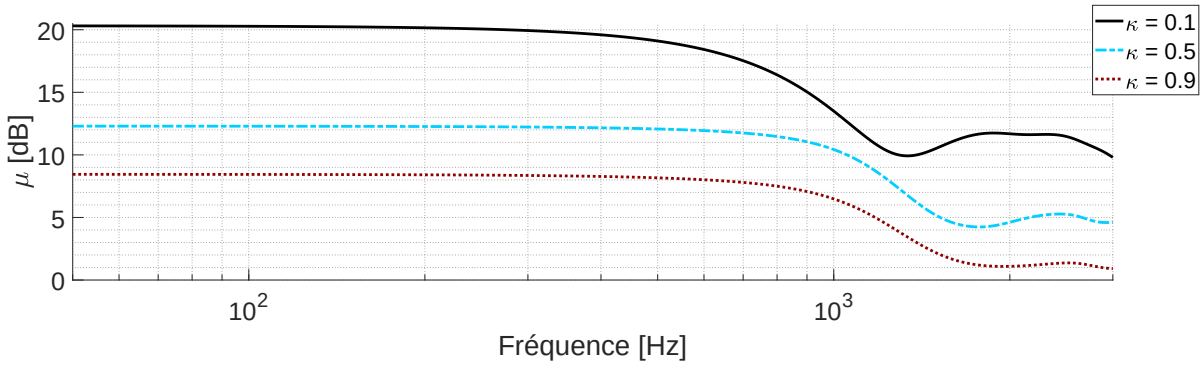


Figure 5.2.19 : Contraste acoustique μ résultant du contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) avec $\kappa = 0.1, 0.5, 0.9$ pour le cas **2**.

valeurs singulière du terme $\boldsymbol{A}_{\text{dz}}$ et ainsi de réduire son conditionnement lors de l'inversion matricielle (Équation (5.28)). Le terme β est défini comme constant quelque soit la fréquence. L'hypothèse émise est que le contrôle perd en efficacité des basses fréquences vers les hautes fréquences lorsque le terme β augmente comme cela est observé lors de l'étude du contrôle en puissance en Section 4.3.1. Le conditionnement est fortement réduit aux basses fréquences dès que $\beta = 10^{-1}$ comme le montre la Figure 5.2.20.

Le module du filtre de contrôle à appliquer à chaque source secondaire aux basses fréquences se réduit à mesure que β augmente (voir le Tableau 4.5.1 où ajouter un terme de régularisation réduit la puissance requise). La Figure 5.2.21 représente l'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ résultant du contrôle pour $\beta = 0; 10^{-1}; 1; 10$.

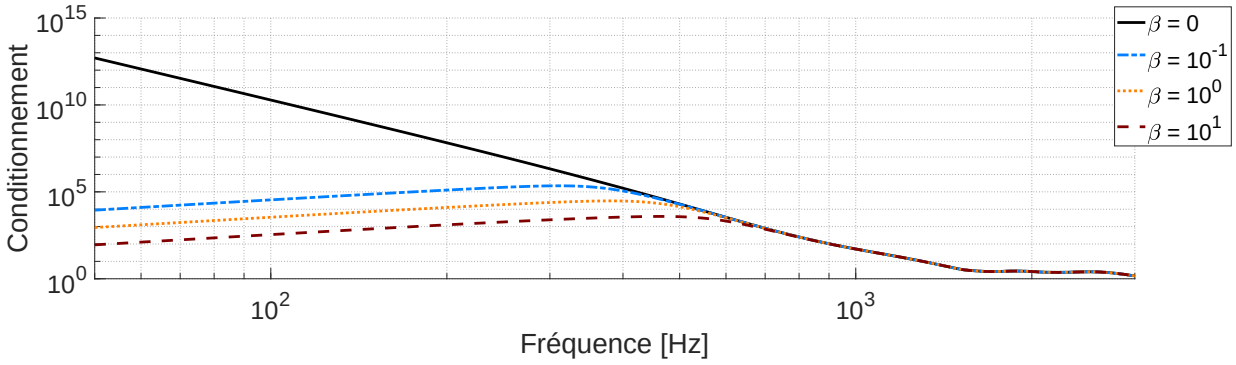


Figure 5.2.20 : Conditionnement de la matrice $\boldsymbol{A}_{\text{dz}}$ pour $\beta = 0; 10^{-1}; 1; 10$ avec un contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) pour le cas **2**.

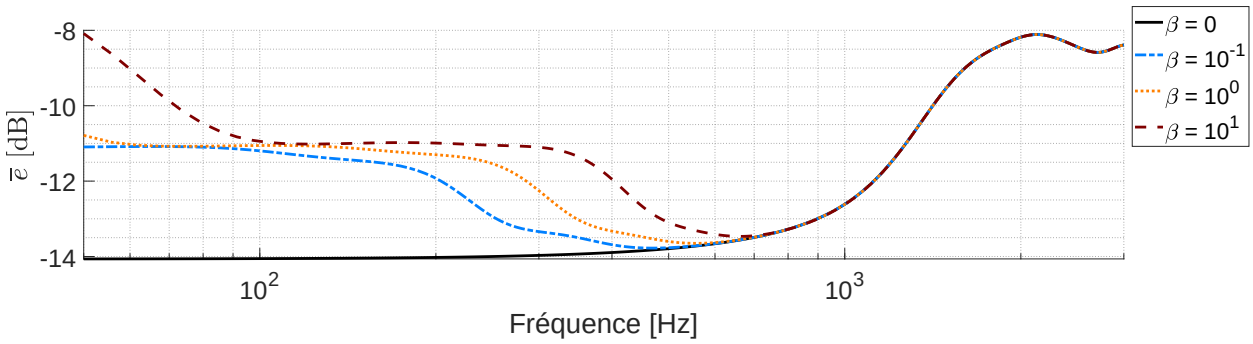


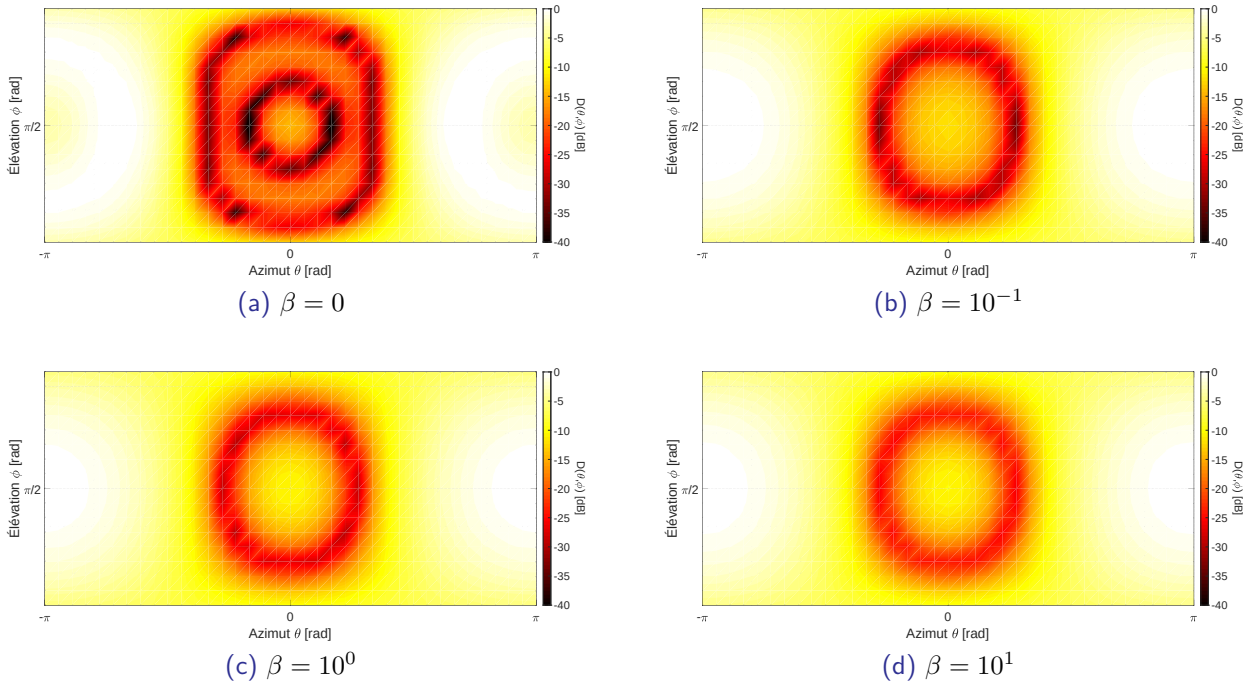
Figure 5.2.21 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ entre la pression cible et la pression résultant du contrôle pour un contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) avec $\beta = 0; 10^{-1}; 1; 10$ pour le cas **2**.

L'ajout d'un terme de régularisation augmente $\overline{e}$ aux basses fréquences : la minimisation de $\overline{e}$ est réduite lorsque $\beta = 10^{-1}$ à partir 500 Hz. Cette fréquence est plus élevée à mesure que β augmente. Il en est de même pour μ (Figure C.2.4 en annexe C.2) qui diminue des basses fréquences vers les hautes fréquences lorsque β augmente avec une réduction du contraste d'environ 1.5 dB à 300 Hz à chaque fois que β est multiplié par 10. Ajouter une régularisation à l'inversion matricielle permet de limiter l'effort imposé aux sources secondaires mais cela vient modifier la directivité obtenue aux basses fréquences. Cela est illustré par la Figure 5.2.22 où le contraste est très diminué dès que β est non-nul entre le point devant à 0° et celui à 180°.

5.2.5 Impact sur le contrôle en puissance

L'impact du contrôle de la directivité sur le contrôle en puissance est étudié pour chaque méthode de contrôle. Une grande partie du champ rayonné par la source primaire n'est pas altéré lorsqu'un contrôle en directivité est effectué. L'atténuation en puissance résultante est montrée sur la Figure 5.2.23 pour le cas **2**.

Pour chaque méthode de contrôle, l'atténuation est inférieure par rapport à celle d'un contrôle de la puissance (ligne continue avec des triangles) et chute à partir de 1000 Hz. Celle-ci ne dépasse pas 14 dB avant 1000 Hz. Pour générer une atténuation en puissance plus importante, il est nécessaire de redéfinir la pression cible. Comme la méthode décrite en Section 5.1.4.1 ne permet pas directement de modifier le module de la pression de la source primaire dans la bright zone, la méthode ciblant une directivité



(a) $\beta = 0$ (b) $\beta = 10^{-1}$

(c) $\beta = 10^{0}$ (d) $\beta = 10^{1}$

Figure 5.2.22 : Champ de pression théorique résultant du contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) avec $\beta = 0; 10^{-1}; 10^{0}; 10^{1}$ pour le cas **2**.

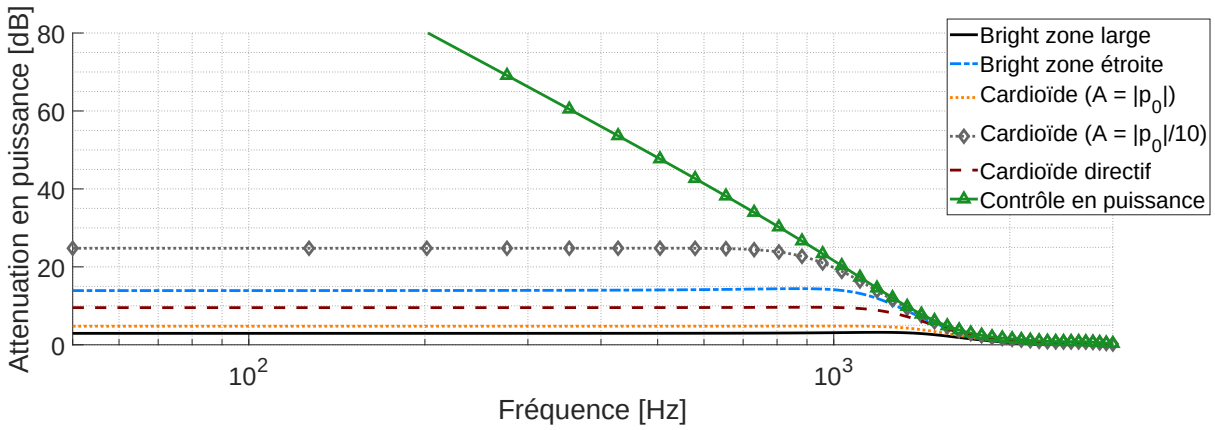


Figure 5.2.23 : Atténuation en puissance $\mathrm{Att}_W = 10\log_{10}\frac{W_0}{W_{\text{tot}}}$ avec le cas **2** pour une pression cible : bright zone large (ligne continue) et bright zone étroite (ligne en tirets/pointillés), cardioïde avec $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ (ligne en pointillés), cardioïde atténuée avec $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$ (ligne en pointillés avec des losanges), cardioïde directif avec $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$ (ligne en tirets) et pour un contrôle en puissance (ligne continue avec des triangles).

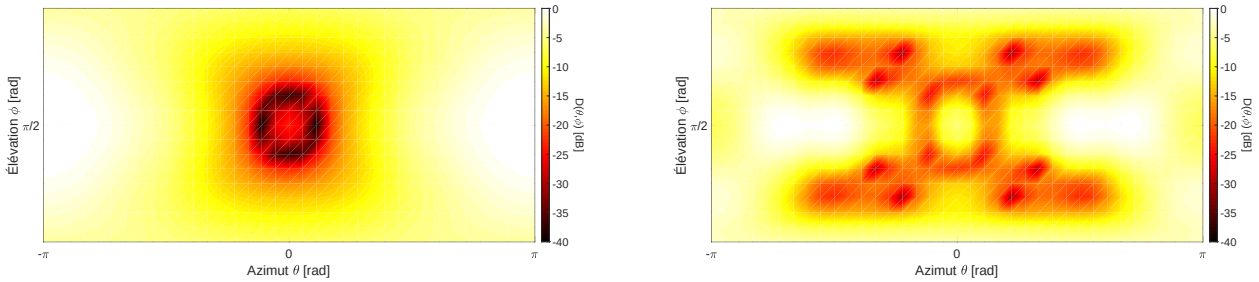
cardioïde décrite en Section 5.1.4.2 est modifiée de telle sorte que la pression cible s'exprime par :

$$\mathscr{D}(\theta) = \frac{1}{10}\Big(\frac{1-\cos\theta}{2}\Big) = \frac{1-\cos\theta}{20}, \tag{5.39}$$

soit une atténuation de 20 dB de la pression rayonnée par la source primaire par rapport au cas où la pression cible est $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$.

L'atténuation en puissance augmente alors pour ce dernier cas comme le montre la ligne continue avec des losanges sur la Figure 5.2.23 indiquant que l'atténuation en puissance est constamment de 25 dB avant

700 Hz. La directivité résultant du contrôle est cependant impactée comme le montre la Figure 5.2.24b où la pression cible n'est plus un cardioïde par rapport au cas classique (Figure 5.2.24a).



(a) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ (b) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$

Figure 5.2.24 : Fonction de directivité après contrôle à 800 Hz en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour le cas **2** avec 2 contrôles par directivité cible avec $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ à gauche et $\frac{\mathscr{D}(\theta)}{20}$ à droite.

Il résulte néanmoins de ce contrôle une erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ similaire entre les 2 cas aux basses fréquences. Plus la fréquence augmente, plus l'erreur augmente pour le contrôle dont la pression cible est $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$ (Figure C.2.5 en annexe C.2). Il est donc possible d'atténuer la puissance de la source primaire tout en modifiant sa directivité mais un compromis est à définir entre l'efficacité du contrôle de la directivité par rapport à celle du contrôle en puissance.

5.2.6 Impact sur l'impédance d'entrée

Il est possible de remonter à l'impédance d'entrée de la source primaire équivalente au trombone à l'aide du modèle présenté en Section 4.3.2. Un modèle composé exclusivement d'une série de tuyaux cylindriques est simulé comme présenté dans la Section A.2. Les trois premières résonances de l'impédance d'entrée de ce montage sont montrées sur la Figure 5.2.25.

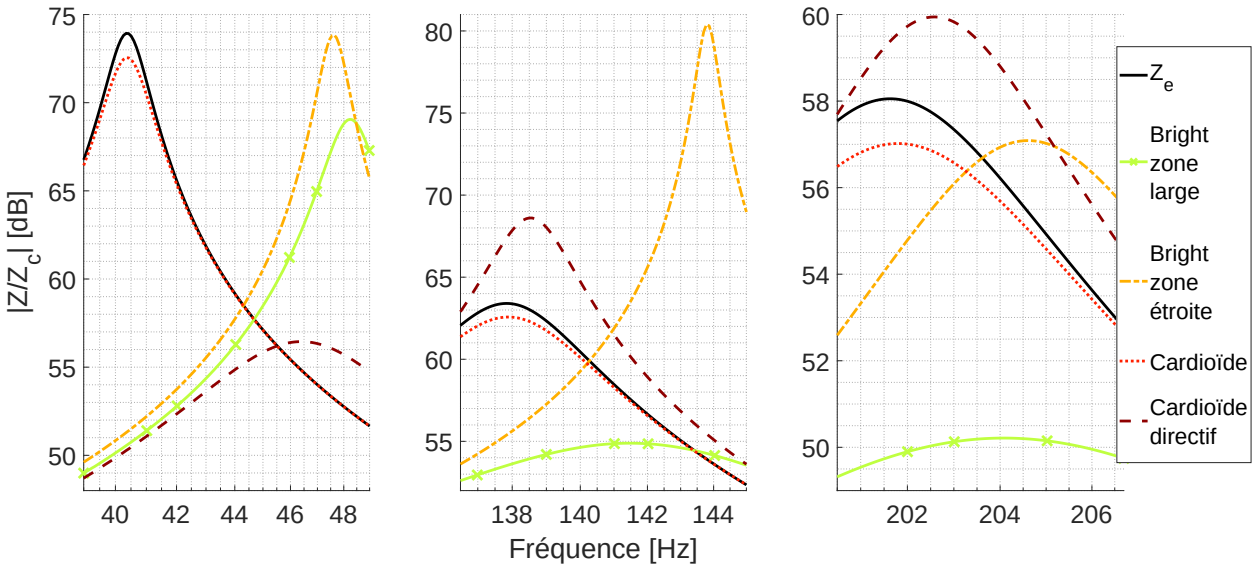


Figure 5.2.25 : Impact de l'impédance d'entrée ramenée pour un contrôle imposant : une bright zone large (ligne continue/croix), étroite (tirets/pointillés), un cardioïde avec $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ (pointillés) ou un cardioïde directif avec $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$ (tirets).

Le contrôle modifie de manière non négligeable l'amplitude des pics de résonance. Cet impact est largement supérieur à celui étudié pour le contrôle en puissance en Section 4.3.2 (0.06 dB de différence maximale sur les 3 premiers pics contre 15 dB pour le contrôle de la directivité). Même si la sortie du trombone est de forme pavillonnaire, les sources secondaires provoquent un changement conséquent sur l'amplitude et la fréquence des pics de l'impédance d'entrée lorsque la pression cible est une bright zone large ou étroite ou lorsque la pression cible est un cardioïde directif. Cela se vérifie en observant le module du filtre de contrôle requis (Équations (5.29) et (5.38)) pour la source la plus proche du pavillon (Figure 5.2.26). Le module du filtre imposé à cette source est largement inférieur lorsque la pression cible est un cardioïde ($\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$) par rapport aux autres types de contrôle et a donc une influence réduite sur le rayonnement du trombone et son impédance d'entrée.

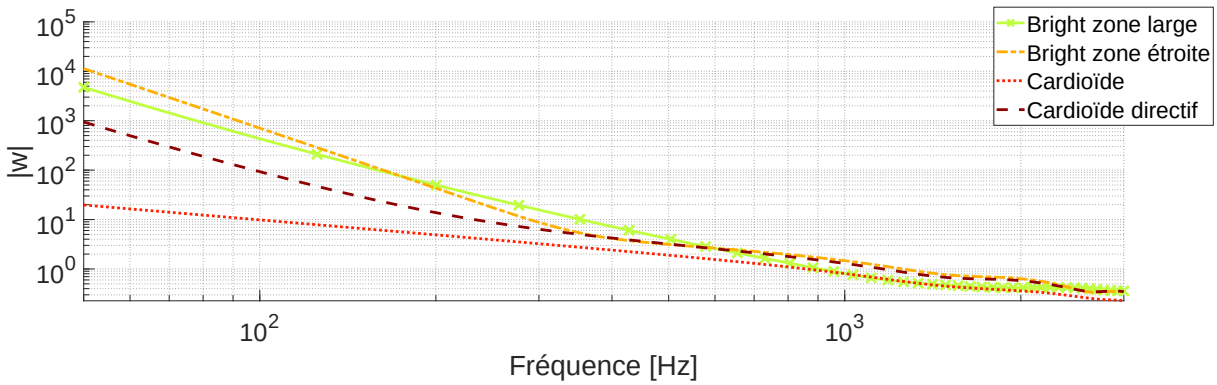


Figure 5.2.26 : Module du filtre de contrôle de la source secondaire la plus proche de la source primaire pour un contrôle imposant une bright zone large (ligne continue/croix), étroite (tirets/pointillés), cardioïde avec $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ (pointillés) ou cardioïde directif avec $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$ (tirets).

Comme la pression cible cardioïde semble avoir moins d'impact sur Z_e par rapport aux autres méthodes de contrôle, Z_{ec} est estimé pour cette méthode ainsi que pour une bright zone large pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée. Le Tableau 5.2.1 présente pour les 10 premiers pics de Z_e l'écart en amplitude en dB (estimé à partir de la partie réelle de Z_e) et l'écart en fréquence en cents (estimé lorsque la partie imaginaire de Z_e passe par 0 aux résonances) entre les situations sans et avec contrôle.

	Pic n°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
	f (Hz)	40	138	201	296	355	440	496	593	650	743
Cardioïde	ΔA (dB)	-1.4	-1.0	-0.8	-0.8	-1.7	-0.8	-1.1	-0.2	-0.7	+0.6
	Δf (cent)	<1	<1	<1	<1	1.1	1.7	<1	1.6	1.6	1.4
Bright zone large	ΔA (dB)	-4.9	-8.5	-8.0	-4.0	-6.0	-3.1	-3.0	-1.1	-1.9	-0.8
	Δf (cent)	92.3	16.0	3.1	3.3	<1	3.7	<1	2.5	2.0	2.8

Tableau 5.2.1 : Écarts d'amplitude (ΔA) et de fréquence (Δf) théoriques pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone relié à un tuyau sans et avec contrôle pour le cas **2** pour un contrôle dont la pression cible impose $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ ou une bright zone large.

La différence d'écarts d'amplitude (ΔA) est supérieur de 6 dB lorsque le contrôle vise une bright zone large pour les 5 premiers pics de Z_e puis ΔA se réduit avec la fréquence. Les pics de Z_e sont amortis quelque soit le contrôle. Le contrôle imposant $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ crée un écart de 1.7 dB au maximum (pic n°5) alors que celui imposant une bright zone large crée un écart de 8.5 dB au maximum (pic n°2). L'écart maximal fréquentiel est négligeable lorsque la pression cible est un cardioïde alors qu'il est au maximum de 92.3 cents (pic n°1) pour le contrôle imposant une bright zone large.

Il apparait donc que le contrôle dont la pression cible est $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ influence beaucoup moins l'impédance d'entrée de l'instrument qu'avec un contrôle dont la pression cible est une bright zone large. Ce dernier diminue fortement le module des 5 premiers pics de l'impédance d'entrée, ceci ayant pour impact de rendre le trombone à priori plus difficile à jouer (à l'inverse de l'étude faite pour le contrôle en puissance en Section 4.3.2, voir impact du module de l'impédance d'entrée sur la jouabilité dans [Meu+15]). L'écart fréquentiel est largement supérieur à 5 cents pour les 2 premiers pics, ceci diminuant la correction de longueur (comme pour le contrôle en puissance).

Cette influence importante du contrôle de la directivité sur l'impédance d'entrée s'explique par le fait que les sources secondaires imposent un champ de pression dont le module est bien plus important que celui produit par la source primaire. Cela se vérifie en regardant le module du filtre de contrôle à appliquer aux sources secondaires sur les Figures 5.2.5 et 5.2.6 qui est bien plus important pour un contrôle imposant une bright zone large que celui imposant un cardioïde. Cela se vérifie en observant l'impact du contrôle sur l'impédance de rayonnement. Un piston de rayon $a = 0.1$ m est considéré pour cette étude. La Figure 5.2.27 compare Z_{rc} à Z_{r0} (définis dans la Section 4.3.2) lors du contrôle imposant une bright zone large ou un cardioïde pour le cas **2**.

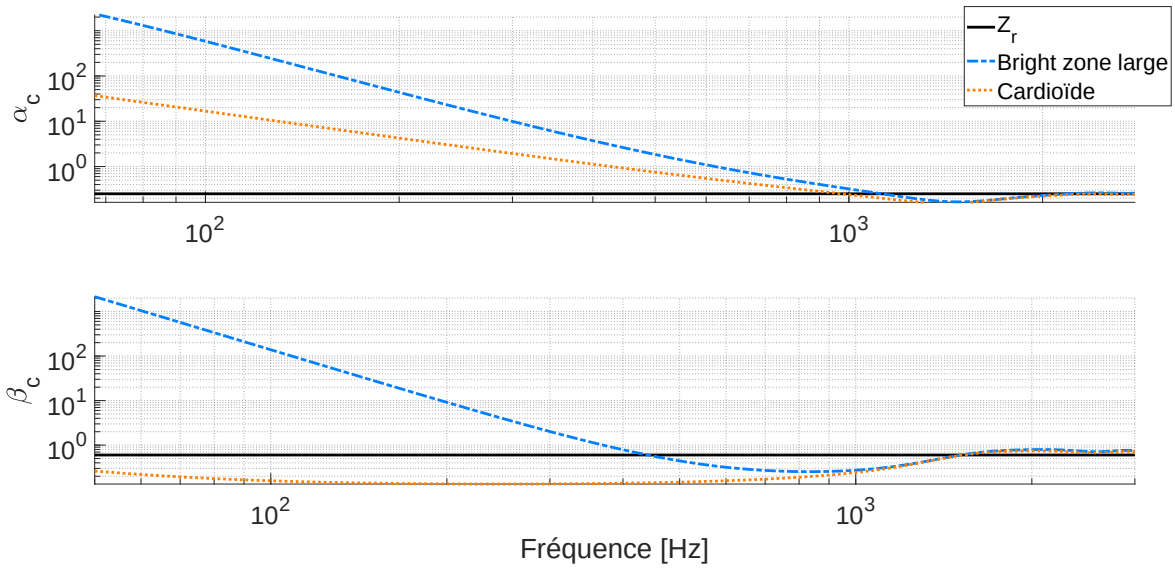


Figure 5.2.27 : Parties réelle et imaginaire normalisées de l'impédance de rayonnement de Z_{r0} et de Z_{rc} représentées par α_c (Équation (4.49)) et β_c (Équation (4.50)). Le cas **2** est étudié pour un contrôle imposant une bright zone large ou un cardioïde.

À 50 Hz, α_c (qui vaut $1/4$ dans le cas d'un rayonnement en espace infini sans contrôle) est multiplié par 10^2 dans le cas d'un contrôle imposant un cardioïde et par 10^3 dans le cas d'un contrôle imposant une bright zone large. L'écart se réduit progressivement avec la fréquence quelque soit la méthode de contrôle jusqu'à 1000 Hz où l'écart disparait. Un contrôle de la directivité produit ainsi un champ de pression principalement imposé par les sources secondaires aux basses fréquences notamment lorsque la méthode de contrôle est exigeante (contrôle par double zone ou contrôle par directivité cible dont l'ordre de complexité est élevé). Cela modifie principalement l'amplitude et la fréquence des 5 premiers pics de l'impédance d'entrée. Il faut cependant noter que l'effet d'un contrôle double zone sur l'impédance d'entrée est réduit en augmentant le terme de régularisation β.

5.2.7 Synthèse

L'influence de la pression cible, du nombre et de la position des sources secondaires, du facteur de pondération κ, du terme de régularisation β ont été étudiés pour un contrôle d'une source primaire par plusieurs sources secondaires. Il a été démontré par ailleurs qu'un compromis peut être défini entre l'efficacité du contrôle de la directivité et celle du contrôle en puissance. Le Tableau 5.2.2 fait une synthèse des performances des différentes méthodes de contrôle.

Contrôle	Bright zone large	Bright zone étroite	Cardioïde	Cardioïde directif
max(μ) [dB]	**1** : 10, **2** : 12	**1** : 7, **2** : 18	NA	NA
min($\overline{e}$) [dB]	**1** : -11, **2** : -12	**1** : -2, **2** : -10	**1** : -33, **2** : -100	**1** : -7, **2** : -45
Impact sur Z_e	Important : -8.5 dB et +92 cents sur le pic n°2	Important : +17 dB sur le pic n°2 et +291 cents sur le pic n°1	Faible : -1.7 dB et moins de 5 cents sur le pic n°5	Important : -17 dB et +238 cents sur le pic n°1

Tableau 5.2.2 : Synthèse des performances théoriques en fonction du cas étudié (cas **1** ou **2**). Pour chaque contrôle, le maximum de μ sur toute la bande fréquentielle est affiché, ainsi que le minimum de $\overline{e}$, l'impact sur Z_e et l'effort imposé aux sources secondaires est commenté. W_{nom} est la puissance nominale du haut-parleur étudié.

Augmenter le nombre de sources secondaires améliore μ et minimise $\overline{e}$. L'erreur est minimale lorsque la pression cible est un cardioïde. L'impact sur l'impédance d'entrée est par ailleurs important pour toutes les méthodes de contrôle sauf lorsqu'une directivité cardioïde est imposée.

Concernant la méthode de contrôle où $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$ (cardioïde atténué), l'erreur $\overline{e}$ est sensiblement similaire à celle d'un cardioïde ($\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$), à savoir une erreur minimum de -100 dB pour le cas **2**. L'impact sur l'impédance d'entrée est également faible (+2 dB et moins de 5 cents d'écart). L'effort imposé aux sources secondaires est cependant supérieur comme cela sera prouvé par la suite en Section 5.4.
Dans un futur travail, l'effet de la fenêtre de pondération sur le contrôle double zone (fenêtre exclusivement rectangle pour ce travail) pourrait améliorer ses performances. Une fenêtre de Hanning permettrait par exemple de minimiser l'erreur dans la bright zone en concentrant l'énergie résultant du contrôle dans l'axe devant le trombone [SH18].

Le trombone n'agit cependant plus comme un monopôle autour de 500 Hz. Les sources secondaires deviennent également directives aux hautes fréquences. Il est ainsi pertinent de valider expérimentalement l'efficacité du contrôle de la directivité.

5.3 Expérience

Dans cette partie, la directivité de la source primaire est mesurée. La pression p_0 émise par la source primaire ainsi estimée est soumise à un contrôle de la directivité. Les différents types de contrôle présentés précédemment en Section 5.2 sont ainsi évalués expérimentalement. Le protocole expérimental est le même que celui présenté dans le Chapitre 4 pour le contrôle en puissance. L'efficacité du contrôle est évaluée puis l'influence de la position des sources dans l'axe est étudiée.

5.3.1 Directivité

Comme mentionné dans l'état de l'art en Section 2.1.4, le trombone est omnidirectionnel jusqu'à environ 500 Hz comme le montre la Figure 2.1.5 [Eyr13] et se comporte ainsi comme un monopôle.

En 2017, Kemp *et al.* estiment la directivité du trombone par une décomposition multimodale estimant le comportement de l'instrument rayonnant dans un cylindre [KLC17]. Les auteurs comparent ce modèle à des mesures du rayonnement d'un trombone effectuées dans une chambre anéchoïque. Le trombone agit comme une source d'ondes sphériques pour les basses fréquences, tandis que la directivité produit un faisceau diffractant à des fréquences plus élevées comme le montre la Figure C.1.1 en annexe A.

Ces résultats sont confrontés à une mesure de la directivité d'un trombone ténor en plastique pBone (présenté en Section 2.1.4) utilisé lors des différentes évaluations du contrôle de la directivité qui suivent.

5.3.1.1 Protocole expérimental

La pression rayonnée par un trombone est mesurée en 614 points répartis sur une sphère de rayon $r = 2$ m, $\Delta\phi = 10°$ et $\Delta\theta = 10°$ comme indiqué dans la Figure 4.4.1.

10 microphones $1/2$" (*B&K 4190* et *GRAS 40-AG*) sont positionnés sur une tige en quart de cercle. Le trombone est placé sur une table tournante pivotant tous les 10° sur 360°. La mesure est ainsi répétée 36 fois pour obtenir la rayonnement du trombone sur un hémisphère en fonction de la tension d'alimentation du haut-parleur u_0. Le dispositif expérimental installé dans une chambre anéchoïque est composé d'un trombone (pBone) connecté à un tuyau en plastique de 1 m excité par un haut-parleur à compression *Faital HF10AK*. Ce dernier est excité par un sinus glissant entre 30 Hz et 3 kHz pour exciter le registre de jeu du trombone.

5.3.1.2 Résultats

La fonction de directivité de la source primaire à plusieurs fréquences est calculée à partir de :

$$D(\theta, \phi) = \frac{|p(\theta, \phi)|}{|p_{\mathsf{max}}|}, \tag{5.40}$$

avec $|p(\theta, \phi)|$ le module de la pression pour chaque récepteur placé sur la sphère en fonction de θ et ϕ et $|p_{\mathsf{max}}|$ le module de la pression dans l'axe du pavillon à l'avant du trombone.

La pression rayonnée par le trombone est premièrement affichée par un diagramme de directivité sur la Figure 5.3.1. Le trombone a un comportement quasi-omnidirectionnel à 200 Hz avec un module de la pression légèrement supérieur à l'avant (du musicien vers le pavillon du trombone). Celui-ci devient directif à partir de 500 Hz. La Figure C.1.2 en annexe C.1 affiche plus précisément la directivité du

trombone entre 50 et 500 Hz. La directivité en-dessous de 100 Hz est alors perturbée par les modes de la salle anéchoïque. Le Tableau 5.3.1 indique l'écart de niveau maximal (différence entre le niveau le plus élevé et celui le moins élevé rayonné par l'instrument de musique) et l'angle d'ouverture à -6 dB pour plusieurs fréquences.

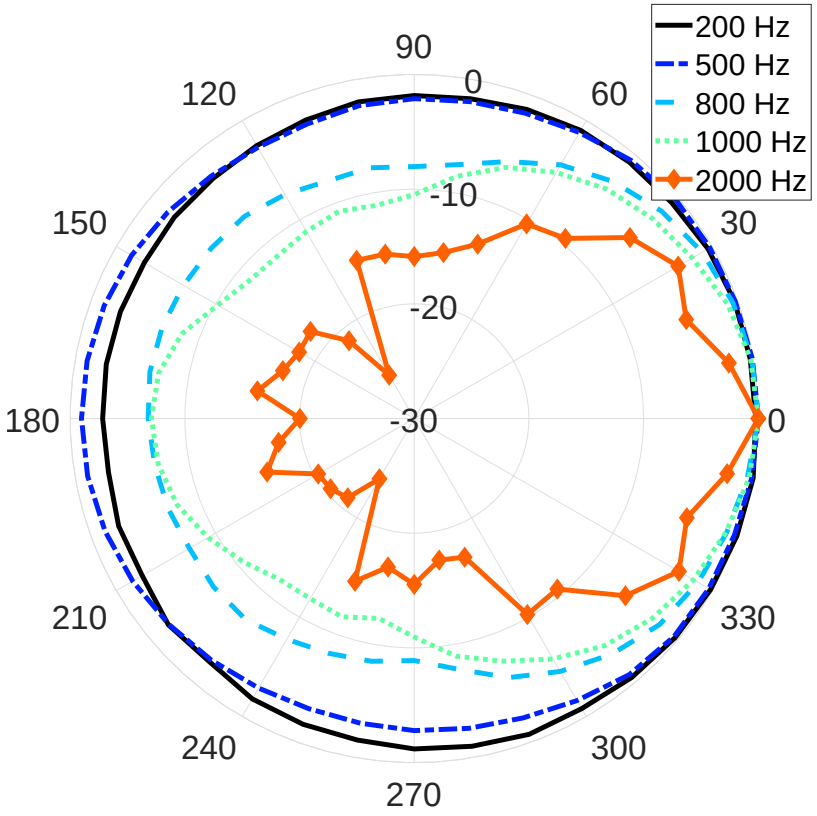


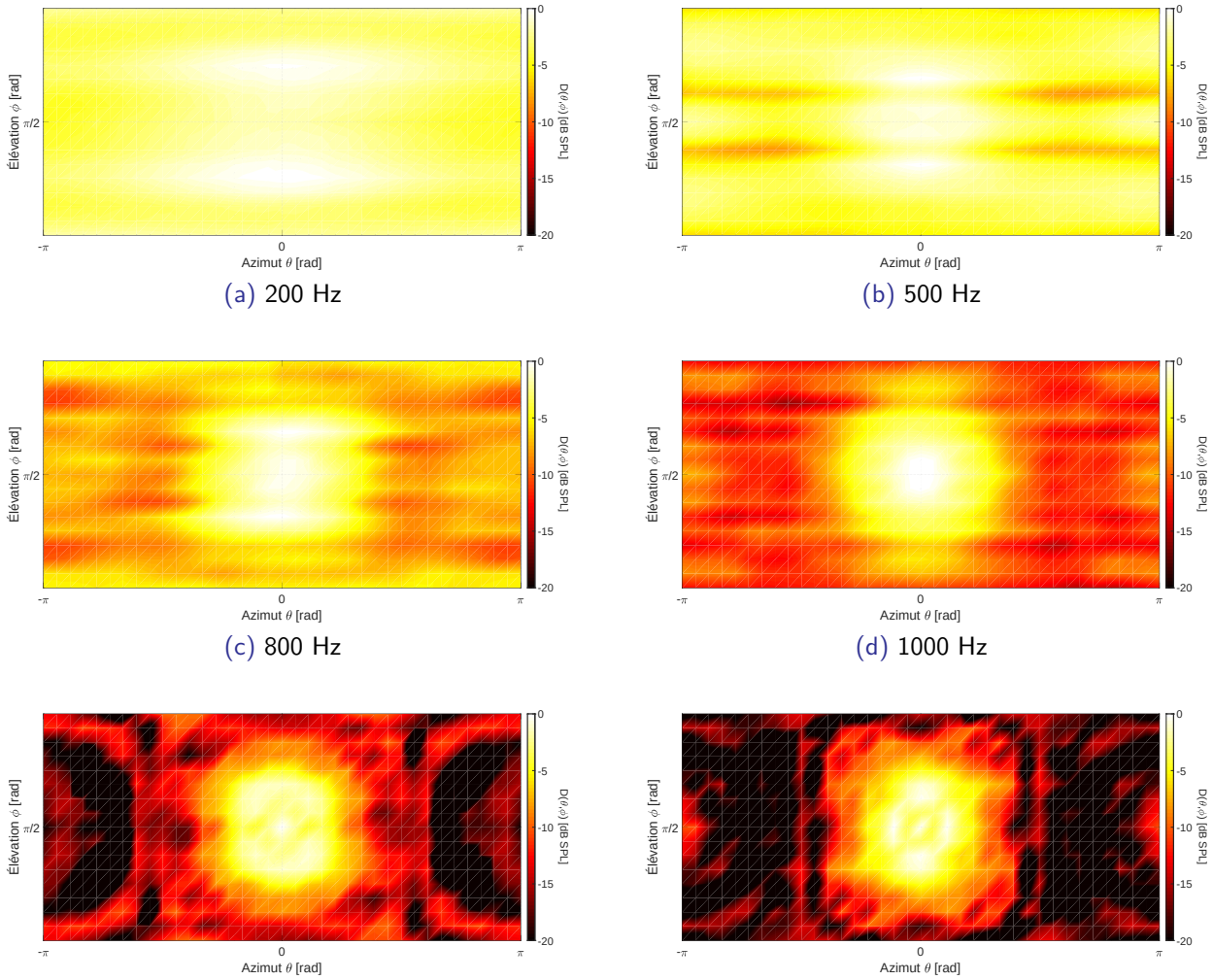
Figure 5.3.1 : Diagramme de directivité (en dB) du rayonnement du trombone à plusieurs fréquences pour des microphones placés à 2 m autour de la source.

Fréquence (Hz)	200	500	800	1000	2000	3000
Écart maximal (dB)	2	3	8	12	26	35
Angle d'ouverture à -6 dB (°)	NA	NA	70	70	40	40

Tableau 5.3.1 : Rayonnement du trombone : écart de niveau maximal (dB) et angle d'ouverture à -6 dB en fonction de la fréquence. L'acronyme NA correspond au terme "non applicable".

Cela confirme que l'instrument rayonne quasiment le même niveau sonore aux basses fréquences tandis que l'auditeur n'entend que peu les hautes-fréquences s'il est placé derrière le tromboniste. L'angle d'ouverture indique qu'il faut se placer à $\pm 40°$ devant le trombone pour avoir au maximum un écart de 6 dB par rapport au niveau émis dans l'axe du trombone.

Le module maximal se situe ainsi toujours devant le pavillon du trombone quelque soit la fréquence (Figure 5.3.2). Le comportement en azimuth et élévation n'est pas symétrique aux hautes-fréquences. L'hypothèse est que la coulisse ne présentant pas d'axe de symétrie de révolution crée de la diffraction à ces fréquences, ceci rendant légèrement asymétrique la directivité du trombone.



(a) 200 Hz (b) 500 Hz

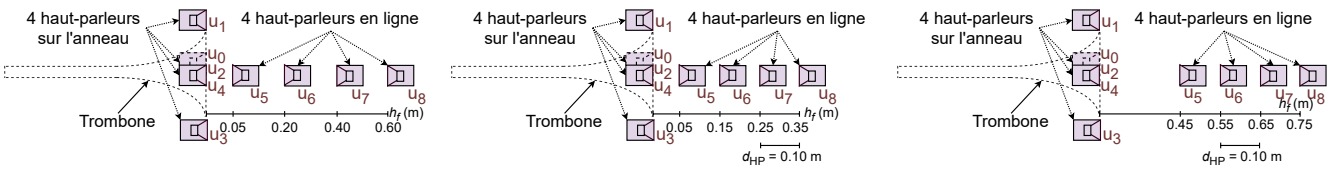
(c) 800 Hz (d) 1000 Hz

(e) 2000 Hz (f) 3000 Hz

Figure 5.3.2 : Fonction de directivité du trombone en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ à plusieurs fréquences pour des microphones placés sur une sphère ($r = 2$ m, $\Delta\phi = 10°$ et $\Delta\theta = 10°$). L'axe du pavillon du trombone se situe à $\theta = 0$ et $\phi = pi/2$.

5.3.2 Efficacité du contrôle

Dans cette partie, le contrôle de la directivité est évalué expérimentalement afin d'être confronté aux résultats théoriques avec le cas **2** présenté par la Section 5.2 pour 3 configurations différentes présentées à la Figure 5.3.3 et illustrées en Figure 5.3.5.



(a) Sources espacées (b) Sources proches (c) Sources éloignées

Figure 5.3.3 : Schéma des trois configurations expérimentales. 4 haut-parleurs sont systématiquement placés autour du trombone à $h_r = 0.16$ m et 4 sont placés en ligne à différentes distances.

Les pressions acoustiques sont mesurées en 614 points répartis sur une sphère de rayon $r = 1.94$ m avec un échantillonnage angulaire $\Delta\phi = 10°$ et $\Delta\theta = 10°$ comme indiqué dans la Figure 4.4.1. Le protocole expérimental pour évaluer l'efficacité du contrôle de la directivité reste le même que celui décrit en Section 4.4.1. L'objectif est d'estimer la tension $\boldsymbol{u_s}$ à appliquer aux haut-parleurs de contrôle pour imposer une pression cible.

La Figure 5.3.4 indique qu'il est nécessaire d'estimer le débit de la source primaire q_0 à partir de l'impédance de transfert théorique du trombone $\boldsymbol{g_0}$ et de la mesure des fonctions de transfert $\boldsymbol{h_0} = \frac{\boldsymbol{p_0}}{u_0}$ entre la tension aux bornes du haut-parleur excitant le trombone et la pression rayonnée au niveau des microphones. Le filtre F estime ainsi la tension $\boldsymbol{u_s}$ à appliquer aux haut-parleurs de contrôle connaissant le débit du trombone q_0 et les fonctions de transfert $\boldsymbol{h_0}$ et $\boldsymbol{H_s}$.

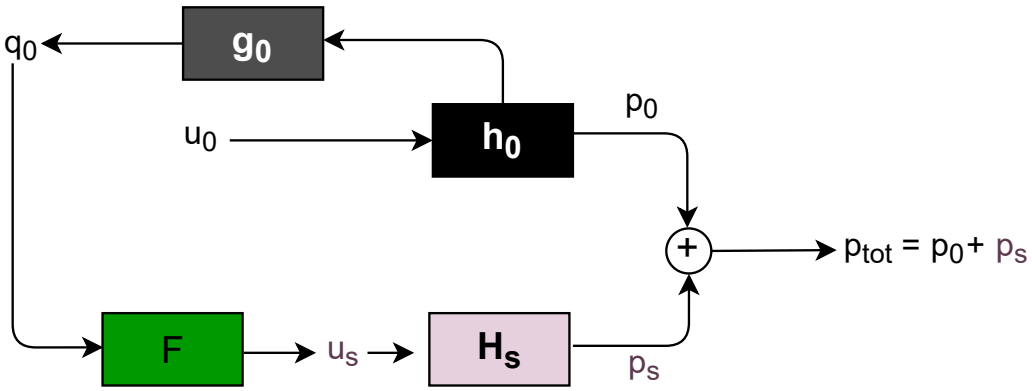


Figure 5.3.4 : Schéma bloc décrivant les différentes étapes pour effectuer le contrôle de la directivité.

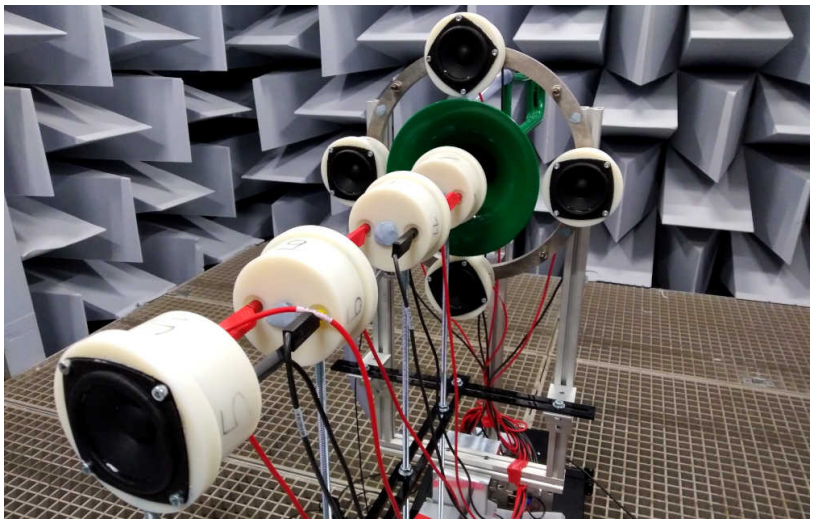
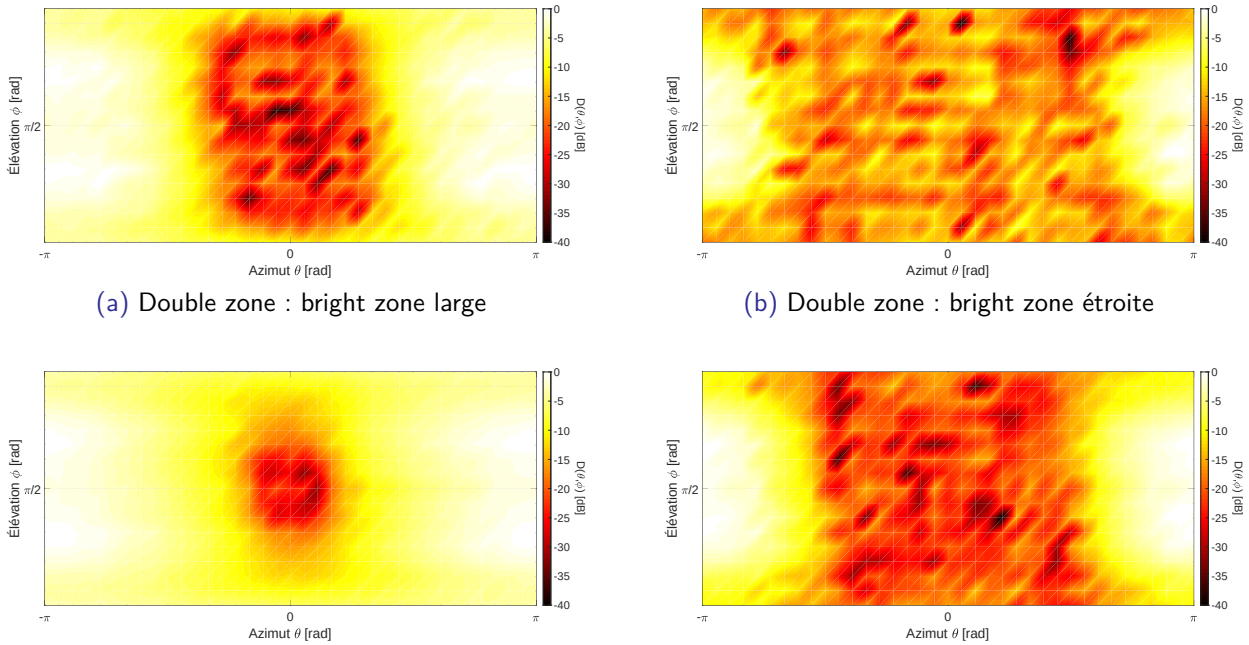


Figure 5.3.5 : Source primaire contrôlée par 4 haut-parleurs placés sur un anneau autour du pavillon et 4 haut-parleurs placés en ligne devant le trombone (cas (a)).

L'objectif est d'étudier l'efficacité expérimentale du contrôle de la directivité pour le montage de la Figure 5.3.3a. La Figure 5.3.6 indique la directivité résultant du contrôle pour les 4 méthodes de contrôle présentées en Section 5.2 (dont la pression cible est présentée à la Figure 5.2.8). Sauf indication contraire, le facteur de pondération correspond à $\kappa = 0.5$ et aucune régularisation n'est ajoutée pour toutes les figures qui suivent lors de cette étude.



(a) Double zone : bright zone large

(b) Double zone : bright zone étroite

(c) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$

(d) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$

Figure 5.3.6 : Fonction de directivité expérimentale après contrôle à 200 Hz en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour le cas **2** avec les 4 différents contrôles pour le cas (a).

Le champ de pression à 200 Hz représenté en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ résultant de chaque contrôle montre que la pression désirée est respectée mais le contraste ne dépasse pas 20 dB. Pour une fréquence plus élevée (1000 Hz sur la Figure C.2.6 en annexe C.2), la pression désirée ainsi que le contraste sont réduits et la pression dans l'axe du trombone est moins atténuée du fait de la pression plus élevée à cette fréquence pour un trombone (comme le montre la Figure 5.3.1). L'indicateur $\overline{e}$ est affiché sur la Figure 5.3.7 pour ce cas de contrôle. De la même manière que pour la Figure 4.4.4, un bruit aléatoire est systématiquement ajouté aux propagateurs théoriques $\boldsymbol{g_0}$ et $\boldsymbol{G_s}$ induisant un RSB de 37 dB à 100 Hz (RSB similaire à celui mesuré lors de l'expérience visant à estimer le contrôle en puissance en Section 4.4).

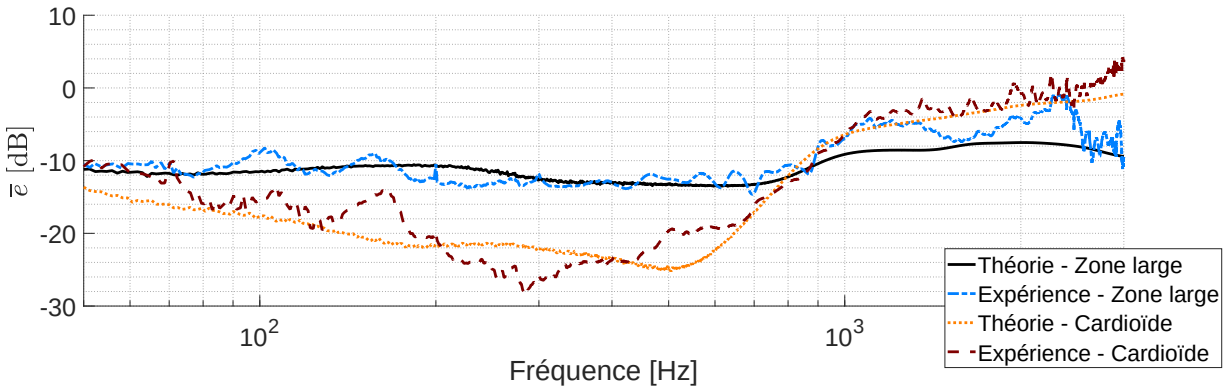


Figure 5.3.7 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ théorique et mesurée entre la pression cible et la pression résultant du contrôle pour le cas (a) lorsque la bright zone est large (ligne en tirets/pointillés) ou lorsque la pression cible est un cardioïde (ligne en tirets). Les courbes théoriques sont affichées avec un bruit aléatoire simulant un RSB de 37 dB à 100 Hz.

L'allure de l'erreur spatiale expérimentale $\overline{e}$ correspond à celle de la théorie quelque soit la méthode de

contrôle étudiée. Il est à noter que $\overline{e}$ ne descend pas en-dessous de -30 dB quelque soit le contrôle étudié.

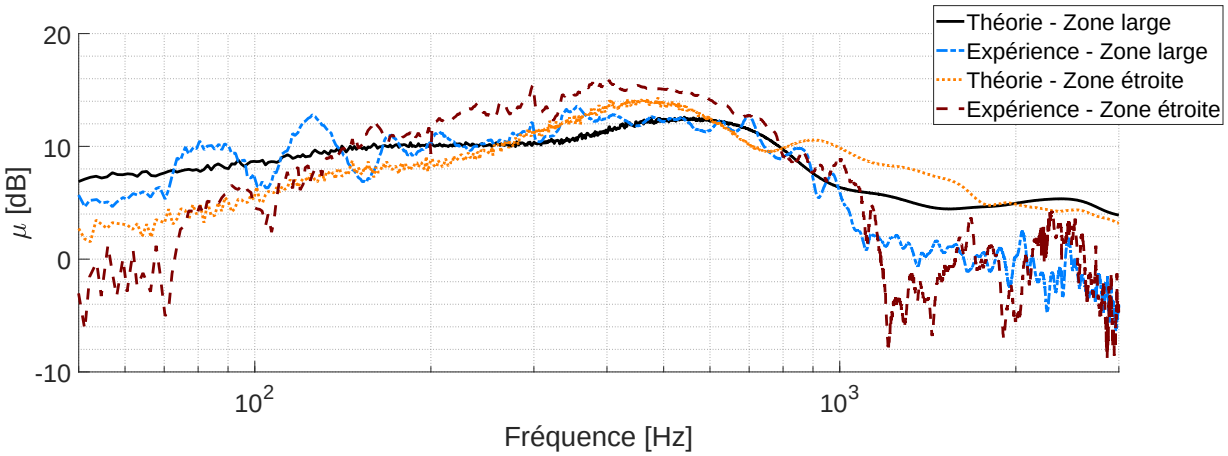


Figure 5.3.8 : Contraste acoustique μ lorsque la bright zone est large ou étroite pour le cas (a). Les courbes théoriques bruitées (lignes continues et en pointillés) sont comparées aux résultats expérimentaux (lignes en tirets/pointillés et en tirets).

L'indicateur μ est affiché sur la Figure 5.3.8. Le contraste acoustique expérimental μ correspond aux valeurs de la simulation entre 100 et 1000 Hz quelque soit la taille de la bright zone. L'écart s'accroit aux basses fréquences, ceci provenant du RSB plus faible dans la salle anéchoïque en dessous de 100 Hz. Un écart de 5 dB est présent lorsque la bright zone est large après 1000 Hz. Le trombone devient directif et le pavillon de l'instrument produit de la diffraction à ces fréquences. La réponse en fréquence du trombone mesurée est affichée par la Figure C.2.7 en annexe C.2. Les haut-parleurs de contrôle deviennent également directifs à ces fréquences comme le montre la Figure C.2.8 en annexe C.2. Le décalage après 1000 Hz entre théorie et expérience est causé par le comportement directif des sources qui n'est pas pris en compte dans le modèle théorique n'utilisant que des monopôles.

Comme démontré dans la Section 5.2.3, le facteur de pondération κ influe différemment sur le contrôle si la bright zone est large ou étroite. Les résultats expérimentaux (Figure C.2.9 en annexe C.2) confirment ce phénomène où réduire κ améliore le contraste acoustique lorsque la bright zone est large alors que celui-ci diminue lorsque la zone est étroite.

5.3.3 Influence de la position des sources dans l'axe

Une comparaison de l'efficacité du contrôle de la directivité est effectuée entre le cas (b) où les haut-parleurs de contrôle sont proches du pavillon du trombone et le cas (c) où ils sont éloignés de l'instrument. L'erreur spatiale moyenne normalisée $\overline{e}$ est affichée sur la Figure 5.3.9.

La minimisation de l'erreur spatiale $\overline{e}$ est plus importante lorsque les sources sont proches entre 200 et 3000 Hz, avec un écart de 12 dB à 1000 Hz entre les 2 cas. L'écart entre les modèles augmente à partir de 1000 Hz, cela étant dû aux sources au comportement directif croissant comme le montre les Figures C.2.7 et C.2.8 en annexe C.2. Cela se vérifie également sur le contraste μ affiché par la Figure 5.3.10.

Le contraste acoustique μ confirme que le contrôle est plus efficace lorsque les haut-parleurs de contrôle sont proches du trombone, avec un écart de 10 dB à 1000 Hz entre sources proches et éloignées. Le contraste est nul à partir de 800 Hz lorsque les sources sont éloignées.

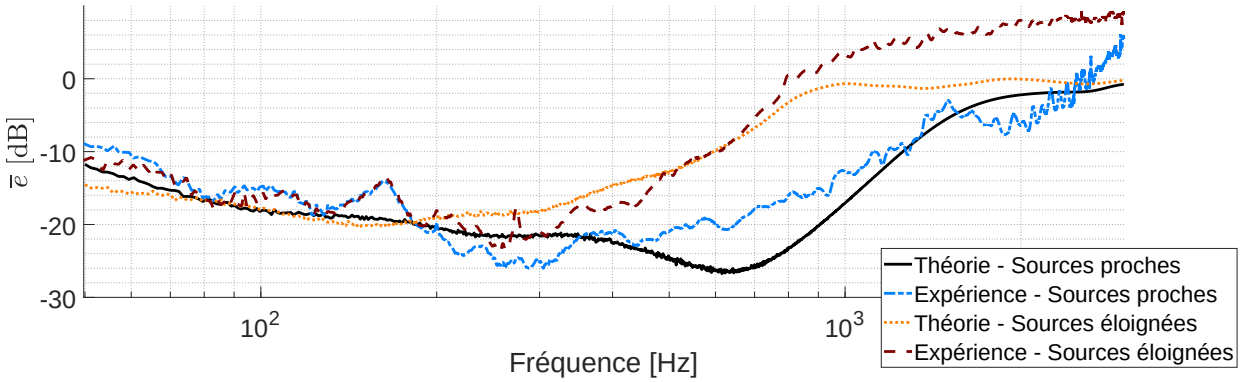


Figure 5.3.9 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression désirée et la pression résultant du contrôle ciblant un cardioïde entre les cas (b) et (c). Les courbes théoriques bruitées (lignes continues et en pointillés) sont comparées aux résultats expérimentaux (lignes en tirets/pointillés et en tirets).

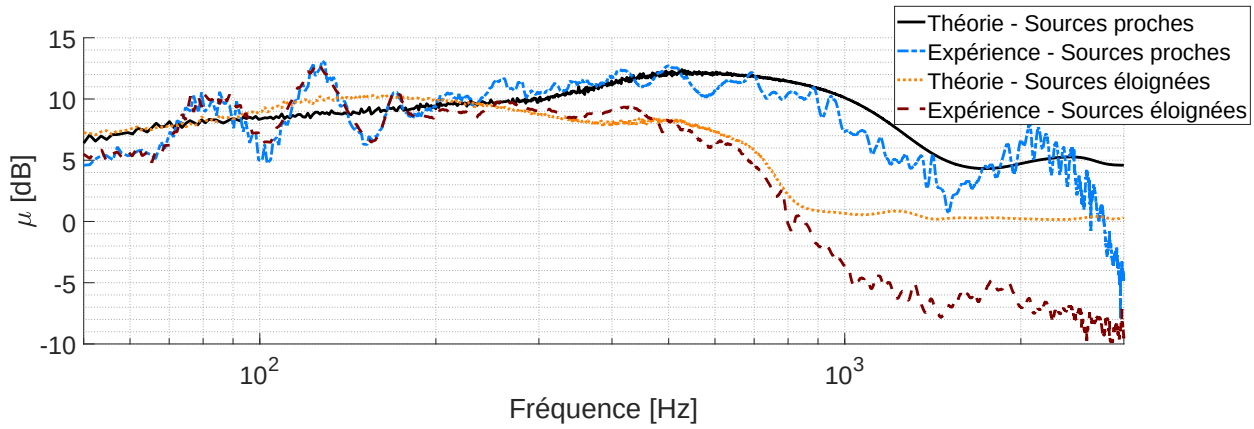


Figure 5.3.10 : Contraste acoustique μ pour un contrôle lorsque la bright zone est large entre le cas (b) et (c). Les courbes théoriques bruitées (lignes continues et en pointillés) sont comparées aux résultats expérimentaux (lignes en tirets/pointillés et en tirets).

Les résultats expérimentaux confirment ainsi le modèle théorique. L'effet d'une atténuation sous-estimée théoriquement (obtenu lors de l'étude du contrôle en puissance à la Figure 4.4.5) n'apparait pas lors d'un contrôle de la directivité, celui-ci étant masqué par la chute abrupte de l'efficacité du contrôle après 1000 Hz. L'impact du contrôle expérimental sur l'impédance d'entrée de l'instrument de musique devra être évalué afin de confirmer la théorie développée en Section 5.2.6. Rapprocher les haut-parleurs de contrôle du trombone améliore l'efficacité du contrôle mais augmente par la même occasion la puissance électrique nécessaire à imposer à chaque haut-parleur de contrôle. Il convient alors d'étudier la faisabilité technologique du contrôle.

5.4 Faisabilité technologique

L'objectif de cette section est d'évaluer la puissance ainsi que le déplacement nécessaire à appliquer à chaque haut-parleur (HP) en fonction de la méthode de contrôle avec et sans terme de régularisation. Le protocole permettant d'évaluer ces paramètres est présenté en Section 4.5. Le haut-parleur *Beyma 3FR30Nd* a une puissance nominale W_{nom} de 30 W et une excursion maximale x_{max} de 4.5 mm. Le haut-parleur *Hertz ML 700.3* a une puissance nominale W_{nom} de 50 W et une excursion maximale x_{max} de 1.1 mm.

Le Tableau 5.4.1 présente les résultats de chaque contrôle lorsque 4 haut-parleurs placés sur l'anneau (couche 1, HP 1 à 4, $h_r = 0.16$ m) sont des *Beyma 3FR30Nd* et que 4 haut-parleurs placés dans l'axe principal de propagation du rayonnement du trombone (couche 2, HP 5 à 8, $h_f = 0.5$ m puis $d_{\text{HP}} = 0.10$ m) sont des *Hertz ML 700.3*. Ce tableau indique la puissance nécessaire en fonction de la puissance nominale de chaque haut-parleur de contrôle ainsi que l'excursion maximale requise en fonction de l'excursion maximale de chaque haut-parleur pour contrôler la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz, cette note étant celle produisant le plus haut niveau sonore global par rapport aux autres notes mesurées).

Méthode	W_i/W_{nom}					$x_{s_{\text{max}}}/x_{\text{max}}$				
	HP 1 à 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8	HP 1 à 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8
Bright zone large	0.8	14.6	14.0	5.4	1.0	0.2	3.4	3.6	2.3	1.0
Bright zone étroite	0.5	4.6	7.7	6.1	0.4	0.1	1.6	2.7	2.4	0.6
Cardioïde ($A = \lvert p_0 \rvert$)	0.1	2.1	0.8	0.1	< 0.1	< 0.1	1.1	0.8	0.3	0.1
Cardioïde ($A = \lvert p_0 \rvert/10$)	< 0.1	2.4	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.9	0.2	0.1	< 0.1
Cardioïde directif	0.1	4.1	2.3	0.7	< 0.1	< 0.1	1.5	1.5	0.8	0.2

Tableau 5.4.1 : Puissance requise normalisée par la puissance nominale de chaque haut-parleur placés sur l'anneau (couche 1, HP 1 à 4, *Beyma 3FR30Nd*) et dans l'axe du trombone (couche 2, HP 5 à 8, *Hertz ML 700.3*) et excursion maximale requise $x_{s_{\text{max}}}$ en fonction de l'excursion maximale de chaque haut-parleur lorsque la note $Si_\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) est jouée en fonction de la pression cible (lorsque la target est un cardioïde : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ puis $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$). 4 haut-parleurs sont placés à $h_r = 0.16$ m et 4 autres sont placés en ligne à $h_f = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35$ m.

La puissance nécessaire à appliquer aux haut-parleurs 1 à 4 placés à $h_r = 0.16$ m n'est jamais dépassée, celle-ci étant répartie entre les 4 haut-parleurs placés sur l'anneau. Il est important de rappeler que des effets non-linéaires peuvent apparaître même si la puissance nominale du haut-parleur n'est pas atteinte. La puissance requise pour le haut-parleur 5 placé à $h_f = 0.05$ m dépasse sa puissance nominale quelque soit le contrôle étudié. La puissance maximale des autres sources secondaires n'est pas dépassée seulement lorsque le contrôle cible un cardioïde. Il est intéressant de noter que produire un cardioïde dont l'amplitude correspond à $A = |p_0|/10$ nécessite une puissance importante seulement pour le haut-parleur le plus proche du trombone. Ce comportement est similaire pour un contrôle en puissance (comme le montre le Tableau 4.5.2).

Il est intéressant de noter qu'une bright zone étroite nécessite une puissance inférieure au cas où la bright zone est large. Cela est à relativiser avec les résultats du contrôle affichés par la Figure 5.3.8 où le contrôle imposant une bright zone étroite propose un contraste acoustique moins important que lorsque la bright zone est large. Il faut également noter qu'aucun de ces contrôles n'est possible sans régularisation. Il est d'ailleurs montré par la suite que le contrôle imposant une bright zone étroite nécessite une puissance supérieure au contrôle imposant une bright zone large dès qu'un paramètre de régularisation est mis en place.

Le déplacement maximal de chaque haut-parleur n'est jamais dépassé pour les haut-parleurs placés à $h_r = 0.16$ m quelque soit la méthode de contrôle étudiée (0.8 mm au maximum pour la bright zone large). Celui-ci est dépassé pour les haut-parleurs 5 et 6 quelque soit le contrôle mis en place (sauf cardioïde et cardioïde atténuée).

Le contrôle impose une puissance et un déplacement importants pour les haut-parleurs placés en ligne devant le pavillon du trombone. Éloigner le haut-parleur 5 de la source primaire permet de réduire la puissance et le déplacement nécessaire mais le contrôle n'est alors efficace que dans une bande fréquentielle réduite (moins efficace vers les hautes fréquences). Il est possible d'ajouter un terme de régularisation β afin de limiter l'effort imposé aux haut-parleurs, ceci ayant pour effet de réduire l'efficacité du contrôle comme illustré avec les Figures C.2.4, 5.2.20 et 5.2.21. Augmenter la valeur de β réduit progressivement le contraste acoustique aux basses fréquences. Cela altère la minimisation de l'erreur spatiale $\bar{e}$ de la même manière. Il est choisi de réitérer l'expérience de faisabilité ci-dessus en imposant un terme de régularisation correspondant à $\beta = 10^{-1}$. Les résultats sont affichés dans le Tableau 5.4.2.

Méthode	W_i/W_{nom}					$x_{s_{\text{max}}}/x_{\text{max}}$				
	HP 1 à 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8	HP 1 à 4	HP 5	HP 6	HP 7	HP 8
Bright zone large	0.1	0.9	0.2	0.1	< 0.1	< 0.1	0.5	0.4	0.3	0.1
Bright zone étroite	< 0.1	1.5	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.6	0.2	0.1	0.1
Cardioïde ($A = \lvert p_0 \rvert$)	< 0.1	0.8	0.2	0.1	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4	0.3	0.1
Cardioïde ($A = \lvert p_0 \rvert/10$)	< 0.1	1.8	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.6	0.1	< 0.1	< 0.1
Cardioïde directif	< 0.1	1.4	0.2	0.1	< 0.1	< 0.1	0.6	0.3	0.2	0.2

Tableau 5.4.2 : Puissance requise avec un terme de régularisation $\beta = 10^{-1}$ en fonction de la puissance nominale et excursion maximale requise $x_{s_{\text{max}}}$ normalisée par l'excursion maximale de chaque haut-parleur lorsque la note $Si\flat 4$ ($f_0 = 466$ Hz) est jouée en fonction de la pression cible (lorsque la target est un cardioïde : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$, cardioïde atténuée $\mathscr{D}(\theta)/10$ ou directif $\mathscr{D}(\theta)^4$). 4 haut-parleurs sont placés à $h_r = 0.16$ m et 4 autres sont placés en ligne à $h_f = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35$ m.

La puissance requise est réduite pour tous les haut-parleurs. Celle-ci est inférieure à la puissance nominale du haut-parleur 5 lorsqu'une bright zone large ou un cardioïde est imposé. Le déplacement nécessaire pour chaque contrôle est inférieur à l'excursion maximale des haut-parleurs. Le contrôle de la directivité est alors faisable mais l'efficacité du contrôle est réduite aux basses fréquences. La puissance imposée au haut-parleur 5 reste supérieure à sa puissance nominale pour les contrôles davantage exigeants.

Un contrôle de la directivité est donc réalisable en plaçant plusieurs couches et différents modèles de haut-parleurs en fonction de la puissance nécessaire et de la bande de fréquence de contrôle. Un terme de régularisation constant est imposé pour ne pas dépasser la puissance nominale des haut-parleurs ni leur excursion maximale. Un contrôle imposant un cardioïde ou une bright zone large est ainsi technologiquement faisable pour le système étudié dans ce chapitre. L'efficacité du contrôle est réduite aux basses fréquences à mesure que le terme de régularisation β augmente. Ce dernier pourrait varier avec la fréquence afin de produire un contrôle dont la régularisation est optimale [NY99].

5.5 Conclusion

Un contrôle de la directivité dont le système est placé à l'extérieur du trombone est faisable. Deux modèles théoriques sont développés et permettent d'appliquer un contrôle soit par double zone, soit par directivité cible. Le premier a pour objectif de créer une zone où l'on entend la source primaire et une autre zone où la pression est nulle. La zone étant définie par une sphère de microphones placés à 2 m de la source primaire, il est également possible d'imposer une directivité telle qu'un cardioïde dont l'énergie est dirigée vers le musicien. Cette dernière méthode a comme avantage d'imposer une pression dont le module varie progressivement avec l'angle sur la sphère.

Le contraste acoustique atteint 12 dB (similaire au contraste obtenu pour un cas classique de sound zones [CJ12]) entre 100 et 1500 Hz pour le meilleur cas d'étude avec une ligne de 4 haut-parleurs devant le pavillon dont la source la plus proche est à $h = 0.05$ m. La minimisation de l'erreur spatiale est alors de -20 dB entre 100 et 1000 Hz lorsque la pression cible est un cardioïde.

La méthode produisant une directivité cible requiert une puissance électrique plus faible en entrée des haut-parleurs de contrôle par rapport à un contrôle par double zone. Il apparait en outre que la source secondaire la plus proche du trombone doit produire l'effort le plus important. Le contrôle est par ailleurs plus efficace en plus hautes fréquences lorsque les sources secondaires sont plus proches de la source primaire (contraste acoustique et minimisation de l'erreur spatiale améliorés).

L'atténuation en puissance provoquée par le contrôle de la directivité est presque négligeable du fait que le module de la pression de la source primaire n'est pas atténué en certains points sur la sphère de récepteurs. Il est néanmoins possible de réduire la puissance de la source primaire en imposant par exemple un cardioïde dont le module correspond à la pression rayonnée par la source primaire pondérée par une valeur inférieure à 1.

Un contrôle par double zone a une influence importante sur l'impédance d'entrée de l'instrument par rapport à un contrôle en puissance. Il apparait que l'amplitude et la fréquence des cinq premiers pics de l'impédance d'entrée sont modifiés. Le module est fortement réduit pour les 3 premiers pics lorsque la pression cible est un contrôle par double zone, cela ayant pour impact de rendre le trombone plus difficile à jouer. La fréquence du premier pic est modifiée environ d'un demi-ton lorsqu'une bright zone est imposée au système étudié dans ce chapitre. Un contrôle dont la pression cible est de type cardioïde ne modifie cependant que peu le module et la fréquence des 10 premiers pics de l'impédance d'entrée.

Les résultats expérimentaux confirment les résultats théoriques entre 100 et 1500 Hz. L'ajout d'un facteur de pondération permet de favoriser la minimisation de l'erreur spatiale dans la bright zone ou le contraste acoustique entre les deux zones. Une étude de la faisabilité technologique du contrôle montre alors qu'un contrôle de la directivité nécessite un effort supérieur par rapport à un contrôle en puissance. Celui-ci n'est pas faisable sans ajout de régularisation pour le système étudié dans ce chapitre. Ajouter un terme de régularisation réduit le conditionnement de l'inversion matricielle estimant les tensions optimales. Cela impacte néanmoins l'efficacité du contrôle des basses vers les hautes fréquences à mesure que le terme de régularisation augmente. Un exemple de contrôle imposant un cardioïde ou une bright zone large est alors faisable dans le cas où $\beta = 10^{-1}$.

Ce contrôle externe ne permet encore une fois de contrôler que les harmoniques basse fréquence produites par le trombone. Une nouvelle méthode améliorant l'efficacité du contrôle après 1500 Hz doit être développée pour contrôler l'ensemble du régime de notes jouées par un trombone. Un contrôle en temps réel pourrait en outre être mis en place afin d'évaluer le contrôle dans une situation de jeu réelle.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

Le but de ce travail de thèse était d'étudier la possibilité de contrôler la puissance acoustique et la directivité d'un trombone sans modifier son impédance d'entrée pour ne pas perturber le jeu du musicien. Sachant que les sourdines existantes, insérées dans le pavillon, permettent de diminuer le niveau sonore mais modifient généralement le timbre et provoquent un décalage des pics de l'impédance d'entrée de l'instrument, un dispositif de contrôle actif externe a été considéré. Cette étude a par ailleurs été motivée par le fait que le trombone émet un fort niveau sonore et que peu de méthodes de contrôle du rayonnement des instruments de musique ont été développées.

Dans un premier temps, la source à contrôler (le trombone) a été caractérisée expérimentalement. D'une part, le débit acoustique produit en situation de jeu réel a été estimé à l'aide de mesures en salle anéchoïque pour connaître les débits à produire par les sources secondaires. D'autre part, sachant que les haut-parleurs de contrôle doivent être positionnés au plus près de la source primaire pour obtenir un contrôle efficace sur une large bande de fréquences, la position du centre acoustique de la source équivalente au trombone a été évaluée.

Le débit acoustique maximal estimé est de l'ordre de 0.5 litre/s. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus indiquent que la position du monopôle équivalent évolue avec la fréquence et se situe à priori entre 10 cm à l'intérieur du pavillon jusqu'à 2 cm devant le pavillon. La précision de la mesure de la position du centre acoustique en salle anéchoïque reste cependant limitée et dépend des réflexions dans la salle, du bruit de fond et de la position des microphones utilisés pour l'estimation.

Les résultats montrent qu'un contrôle actif externe permet d'atténuer, de manière décroissante quand la fréquence augmente (ce qui modifie le timbre), la puissance du trombone jusqu'à 2000 Hz pour la meilleure configuration avec une source secondaire proche de la sortie du pavillon. Cette source modifie à priori le champ de pression de l'instrument de telle sorte qu'il est possible d'obtenir une atténuation en puissance supérieure à celle prédite par le modèle théorique considérant des sources ponctuelles. Les positions des centres acoustiques des sources primaire et secondaire pourraient varier en raison du positionnement de la source secondaire devant le pavillon, ce qui rapprocherait les sources équivalentes et aurait pour conséquence d'augmenter l'efficacité du contrôle dans les hautes fréquences. Cette hypothèse reste cependant à vérifier.

Placer plusieurs couches d'actionneurs (par exemple 8 haut-parleurs sur un anneau et une source plus proche du pavillon de l'instrument) permet d'étendre la bande fréquentielle du contrôle en puissance. L'impédance d'entrée et donc la jouabilité de l'instrument est très légèrement affectée par ce type de contrôle. La puissance électrique à appliquer en entrée des haut-parleurs de contrôle est le facteur limitant du contrôle en puissance (et non l'excursion maximale du haut-parleur). Un contrôle est alors faisable

sans régularisation si les sources secondaires sont seulement placées sur un anneau autour du trombone. Ajouter un haut-parleur de contrôle devant le pavillon du trombone améliore l'efficacité du contrôle mais ce dernier doit fournir la majorité de l'énergie acoustique nécessaire au contrôle actif d'autant plus s'il est proche. Il faut alors redimensionner le haut-parleur ou ajouter un paramètre de régularisation à la fonction coût.

Deux méthodes ont permis d'effectuer un contrôle de la directivité du trombone. Une première méthode permet de créer une zone où l'on entend la source primaire (bright zone) alors que la pression est minimisée dans une autre zone (dark zone). Cette technique est appelée contrôle par "double zone". Une seconde méthode permet d'imposer une directivité cible (par exemple cardioïde) dont l'énergie est dirigée vers le musicien. Le contraste acoustique atteint 12 dB entre 100 et 1500 Hz pour un contrôle de la directivité par double zone avec 4 sources secondaires placées sur un anneau et 4 autres placées devant le pavillon. La minimisation de l'erreur spatiale $\overline{e}$ est de -10 dB entre 100 et 1000 Hz pour un contrôle par double zone et de -20 dB pour un contrôle par directivité cible. Le contraste acoustique μ et la minimisation de l'erreur spatiale sont améliorés dès que les sources secondaires sont plus proches de la source primaire.

Ces deux méthodes imposent cependant aux sources secondaires un effort supérieur à celui demandé pour un contrôle de la puissance et l'impact sur l'impédance d'entrée est également accru. Un contrôle par double zone a une influence importante sur l'impédance d'entrée de l'instrument, cela ayant pour impact de rendre le trombone plus difficile à jouer. La fréquence du premier pic est modifiée environ d'un demi-ton lorsqu'une bright zone est imposée au système étudié. Ce n'est pas le cas du contrôle par directivité cible qui ne modifie que très peu le module et la fréquence des 10 premiers pics de résonance de l'impédance d'entrée. Il est possible de réduire la puissance de la source primaire tout en imposant une directivité cible mais cela augmente légèrement l'effort à fournir aux haut-parleurs de contrôle. La méthode par directivité cible impose en outre une puissance électrique plus faible en entrée des haut-parleurs de contrôle par rapport à la méthode par double zone. Ajouter un terme de régularisation réduit le conditionnement de l'inversion matricielle estimant les tensions optimales et rend le contrôle de la directivité du trombone possible. Cela réduit néanmoins l'efficacité de celui-ci des basses vers les hautes fréquences à mesure que le terme de régularisation augmente et change donc le timbre par rapport à un contrôle sans régularisation. Les résultats de chaque contrôle sont synthétisés par le Tableau 6.0.1 afin de comparer la puissance requise à imposer aux haut-parleurs de contrôle et l'impact sur l'impédance d'entrée du trombone.

Contrôle	de la puissance	de la directivité	
		par double zone	par directivité cible
Efficacité	Atténuation de 30 dB à 200 Hz jusqu'à 6 dB à 2000 Hz si source proche du pavillon	$\overline{e} = -10$ dB entre 100 et 1000 Hz et $\mu = 12$ dB entre 100 et 1500 Hz si 4 HP devant le pavillon	$\overline{e} = -20$ dB entre 100 et 1000 Hz si 4 HP devant le pavillon
Impact sur Z_e	Faible : $+1$ dB et moins de 5 cents sur les 5 premiers pics	Important : -8.5 dB sur le pic n°2 et décalage de 92 cents	Faible : -1.7 dB et moins de 5 cents sur les 10 premiers pics
Puissance électrique imposée [W]	$< W_{\text{nom}}$ sans régularisation si HP adapté à chaque couche	$> W_{\text{nom}}$ sans régularisation	Légèrement inférieure au contrôle par double zone

Tableau 6.0.1 : Synthèse de chaque méthode de contrôle du rayonnement du trombone étudié lors de cette thèse (l'acronyme "HP" signifie haut-parleur).

Le contrôle actif développé lors de cette thèse ne permet de contrôler que les harmoniques basse fréquence produits par le trombone. Une nouvelle méthode améliorant l'efficacité du contrôle après 2000 Hz doit être développée pour contrôler l'ensemble du régime de notes du trombone. La combinaison d'un système de contrôle actif/passif permettrait par exemple d'aboutir à un contrôle large bande. Un contrôle interne à l'instrument peut en outre être étudié pour atteindre cet objectif.

Une étude numérique permettrait d'évaluer l'impact du haut-parleur de contrôle situé à proximité du pavillon (distance au pavillon, diamètre) sur l'impédance d'entrée du trombone. Le centre acoustique équivalent au trombone est un concept simple mais doit être étudié plus en profondeur. Le débit produit par l'instrument et la position du centre acoustique équivalent pourraient être étudiés par des approches numérique (par exemple par une approche multimodale) et expérimentale (salle anéchoïque de grande taille, triangulation, ...) plus poussées que celles abordées dans ce travail.

Enfin, un contrôle en temps réel pourrait être mis en œuvre afin d'appliquer les différentes méthodes développées durant cette thèse à un cas réaliste. Les filtres optimaux estimés à partir des mesures pourraient dans un premier temps être appliqués aux différents prototypes étudiés afin de mesurer l'atténuation engendrée expérimentalement et la comparer à l'atténuation évaluée dans ce travail. L'implémentation d'un contrôleur permettrait ensuite d'effectuer le contrôle en temps réel lorsque l'instrument est joué par une bouche artificielle. Le dernier objectif serait de confronter le contrôle en temps réel au jeu d'un musicien ce qui nécessiterait d'adapter le contrôleur à la variation temporelle de la fréquence fondamentale.

Annexe A

Caractérisation de la source primaire

A.1 Centre acoustique

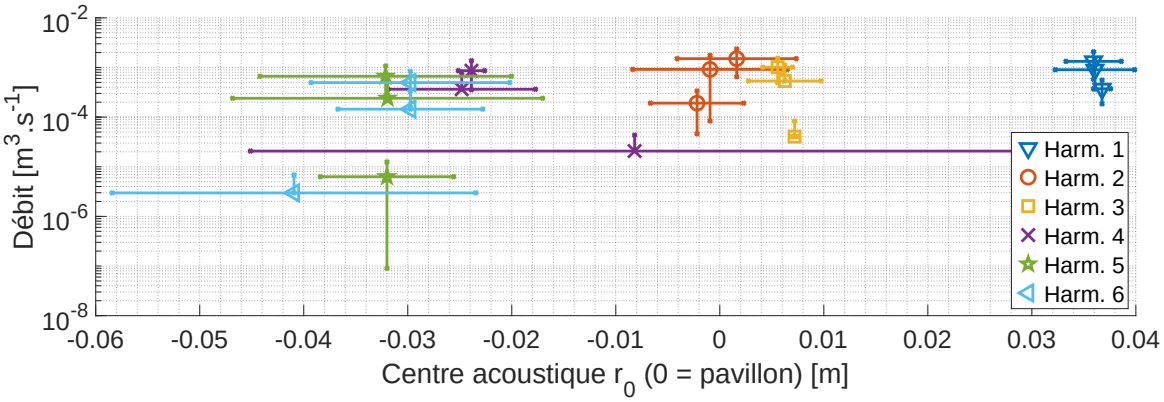


Figure A.1.1 : Débit du trombone q_0 en fonction du centre acoustique r_0 pour les 6 premiers harmoniques de la note $Si_\flat 2$ ($f = 233$ Hz) et pour trois niveaux d'entrée différents (piano, mezzo forte et forte). L'incertitude représentée correspond à deux fois l'écart-type de l'estimation.

A.2 Impédance d'entrée

L'objectif de cette section est d'estimer théoriquement et expérimentalement l'impédance d'entrée du trombone. Cela permettra d'estimer l'influence du contrôle actif sur l'impédance d'entrée de l'instrument. L'impédance d'entrée de l'instrument est modélisée et mesurée depuis longtemps. Celle-ci est néanmoins estimée pour un montage expérimental particulier utilisé lors de ce travail de thèse où un haut-parleur à compression excite un tuyau en plastique relié à un trombone ténor. L'objectif est simplement d'estimer un modèle assez réaliste pour comprendre l'impact du contrôle.

L'impédance d'entrée du trombone est étudiée depuis le siècle dernier. Caussé *et al.* proposent en 1984 de mesurer et modéliser l'impédance d'entrée d'instruments de type cuivre de différentes manières [CKL84]. Un capteur d'impédance permet de maintenir un débit constant en entrée de l'instrument. Il est ainsi possible d'estimer l'impédance d'entrée du trombone avec la mesure de la pression en entrée. Les résultats sont comparés au modèle théorique (présenté en Section A.2.2) se basant sur la théorie des lignes de transmission pour décrire le transfert dans un tube cylindrique et dans un tube de forme exponentielle. Une succession de tubes permet de reconstruire la géométrie de l'instrument de manière simplifiée avec une propagation d'ondes planes.

La perce étudiée dans ce travail de thèse est d'abord décrite. Le modèle théorique est ensuite rappelé [CKL84] et une mesure de l'impédance d'entrée est enfin présentée.

A.2.1 Perce étudiée

Une mesure de la perce du trombone est nécessaire avant de pouvoir estimer son impédance d'entrée. Comme il est nécessaire d'automatiser le protocole expérimental présenté précédemment en Section 5.3.1, un haut-parleur excite un tuyau en plastique d'un mètre relié au corps du trombone remplaçant ainsi le couple musicien/trombone. Cela permet en outre de contrôler l'excitation du trombone. La perce étudiée se rapproche de celle du trombone en commençant par un tuyau cylindrique de diamètre constant pour s'évaser tardivement au niveau du pavillon (Figure A.2.2, [Pyl91 ; CGM20]).

A.2.2 Modèle

L'impédance d'entrée de l'instrument se définit par :

$$Z_e = \frac{p_e}{q_e}, \tag{A.1}$$

avec p_e la pression en entrée du trombone et q_e le débit en entrée du trombone.

L'impédance de rayonnement doit premièrement être décrite. Le montage se composant d'un pavillon rayonnant en espace infini, l'impédance de rayonnement d'une calotte sphérique peut s'écrire [CK16] :

$$Z_r = Z_c[\alpha(ka)^2 + j\beta(ka)], \tag{A.2}$$

avec $Z_c = \frac{\rho c}{S}$, où $S = \pi a^2$ avec a le rayon du pavillon. $\alpha = 1/4$ dans le cas d'un rayonnement en espace infini et $\beta = 0.6133$ [CKL84]. Dans le cas du rayonnement en espace infini, l'impédance de rayonnement d'une calotte sphérique s'écrit donc :

$$Z_r = Z_0 + j\omega\frac{\rho\Delta\ell}{S}, \tag{A.3}$$

avec $Z_0 = \frac{\rho c k^2}{4\pi}$ et $\Delta\ell = \beta a$.

Ayant l'expression analytique de l'impédance de rayonnement Z_r, il est possible de remonter à l'impédance d'entrée Z_e à l'aide de matrices de transfert. Un modèle composé exclusivement d'une série de tuyaux cylindriques (Figure A.2.1) est simulé afin de déduire l'impédance d'entrée de l'instrument.

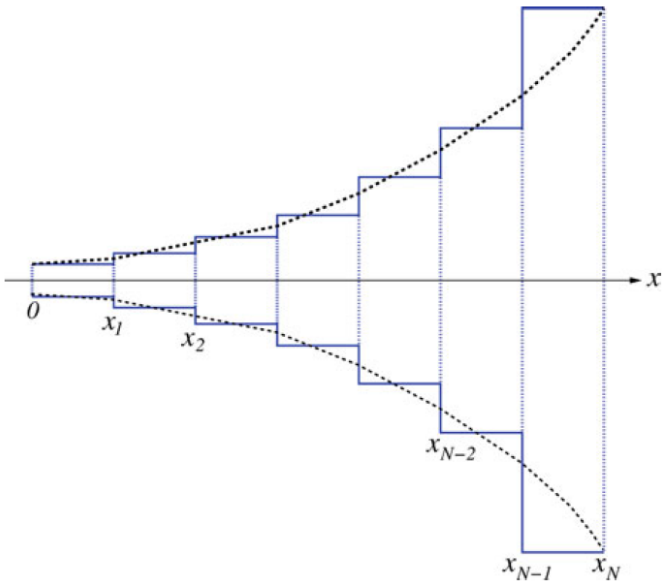


Figure A.2.1 : Exemple d'approximation d'un pavillon par des sections de tuyaux cylindriques [CGM20].

Pour le montage du trombone étudié lors de ce travail de thèse, les dimensions ont été mesurées tous les centimètres avec un pied à coulisse. Le diamètre intérieur est de 0.9 cm de l'embouchure jusqu'à environ 1.1 m dans le tube. Le diamètre évolue ensuite de façon exponentielle pour atteindre un diamètre d'environ 21 cm au niveau du pavillon du trombone (Figure A.2.2).

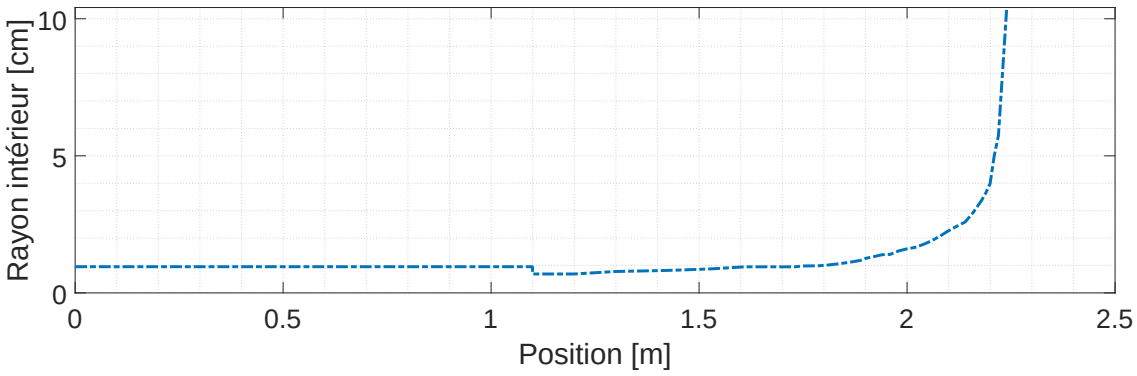


Figure A.2.2 : Mesure de la perce du trombone relié à un tuyau. Rayon intérieur en fonction de la longueur du trombone.

La propagation dans chaque tube cylindrique est décrite par la matrice de transfert suivante :

$$\begin{pmatrix} p_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kL & jZ_c \sin kL \\ jZ_c^{-1} \sin kL & \cos kL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_s \\ q_s \end{pmatrix}, \tag{A.4}$$

avec p_s et q_s respectivement la pression et le débit de sortie du tronçon cylindrique. Des pertes visco-thermiques sont prises en compte dans ce modèle avec le nombre d'ondes complexe $k = \frac{\omega}{c} + (1-j)\alpha$ où $\alpha = 3.10^{-5} \dfrac{\sqrt{f}}{r_{\text{tube}}}$ avec r_{tube} le rayon du tube [Dub+99].

A.2.3 Mesure

La Figure A.2.3 montre le schéma du principe du capteur d'impédance utilisé pour mesurer l'impédance d'entrée d'un guide d'onde. Celui-ci est composé d'une cavité arrière avec une pression p_{0_r} menant à un résonateur dont la pression devant le capteur d'impédance est p_{0_f}.

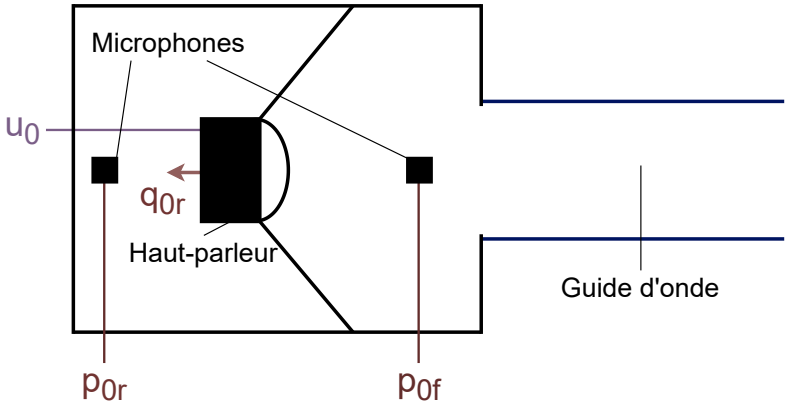


Figure A.2.3 : Schéma du montage utilisé pour la mesure de l'impédance d'entrée des différents guides d'ondes. Un capteur placé dans une cavité close et relié à l'entrée du guide d'onde permet de définir une pression p_{0_f} devant le haut-parleur et p_{0_r} derrière celui-ci.

L'impédance d'entrée du résonateur est estimée à partir des mesures de $H_{0_f} = \frac{p_{0_f}}{u_0}$ et $H_{0_r} = \frac{p_{0_r}}{u_0}$ (respectivement la réponse en pression du capteur avant et arrière) par :

$$Z_e = \frac{p_{0_f}}{q_{0_r}} = \frac{H_{0_f}}{H_{q_{0_r}}}, \tag{A.5}$$

avec $H_{q_{0_r}} = \frac{q_{0_r}}{u_0}$ la réponse en débit de la partie arrière de la source primaire. À partir de l'étalonnage du capteur d'impédance, il est possible de déterminer la relation entre $H_{q_{0_r}}$ et H_{0_r} par $H_{q_{0_r}} = f(H_{0_r})$. L'impédance d'entrée s'écrit donc :

$$Z_e = \frac{H_{0_f}}{f(H_{0_r})}. \tag{A.6}$$

La fonction $f(H_{0_r})$ est donnée par le système de mesure de l'impédance d'entrée qui est détaillée dans [Dal01a ; Dal01b].

A.2.4 Comparaison

L'impédance d'entrée théorique est confronté à celle mesurée sur la Figure A.2.4. L'amplitude et la fréquence des pics de l'impédance d'entrée sont globalement similaires avec un écart maximal d'amplitude de 10 dB pour le premier pic Z_e et un écart maximal fréquentiel de 90 cents pour le second pic. La fréquence de résonance du premier pic de l'impédance d'entrée se situe à environ 40 Hz. Cette géométrie particulière qui diffère d'un trombone classique se traduit notamment par l'écart de 100 Hz entre les deux premiers pics contre environ 70 Hz pour un trombone ténor classique.

Un modèle simple n'utilisant que des tuyaux cylindriques permet ainsi d'obtenir une première approximation de l'impédance d'entrée. La fréquence du premier pic de l'impédance d'entrée se situe alors à 40 Hz contre 38 Hz sans tuyau additionnel. Un modèle composé de matrices de transfert de cônes et de pavillons exponentiels [Dal11] permet d'affiner le modèle mais il n'y pas pas de différence sur les 5 premiers pics de l'impédance d'entrée. Une nouvelle modélisation de l'impédance de rayonnement Z_r du pavillon et une mesure plus précise de la géométrie interne affinerait le modèle.

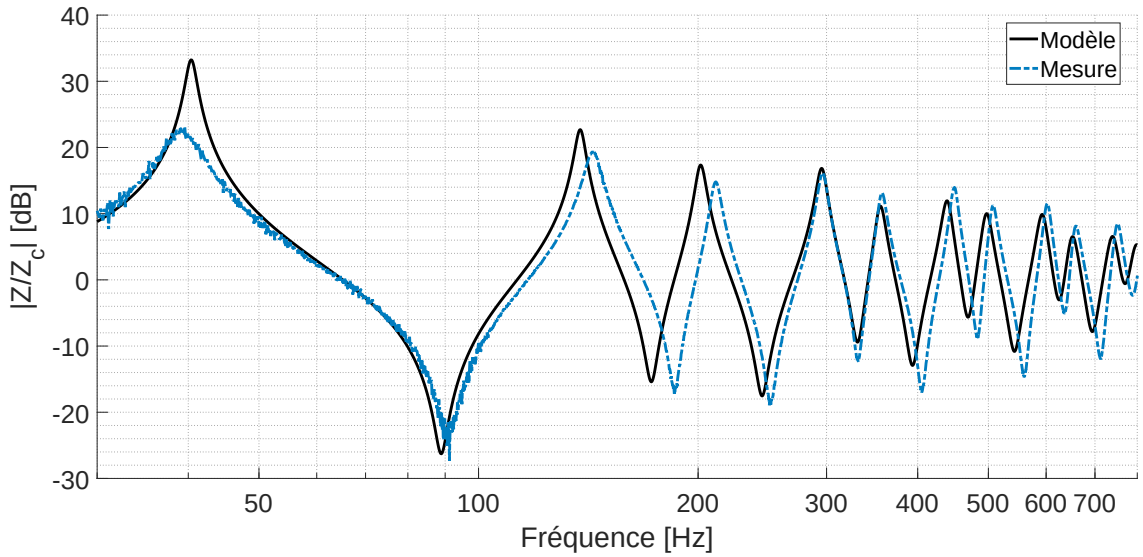


Figure A.2.4 : Modules théorique et mesuré de l'impédance d'entrée réduite du pBone relié à un tuyau en plastique.

Annexe B

Contrôle de la puissance

B.1 Impédance d'entrée théorique avec contrôle

Pic n°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
f (Hz)	40	138	201	295	355	440	497	594	652	742
Cas **1** (dB)	<0.1	<0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.5	0.8	1	1.7
Cas **2** (dB)	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.4	0.6	0.6	0.7	1.2	0.7
Cas **3** (dB)	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.4	0.6	0.6	0.7	1.2	0.8
Cas **4** (dB)	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.4	0.6	0.6	0.8	1.2	1.7
Cas **5** (dB)	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.4	0.6	0.6	0.8	1.2	1.7

Tableau B.1.1 : Écarts d'amplitude (ΔA) théoriques pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone relié à un tuyau sans et avec contrôle pour tous les cas présentés sur la Figure 4.3.1.

Pic n°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
f (Hz)	40	138	201	295	355	440	497	594	652	742
Cas **1** (cent)	<1	<1	1.3	1.6	4.4	3.4	4.7	2.6	7.7	1.6
Cas **2** (cent)	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	1.5	0.3	6.5
Cas **3** (cent)	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	1.5	0.3	7.5
Cas **4** (cent)	<1	<1	<1	<1	1.9	1.3	2.6	<1	5.1	0
Cas **5** (cent)	<1	<1	<1	<1	1.9	1.3	2.6	<1	5.1	0.6

Tableau B.1.2 : Écarts de fréquence (Δf) théoriques pour les 10 premiers pics de l'impédance d'entrée d'un trombone relié à un tuyau sans et avec contrôle pour tous les cas présentés sur la Figure 4.3.1.

B.2 Influence de la position des sources secondaires

Une comparaison de l'efficacité du contrôle en puissance est effectuée entre un cas où les haut-parleurs de contrôle sont proches du pavillon du trombone ($h_f = 0.05$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.10$ m, Figure 5.3.3) et un second cas où ils sont éloignés de l'instrument ($h_f = 0.45$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.10$ m). Cette étude est faite dans le cadre des mesures effectuées pour l'étude du contrôle de la directivité au Chapitre 5. Il convient premièrement d'observer l'efficacité de l'atténuation en puissance lorsque le contrôle vise à minimiser la puissance de la source primaire avec la Figure B.2.1.

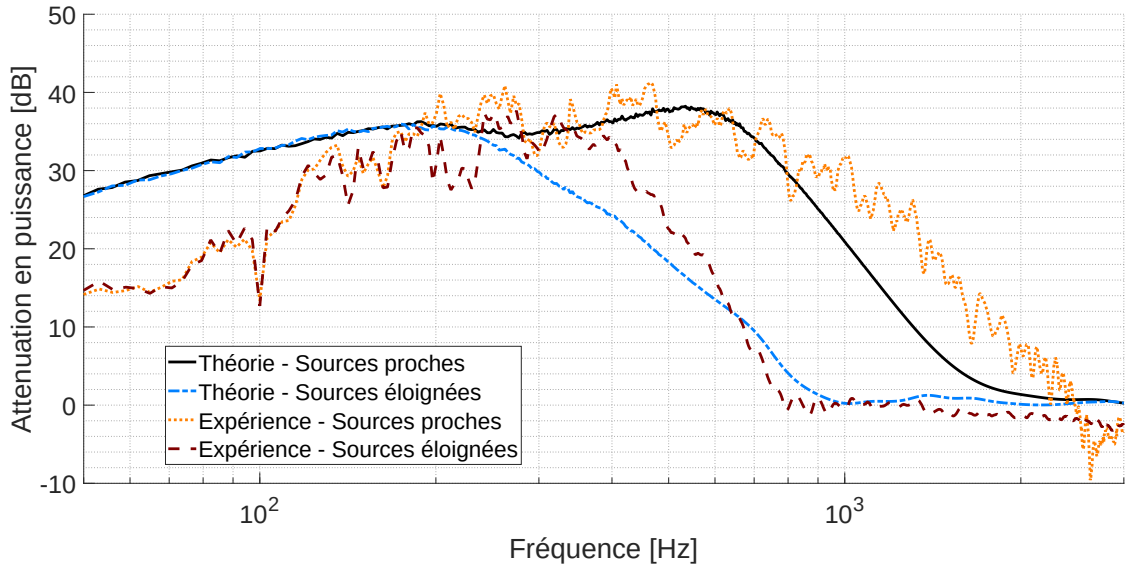


Figure B.2.1 : Atténuation en puissance lorsque le contrôle vise à minimiser la puissance de la source primaire. Un bruit aléatoire est ajouté aux résultats théoriques. 4 haut-parleurs sont placés à $h_r = 0.16$ m et 4 autres sont placés en ligne soit à $h_f = 0.05$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.10$ m, soit à $h_f = 0.45$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.10$ m.

Comme observé lors de l'étude du contrôle en puissance en Section 4.4.2, un décalage apparait entre la théorie (ligne en tirets/pointillés) et l'expérience (ligne en tirets) quelque soit le cas étudié. Lorsque les sources secondaires sont au moins à $h = 0.16$ m de la source primaire, l'atténuation expérimentale est supérieure à la théorie entre 150 et 600 Hz atteignant 10 dB à 400 Hz, malgré le fait qu'aucune source ne soit proche du pavillon. Cela conforte l'idée que les centre acoustiques équivalents de la source primaire et des sources secondaires sont plus proches qu'en théorie dès que les sources sont placées l'une en face de l'autre, que la source soit à $h_f = 0.05$ m ou à $h_f = 0.45$ m. L'efficacité de l'atténuation en puissance est alors élargie vers les hautes fréquences. Le conditionnement correspondant à chaque cas de la Figure B.2.1 est similaire entre la théorie et l'expérience. Cette suratténuation ne proviendrait donc pas d'un mauvais conditionnement de la matrice.

Annexe C

Contrôle de la directivité

C.1 Directivité de la source primaire

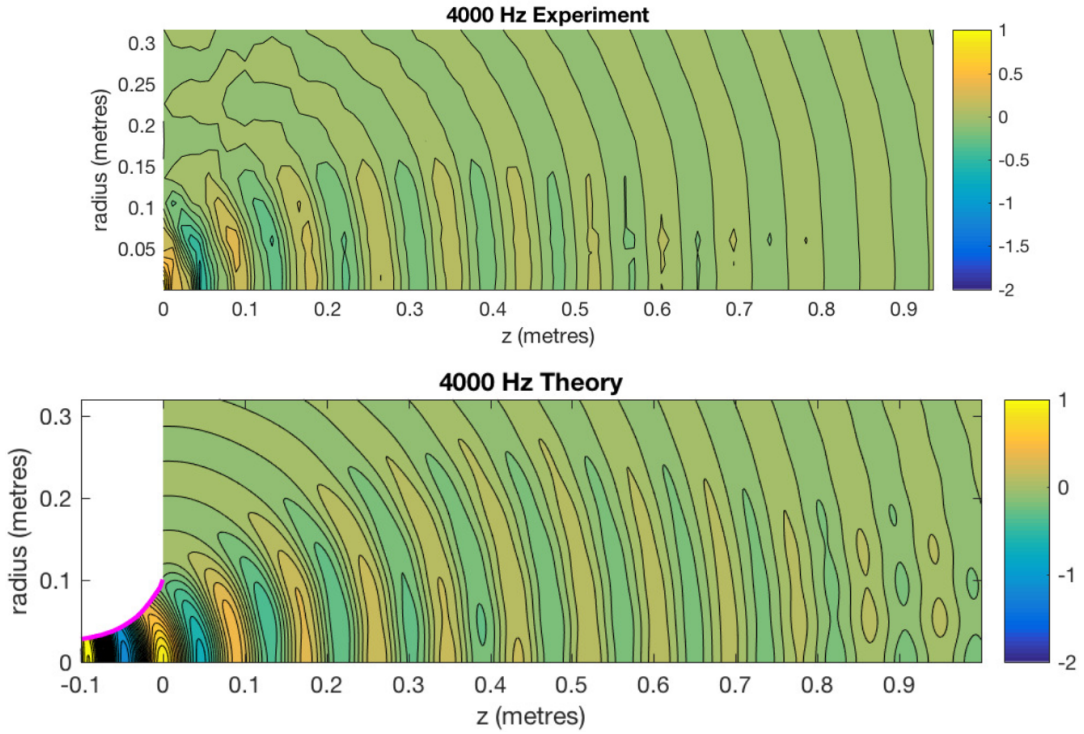


Figure C.1.1 : Partie réelle des champs de pression expérimentaux (haut) et théoriques (bas) normalisés pour un trombone Bach 36 Stradivarius. Les résultats théoriques traduisent le comportement d'un trombone rayonnant dans un cylindre de longueur infinie. Les résultats expérimentaux sont basés sur des mesures de réseaux de microphones dans une chambre anéchoïque [KLC17].

C.2 Évaluation des performances du contrôle

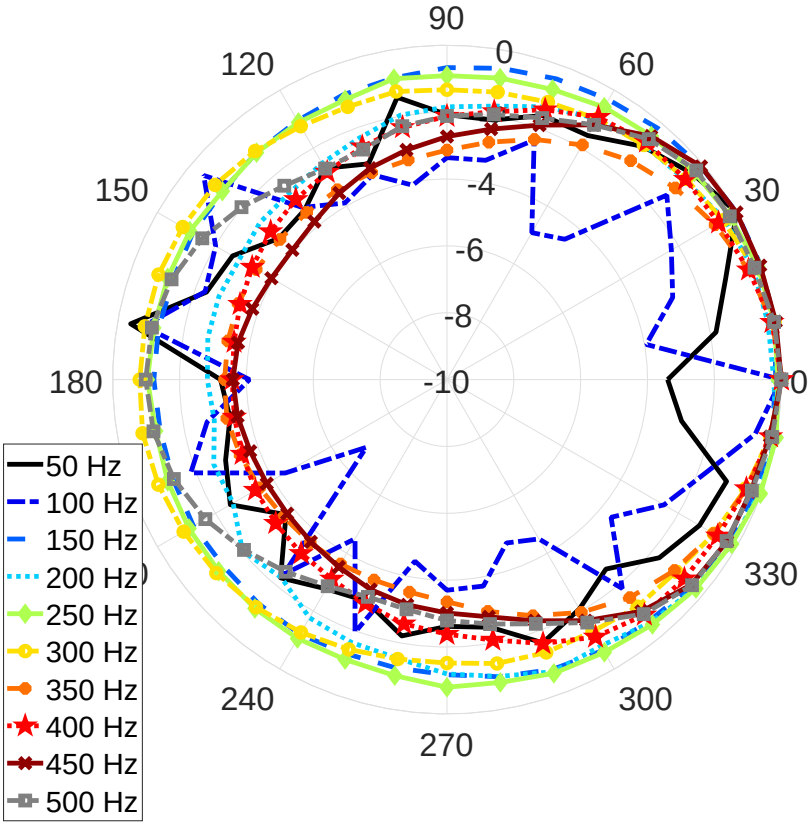


Figure C.1.2 : Diagramme de directivité (en dB) du rayonnement du trombone entre 50 et 500 Hz pour des microphones placés à 2 m autour de la source.

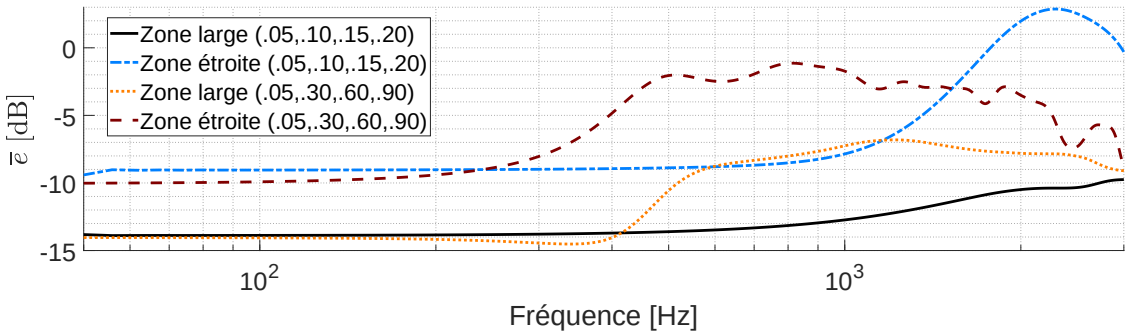


Figure C.2.1 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression target et la pression résultant d'un contrôle lorsque la bright zone est large (lignes continue et pointillés) et lorsque la bright zone est étroite (lignes en tirets/pointillés et en tirets). 4 sources secondaires sont placées à $h_r = 0.16$ m et 4 autres sont placées en ligne à $h_f = 0.05$ m puis à $d_{\text{HP}} = 0.05$ m (lignes continue et en tirets/pointillés) ou à $d_{\text{HP}} = 0.30$ m (lignes en pointillés et en tirets).

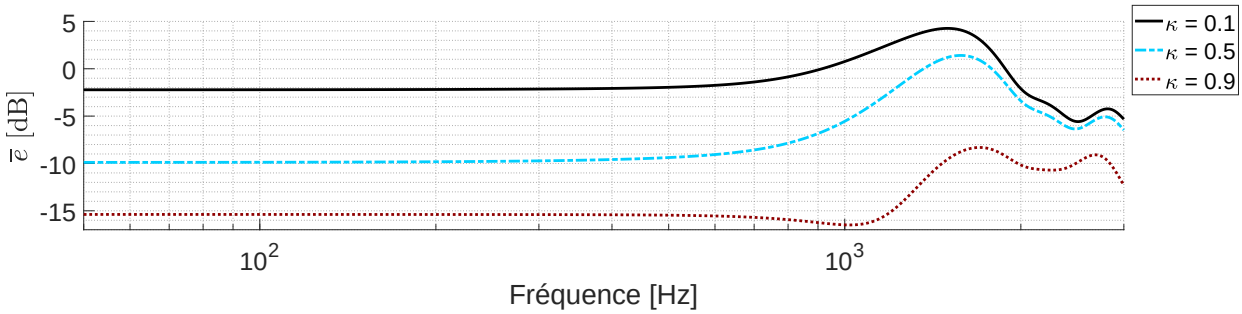


Figure C.2.2 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression target et la pression résultant d'un contrôle où la bright zone est étroite avec $\kappa = 0.1, 0.5, 0.9$ pour le cas **2**.

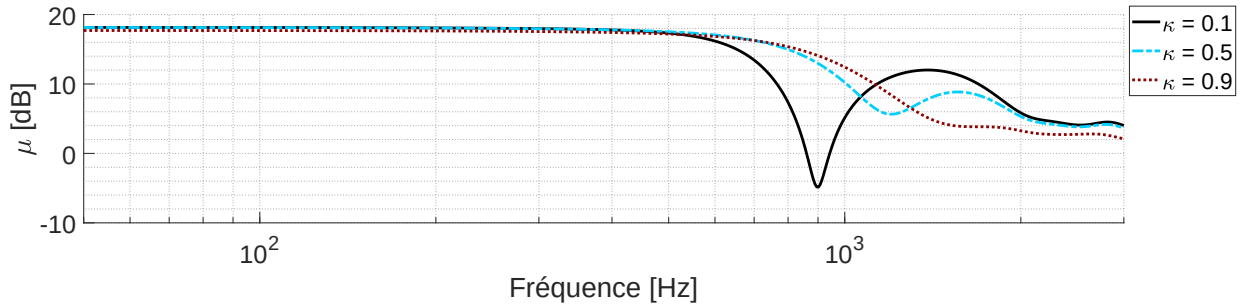


Figure C.2.3 : Contraste acoustique μ théorique pour un contrôle où la bright zone est étroite avec $\kappa = 0.1, 0.5, 0.9$ pour le cas **2**.

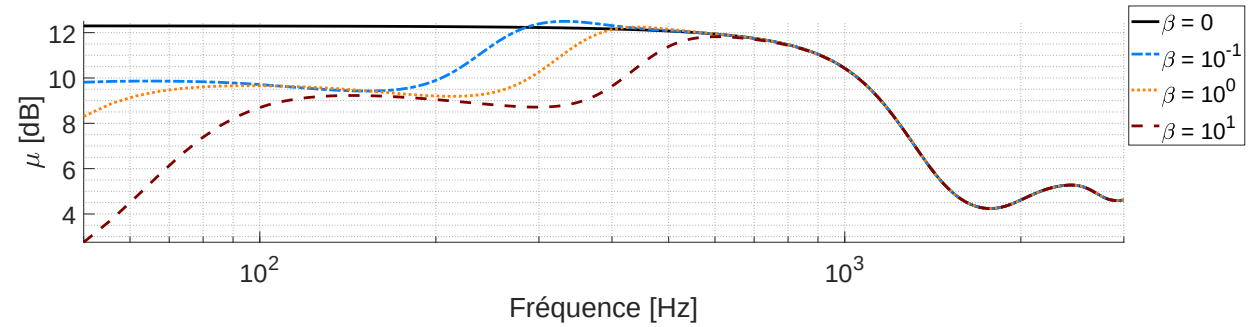


Figure C.2.4 : Contraste acoustique μ théorique pour un contrôle où la bright zone est large ($\theta = \pm 90°$) avec $\beta = 0; 10^{-1}; 10^0; 10^1$ pour le cas **2**.

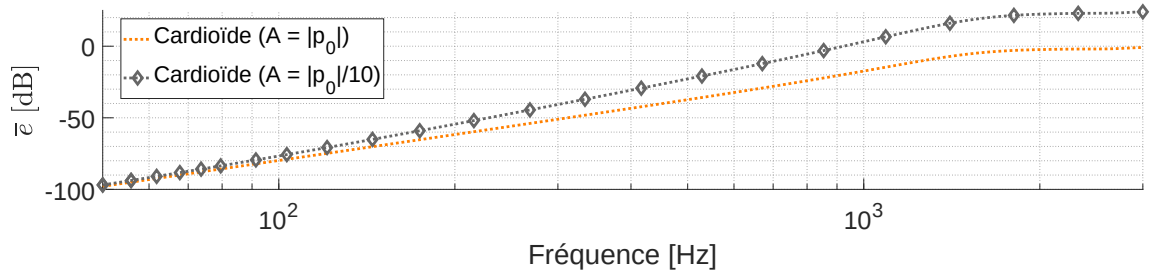
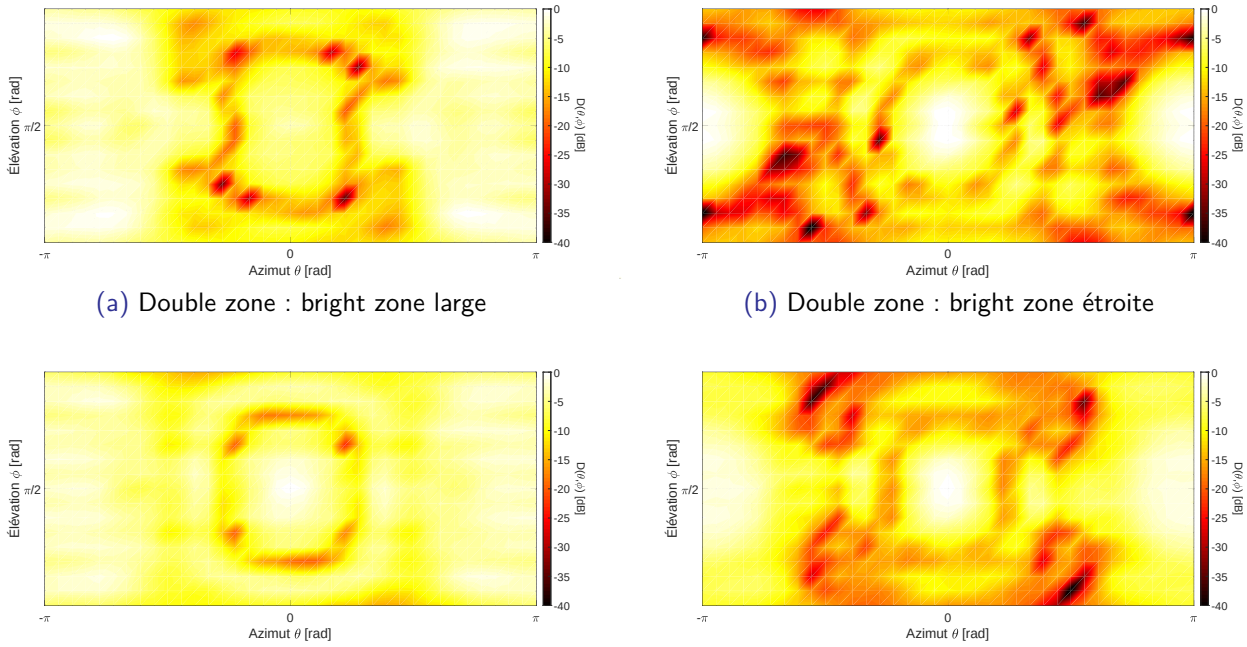


Figure C.2.5 : Erreur spatiale moyenne normalisée $\bar{e}$ entre la pression target et la pression résultant d'un contrôle où la pression target est $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$ (ligne en pointillés) ou $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{20}$ (ligne en pointillés avec losanges) pour le cas **2**.



(a) Double zone : bright zone large

(b) Double zone : bright zone étroite

(c) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = \frac{1-\cos\theta}{2}$

(d) Target directivity : $\mathscr{D}(\theta) = (\frac{1-\cos\theta}{2})^4$

Figure C.2.6 : Fonction de directivité expérimentale après contrôle à 1000 Hz en fonction de l'azimut θ et de l'élévation ϕ pour le cas **2** avec les 4 différents contrôles pour le cas (a).

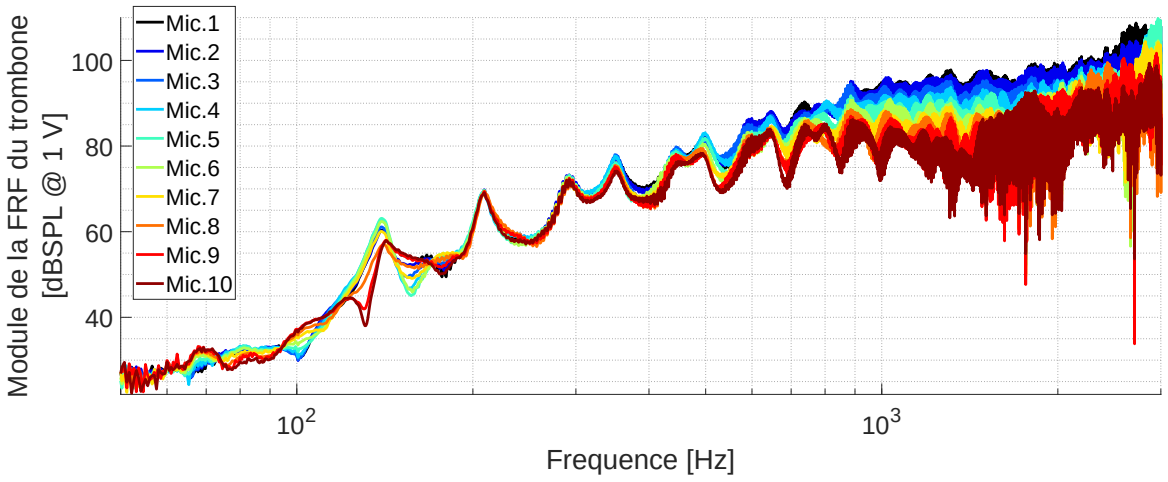


Figure C.2.7 : Réponse en fréquence entre la tension aux bornes du haut-parleur à compression du trombone et la pression au niveau des 10 microphones placés à 2 m. Le microphone 1 (ligne noire) est placé dans l'axe du pavillon du trombone alors que le microphone 10 (ligne rouge foncée) est placée au-dessus du pavillon du trombone.

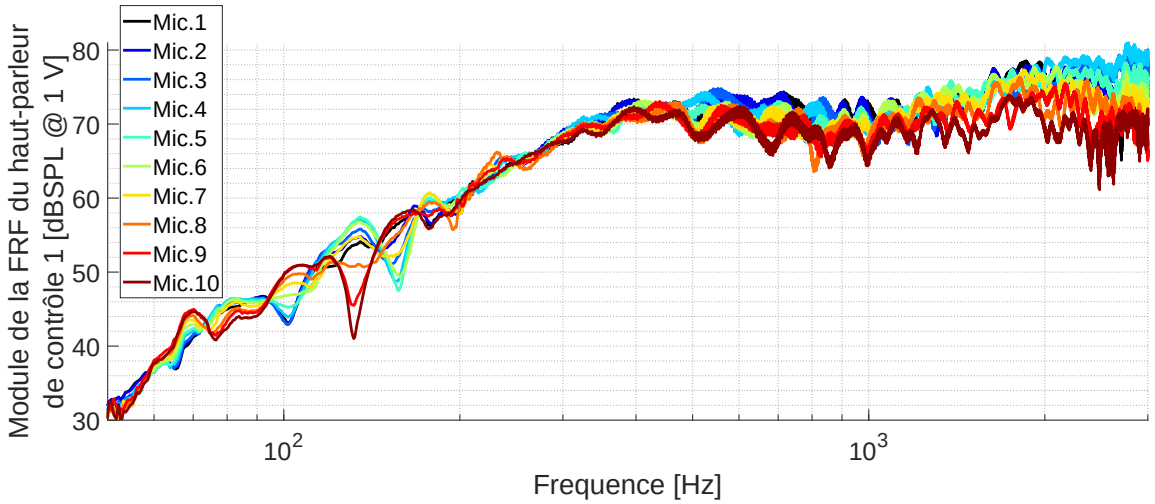


Figure C.2.8 : Réponse en fréquence entre la tension aux bornes du haut-parleur de contrôle 1 (placé sur la couronne à $h_r = 0.16$ m de la source primaire) et la pression au niveau des 10 microphones placés à 2 m. Le microphone 1 (ligne noire) est placé dans l'axe du pavillon du trombone alors que le microphone 10 (ligne rouge foncée) est placée au-dessus du pavillon du trombone.

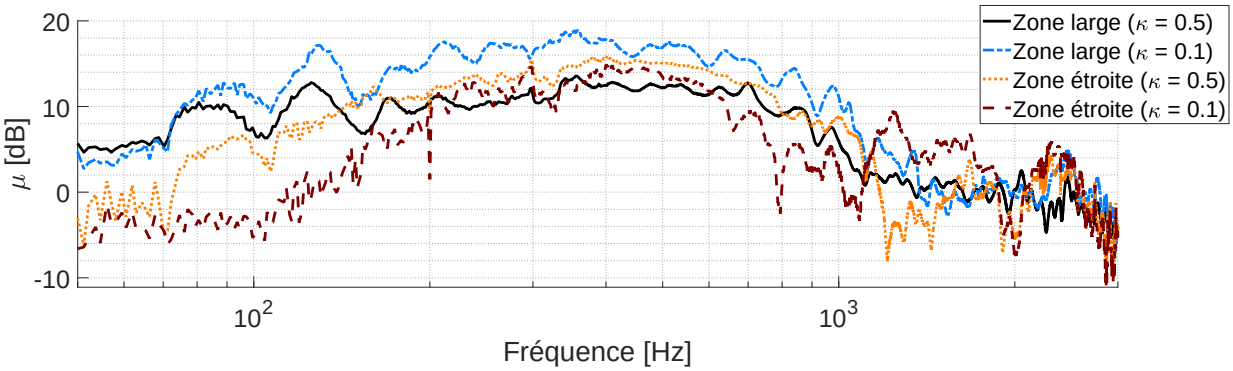


Figure C.2.9 : Contraste acoustique μ lorsque la bright zone est large ou étroite pour le cas (a) de la Figure 5.3.3 pour plusieurs valeurs de κ.

Bibliographie

[Ahr12] **J. Ahrens**. *Analytic Methods of Sound Field Synthesis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. DOI : 10.1007/978-3-642-25743-8 (cité p. 21).

[And68] **Y. Ando**. « Experimental Study of the Pressure Directivity and the Acoustic Centre of the Circular Pipe Horn Loud Speaker » (1968) (cité p. 35).

[Ayr+16] **C. Ayrault, T. Laurence, M. Melon et B. Gazengel**. « Effet d'un contrôle actif sur l'impédance de rayonnement d'un guide ». Congrès Français d'Acoustique. Le Mans, France, avr. 2016 (cité pp. 28-30, 45, 54, 68).

[Ayr+18] **C. Ayrault, A. Bonnet, C. Corno, M. Melon et B. Gazengel**. « Étude d'une sourdine passive et active pour trompette simplifiée ». Congrès Français d'Acoustique. Le Havre, France, avr. 2018 (cité pp. 13, 15).

[Bac76] **J. Backus**. « Input impedance curves for the brass instruments ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 60.2 (août 1976), p. 470-480. DOI : 10.1121/1.381104 (cité pp. 10-13).

[BB08] **H. Boutin et C. Besnainou**. « Physical parameters of the violin bridge changed by active control ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 123.5 (mai 2008), p. 3656-3656. DOI : 10.1121/1.2934961 (cité p. 24).

[BBG00] **T. A. Beauvilain, J. S. Bolton et B. K. Gardner**. « Sound cancellation by the use of secondary multipoles : Experiments ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 107.3 (mars 2000), p. 1189-1202. DOI : 10.1121/1.428408 (cité p. 44).

[BBP15] **H. Boutin, C. Besnainou et J.-D. Polack**. « Modifying the Resonances of a Xylophone Bar Using Active Control ». *Acta Acustica united with Acustica* 101.2 (mars 2015), p. 408-420. DOI : 10.3813/AAA.918836 (cité p. 25).

[BC17] **A. Bonnet et C. Corno**. *Characterisation of a trumpet mute*. Rapport de projet de Master IMDEA. Le Mans Université, 2017 (cité p. 15).

[Bea12] **J. W. Beauchamp**. « Trombone Transfer Functions : Comparison Between Frequency-Swept Sine Wave and Human Performer Input ». *Archives of Acoustics* 37.4 (déc. 2012), p. 447-454. DOI : 10.2478/v10168-012-0056-x (cité p. 7).

[Ben+16] **S. Benacchio, A. Mamou-Mani, B. Chomette et V. Finel**. « Active control and sound synthesis - two different ways to investigate the influence of the modal parameters of a guitar on its sound ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.3 (mars 2016), p. 1411-1419. DOI : 10.1121/1.4944572 (cité p. 24).

[Ber54] **L. L. Beranek**. *Acoustics*. Acoustic Laboratory. Massachusetts Institute of Technology : Bolt Beranek et Newman, Inc., 1954 (cité p. 19).

[Bet+15] **T. Betlehem, W. Zhang, M. A. Poletti et T. D. Abhayapala**. « Personal Sound Zones : Delivering interface-free audio to multiple listeners ». *IEEE Signal Processing Magazine* 32.2 (mars 2015), p. 81-91. DOI : 10.1109/MSP.2014.2360707 (cité pp. 23, 81, 86).

[BGB95] **J. S. Bolton, B. K. Gardner et T. A. Beauvilain**. « Sound cancellation by the use of secondary multipoles ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 98.4 (oct. 1995), p. 2343-2362. DOI : 10.1121/1.414400 (cité pp. 44, 45, 53).

[BK22] **Brüel et Kjaer**. *Condenser Microphone Cartridges - Types 4133 to 4181*. Juill. 2022 (cité p. 32).

[Bou+13] **H. Boutin, N. Fletcher, J. Smith et J. Wolfe**. « Lip motion, the playing frequency of the trombone and the upstream and downstream impedances ». *Henri Boutin et al.* (2013). Henri Boutin et al., p. 7 (cité p. 5).

[BRJ06] **S. Barrera-Figueroa, K. Rasmussen et F. Jacobsen**. « The acoustic center of laboratory standard microphones ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 120.5 (nov. 2006), p. 2668-2675. DOI : 10.1121/1.2345830 (cité pp. 35, 36).

[Bro22] **Brogi**. *Buccin*. https ://commons.wikimedia.org/wiki/File :Buccina_1.png ?uselang=fr. Fév. 2022 (cité p. 4).

[BSL17] **K. Buys, D. Sharp et R. Laney**. « Developing and Evaluating a Hybrid Wind Instrument ». *Acta Acustica united with Acustica* 103.5 (sept. 2017), p. 830-846. DOI : 10.3813/AAA.919111 (cité p. 27).

[BVV93] **A. J. Berkhout, D. de Vries et P. Vogel**. « Acoustic control by wave field synthesis ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 93.5 (mai 1993), p. 2764-2778. DOI : 10.1121/1.405852 (cité pp. 20, 92).

[Cam67] **M. Camras**. « Approach to Recreating a Sound Field ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 41.6 (1967), p. 1590-1590 (cité p. 20).

[Cau16] **R. Caussé**. « Effet des différentes sourdines sur l'acoustique des instruments à vent de la famille des "cuivres" ». *Musique & Technique* 6 (2016), p. 65-77 (cité p. 10).

[Cav+19a] **C. Cavaillès, C. Ayrault, M. Melon, J. Gilbert et B. Gazengel**. « Loudspeakers Optimisation For Active Control of Trombone Radiation ». International Congress On Sound And Vibration. Montréal, Canada, juill. 2019, p. 8 (cité pp. IV, 31).

[Cav+19b] **C. Cavaillès, C. Ayrault, M. Melon, J. Gilbert et B. Gazengel**. « Optimisation de haut-parleur pour le contrôle actif du rayonnement d'un trombone ». Le Mans, France, juin 2019 (cité p. IV).

[Cav+20] **C. Cavaillès, M. Melon, C. Ayrault et B. Gazengel**. « Optimal active control for a trombone : a parametric study ». Forum Acusticum 2020. Lyon, France : e-Forum Acusticum 2020, 2020, 7 pages. DOI : 10.48465/FA.2020.0312 (cité p. IV).

[Cav+22] **C. Cavaillès, B. Gazengel, M. Melon et C. Ayrault**. « Study of the optimal active control of a trombone ». *Acta Acustica* 6 (2022), p. 18. DOI : 10.1051/aacus/2022015 (cité p. IV).

[CE13] **J. Cheer et S. Elliott**. « Design and implementation of a personal audio system in a car cabin ». Montreal, Canada : 21th International Congress on Acoustics, 2013, p. 055009-055009. DOI : 10.1121/1.4798948 (cité p. 81).

[CGM20] **M. Campbell, J. Gilbert et M. Myers**. *The science of brass instruments*. Springer-Verlag, 2020 (cité pp. 4-6, 10, 119, 120).

[Che12] **J. Cheer**. « Active Control of the Acoustic Environment in an Automobile Cabin ». Thèse de doct. Southampton, UK : University of Southampton, déc. 2012 (cité p. 84).

[Cho+08] **J.-W. Choi, Y. Kim, S. Ko et J.-H. Kim**. « Super-Directive Loudspeaker Array for the Generation of Personal Sound Zone ». *The Journal of the Audio Engineering Society*. San Fransisco, USA : Audio Engineering Society, oct. 2008 (cité pp. 22, 81, 84, 86).

[CJ12] **J.-H. Chang et F. Jacobsen**. « Sound field control with a circular double-layer array of loudspeakers ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 131.6 (juin 2012), p. 4518-4525. DOI : 10.1121/1.4714349 (cité pp. 22, 23, 81, 83, 84, 86, 114).

[CJA15] **J.-H. Chang, J. Jensen et F. Agerkvist**. « Shift of the Acoustic Center of a Closed-Box Loudspeaker in a Linear Array : Investigation Using the Beamforming Technique ». *Journal of the Audio Engineering Society* 63.4 (avr. 2015), p. 257-266. DOI : 10.17743/jaes.2015.0018 (cité p. 67).

[CK02] **J.-W. Choi et Y.-H. Kim**. « Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 111.4 (avr. 2002), p. 1695-1700. DOI : 10.1121/1.1456926 (cité p. 22).

[CK16] **A. Chaigne et J. Kergomard**. *Acoustics of Musical Instruments*. Modern Acoustics and Signal Processing. New York, NY : Springer New York, 2016. DOI : 10.1007/978-1-4939-3679-3 (cité pp. 55, 119).

[CKL84] **R. Caussé, J. Kergomard et X. Lurton**. « Input impedance of brass musical instruments - Comparison between experiment and numerical models ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 75.1 (jan. 1984), p. 241-254. DOI : 10.1121/1.390402 (cité p. 119).

[CM18] **B. Chomette et A. Mamou-Mani**. « Modal control based on direct modal parameters estimation ». *Journal of Vibration and Control* 24.12 (juin 2018), p. 2389-2399. DOI : 10.1177/1077546317726615 (cité p. 26).

[CS82] **R. Causse et B. Sluchin**. « Mutes of brass instruments—Experiments and calculations ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 71.S1 (avr. 1982), S91-S92. DOI : 10.1121/1.2019634 (cité p. 13).

[CS91] **R. Caussé et B. Sluchin**. *Sourdines des cuivres*. Les Editions de la MSH. 1991 (cité pp. 10-13).

[Dal01a] **J.-P. Dalmont**. « Acoustic Impedance Measurement, part I : A Review ». *Journal of Sound and Vibration* 243.3 (juin 2001), p. 427-439. DOI : 10.1006/jsvi.2000.3428 (cité pp. 9, 68, 69, 121).

[Dal01b] **J.-P. Dalmont**. « Acoustic Impedance Measurement, part II : A New Calibration Method ». *Journal of Sound and Vibration* 243.3 (juin 2001), p. 441-459. DOI : 10.1006/jsvi.2000.3428 (cité pp. 9, 68, 69, 121).

[Dal11] **J.-P. Dalmont**. *Guide des guides d'ondes acoustiques*. Published : cours de Master 1 IMDEA. Le Mans Université, jan. 2011 (cité p. 121).

[Dub+99] **V. Dubos, A. Khettabi, D. H. Keefe, C. J. Nederveen et A. Pijnacker**. « Theory of Sound Propagation in a Duct with a Branched Tube Using Modal Decomposition ». *Acta Acustica united with Acustica* 85 (1999), p. 18 (cité p. 120).

[ELS14] **N. Eyring, T. Leishman et W. Strong**. *Tenor Trombone Directivity Animations*. Brigham Young University, USA, nov. 2014 (cité p. 31).

[Eve+12] **P. Eveno, J.-P. Dalmont, R. Caussé et J. Gilbert**. « Wave Propagation and Radiation in a Horn : Comparisons Between Models and Measurements ». *Acta Acustica united with Acustica* 98.1 (jan. 2012), p. 158-165. DOI : 10.3813/AAA.918501 (cité p. 9).

[Eyr13] **N. J. Eyring**. *Development and Validation of an Automated Directivity Acquisition System Used in the Acquisition, Processing, and Presentation of the Acoustic Far-Field Directivity of Musical Instruments in an Anechoic Space*. Rapp. tech. Brigham Young University, USA, 2013 (cité pp. 7, 105).

[Foo14] **K. G. Foote**. « Discriminating between the nearfield and the farfield of acoustic transducers ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 136.4 (oct. 2014), p. 1511-1517. DOI : 10.1121/1.4895701 (cité p. 34).

[Gad22] **Gadjou**. *Saqueboute*. https ://commons.wikimedia.org/wiki/File :Saqueboute.jpg. Fév. 2022 (cité p. 4).

[GDF21] **T. Guennoc, J.-B. Doc et S. Félix**. « Improved multimodal formulation of the wave propagation in a 3D waveguide with varying cross-section and curvature ». *J. Acoust. Soc. Am.* (2021), p. 12 (cité p. 42).

[GKR85] **D. Guicking, K. Karcher et M. Rollwage**. « Coherent active methods for applications in room acoustics ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 78.1426 (1985), p. 10 (cité p. 16).

[GP97] **J. Gilbert et J.-F. Petiot**. « Brass instruments : some theoretical and experimental results. » T. 19(5). Edinburgh, UK, 1997, p. 391-400 (cité p. 6).

[GS03] **K. L. Gee et S. D. Sommerfeldt**. « Application of theoretical modeling to multichannel active control of cooling fan noise ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 115.1 (oct. 2003), p. 228-236. DOI : 10.1121/1.1631940 (cité p. 18).

[Gué98] **J. Guérard**. « Modélisation numérique et simulation expérimentale de systèmes acoustique. Application aux instruments de musique ». Thèse de doct. Université Paris VI, 1998 (cité pp. 26, 27).

[Gui09] **D. Guicking**. *Patents on Active Control of Sound and Vibration – an Overview –*. Rapp. tech. Gottingen, Allemagne, mai 2009, p. 118 (cité p. 16).

[GV11] **D. Gasteau et J. Vernier**. *Étude acoustique de sourdines de trompette*. Rapp. tech. Le Mans Université, 2011 (cité p. 11).

[Her97] **T. Herbert**. « "Sackbut" : the early trombone ». *The Cambridge Companion to Brass Instruments*. Sous la dir. de T. Herbert et J. Wallace. 1re éd. Cambridge University Press, oct. 1997, p. 68-83. DOI : 10.1017/CCOL9780521563437.008 (cité p. 4).

[Hir+96] **A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam et A. P. J. Wijnands**. « Shock waves in trombones ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 99.3 (mars 1996), p. 1754-1758. DOI : 10.1121/1.414698 (cité p. 5).

[HR03] **T. Hélie et X. Rodet**. « Modélisation physique d'instruments de musique en systèmes dynamiques et inversion ». *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 37.10 (déc. 2003), p. 1305-1310. DOI : 10.3166/jesa.37.1305-1310 (cité p. 8).

[HS97] **C. H. Hansen et S. D. Snyder**. *Active Control of Noise and Vibration*. Sous la dir. d'E. bibinitperiod F. Spon. Chapman & Hall, 1997 (cité p. 17).

[HW03] **S. Haykin et B. Widrow**. *Least-mean-square adaptive filters*. T. 31. John Wiley & Sons, 2003 (cité p. 79).

[Jos+17] **M. Jossic et al.** « Modal active control of Chinese gongs ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.6 (juin 2017), p. 4567-4578. DOI : 10.1121/1.4985108 (cité pp. 25, 26).

[Jos18] **M. Jossic**. « Contrôle actif et non-linéarités géométriques : le cas du gong xiaoluo ». Thèse de doct. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, oct. 2018 (cité p. 25).

[Kau+15] **W. Kausel, V. Chatziioannou, T. R. Moore, B. R. Gorman et M. Rokni**. « Axial vibrations of brass wind instrument bells and their acoustical influence : Theory and simulations ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 137.6 (juin 2015), p. 3149-3162. DOI : 10.1121/1.4921270 (cité p. 7).

[Kem76] **A. J. Kempton**. « The ambiguity of acoustic sources - A possibility for active control ? » *Journal of Sound and Vibration* (mai 1976), p. 9 (cité p. 17).

[Kir+96] **O. Kirkeby, P. A. Nelson, F. Orduna-Bustamante et H. Hamada**. « Local sound field reproduction using digital signal processing ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 100.3 (sept. 1996), p. 1584-1593. DOI : 10.1121/1.416060 (cité p. 20).

[KLC17] **J. Kemp, A. Lopez-Carromero et M. Campbell**. « Pressure fields in the vicinity of brass musical instrument bells measured using a two dimensional grid array and comparison with multimodal models ». Internation Congress on Sound and Vibration. London, UK : Internation Congress on Sound et Vibration, juill. 2017, p. 9 (cité pp. 105, 125).

[Koe01] **R. Koehler**. « Intensity Error Sensing In The Active Control of Free Field Sound Radiation ». Thèse de doct. Australia : Adelaide university, sept. 2001 (cité p. 46).

[Lec17] **P. Lecomte**. « Ambisonie d'ordre élevé en trois dimensions : captation, transformations et décodage adaptatifs de champs sonores ». Thèse de doct. CNAM et Université de Sherbrooke, juin 2017 (cité p. 17).

[Lue34] **P. Lueg**. « Process of silencing sound oscillations ». 2043416. Mars 1934 (cité p. 16).

[Mat+21] **R. Mattéoli et al.** « Minimal blowing pressure allowing periodic oscillations in a model of bass brass instruments ». *Acta Acustica* 5 (2021), p. 57. DOI : 10.1051/aacus/2021049 (cité p. 5).

[McP10] **A. McPherson**. « The Magnetic Resonator Piano : Electronic Augmentation of an Acoustic Grand Piano ». *Journal of New Music Research* 39.3 (sept. 2010), p. 189-202. DOI : 10.1080/09298211003695587 (cité pp. 24, 25).

[Mel+12] **M. Melon, P. Herzog, A. Sitel et M.-A. Galland**. « One dimensional study of a module for active/passive control of both absorption and transmission ». *Applied Acoustics* 73.3 (mars 2012), p. 234-242. DOI : 10.1016/j.apacoust.2011.09.005 (cité p. 26).

[Mer35] **M. Mersenne**. « Harmonicorum libri XII ». (Paris). 1635 (cité p. 10).

[Meu+14] **T. Meurisse, A. Mamou-Mani, R. Caussé, B. Chomette et D. B. Sharp**. « Simulations of Modal Active Control Applied to the Self-Sustained Oscillations of the Clarinet ». *Acta Acustica united with Acustica* 100.6 (nov. 2014), p. 1149-1161. DOI : 10.3813/AAA.918794 (cité pp. 16, 26, 27).

[Meu+15] **T. Meurisse, A. Mamou-Mani, R. Caussé, B. Sluchin et D. B. Sharp**. « An active mute for the trombone ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 138.6 (déc. 2015), p. 3539-3548. DOI : 10.1121/1.4936901 (cité pp. 13-15, 70, 103).

[Meu14] **T. Meurisse**. « Contrôle Actif Appliqué aux Instruments de Musique à Vent ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014 (cité pp. 13, 15, 16, 27).

[Mil22] **D. K. Miller**. *Yamaha Silent Brass*. flickr.com/photos/penmachine/362288180/. Fév. 2022 (cité p. 13).

[MR94] **A. Miśkiewicz et A. Rakowski**. « Loudness level versus sound-pressure level : A comparison of musical instruments ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 96.6 (déc. 1994), p. 3375-3379. DOI : 10.1121/1.411448 (cité p. 31).

[MR97] **T. Martin et A. Roure**. « Optimization of an active noise control system using spherical harmonics expansion of the primary field ». *Journal of Sound and Vibration* 201.5 (avr. 1997), p. 577-593. DOI : 10.1006/jsvi.1996.0782 (cité p. 17).

[MR98] **T. Martin et A. Roure**. « Active noise control of acoustics sources using spherical harmonics expansion and a genetic algorithm : simulation and experiment ». *Journal of Sound and Vibration* 212.3 (mai 1998), p. 511-523. DOI : 10.1006/jsvi.1997.1444 (cité pp. 17, 18).

[MS72] **W. P. Malm et A. Schaeffner**. « Origine des Instruments de Musique : Introduction ethnologique a l'histoire de la musique instrumentale ». *Ethnomusicology* 16.2 (mai 1972), p. 292. DOI : 10.2307/849730 (cité p. 4).

[NE92] **P. A. Nelson et S. Elliott**. *Active Control of Sound*. Sous la dir. d'U. S. Edition. Academic Press inc., 1992 (cité pp. 17, 46, 51, 80, 84).

[Nel+87] **P. A. Nelson, A. Curtis, S. Elliott et A. Bullmore**. « The minimum power output of free field point sources and the active control of sound ». *Journal of Sound and Vibration* 116.3 (août 1987), p. 397-414. DOI : 10.1016/S0022-460X(87)81373-1 (cité pp. 17, 18, 26, 35, 41, 42, 44-46, 48, 52, 58).

[Nie+08] **G. Nief, F. Gautier, J.-P. Dalmont et J. Gilbert**. « Influence of wall vibrations on the behavior of a simplified wind instrument ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 124.2 (août 2008), p. 1320-1331. DOI : 10.1121/1.2945157 (cité p. 7).

[NY99] **P. A. Nelson et S. Yoon**. « Estimation of acoustic source strength by inverse methods : part I, conditionning of the inverse problem ». *Journal of Sound and Vibration* 233.4 (déc. 1999), p. 643-668. DOI : 10.1006/jsvi.1999.2837 (cité pp. 53, 113).

[Oli+15] **F. Olivieri, F. M. Fazi, M. Shin et P. A. Nelson**. « Pressure-Matching beamforming method for loudspeaker arrays with frequency dependent selection of control points ». Warsaw, Poland : The Journal of the Audio Engineering Society, mai 2015, p. 10 (cité p. 21).

[Ols53] **H. Olson**. « Electronic Sound Absorber ». 2983790. Avr. 1953 (cité p. 16).

[Ols73] **H. Olson**. « Gradient loudspeakers ». *Journal of the Audio Engineering Society* 21.2 (1973), p. 86-93 (cité p. 19).

[Pap+17] **G. S. Papini, R. L. Pinto, E. B. Medeiros et F. B. Coelho**. « Hybrid approach to noise control of industrial exhaust systems ». *Applied Acoustics* 125 (oct. 2017), p. 102-112. DOI : 10.1016/j.apacoust.2017.03.017 (cité p. 16).

[Pic98] **P. Pickett**. *An Investigation of Active Tonal Spectrum Control as Applied to the Modern Trumpet, Master thesis*. Rapp. tech. Blacksburg, VA, USA, juin 1998, p. 151 (cité pp. 27, 28, 41).

[Pyl91] **R. Pyle**. « A Computational Model of the Baroque Trumpet and Mute ». *Historic Brass Society Journal* 3 (1991), p. 79-97. DOI : 10.2153/0119910011009 (cité pp. 10, 119).

[QH00] **X. Qiu et C. Hansen**. « Secondary acoustic source types for active control in free field : monopoles or multipoles ? » *Journal of Sound and Vibration* 232.5 (mai 2000), p. 1005-1009. DOI : 10.1006/jsvi.1999.2702 (cité pp. 18, 44, 45).

[Ren+18] **P. L. Rendón et al.** « Using Schlieren imaging to estimate the geometry of a shock wave radiated by a trumpet bell ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 144.4 (oct. 2018). DOI : 10.1121/1.5063810 (cité pp. 7, 8, 36, 37, 64).

[SEC15] **M. F. Simon Galvez, S. J. Elliott et J. Cheer**. « Time Domain Optimization of Filters Used in a Loudspeaker Array for Personal Audio ». *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 23.11 (nov. 2015), p. 1869-1878. DOI : 10.1109/TASLP.2015.2456428 (cité p. 83).

[SH18] **K. Sato et Y. Haneda**. « Sidelobe suppression by desired directivity pattern optimization for a small circular loudspeaker array ». *Acoustical Science and Technology* 39.3 (mai 2018), p. 243-251. DOI : 10.1250/ast.39.243 (cité p. 104).

[Sha+17] **N. R. Shabtai, G. Behler, M. Vorländer et S. Weinzierl**. « Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.2 (fév. 2017), p. 1246-1256. DOI : 10.1121/1.4976071 (cité pp. 35, 36).

[Sma72] **R. H. Small**. « Direct Radiator Loudspeaker System Analysis ». *The Journal of the Audio Engineering Society* 20(5) (1972), p. 383-395 (cité p. 72).

[Sta12] **E. Start**. « Simulation and application of beam-shaped subwoofer arrays ». Acoustics 2012 Nantes Conference. Nantes, France : Acoustics 2012, avr. 2012, p. 7 (cité p. 19).

[SV15] **N. R. Shabtai et M. Vorländer**. « Acoustic centering of sources with high-order radiation patterns ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 137.4 (avr. 2015), p. 1947-1961. DOI : 10.1121/1.4916594 (cité pp. 35-37).

[SV16] **N. R. Shabtai et M. Vorländer**. « Acoustic centering of a baffled piston in the circular harmonics domain ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.3 (mars 2016), p. 1372-1380. DOI : 10.1121/1.4944691 (cité pp. 35, 36).

[Swi73] **M. Swinbanks**. « The active control of sound propagation in long ducts ». *Journal of Sound and Vibration* 27.3 (avr. 1973), p. 411-436. DOI : 10.1016/S0022-460X(73)80355-4 (cité p. 16).

[Swi84] **M. A. Swinbanks**. « The Active Control of Noise and Vibration and Some Applications in Industry ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Power and Process Engineering* 198.4 (nov. 1984), p. 281-288. DOI : 10.1243/PIME_PROC_1984_198_031_02 (cité p. 17).

[Ure98] **M. S. Ureda**. « The Effects of Acoustic Center on Array Directivity ». Amsterdam : Audio Engineering Society, mai 1998 (cité p. 67).

[Vin21] **L. Vindrola**. « Personalised low-frequency sound reproduction in a car cabin ». Thèse de doct. Le Mans, France : Le Mans Université, mai 2021 (cité pp. 23, 24, 85).

[VSV96] **M. Van Der Wal, E. Start et D. de Vries**. « Design of Logarithmically Spaced Constant-Directivity Transducer Arrays ». *The Journal of the Audio Engineering Society* 44.6 (1996), p. 497-507 (cité p. 19).

[Wei+18] **S. Weinzierl et al.** « Sound power and timbre as cues for the dynamic strength of orchestral instruments ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 144.3 (sept. 2018), p. 1347-1355. DOI : 10.1121/1.5053113 (cité p. 31).

[Wij+20] **M. Wijnand, B. d'Andréa-Novel, T. Hélie et D. Roze**. « Active control of the axisymmetric vibration modes of a tom-tom drum using a modal-based observer-regulator » (2020). Forum Acusticum 2020, 8 pages. DOI : 10.48465/FA.2020.0439 (cité p. 26).

[Wij21] **M. Wijnand**. « Contrôle en temps fini de systèmes vibratoires hybrides couplant equations aux derivees partielles et equations aux derivées ordinaires : les cas du tom et du câble pesant ». Thèse de doct. Paris : Sorbonne Université, sept. 2021 (cité p. 26).

[YN17] **S. Yoshikawa et Y. Nobara**. « Acoustical Modeling of Mutes for Brass Instruments ». *Studies in Musical Acoustics and Psychoacoustics*. Sous la dir. d'A. Schneider. T. 4. Series Title : Current Research in Systematic Musicology. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 143-186. DOI : 10.1007/978-3-319-47292-8_5 (cité p. 10).

[YN99] **S. Yoon et P. Nelson**. « Estimation of acoustic source strength by inverse methods : part II, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters ». *Journal of Sound and Vibration* 233.4 (déc. 1999), p. 669-705. DOI : 10.1006/jsvi.2000.2836 (cité pp. 48, 51, 53).

COLLEGE SCIENCES
DOCTORAL DE L'INGENIERIE
PAYS DE LA LOIRE ET DES SYSTEMES

Le Mans Université

Titre : Contrôle du champ rayonné par un Trombone à l'aide d'un réseau de Haut-Parleurs

Mot clés : Acoustique Musicale, Électroacoustique, Contrôle Actif, Instruments de Musique de type Cuivre, Transducteurs, Zones d'Écoute Personnalisée

Résumé : Dans la famille des instruments de type cuivre, il est parfois nécessaire de réduire le niveau sonore à l'aide d'une sourdine généralement insérée dans le pavillon. Celle-ci modifie le timbre et l'impédance d'entrée de l'instrument et perturbe donc la sensation de jeu du musicien.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le principe et la faisabilité technologique d'un contrôle actif du rayonnement d'un trombone, à l'aide d'un réseau de haut-parleurs placés à l'extérieur de l'instrument. Le dispositif doit réduire la puissance acoustique émise par le trombone ou contrôler sa directivité en ne modifiant que très peu son impédance d'entrée.

Le système de contrôle est composé de haut-parleurs (sources secondaires) disposés en couronne autour du pavillon et en ligne devant ce dernier. Plusieurs configurations du nombre et de la position des sources secondaires sont étudiées par la théorie du contrôle optimal afin de maximiser l'atténuation en puissance ou de favoriser le rayonnement vers le musicien. Dans ce dernier cas, deux stratégies de synthèse de champ sont considérées : l'une consiste à générer une zone d'écoute et une zone de silence et l'autre à reproduire des directivités cibles.

Les résultats expérimentaux confirment les prédictions des modèles analytiques et numériques et montrent qu'il est possible de réduire la puissance acoustique du trombone jusqu'à 2000 Hz et de contrôler sa directivité jusqu'à 1500 Hz.

Dans le cas du contrôle en puissance, le placement d'un haut-parleur devant le pavillon modifie le champ proche de l'instrument, ce qui engendre une atténuation supérieure à celle prédite. L'impédance d'entrée de l'instrument est très légèrement affectée par ce type de contrôle.

Dans le cas du contrôle en directivité, augmenter le nombre de sources en ligne permet de minimiser l'erreur entre les pressions cibles et générées. Imposer des zones d'écoute et de silence permet d'obtenir un contraste acoustique important mais nécessite des débits très élevés et la fréquence du premier pic de résonance de l'impédance d'entrée peut être décalée d'un demi-ton. En revanche, imposer une directivité cible nécessite des débits plus faibles et modifie plus légèrement l'impédance d'entrée, d'autant plus que la directivité est peu marquée.

La faisabilité du contrôle en puissance est évaluée connaissant le débit du trombone estimé pour plusieurs nuances de jeu. Le dimensionnement technologique montre que le système de contrôle est réalisable à condition d'effectuer une régularisation pour limiter la puissance électrique nécessaire à chaque haut-parleur placé dans l'axe du pavillon. L'ajout du paramètre de régularisation a pour effet de réduire l'efficacité du contrôle pour les fréquences inférieures à 300 Hz.

Les perspectives de ce travail s'orientent vers la mise en œuvre d'un contrôle externe effectif en temps réel, ainsi que l'étude d'un contrôle interne monté sur sourdine.

COLLEGE SCIENCES
DOCTORAL DE L'INGENIERIE
PAYS DE LA LOIRE ET DES SYSTEMES

Le Mans Université

Title: Control of the acoustic radiation of the trombone using a loudspeaker array

Keywords: Musical Acoustics, Electroacoustics, Active Control, Brass instruments, Transducers, Sound Zones

Abstract: In the brass instruments family, it may be necessary to reduce the sound level with the help of a mute generally inserted into the bell. This changes the timbre and the input impedance of the instrument and therefore disturbs the musician's playing sensation.

The objective of this thesis is to study the principle and the technological feasibility of an active control system modifying the acoustic radiation of a trombone using a loudspeaker array placed outside the instrument. The device must reduce the acoustic power emitted by the trombone or control its directivity, by modifying only slightly its input impedance.

The control system is composed of loudspeakers (secondary sources) placed in a ring around the bell and on a line in front of it. Several configurations of the number and position of secondary sources are studied by the optimal control theory in order to maximize the power attenuation or to favor the radiation towards the musician. In this last case, two field synthesis strategies are considered: one must generate a sound zone and a silent zone and the other has to reproduce target directivities.

The experimental results confirm the predictions of the analytical and numerical models and show that it is possible to reduce the acoustic power of the trombone up to 2000 Hz and to control its directivity up to 1500 Hz.

In the case of power control, placing a loudspeaker in front of the bell modifies the near field of the instrument, resulting in higher than predicted attenuation. The input impedance of the instrument is very slightly affected by this type of control.

In the case of a directivity control, increasing the number of sources placed on a line minimizes the error between the target and the resulting pressure. Impose two zones (sound and silence) provides a high acoustic contrast but requires very high source strengths and the frequency of the input impedance first resonance peak can be shifted by a semitone. However, impose a target directivity requires lower source strengths and only slightly modifies the input impedance, especially if the directivity is slightly pronounced.

The power control feasibility is evaluated knowing the estimated trombone volume velocity for several playing nuances. It is shown that the control system is feasible when a regularization is performed to limit the electrical power required by each loudspeaker placed in the bell axis. Adding a regularization term reduces the control efficiency for frequencies lower than 300 Hz.

A future work is the implementation of a real time external control and a study of an internal control mounted on a mute.