



HAL
open science

Etude d'une sourdine passive et active pour trompette simplifiée

Christophe Ayrault, A Bonnet, C Corno, Manuel Melon, Bruno Gazengel

► **To cite this version:**

Christophe Ayrault, A Bonnet, C Corno, Manuel Melon, Bruno Gazengel. Etude d'une sourdine passive et active pour trompette simplifiée. Congrès Français d'Acoustique, Apr 2018, Le Havre, France. hal-01877799

HAL Id: hal-01877799

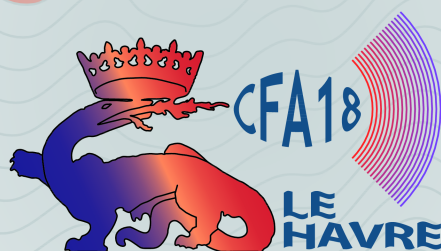
<https://hal.science/hal-01877799v1>

Submitted on 20 Sep 2018

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.

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Étude d'une sourdine passive et active pour trompette simplifiée

C. Ayrault^a, A. Bonnet^a, C. Corno^a, M. Melon^b et B. Gazengel^c

^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085
cedex 09 Le Mans, France

^bLAUM UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72000 Le Mans, France

^cLAUM, Avenue O Messiaen, 72000 Le Mans, France
manuel.melon@univ-lemans.fr

Afin de diminuer le niveau sonore émis, les instruments de type cuivre utilisent un ensemble de sourdines qui modifient le timbre, la facilité de jeu et la justesse de l'instrument. Ces modifications peuvent être considérées comme des qualités musicales mais aussi des défauts qu'il conviendrait de corriger. Une solution envisagée est d'utiliser une sourdine passive dans laquelle est installé un microphone, connecté à un amplificateur et à un casque. De fait le musicien peut jouer à un niveau sonore faible et modifier le son perçu à l'aide d'un traitement de signal. Cependant la facilité d'émission et la justesse restent affectées par la présence de la sourdine. Une deuxième solution est de considérer une sourdine active réalisée à l'aide d'une sourdine passive équipée de transducteurs placés à l'intérieur ou à l'extérieur de l'instrument pour contrôler la puissance acoustique rayonnée et l'impédance d'entrée de l'instrument. Ce travail s'intéresse à une sourdine active montée dans le pavillon d'une trompette simplifiée (tube cylindrique connecté à un pavillon exponentiel). La sourdine est équipée de six haut-parleurs de petite taille montés en couronne. Dans un premier temps, l'impédance d'entrée de l'instrument est mesurée et calculée (par modèles d'ondes planes et par méthode d'éléments de frontières) pour différentes configurations (instrument seul, instrument avec sourdine passive, instrument avec sourdine équipée de haut-parleurs). Le modèle prédictif est validé par comparaison avec la mesure. Dans un deuxième temps, la réponse des sources secondaires (haut-parleurs montés en sourdine) est mesurée et calculée à l'entrée de l'instrument, ce qui permet de valider le modèle de comportement des haut-parleurs. Ces différents modèles permettent de prédire l'impédance d'entrée et la pression acoustique, qui existerait en présence d'un contrôle actif optimal. L'impact de ce contrôle sur l'impédance d'entrée est faible en fréquence et en amplitude quand le contrôle vise à diminuer le niveau rayonné. La réponse de l'instrument n'est donc que très peu modifiée par le contrôle. Il en va de même en fréquence quand le contrôle vise à augmenter le niveau rayonné sauf pour les pics d'impédance, dont le niveau augmente fortement rendant ainsi l'instrument plus facile à jouer.

1 Introduction

Les instruments de type cuivre utilisent, pour diminuer le niveau sonore, un ensemble de sourdines passives pour atténuer le niveau sonore émis ou des sourdines amplifiées qui permettent d'écouter un signal sonore modifié par un traitement du signal [1]. Chacun de ces systèmes modifient le timbre, la facilité de jeu et la justesse de l'instrument en jouant en particulier sur l'impédance d'entrée [2, 3].

Il est alors possible d'essayer de contrôler le son rayonné par l'instrument à l'aide d'un système de contrôle actif [4]. Cette technique permet a priori d'ajuster les paramètres de manière à obtenir le type de sourdine souhaité (niveau sonore ou timbre) sans altérer la justesse, ni la facilité d'émission. Si cette sourdine active ouvre en théorie un grand nombre de possibilités, elle n'est aujourd'hui pas commercialisée, du fait des difficultés de mise en œuvre.

Les travaux réalisés sur ce sujet ont débuté à la fin des années 1990 avec Pickett [5]. Celui-ci tente de réduire le niveau sonore émis par une trompette en plaçant un haut-parleur au niveau de l'embouchure. Le dispositif expérimental est relativement lourd et peu adapté pour une application musicale. Plus récemment, Meurisse *et al* proposent de modifier une sourdine de trombone à l'aide d'un contrôle actif par rétroaction pour corriger le défaut de la sourdine aux basses fréquences [6]. Le dispositif mis en place s'avère efficace lorsqu'il est joué par un musicien. Ce système est utilisé par Velut *et al* [7] pour étudier la note pédale du trombone. Ce dispositif permet de corriger un défaut particulier dû à la sourdine passive aux basses fréquences et modifie l'impédance d'entrée. Néanmoins, l'effet du contrôle actif sur le niveau sonore global et sur la directivité n'est *a priori* pas connu. Un contrôle actif appliqué à l'extérieur du pavillon a été étudié par Ayrault *et al* [8]. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire la puissance acoustique rayonnée en jouant sur la directivité de l'instrument. Ce type de contrôle a peu d'influence sur l'impédance d'entrée et sur la fréquence de résonance des maximums de l'impédance. Il apparaît qu'un contrôle mixte, alliant contrôle interne et externe pourrait

être intéressant pour contrôler à la fois l'impédance d'entrée, la puissance rayonnée et la directivité.

Ce travail s'intéresse au contrôle actif du son rayonné par une trompette simplifiée en utilisant une sourdine passive munie de haut-parleurs. Le but ici n'est pas de corriger un défaut de la sourdine mais d'évaluer la possibilité d'atténuer ou d'amplifier le niveau sonore émis par l'instrument et d'en mesurer l'impact sur l'impédance d'entrée de l'instrument. Le principe de ce travail est d'étudier par modélisation l'effet d'un contrôle actif sur l'impédance d'entrée et la pression rayonnée dans l'axe de l'instrument.

Dans un premier temps, le système étudié est présenté et les indicateurs étudiés définis. Les modèles prédictifs (impédance, pression rayonnée) sont ensuite validés par comparaison avec des mesures réalisées dans différentes configurations. Ces modèles sont finalement utilisés pour évaluer l'influence de la sourdine et du contrôle sur la pression rayonnée dans l'axe et l'impédance d'entrée.

2 Système étudié

2.1 Description

Le système étudié est composé d'une trompette simplifiée et d'une sourdine (figure 1). La trompette simplifiée est réalisée grâce à un cylindrique de longueur 43 cm et de diamètre intérieur 2,6 cm connecté à un pavillon de longueur 13 cm et de diamètre de sortie proche de 14,5 cm (correspondant à une surface variable $S(x) = S_0 e^{mx}$ avec S_0 la surface initiale, x l'axe du pavillon et $m \approx 26 \text{ m}^{-1}$).

Le prototype réalisé est présenté à la figure 2. Il comprend le résonateur et la sourdine sur laquelle sont disposés six haut-parleurs. Ces haut-parleurs peuvent être remplacés par des bouchons rigides.

Le système est excité à l'entrée du tube par une source quelconque de débit donné appelée source primaire. Le système de contrôle est constitué de six haut-parleurs EKULIT LSF-23M/NT connectés en série-parallèle (2 systèmes de 3 haut-parleurs en série) appelés sources secondaires.

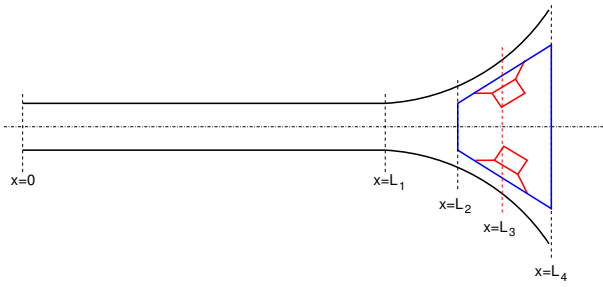


FIGURE 1 – Principe de la trompette simplifiée et de la sourdine (vue en coupe).

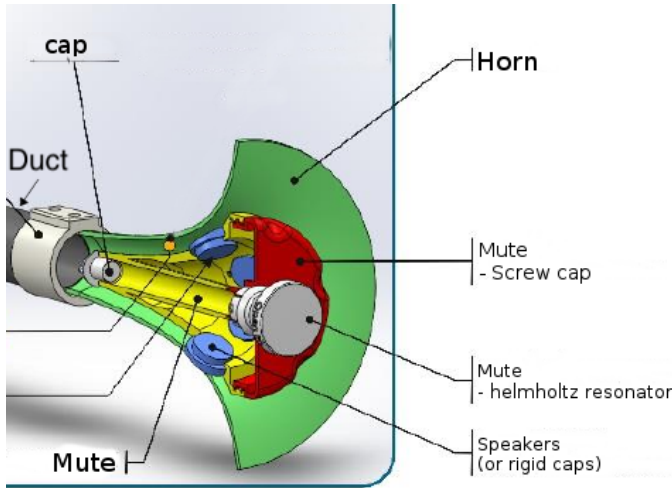


FIGURE 2 – Schéma détaillé du pavillon et de la sourdine en coupe (issu de [9]).

2.2 Modèle

Le principe de superposition est utilisé : la pression à l'entrée du guide (idem pour la pression rayonnée) en présence de la source primaire et des sources secondaires est la somme de la pression due à la source primaire seule et aux sources secondaires seules avec une entrée supposée rigide (figure 3). Les indicateurs physiques étudiés calculés dans les configurations de la figure 3 sont définis comme suit :

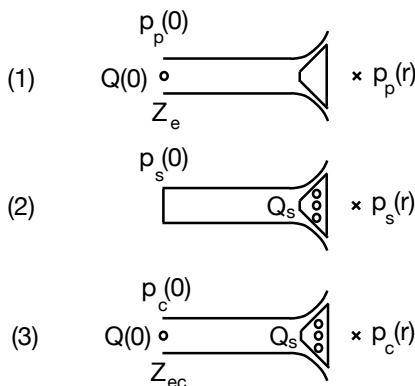


FIGURE 3 – Schéma des configurations utilisées pour les modèles de calcul de l'impédance d'entrée et de la pression rayonnée.

1. Pour le système passif (les haut-parleurs sont remplacés par des bouchons, figure 3-1)

- l'impédance d'entrée du guide d'onde $Z_e = \frac{p_p(0)}{Q(0)}$ où $p_p(0)$ et $Q(0)$ sont respectivement la pression due à la source primaire et au résonateur et le débit acoustique de la source primaire (indice p) à l'entrée du résonateur ($x = 0$).

- la réponse en pression externe (indice e) à une distance r due à la source d'accélération volumique à l'entrée $A(0) = j\omega Q(0)$, $H_{ep}(r) = \frac{p_p(r)}{A(0)}$.

2. Pour le système avec les haut-parleurs secondaires (indice s ; l'entrée du guide est supposée parfaitement rigide, figure 3-2)

- la réponse en pression interne (indice i) due aux haut-parleurs à l'entrée du guide d'onde $H_{is}(0) = \frac{p_s(0)}{U_s}$, où U_s est la tension d'alimentation pour l'ensemble des haut-parleurs.

- la réponse en pression externe à une distance r due aux haut-parleurs $H_{es}(r) = \frac{p_s(r)}{U_s}$.

3. Pour le système complet (figure 3-3)

- l'impédance d'entrée du guide d'onde $Z_{ec} = \frac{p_c(0)}{Q(0)}$ où $p_c(0) = p_p(0) + p_s(0)$ est la pression à l'entrée du résonateur ($x = 0$) en présence de contrôle.

- la réponse en pression externe à une distance r due à la source d'accélération volumique à l'entrée $A(0)$, $H_e(r) = \frac{p_c(r)}{A(0)}$ où $p_c(r) = p_p(r) + p_s(r)$ est la pression à une distance r en présence de contrôle.

2.3 Principe du contrôle

Le contrôle vise ici à réduire le niveau de pression acoustique rayonnée dans l'axe de l'instrument. L'objectif est d'atteindre

$$p_c(r) = G p_p(r), \quad (1)$$

où G est un gain (inférieur à 1). La tension appliquée aux haut-parleurs est alors définie par :

$$U_c = (G - 1) \frac{H_{ep}}{H_{es}} A(0). \quad (2)$$

L'impédance d'entrée du résonateur s'écrit

$$Z_{ec}(r) = \frac{p_p(0) + p_s(0)}{Q(0)} = Z_e + j\omega \frac{p_s(0)}{A(0)}, \quad (3)$$

ce qui conduit alors à

$$Z_{ec} = Z_e + j\omega H_{is}(0)(G - 1) \frac{H_{ep}}{H_{es}}. \quad (4)$$

De façon à ne faire travailler les haut-parleurs que dans une gamme de fréquence particulière, le gain G est défini par

$$G = \frac{G_1 G_2}{G_0}, \quad (5)$$

où G_0 est le gain dans la bande passante et G_1 et G_2 sont des fonctions sigmoïdes définies par les fréquences de coupure f_1 et f_2 .

Dans ce travail, aucun système de contrôle actif fonctionnant en temps réel n'est utilisé. L'étude de l'effet du contrôle est réalisé uniquement par simulation de façon à obtenir les limites du contrôle optimal.

3 Outils et méthodes

3.1 Modèle du système

L'objectif de la modélisation est de prédire l'impédance d'entrée de la trompette simplifiée, et la pression rayonnée dans l'axe à 1 mètre.

Dans un premier temps, nous faisons l'hypothèse d'une propagation en ondes planes et utilisons le formalisme des matrices de transfert (en pratique le logiciel Akabak [10] est utilisé pour calculer l'impédance d'entrée). Dans ce cas, la géométrie équivalente au système en présence de la sourdine est celle présentée à la figure 4. Le comportement des transducteurs est représenté à l'aide de modèle à constantes localisées classiques [11].

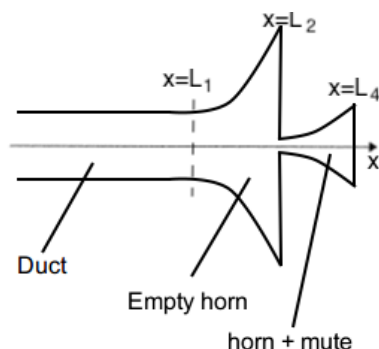


FIGURE 4 – Géométrie équivalente au système en présence de la sourdine (issu de [12]).

3.2 Caractérisation expérimentale

3.2.1 Résonateur

La mesure de l'impédance acoustique d'entrée du système est réalisée à l'aide d'un capteur d'impédance développé en partenariat avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), le Centre de Transfert de Technologies du Mans (CTTM) et le Laboratoire d'Acoustique et de Mécanique (LMA) [13].

Un exemple de mesure d'impédance est présenté à la figure 5 avec et sans sourdine. L'influence de la sourdine est clairement visible. Elle a pour effet de décaler les fréquences de résonance vers les basses fréquences (le résonateur joue plus bas) et d'augmenter les pertes (le résonateur est plus difficile à jouer). Un tel décalage des maximums des impédances d'entrée mesurées sans et avec sourdine est dû au fait que la sourdine n'est pas optimisée et n'est pas forcément visible sur les sourdines du commerce.

La phase de l'impédance mesurée montre des accidents au voisinage des minimums d'impédance dus à un mauvais étalonnage du capteur d'impédance.

En ce qui concerne la mesure de la réponse en pression, celle-ci est réalisée au sein de la salle anéchoïque du LAUM (fréquence de coupure de l'ordre de 100 Hz) à l'aide d'un microphone 1/4 pouce Bruel & Kjaer placé à une distance de 1 mètre dans l'axe du pavillon.

3.2.2 Haut-parleurs

Les paramètres de Thiele & Small des haut-parleurs sont caractérisés en mesurant l'impédance électrique des

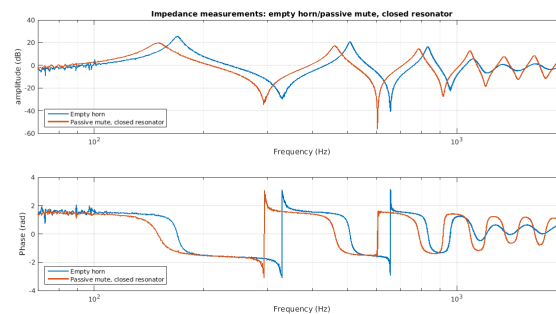


FIGURE 5 – impédance d'entrée mesurée dans deux configurations : sans sourdine, avec sourdine (résonateur de Helmholtz fermé (voir figure 2)).

haut-parleurs rayonnant en espace infini et couplés à un volume connu. Ces deux mesures permettent d'estimer les paramètres électriques (résistance, inductance) et les paramètres mécaniques (fréquence de résonance, facteurs de qualité, souplesse mécanique). Par ailleurs, la réponse en pression dans ce volume est mesurée pour estimer le facteur de force.

4 Résultats

4.1 Efficacité des modèles

L'objectif de cette partie est de valider les modèles utilisés pour prédire le comportement de la sourdine active.

4.1.1 Sourdine sans haut-parleurs

Le système étudié est ici le guide d'ondes seul ou équipé de la sourdine. Dans ce cas, les haut-parleurs ne sont pas montés sur la sourdine et sont remplacés par des bouchons rigides. Les impédances d'entrée calculées (logiciel Akabak) sont comparées aux impédances mesurées (cf. §3.2).

La figure 6 présente les impédances d'entrée calculée et mesurée pour le guide d'onde seul (sans sourdine). L'accord entre les deux courbes est bon même si l'écart est plus élevé en haute fréquence du fait de la discrétisation de la géométrie en seulement dix éléments. Une discrétisation plus fine permettrait *a priori* d'améliorer le calcul de l'impédance aux hautes fréquences.

La figure 7 présente les impédances d'entrées calculée et mesurée pour le guide d'onde équipé de la sourdine rigide. L'accord entre mesure et modèle est bon pour le premier maximum de l'impédance mais montre un plus grand écart pour les maximums d'ordre supérieur. Cet écart est *a priori* dû à une description géométrique de la sourdine insuffisante. Néanmoins, ces comparaisons nous permettent de valider le modèle d'impédance d'entrée réalisé à l'aide du logiciel Akabak.

4.1.2 Sourdine avec haut-parleurs actifs

Le système étudié est ici le guide d'onde fermé à son entrée, équipé de la sourdine sur laquelle sont placés les six haut-parleurs. La réponse des haut-parleurs (pression à l'entrée du guide d'onde / tension aux bornes des haut-parleurs) est calculée dans ce cas particulier à l'aide du

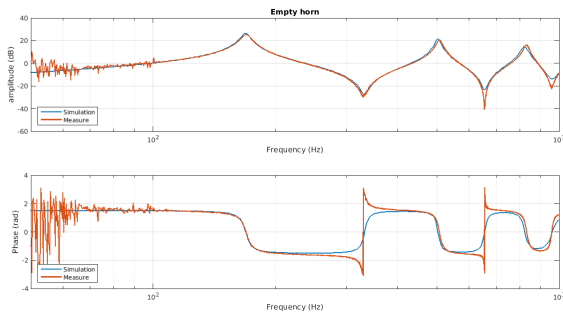


FIGURE 6 – Impédances d'entrée calculée (Akabak) et mesurée pour le résonateur sans sourdine (issu de [12]).

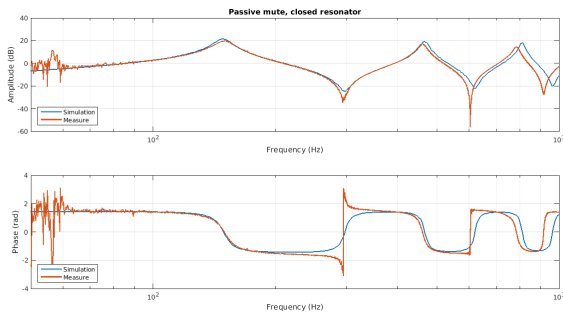


FIGURE 7 – Impédances d'entrée calculées (Akabak) et mesurée en présence de la sourdine (issu de [12]).

logiciel d'éléments de frontière ABEC puis comparée à celle mesurée.

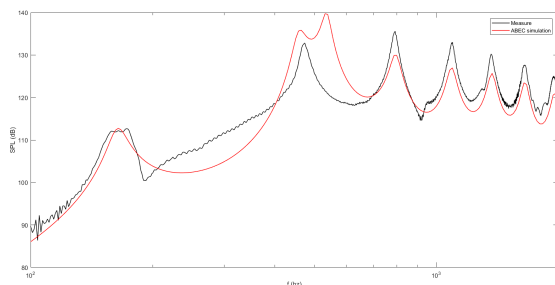


FIGURE 8 – Réponse en pression des haut-parleurs à l'entrée du résonateur. Comparaison entre simulation (ABEC) et mesure (issu de [12]).

La figure 8 montre le niveau de pression obtenu pour une tension de 1 volt appliquée aux haut-parleurs. Le modèle prédictif est proche de la mesure aux basses fréquences (environ 150 Hz). Aux fréquences de résonance du conduit plus élevées, le modèle sous-estime l'amplitude de la réponse. Enfin au voisinage de 500 Hz, le modèle introduit un biais inexplicable dans le calcul de la pression existant à l'entrée du guide d'onde. Néanmoins, nous considérons que le modèle prédictif est suffisant pour étudier le comportement du système en présence de contrôle.

5 Effet attendu du contrôle actif

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'effet d'un contrôle actif par simulation. On s'intéresse ici à l'impédance d'entrée du résonateur et à la pression rayonnée à 1 mètre

dans l'axe. Dans ce cas, les six haut-parleurs sont branchés en série-parallèle (2 branches de 3 haut-parleurs connectés en série). A titre d'exemple, le gain G (équation 5) est fixé ici à 0,5 (atténuation de 6 dB) dans une bande fréquentielle définie par les sigmoïdes G_1 et G_2 en fonction de la bande passante des haut-parleurs utilisés dans l'étude expérimentale ([200 - 2000] Hz à -10 dB). L'allure du gain G est présenté sur la figure 9. Considérant une accélération volumique $A(0) = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, la tension optimale appliquée aux haut-parleurs est présentée à la figure 10. Considérant ce résultat, la tension efficace appliquée à l'ensemble des haut-parleurs est de 5,1 Volts RMS (si le signal appliqué au résonateur est composé uniquement des fréquences correspondant aux maximums de la tension de contrôle), soit 0,36 W par haut-parleur. A titre d'exemple, les haut-parleurs utilisés dans cette étude supportent au plus 0,2 W. Se pose donc ici la problématique de transducteurs suffisamment puissants pour un poids et un encombrement faibles. On observe également des sauts de phase de π à chaque résonance indiquant la mise en opposition de phase des sources secondaires vis-à-vis du système source primaire - résonateur.

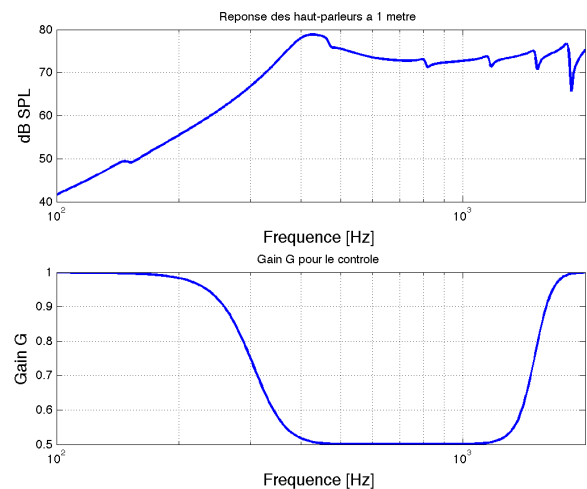


FIGURE 9 – Réponse à 1 m des haut-parleurs montés sur la sourdine (haut); gain G appliqué au contrôle (bas) avec $G_0 = 0,5$, fréquences de coupure $f_1 = 300 \text{ Hz}$ et $f_2 = 1500 \text{ Hz}$, paramètres de la sigmoïde $\lambda_1 = \frac{10}{f_1}$ et $\lambda_2 = \frac{20}{f_2}$

5.1 Pression rayonnée

La pression rayonnée à 1 mètre sans contrôle ($G_0 = 1$) et avec contrôle, pour $G_0 = 0,1$ et $G_0 = 10$ (pour exemple même si l'objectif est d'atténuer la pression primaire), est donnée sur la figure 11. On vérifie bien les gains de $\pm 20 \text{ dB}$ dans la gamme fréquentielle d'action du contrôle.

5.2 Impédance d'entrée

L'impact de ce contrôle sur l'impédance est montré sur la figure 12. Le contrôle visant à diminuer le niveau sonore a un impact très faible sur celle-ci. Pour $G_0 = 0,1$, le deuxième pic de résonance situé à $f_2 = 466 \text{ Hz}$ voit la fréquence f_2' chuter d'au plus 3 Hz (pour une résolution fréquentielle de 0,6 Hz), ce qui correspond à un intervalle de 10 cents au plus ($1200 \frac{\log(f_2/f_2')}{\log(2)}$). Pour $G_0 = 0,5$, l'écart se réduit à 3 cents

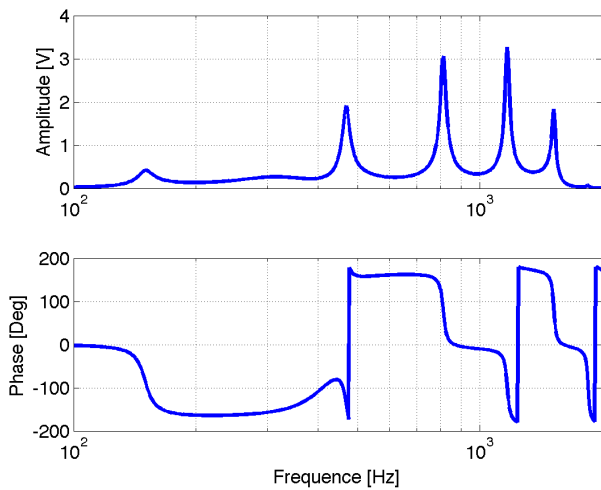


FIGURE 10 – Tension optimale appliquée aux haut-parleurs (la référence de phase est l'accélération volumique d'entrée) pour $G_0 = 0.5$.

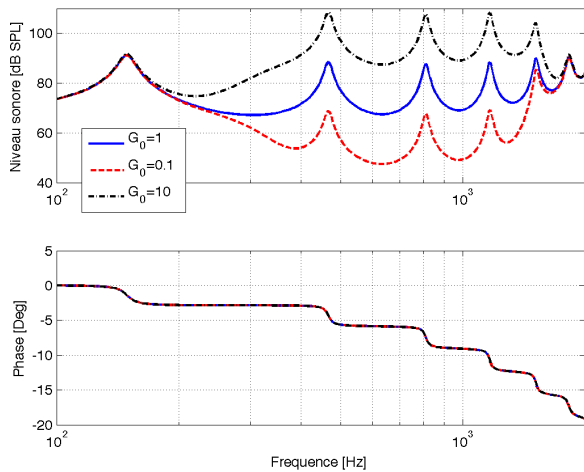


FIGURE 11 – Niveau sonore à 1 mètre dans l'axe sans contrôle ($G_0 = 1$), et avec contrôle pour des gains $G_0 = 0.1$ et $G_0 = 10$.

environ. D'autre part, l'amplitude des pics d'impédance est modifiée de moins de 0,5 dB. L'impact d'un contrôle pour diminuer le champ rayonné, sur l'impédance d'entrée, est donc très faible.

En revanche, quand le contrôle vise à augmenter le niveau sonore, on observe un impact beaucoup plus important, notamment sur le niveau des pics d'impédance. La figure 13 montre un zoom sur le deuxième pic d'impédance vers 466 Hz. Le décalage en fréquence est de 3 Hz, soit 10 cents, ce qui reste faible, tandis que le niveau du pic d'impédance augmente quant à lui très significativement (7,5 dB), rendant de la sorte l'instrument plus facile à jouer. Ceci s'explique par le fait que, pour rayonner plus fortement (pour un rayonnement identique en sortie de pavillon), il faut favoriser la réponse du tube qui est caractérisée par l'amplitude des pics d'impédance.

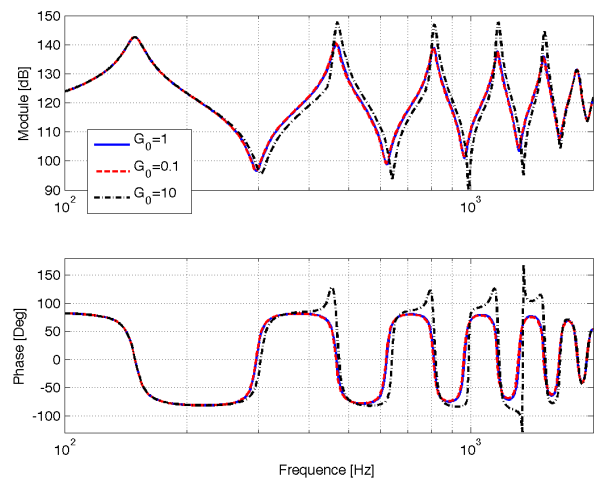


FIGURE 12 – Impédance d'entrée sans ($G_0 = 1$) et avec contrôle ($G_0 = 0.1$ et $G_0 = 10$).

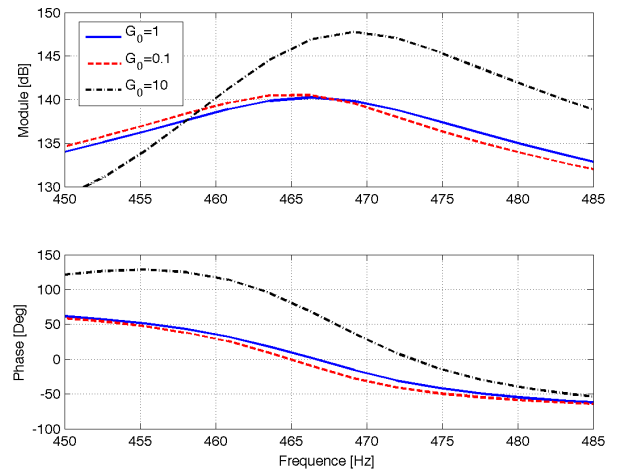


FIGURE 13 – Zoom sur le second pic de l'impédance d'entrée à 466 Hz, sans ($G_0 = 1$) et avec contrôle ($G_0 = 0.1$ et $G_0 = 10$).

6 Conclusion

Dans ce travail, la simulation d'un contrôle optimal sur la pression rayonnée par un guide d'onde avec pavillon munie d'une sourdine équipée de 6 haut-parleurs miniatures de contrôle et de son impact sur l'impédance d'entrée a été réalisée.

La simulation a été menée à bien grâce au principe de superposition des contributions de la source primaire et des sources secondaires de contrôle. Les fonctions de transfert nécessaires ont été calculées avec le logiciel objet Akabak et le champ interne a été calculé dans un cas particulier avec le logiciel d'éléments de frontière ABEC. Le modèle a été validé par comparaison des simulations et des mesures de la pression rayonnée et des impédances d'entrée avec ou sans sourdine.

La tension de contrôle nécessaire, fonction des paramètres de Thiele & Small des haut-parleurs, a été étudiée pour un gain variable dans une bande fréquentielle dépendant de la bande passante des haut-parleurs.

Les résultats obtenus permettent de vérifier que la pression rayonnée diminue ou augmente, conformément

au gain choisi, respectivement inférieur ou supérieur à 1. L'impact de ce contrôle sur les pics d'impédance est faible en fréquence (diminution de moins de 10 cents) et très faible en niveau (augmentation de moins de 0,5 dB) quand le contrôle vise à diminuer le niveau rayonné de 20 dB. La réponse de l'instrument n'est donc que très peu modifiée par le contrôle. Il en va de même en fréquence quand le contrôle vise à augmenter le niveau rayonné de 20 dB. Cependant, dans ce cas, le niveau des pics d'impédance augmente très fortement (de l'ordre de 10 dB), rendant ainsi l'instrument plus facile à jouer.

L'étude menée ici a montré l'intérêt d'une sourdine active aussi bien pour l'atténuation du son rayonné que pour la modification du timbre de l'instrument. Cependant, la réalisation pratique de cette sourdine est conditionnée à l'utilisation de haut-parleurs légers pouvant supporter une forte puissance d'entrée. Ainsi, la détermination des caractéristiques optimales des sources de contrôle et de leur design associé devrait faire l'objet des perspectives de cette étude.

Références

- [1] Kazuo Murakami. Designing and making musical instruments to form sounds. *Acoustical science and technology*, 26(3) :285–288, 2005.
- [2] J. Backus. Input impedance curves for the brass instruments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 60(2) :470–480, 1976.
- [3] C. Macías, I. Rabadán, and I. Servín. Analysis of the variations in frequency for a trumpet b-flat to use “mute”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(4) :2282–2282, 2010.
- [4] G. Mangiante. Contrôle actif des bruits – bases théoriques. *Techniques de l'ingénieur*, 2008.
- [5] P. B. Pickett. *An Investigation of Active Tonal Spectrum Control as Applied to the Modern Trumpet*. phdthesis, 1998. Master's thesis, VPISU-USA.
- [6] T. Meurisse, A. Mamou-Mani, R. Caussé, B. Sluchin, and D.B. Sharp. An active mute for the trombone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(6) :3539–3548, 2015.
- [7] Lionel Velut, Christophe Vergez, and Joël Gilbert. Physical modelling of trombone mutes, the pedal note issue. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4) :668–675, 2017.
- [8] C. Ayrault, Thomas Laurence, M. Melon, and B. Gazengel. Effet d'un contrôle actif sur l'impédance de rayonnement d'un guide. In *CFA/VISHNO Le Mans*, 2016.
- [9] A. Lemarchand, C. Jost, A. Angermuller, G. Raybaud, and A. Bonnet. Projet sourdine active. Rapport de projet ENSIM 4A, Le Mans Université, 2016.
- [10] R&D Team. Akabak, lumped element simulator for loudspeaker design, consulté le 19 mars 2018.
- [11] Pierrick Lotton, Hervé Lissek, and Manuel Melon. [Analyse de réseaux électro-mécano-acoustiques](#), Cours en ligne “Electroacoustique”, consulté le 19 mars 2018.
- [12] C. Corno and A. Bonnet. Characterisation of a trumpet mute. Rapport de projet IMDEA, Le Mans Université, 2017.
- [13] JC Le Roux, M. Pachebat, and J.P. Dalmont. Un capteur de nouvelle génération pour la mesure d'impédance acoustique en contexte industriel. *Acoustique et Techniques*, 2012.