



Étude de l'effet de terminaisons rigides, réactives et active sur l'impédance de rayonnement d'un tuyau sonore

B. Gazengel^a et J. Panzer^b

^aLAUM CNRS UMR 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

^bR&D Team, Raiffeisenstr. 5, D-87775 Salgen, Allemagne
bruno.gazengel@univ-lemans.fr

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une démarche qui vise à comprendre l'effet d'une modification ajoutée à l'extrémité d'un tuyau sonore de façon à réduire le niveau sonore émis sans modifier considérablement les propriétés acoustiques internes du conduit. Les modifications pouvant être introduites à l'extrémité du conduit sont des obstacles rigides de plus ou moins grandes dimensions, des obstacles résonants comme par exemple un haut-parleur (ou un tampon de saxophone) et enfin un système de contrôle actif. Le travail réalisé se propose d'observer expérimentalement et à l'aide de simulations numériques l'effet de telles terminaisons sur l'impédance de rayonnement du conduit. L'expérience réalisée utilise un tube cylindrique dont on mesure l'impédance d'entrée de façon à estimer l'impédance de rayonnement. Cette expérience est conduite pour les trois cas cités, à savoir différentes terminaisons rigides, un haut-parleur seul ou en chargé par un enceinte close et connecté à différentes charges électriques, et enfin un système de contrôle actif fonctionnant en boucle de rétroaction élémentaire. Les résultats obtenus montrent l'effet de telles terminaisons sur les parties réelles et imaginaires de l'impédance de rayonnement.

1 Introduction

Le contrôle du bruit rayonné par les guides d'ondes est une préoccupation majeure dans de nombreux cas industriels, mais aussi pour limiter le niveau sonore des d'instruments de musique (effet sourdine). Dans les deux cas, il y a présence d'un écoulement dans le guide et l'on souhaite réduire la puissance acoustique rayonnée par le guide sans modifier la nature de l'écoulement. Les solutions mises en oeuvre actuellement peuvent se classer comme suit :

- Solutions passives : utilisation de matériaux absorbants permettant de réaliser des silencieux qui dissipent l'énergie acoustique en chaleur [1].
- Solutions réactives : utilisation de résonateurs placés dans les guides d'ondes. Ces résonateurs (Helmholtz par exemple) permettent de localiser l'énergie dans le résonateur à une fréquence particulière [2, 3]. On voit apparaître aujourd'hui des résonateurs accordables mettant en oeuvre des transducteurs électroacoustiques utilisés comme des systèmes réglables grâce à la charge électrique utilisée [4].
- Solutions actives : utilisations de systèmes de contrôle actif (par anticipation ou par rétroaction) qui permettent un contrôle aux basses fréquences [5].
- Solutions mixtes : utilisation de systèmes de contrôle actif associés à des traitements passifs [6, 7]

Pour l'ensemble des solutions industrielles, le problème principal est la réduction du niveau sonore de l'élément considéré. Les solutions mises en oeuvre sont des systèmes de réduction de bruit qui peuvent être placés à demeure dans les guides d'ondes.

Dans le cas des instruments de musique, le problème est un peu plus complexe dans la mesure où il souhaitable de réduire le niveau sonore sans altérer les valeurs des fréquences propres du guide ou le facteur de qualité associé à ces fréquences. Le système idéal de sourdine pour instruments de musique serait donc un dispositif à placer à la sortie de l'instrument (sur le pavillon), dispositif qui ne modifierait en aucun cas l'impédance d'entrée de l'instrument mais qui permettrait de réduire la puissance acoustique rayonnée. Un tel dispositif pourrait bien sûr en outre être appliqué à des systèmes industriels (bouches de conduits).

2 Position du problème

On considère un guide excité par un source et rayonnant dans un espace infini (figure 1).

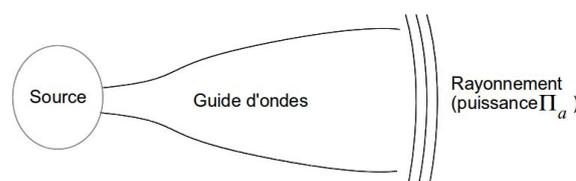


FIGURE 1 – Principe du système acoustique.

La puissance acoustique rayonnée par le conduit est donnée par

$$\Pi_a = \Re(Z_r) |w_s|^2, \quad (1)$$

où Z_r est l'impédance de rayonnement du guide et w_s le débit acoustique efficace en sortie.

La réduction la puissance acoustique rayonnée nécessite soit de réduire le débit de sortie soit de modifier la partie réelle de l'impédance de rayonnement. L'ajout d'un dispositif placé en sortie de guide (figure 2) pourrait permettre une modification de la partie réelle pour obtenir une nouvelle puissance rayonnée,

$$\Pi_{at} = \Re(Z_{rt}) |w_{st}|^2, \quad (2)$$

où Z_{rt} est l'impédance de rayonnement en présence de la terminaison et w_{st} est le débit acoustique efficace en sortie en présence de terminaison. Bien sûr la terminaison, si elle affecte l'impédance de sortie, affecte l'impédance d'entrée du conduit et ainsi le couplage avec la source dans le cas d'oscillations forcées et *a priori* pour des auto-oscillations. Ainsi, le débit en sortie peut être modifié également par la présence de la terminaison.

La présence de la terminaison pourrait aussi bien sûr modifier la partie imaginaire de l'impédance de rayonnement, c'est à dire la correction de longueur associée au guide, et ainsi les fréquences de résonance du guide d'onde. Ceci a pour un effet une modification de la coloration du bruit dans un cas industriel et une modification drastique de la justesse et de la facilité d'émission pour un instrument de musique. Cet effet est actuellement bien connu pour les sourdines de trompettes [8, 9].

Dans ce cadre, l'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'impact de différentes terminaisons sur les parties réelle et imaginaire de l'impédance de rayonnement ainsi que sur la pression acoustique rayonnée dans l'axe du guide.

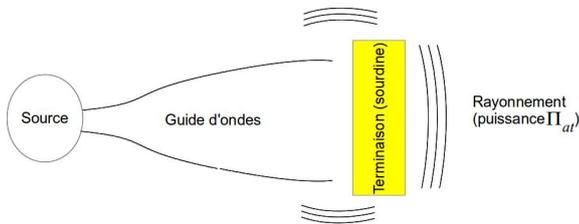


FIGURE 2 – Principe du système acoustique avec terminaison visant à réduire la puissance acoustique émise.

3 Système étudié

3.1 Guide et terminaisons

Le système étudié est constitué d'un tube cylindrique excité par un haut-parleur. La terminaison du tube est réalisée grâce à l'un des éléments suivants :

- un disque placé devant la sortie du guide d'onde, ce pour différentes distances (figure 3),
- un haut-parleur placé devant la sortie du guide d'onde et connecté à différentes charges électriques (figure 4),
- un système élémentaire de contrôle actif en rétroaction utilisant un microphone connecté en opposition de phase à un haut-parleur (figure 5), placé devant la sortie du guide d'onde.

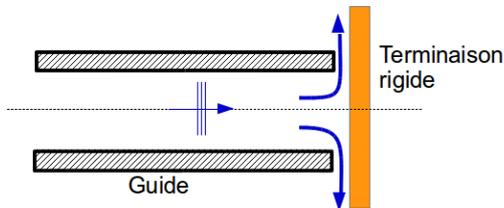


FIGURE 3 – Principe du système étudié.

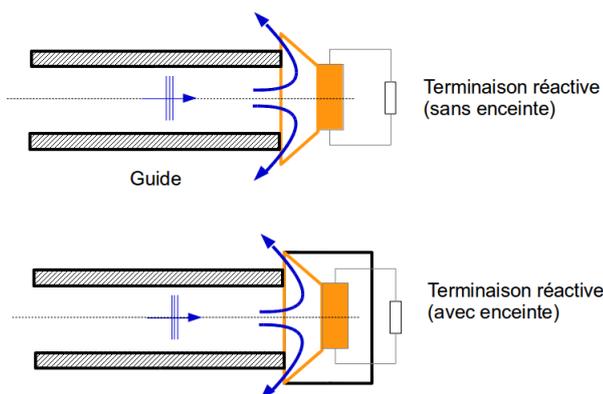


FIGURE 4 – Configurations utilisées pour l'étude en présence de la terminaison réactive.

Les paramètres permettant de modifier l'impédance de rayonnement du tube sont

- Le diamètre du disque placé devant le guide. Trois diamètres sont étudiés (40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm).

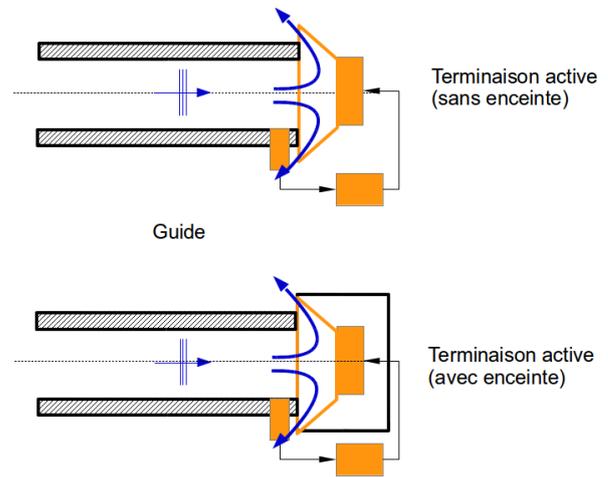


FIGURE 5 – Configurations utilisées pour l'étude en présence de la terminaison active.

- La distance entre le disque et l'extrémité du tube. Deux distances sont étudiées (2mm, 5 mm).
- Le type de charge acoustique du haut-parleur. Le haut-parleur est ici monté d'une part dans une enceinte close, d'autre part sans enceinte.
- Le type de charge électrique du haut-parleur. Pour le système d'absorption "réactif" (figure 4), le haut-parleur peut être branché en circuit ouvert ou en court-circuit.

Pour chacune de ces configurations, le diamètre interne du guide d'onde est 33 mm, son diamètre externe est 40 mm. Les configurations utilisées pour la terminaison rigide sont présentées à la figure 6.

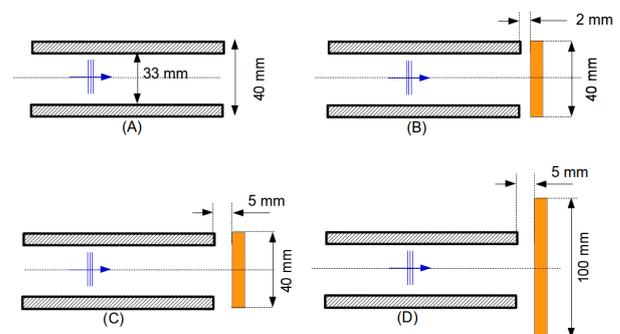


FIGURE 6 – Configurations utilisées pour la terminaison rigide.

3.2 Modèle de l'impédance de rayonnement

Pour chacun des cas présentés ci-dessus, nous faisons l'hypothèse que l'impédance de rayonnement Z_r peut s'écrire

$$Z_r = Z_c [\alpha(ka)^2 + j\beta ka], \quad (3)$$

où Z_c est l'impédance caractéristique, k le nombre d'onde et a le rayon interne du tube. Ce modèle est valide pour $ka < 1$, ce qui limite l'étude à une fréquence de 3300 Hz environ pour l'expérience utilisée dans ce travail.

3.3 Système de mesure

L'objectif est ici d'estimer l'impédance de rayonnement du tube (parties réelle et imaginaire) ainsi que la perte par insertion due à la présence de la terminaison.

3.3.1 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée du guide est mesurée à l'aide d'un capteur d'impédance développé au laboratoire en collaboration avec le Centre de Transfert de Technologies du Mans [10]. Ce capteur permet notamment d'estimer l'influence de la terminaison sur les fréquences de résonance du guide.

3.3.2 Impédance de rayonnement

Un doublet microphonique (espacement 35 mm) dont le centre est placé à 27 mm de la sortie du guide permet d'estimer l'impédance de rayonnement grâce à un modèle de propagation en ondes planes prenant en compte les effets viscothermiques. La validation de cette mesure est présentée au §3.4.

3.3.3 Perte par insertion

L'effet de la terminaison sur la pression acoustique rayonnée dans l'axe (distance 1 mètre) est caractérisé par la perte par insertion PI définie par

$$PI = L_p - L_{pt}, \quad (4)$$

où L_p et L_{pt} sont respectivement les niveaux sonores mesurés sans terminaison et avec terminaison dans l'axe du guide à une distance de 1 mètre en salle anéchoïque.

3.4 Vérification du système de mesure

De façon à s'assurer que le système de mesure d'impédance ne conduit pas à des résultats aberrants, l'impédance d'entrée et l'impédance de rayonnement d'un guide droit ont été mesurées à l'aide des deux dispositifs présentés ci dessus (§3.3.1 et §3.3.2). La mesure a été réalisée dans une salle quelconque (non anéchoïque).

La figure 7 montre que la partie réelle de l'impédance de rayonnement est bien estimée par les deux méthodes entre 1000 et 3000 Hz. La valeur de β obtenue par la méthode du doublet microphonique surestime la valeur théorique (masse de rayonnement). La mesure d'impédance d'entrée estime correctement cette valeur avec néanmoins des oscillations pouvant être dues à une mauvaise estimation de la température. On voit ici la difficulté à mesurer précisément la masse de rayonnement. Par ailleurs, la valeur exacte de l'impédance de rayonnement devrait prendre en compte la l'épaisseur du guide comme montré par [12].

Pour la suite, les impédances de rayonnement sont estimées à partir de l'impédance d'entrée.

4 Etude de l'effet des terminaisons

Les différentes terminaisons décrites au §3.1 sont étudiées expérimentalement à l'aide du dispositif de mesure décrit au §3.3. La terminaison rigide est quant à elle étudiée expérimentalement et numériquement.

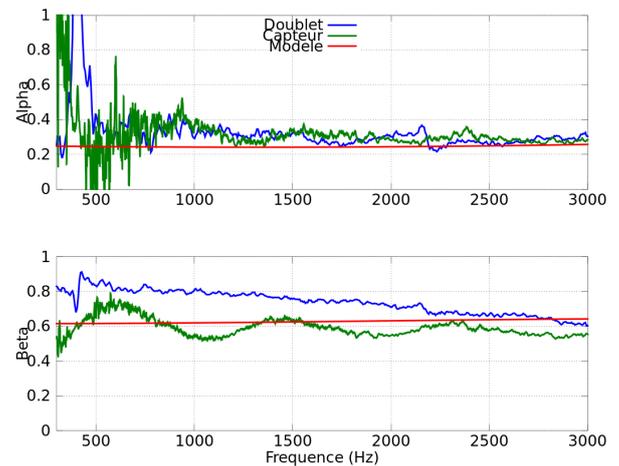


FIGURE 7 – Coefficients α et β de l'impédance de rayonnement d'un tube seul (configuration A, figure 6) estimés à partir de l'impédance d'entrée, de la mesure par deux microphones situés en extrémité de tube. Comparaison avec l'impédance théorique issue de [11].

4.1 Etude numérique

4.1.1 Principe

Un modèle numérique du système a été réalisé à l'aide du logiciel ABEC, dédié à la modélisation de systèmes électroacoustiques couplés à des environnements acoustiques en utilisant une formulation d'éléments de frontières [13]. Un exemple de calcul de champ de pression est présenté à la figure 8 dans le cas du disque rigide de diamètre 100 mm placé à 5 mm du guide.

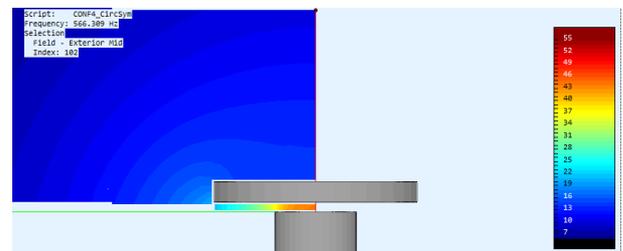


FIGURE 8 – Exemple de pression acoustique calculée par ABEC.

4.1.2 Résultats de simulation

L'impédance de rayonnement du guide est calculée à l'aide du logiciel ABEC. Les coefficients α et β définis par l'équation 3 sont présentés à la figure 9 pour les 4 configurations de la figure 6.

La figure 9 montre que l'effet de la terminaison sur la masse de rayonnement ajoutée est clairement visible. La masse de rayonnement est croissante pour les cas suivants :

1. disque diamètre 40 mm à une distance de 5 mm,
2. disque diamètre 100 mm à une distance de 5 mm,
3. disque diamètre 40 mm à une distance de 2 mm.

La partie réelle (coefficient α) estimée correspond à celle attendue pour le tube seul pour des fréquences

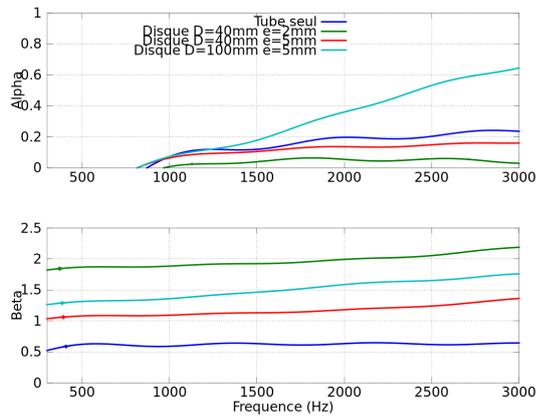


FIGURE 9 – Coefficients α et β de l'impédance de rayonnement calculés à partir par le logiciel ABEC pour les 4 configurations définies à la figure 6.

supérieures à 1000 Hz. La présence des terminaisons montre une modification du coefficient α , en particulier pour la terminaison de diamètre 100 mm placée à 5 mm de l'extrémité du guide.

La perte par insertion est aussi estimée par calcul numérique. Un exemple est donné à la figure 10 et à la figure 11 pour la configuration (B). Ces figures montrent un effet d'affaiblissement de la pression rayonnée à certaines fréquences et une directivité omnidirectionnelle jusqu'à 3000 Hz.

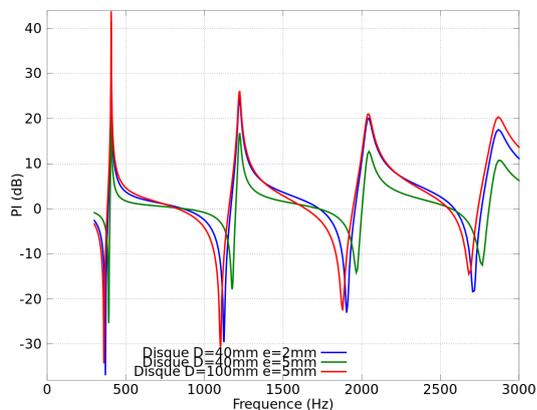


FIGURE 10 – Perte par insertion dans l'axe (1 m) pour les trois configurations.

4.2 Etude expérimentale

L'étude expérimentale a été réalisée comme décrit au §3.3. Pour chacune des configurations présentées au §3.1, l'impédance de rayonnement du guide et la perte par insertion sont mesurées.

4.2.1 Terminaison rigide

Effet sur l'impédance de rayonnement Les coefficients α et β de l'impédance de rayonnement estimés en présence d'une terminaison rigide sont présentés à la figure 12.

Comme pour la simulation numérique, chacune des quatre configurations montre une modification significative

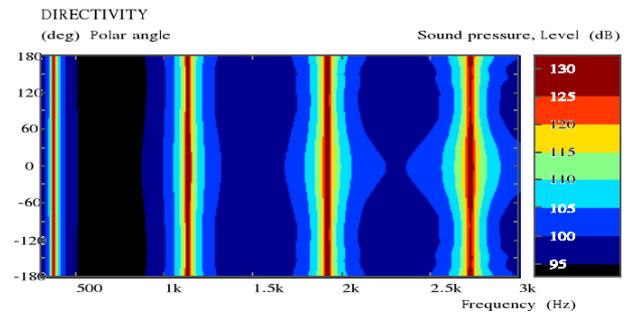


FIGURE 11 – Champ de pression calculé pour différentes fréquences et différents angles (configuration B de la figure 6).

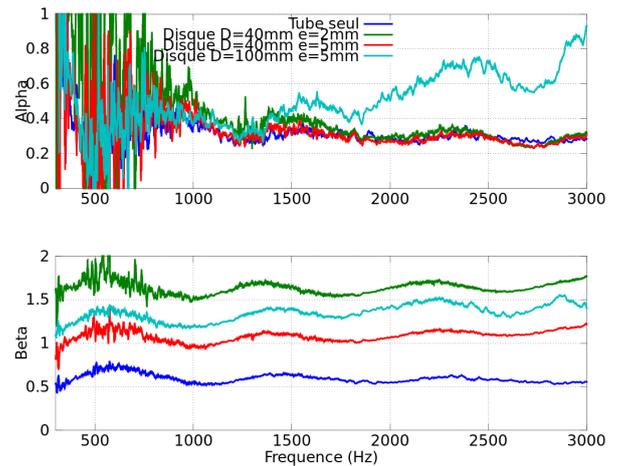


FIGURE 12 – Coefficients α et β de l'impédance de rayonnement estimée à partir de l'impédance d'entrée pour les 4 configurations (figure 6).

de la masse de rayonnement dans l'ordre suivant

1. disque diamètre 40 mm à une distance de 5 mm,
2. disque diamètre 100 mm à une distance de 5 mm,
3. disque diamètre 40 mm à une distance de 2 mm.

Ces terminaisons affectent donc l'impédance d'entrée en diminuant les fréquences de résonances (ajout de masse de rayonnement).

Pour la partie réelle, seule la configuration utilisant un disque de diamètre 100 mm montre une augmentation significative de la partie réelle, modifiant ainsi l'amplitude des pics de résonance (ajout de résistance de rayonnement). Pour un instrument de musique, ce type de terminaison modifie donc la justesse et la facilité d'émission, comme on le constate pour les cuivres avec des sourdines de géométries plus complexes.

Effet sur la perte par insertion La perte par insertion créée par les différents obstacles rigides est présentée à la figure 13. Le disque de diamètre 100 mm est celui qui crée la plus grande perte par insertion. Néanmoins il est difficile de comparer ce résultat avec celui issu du calcul réalisé par ABEC. Le couplage entre la terminaison et la source (haut-parleur) crée a priori des situations différentes dans les quatre configurations, rendant ainsi la comparaison difficile.

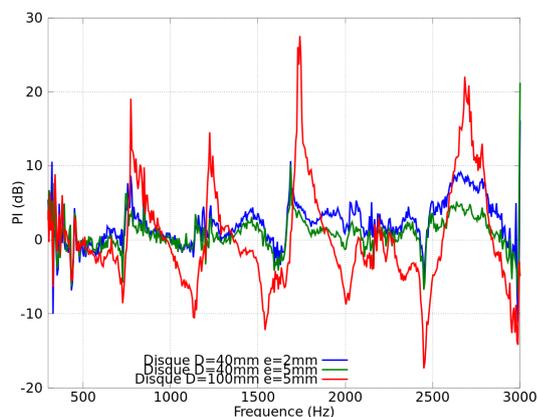


FIGURE 13 – Perte par insertion mesurée sur le système avec terminaison rigide.

4.2.2 Terminaison réactive

La terminaison réactive est celle présentée au §3.1 et constitue quatre cas différents.

L'impédance de rayonnement estimée en présence de ces quatre terminaisons est présentée à la figure 14. La perte par insertion mesurée en présence de ces dispositifs est présentée à la figure 15.

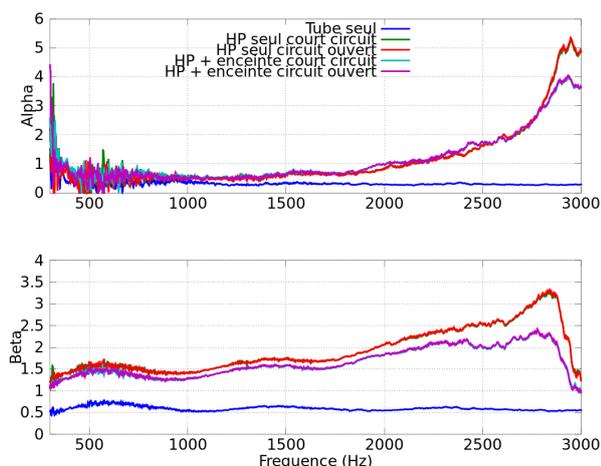


FIGURE 14 – Coefficients α et β de l'impédance de rayonnement estimée à partir de l'impédance d'entrée pour les 4 configurations (figure 12).

Effet sur l'impédance de rayonnement Les résultats de mesure montrent que l'effet de la terminaison réactive est significative. En effet, la partie imaginaire de l'impédance de rayonnement montre un ajout de masse très significatif (correction de longueur de 1,5 à 2 fois le rayon environ). La partie réelle de l'impédance de rayonnement est aussi beaucoup plus élevée en présence de ces terminaisons qui augmentent donc les effets de dissipation, notamment aux hautes fréquences. Les terminaisons utilisant un haut-parleur seul (sans enceinte close) montrent une partie imaginaire (coefficients β) plus grande que celle obtenue pour le haut-parleur sans enceinte. Les parties réelles (coefficients α) sont très proches pour les quatre configurations. Nous ne pouvons pas dire ici si la modification de l'impédance

de rayonnement est due au l'effet résonant du haut-parleur ou à sa géométrie. A priori, la fréquence de résonance du haut-parleur étant de l'ordre de 150 Hz, celui-ci doit se comporter comme une masse ajoutée.

Effet sur la perte par insertion Les résultats présentés à la figure 15 montrent que les quatre configurations ont sensiblement le même effet. On note de petites différences entre le haut-parleur seul et le haut-parleur monté en enceinte, différences pouvant être dues aux effets de diffraction de l'enceinte placée à l'arrière du haut-parleur.

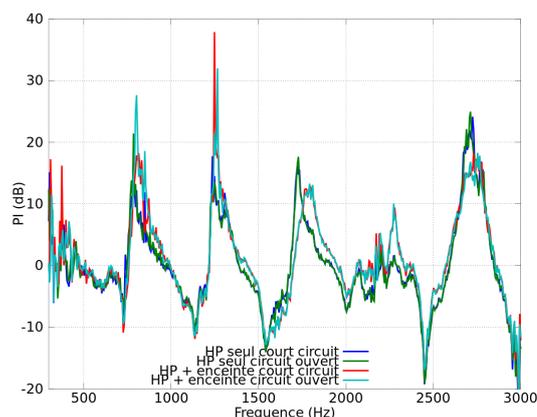


FIGURE 15 – Perte par insertion mesurée sur le système avec terminaison réactive.

4.2.3 Terminaison active

Les terminaisons actives présentées au §3.1 sont mises en oeuvre pour les deux cas, haut-parleur sans enceinte et haut-parleur avec enceinte. Le système de contrôle est réglé en utilisant un gain d'amplification à la limite de l'effet Larsen.

Effet sur l'impédance de rayonnement Les coefficients α et β sont présentés à la figure 16. Ces résultats montrent une augmentation de la partie imaginaire de l'impédance de rayonnement (correction de longueur de 1 à 2 fois le rayon environ). La partie réelle, quant à elle est diminuée par la présence du contrôle actif dans la bande de fréquence 1000 - 3000 Hz environ.

Cette diminution permet de limiter les pertes et ainsi d'augmenter l'amplitude des pics d'impédance dans la bande considérée. Cet effet est montré à la figure 17.

Effet sur la perte par insertion L'effet de la terminaison active sur la perte d'insertion est montré à la figure 18. L'effet des deux configurations est clairement différent, la configuration avec haut-parleur monté en enceinte close étant la plus efficace

4.3 Comparaison des terminaisons

Trois types de terminaisons sont comparées pour identifier celle qui pourrait avoir un intérêt en acoustique musicale :

- Disque rigide diamètre 100 mm à 5 mm de l'extrémité du tube,

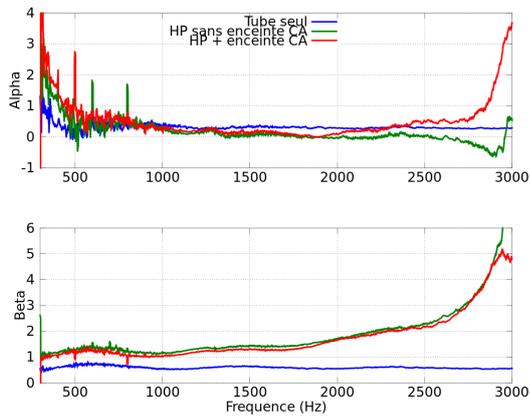


FIGURE 16 – Coefficients α et β de l'impédance de rayonnement estimée à partir de l'impédance d'entrée pour les 4 configurations (figure 12).

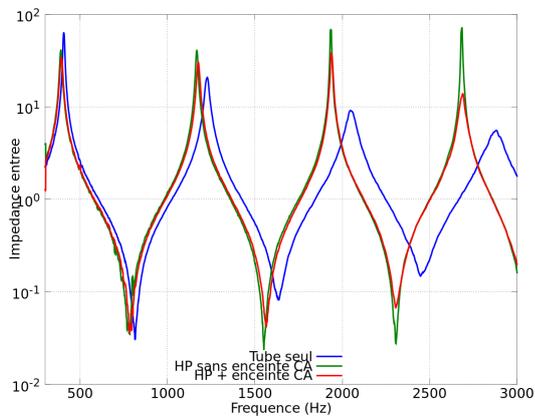


FIGURE 17 – Effet du contrôle actif sur l'impédance d'entrée du guide.

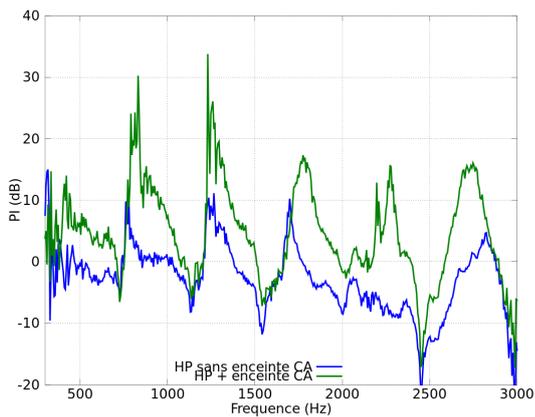


FIGURE 18 – Perte par insertion mesurée sur le système avec terminaison active.

- Haut-parleur monté en enceinte et en court circuit,
- Système de contrôle actif utilisant un haut-parleur monté en enceinte.

La configuration “tube seul” est aussi présentée comme référence.

Effet sur l'impédance de rayonnement La figure présente les coefficients α et β estimés dans les trois cas cités ci-dessus. La configuration qui introduit un coefficient β indépendant de la fréquence est celle utilisant le disque rigide. Les autres solutions introduisent une correction de longueur qui dépend de la fréquence. Les solutions passives (disque, haut-parleur monté en enceinte) augmentent la valeur du coefficient α (pertes) et diminuent l'amplitude des pics d'impédance d'entrée. La solution active diminue la valeur de α et permet d'augmenter l'amplitude des pics d'impédance d'entrée.

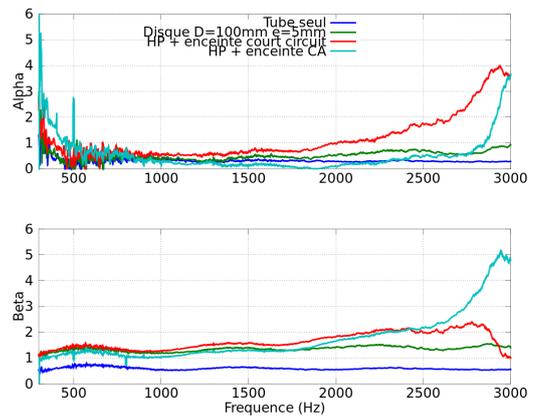


FIGURE 19 – Impédances de rayonnement pour différentes familles de terminaison.

La solution active semble être une solution intéressante dans la mesure où elle permet de conserver une correction de longueur constante jusqu'à 2 kHz tout en réduisant les pertes.

Effet sur la perte par insertion La perte par insertion mesurée dans les trois cas est présentée à la figure 20. On peut remarquer que les trois solutions présentent des maximums d'atténuation aux mêmes fréquences, probablement du fait des dimensions des obstacles (diamètre 100 mm pour tous). Aux basses fréquences, la solution active est la plus performante. Pour les fréquences supérieures à 1500 Hz, elle est en concurrence avec le disque rigide qui permet d'apporter une bonne atténuation à quelques fréquences particulières.

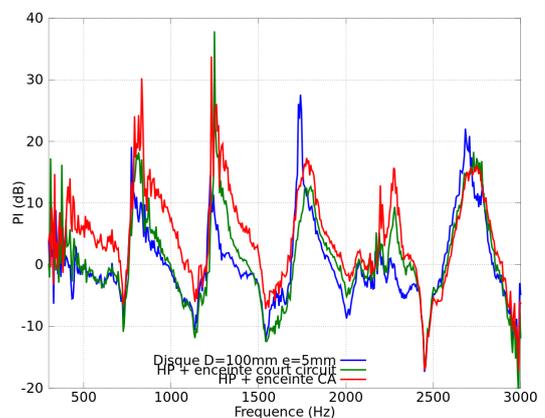


FIGURE 20 – Comparaison des pertes par insertion pour différentes familles de terminaison.

5 Conclusion

Nous nous intéressons dans ce travail à l'effet de trois familles de terminaisons placées à l'extrémité d'un tube cylindrique, terminaisons rigides, terminaisons utilisant un haut-parleur comme absorbeur dynamique et terminaisons actives.

L'estimation de l'impédance de rayonnement réalisée à partir de la mesure de l'impédance d'entrée du guide montre que les solutions rigides ont pour effet l'augmentation de la masse de rayonnement. La résistance de rayonnement est modifiée pour un disque dont le diamètre est supérieur au diamètre du guide. Ces résultats sont en accord qualitatif avec ceux obtenus à l'aide du logiciel ABEC.

La perte d'insertion calculée à l'aide du logiciel ABEC montre que le rayonnement reste omnidirectionnel jusqu'à $ka < 1$. Les mesures montrent une perte d'insertion marquée à certaines fréquences pour des obstacles de même diamètre (100 mm).

Pour la solution à absorbeur dynamique, l'impédance de rayonnement est estimée pour des fréquences supérieures à la fréquence de résonance du haut-parleur qui se comporte *a priori* comme une masse ajoutée. La correction de longueur équivalente à l'impédance de rayonnement dépend de la fréquence, probablement du fait de la géométrie complexe qui existe entre l'extrémité du guide et le haut-parleur. La partie réelle, quant à elle, montre une augmentation significative pour les plus hautes fréquences (> 1500 Hz).

La solution active montre une nette diminution de la partie réelle de l'impédance de rayonnement et ainsi une augmentation de l'amplitude des pics de résonance. On observe également l'existence d'une correction de longueur, beaucoup plus faible que dans le cas de l'absorbeur dynamique.

Remerciements

Les auteurs remercient Patrick Collas pour la réalisation mécanique de l'expérience.

Références

- [1] Manchar Lal Munjal. *Acoustics of ducts and mufflers*. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] Hervé Lissek, Romain Boulandet, and Romain Fleury. Electroacoustic absorbers : bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5) :2968–2978, 2011.
- [3] S.K. Tang. On helmholtz resonators with tapered necks. *Journal of Sound and Vibration*, 279(3–5) :1085 – 1096, 2005.
- [4] Xiaofeng Shi, Cheuk Ming Mak, and Jun Yang. Attenuation performance of a semi-active helmholtz resonator in a grazing flow duct. *Open Journal of Acoustics*, 3 :25, 2013.
- [5] D Thenail, O Lacour, MA Galland, and M Furstoss. The active control of wall impedance. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(6) :1039–1044, 1997.
- [6] Manuel Melon, Philippe Herzog, Azzedine Sittel, and Marie-Annick Galland. One dimensional study of a module for active/passive control of both absorption and transmission. *Applied Acoustics*, 73(3) :234–242, 2012.
- [7] Marie-Annick Galland, Benoît Mazeaud, and Nadine Sellen. Hybrid passive/active absorbers for flow ducts. *Applied Acoustics*, 66(6) :691–708, 2005.
- [8] Robert W Pyle Jr. A computational model of the baroque trumpet and mute. *Historic Brass Society Journal*, 3 :79–97, 1991.
- [9] Natalie Dell, Ralph James, Jane Davidson, and Joe Wolfe. The effect of hand and mute on the impedance spectra of the horn. In *Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics, Sydney, Australia*, pages 1–5, 2010.
- [10] Jean-Christophe Le Roux, Marc Pachebat, and Jean-Pierre Dalmont. Un capteur de nouvelle génération pour la mesure d'impédance acoustique en contexte industriel. *Acoustique & techniques*, (68) :6–12, 2012.
- [11] Harry Ferdinand Olson. *Music, physics and engineering*, volume 1769. Courier Dover Publications, 1967.
- [12] J-P Dalmont, CJ Nederveen, and N Joly. Radiation impedance of tubes with different flanges : numerical and experimental investigations. *Journal of sound and vibration*, 244(3) :505–534, 2001.
- [13] R&D Team. Acoustic boundary element calculator (abec), 3d-bem for acoustics, 2013.