

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



Analyse de couplages vibroacoustiques sur un double pavillon de trombone en situation de jeu

M. Secail-Geraud^a, L. Leblanc^a, J. Gilbert^a, F. Gautier^b et P. Hoekje^c

^aLAUM - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France

^bLAUM - UMR CNRS 6613, Av. Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France

^cDept. of Physics and Astronomy, Baldwin Wallace College, Berea, 44017, USA

mathieu.secail-geraud@univ-lemans.fr

Les vibrations de paroi d'instruments de musique de type cuivre sont couplées de façon complexe au champ acoustique interne. Dans le cas du trombone, les niveaux vibratoires sont élevés au niveau du pavillon où la paroi est fine et le diamètre important. L'importance de ces vibrations pour les musiciens reste une question ouverte. Nous proposons ici une étude expérimentale des couplages vibroacoustiques d'un prototype de pavillon de trombone à double parois. Le pavillon double est constitué de deux pavillons concentriques définissant une région annulaire qui peut être remplie d'eau, permettant ainsi de faire varier continuellement la structure modale du pavillon. Le trombone opère en situation de jeu grâce à une bouche artificielle. Des situations de coïncidences entre un harmonique du signal acoustique auto-entretenu et un mode vibratoire particulier, le mode piston, sont suscitées à des volumes d'eau spécifiques. Les signaux acoustiques et vibratoires sont analysés au voisinage des coïncidences. Il apparaît clairement des phénomènes spectaculaires sur les signaux vibratoires. Les signaux acoustiques rayonnés en champ proche sont eux que très faiblement perturbés.

1 Introduction

Les oscillations acoustiques de la colonne d'air des cuivres sont suffisamment importantes pour mettre significativement en vibration les parois de l'instrument, notamment dans la zone du pavillon où elles sont maximales. Ces vibrations mécaniques sont clairement ressenties par le cuivriste. Néanmoins, l'influence de ces vibrations sur le son rayonné n'a jamais été mise en évidence de manière indubitable. Seuls des cas que l'on peut considérer comme pathologiques, atypiques, ont été établis depuis le siècle dernier [1,2,3]. Ces cas de figures où l'oscillation périodique est perturbée (bifurcation vers un régime quasi-périodique par exemple) est la conséquence d'un phénomène physique bien identifié et modélisé [4] : la coïncidence entre un mode de structure et la composante fondamentale de l'oscillation. Par ailleurs, dans le cas d'un instrument à anche, [4] a montré qu'une coïncidence avec une harmonique du signal périodique peut conduire à une perturbation significative du contenu spectral de l'oscillation et donc du timbre.

La présente étude est basée sur la même idée appliquée aux cuivres. Plus précisément, il s'agit ici d'utiliser un trombone muni d'un pavillon à double paroi pour favoriser à dessein le phénomène de coïncidence entre un mode mécanique particulier du pavillon (« mode piston ») et un harmonique du signal périodique généré par le trombone en situation de jeu. Le dispositif expérimental est décrit au chapitre 2, il est en particulier basé sur l'utilisation d'une bouche artificielle [5] afin d'avoir des signaux expérimentaux très stables. L'analyse modale ayant pour objectif de détecter le « mode piston » [6] est abordée au chapitre 3. Les mesures vibratoires et acoustiques en situation de jeu sont discutées chapitre 4.

2 Dispositif expérimental et méthodologie

L'élément essentiel du dispositif expérimental est un trombone muni d'un pavillon à double paroi. Il est ainsi possible de remplir d'eau progressivement l'interstice entre les deux parois du pavillon (Figure 1). Cette masse ajoutée permet de faire varier continuellement les caractéristiques mécaniques de la structure, et en particulier les fréquences de résonance des modes mécaniques localisés au niveau du pavillon, dont le « mode piston ».

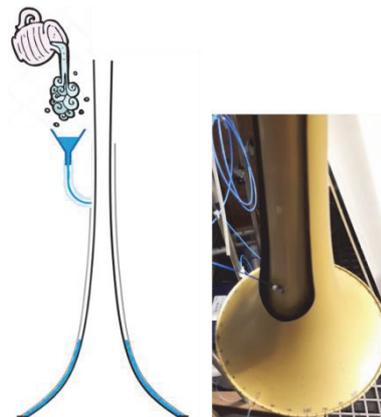


Figure 1 : Pavillon de trombone à double paroi. Il est possible de remplir d'eau l'espace compris entre les deux parois du pavillon.

Le trombone muni d'un accéléromètre triaxial miniature (PCB 356A01) au niveau du pavillon (Figure 1) et d'un microphone et d'un microphone à 50cm dans l'axe du pavillon (PCB 378B02) est mis en situation de jeu au moyen d'une bouche artificielle instrumentée (Figure 2) permettant une stabilité de jeu très impressionnante : par exemple la fréquence de jeu varie de ± 0.3 cents sur une durée de 3 minutes, cette micro-fluctuation étant la conséquence de la légère instabilité du compresseur d'air du bâtiment ($\pm 0.3\%$).

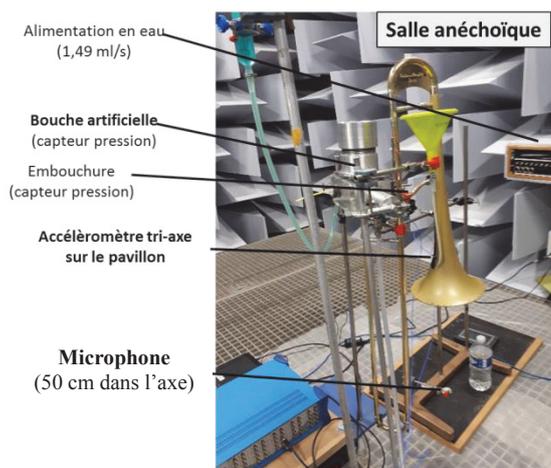


Figure 2 : Trombone en situation de jeu via une bouche artificielle [5].

3 Analyse modale expérimentale. Comment varie le « mode piston » ?

Avant d'effectuer les mesures en situation de jeu, il est indispensable d'effectuer une analyse modale expérimentale du trombone utilisé, et en particulier d'y repérer le « mode piston » parmi les nombreux modes de structure de l'instrument de musique.

Lors d'une étude récente [7], une analyse modale expérimentale complète du pavillon a été menée à l'aide du même accéléromètre triaxial et d'un marteau d'impact miniature (PCB 086E80). La mesure est faite à l'aide d'un système LMS Testlab et l'extraction des paramètres modaux a été réalisée à l'aide de l'algorithme Polymax (méthode LSCE).

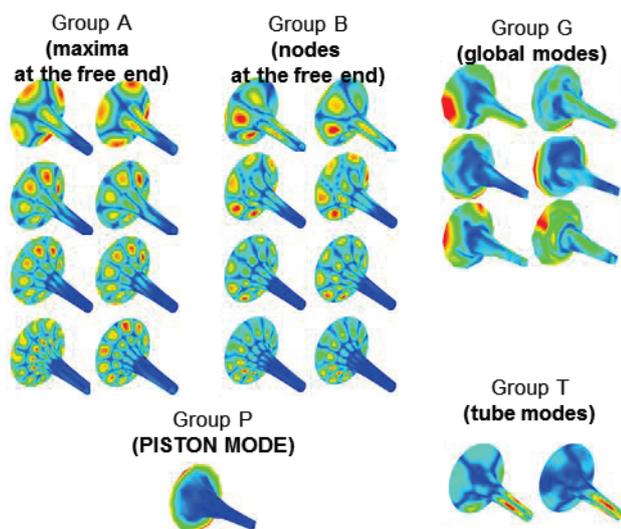


Figure 3 : Modes propres de pavillon obtenus par analyse modale expérimentale [7].

Parmi les nombreux modes de pavillon identifiés, un mode axisymétrique, que nous nommons mode piston, a été clairement isolé. Ce mode a la particularité d'être localisé à l'extrémité du pavillon et de vibrer en phase (Figure 3). La déformée opérationnelle de ce mode a également pu être observée par interférométrie de speckle dans [8] en excitation harmonique forcée dans le cas des pavillons de trompette.

Dans cette étude, le mode piston est un candidat optimal pour favoriser un couplage vibro-acoustique avec le mode acoustique plan de la colonne d'air [6], ce qui le rend susceptible d'occasionner une perturbation sur la pression acoustique rayonnée. Il a de plus été montré dans [7] que ce mode pouvait occasionner de petites perturbations de l'impédance acoustique d'entrée du trombone, confirmant que le couplage vibro-acoustique est plus important avec ce mode mécanique.

Dans la présente étude sur pavillon double, ce mode a été identifié à 1300 Hz, sans eau ajoutée, après une analyse modale moins exhaustive que dans [7] et une extraction modale avec Polymax. On peut également mentionner que la base modale du pavillon double est plus complexe que celle d'un simple pavillon, ce qui est imputable à la double paroi augmentant le nombre de modes mécaniques. Le mode piston est également moins énergétique que sur un simple pavillon.

Lorsque de l'eau est insérée entre les deux parois du pavillon, l'effet masse ajoutée induit une décroissance de la fréquence du mode piston. Une mesure de quelques inertances A_x/F_i et A_z/F_i (Figure 4), sur le quart du bord du pavillon à chaque nouveau volume d'eau de 30ml introduit, et l'analyse des phases de ces fonctions de transfert permet ensuite de suivre le glissement fréquentiel du mode de façon simple.

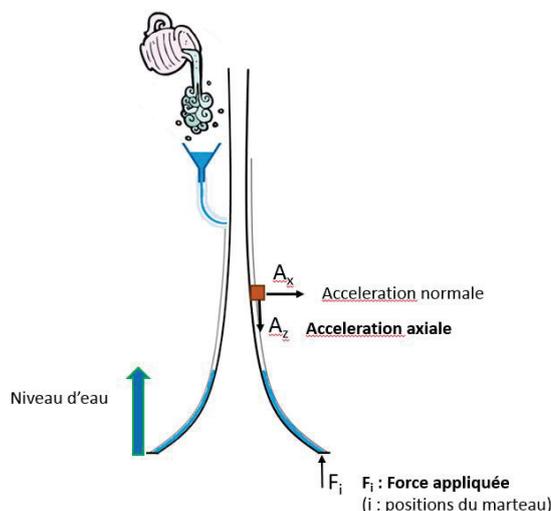


Figure 4 : Placement des capteurs permettant le suivi du mode piston à chaque volume d'eau de 30ml introduit.

In fine, la plage fréquentielle balayée par l'ajout d'eau va de 1300 Hz à 800Hz (Figure 5). Cette bande est donc a priori suffisamment large pour envisager un effet de coïncidence avec un harmonique d'une note de trombone.

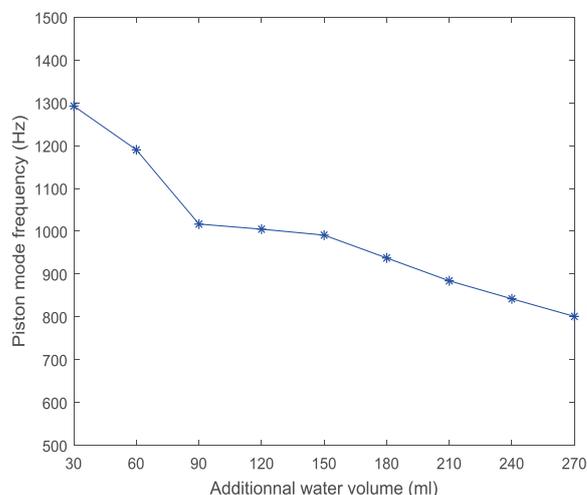


Figure 5 : Suivi de la fréquence propre du mode piston en fonction du volume d'eau ajouté entre les deux parois du pavillon.

En pratique, deux cas de figure permettant une coïncidence sont obtenus avec la bouche artificielle, et analysés au chapitre qui suit. Il s'agit de l'harmonique 4 du Bb3 (940 Hz) d'une part, et de l'harmonique 3 du D4 (888 Hz) d'autre part. Il s'agit de notes centrales du registre de l'instrument et faciles d'émission, le Bb3 étant notamment la note de référence servant à s'accorder.

4 Mesures vibratoires et acoustiques en situation de coïncidence

Dans un premier temps, la bouche artificielle est réglée pour émettre un Bb3 de fréquence fondamentale 235 Hz (régime 4 obtenu en 1^{ère} position). Lors du remplissage en eau du pavillon, la fréquence du mode piston décroît à partir de 1300 Hz, et croise l'harmonique 4 du signal périodique à 940 Hz à $t=100$ s.

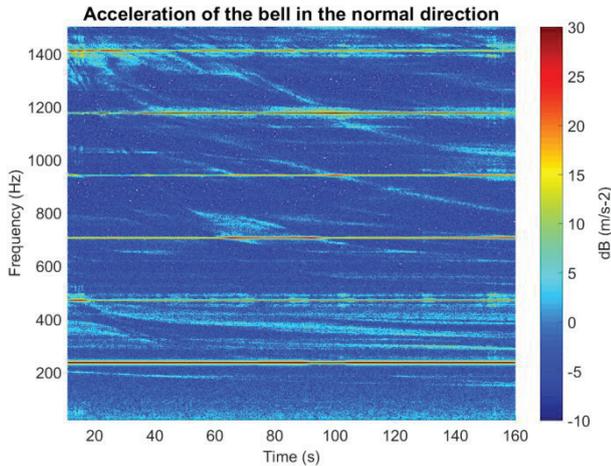


Figure 6 : Spectrogramme du signal d'accélération sur le pavillon (composante normale à la paroi). L'axe des X (temporel) correspond au temps de remplissage en eau du pavillon double.

Durant la durée du remplissage (de l'ordre de 3 minutes), il est fait acquisition à la fois de signaux d'accélération au niveau du pavillon, et acoustique rayonnés en champ proche. Les spectrogrammes des signaux accélérométriques sont présentés Figure 6 pour la composante normale à la paroi et Figure 7 pour la composante axiale. Sur les deux figures, il apparaît très clairement les 6 premiers harmoniques du Bb3. Sur la Figure 6, il apparaît également de nombreux éléments spectraux de fréquences variables avec le volume d'eau exprimant le nombre de modes mécaniques du pavillon, couplés au champs acoustique. L'analyse modale préliminaire nous permet de dire qu'il s'agit de modes d'ovalisation du pavillon, couplés au champs acoustique par des défauts de symétrie de révolution [9].

Sur la figure 7, seuls les modes mécaniques couplés ayant une composante dans l'axe du pavillon sont visibles. Ce signal nous permet donc de « filtrer » les modes d'ovalisation et de suivre de façon beaucoup plus évidente l'évolution du mode piston avec le volume d'eau introduit. Si les 6 premiers harmoniques du Bb3 sont très visibles, le glissement fréquentiel du mode piston entre 1300 Hz et 800 Hz apparaît également clairement lors du remplissage en eau (Figure 7). Ce résultat est conforme aux analyses modales expérimentales préliminaires.

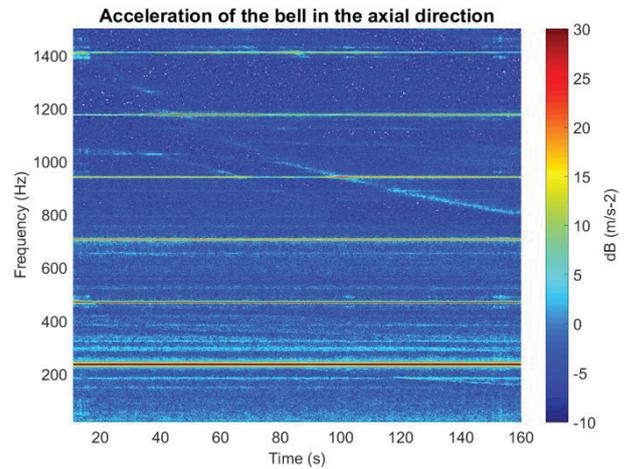


Figure 7 : Spectrogramme du signal d'accélération sur le pavillon (composante axiale). L'axe des X (temporel) correspond au temps de remplissage en eau du pavillon double.

Si on effectue un spectrogramme du champ de pression rayonné à 50 cm dans l'axe lors de l'expérience précédente, il est légitime d'observer précisément le signal au moment de la coïncidence, c'est-à-dire vers $t = 100$ s. A première vue (Figure 8), contrairement aux spectrogrammes des signaux d'accélération, rien d'évident n'est visible sur le spectrogramme acoustique.

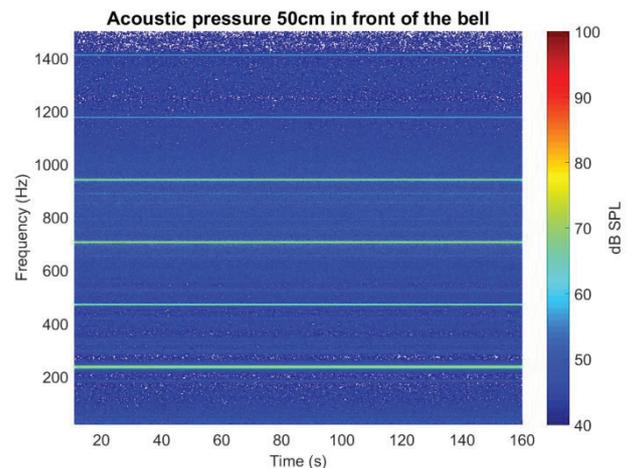


Figure 8 : Spectrogramme du signal de pression acoustique rayonné en champ proche. L'axe des X (temporel) correspond au temps de remplissage en eau du pavillon double. Seuls les 6 premiers harmoniques du Bb3 sont très visibles.

Avant de conclure, observons plus finement les signaux en isolant leur harmonique 4 et en observant les variations au moment de la coïncidence, en $t = 100$ s (Figure 9). Sans surprise, le signal accélérométrique exhibe une variation importante déjà visible sur le spectrogramme (Figure 9, gauche) de l'ordre de +10dB par rapport à la valeur moyenne. Par contre, rien de tel n'est observable sur la pression rayonnée (Figure 9, droite). Certes il y a bien une fluctuation visible mais elle est très petite (< 0.1 dB) et donc sans aucun doute non perceptible.

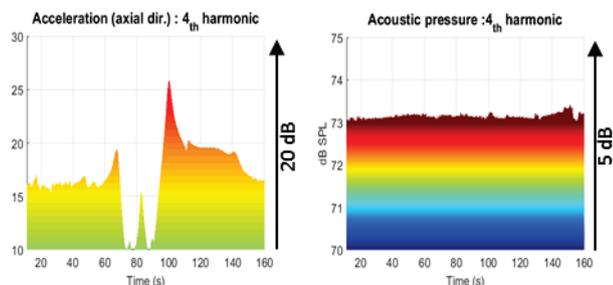


Figure 9 : Analyse spectrale de l'harmonique 4 du Bb3 des signaux d'accélération axiale (à gauche) et de pression acoustique rayonnée en champ proche (à droite). L'axe des X (temporel) correspond au temps de remplissage en eau du pavillon double.

Dans un second temps, la bouche artificielle est réglée pour émettre un D4 de fréquence fondamentale 296 Hz (régime 5 obtenu en 1^{ère} position). Lors du remplissage en eau du pavillon, la fréquence du mode piston décroît à partir de 1300 Hz, et croise l'harmonique 3 du signal périodique à 888 Hz à $t=110$ s (Figure 10). Les conclusions de ce second cas d'étude (D4) sont identiques à celle du premier cas (Bb3) : le phénomène de coïncidence implique une variation locale importante du signal accélérométrique de plusieurs décibels, et une variation négligeable du signal de pression acoustique rayonnée.

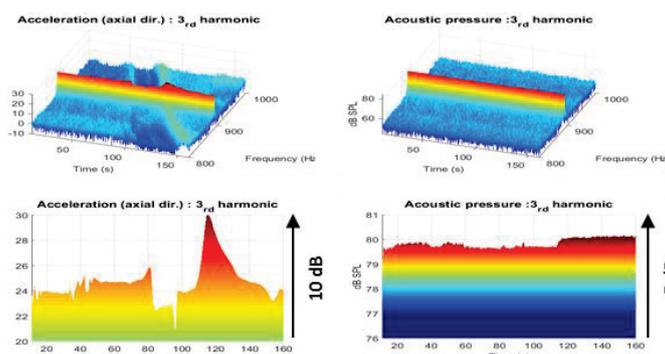


Figure 10 : Signaux d'accélération axiale (à gauche) et de pression acoustique rayonnée en champ proche (à droite) du D4. L'axe des X (temporel) correspond au temps de remplissage en eau du pavillon double. Spectrogrammes (en haut) et analyse spectrale de l'harmonique 3 (en bas).

5 Conclusion

Des phénomènes spectaculaires d'effets des vibrations de paroi sur le son rayonné ont été mis en évidence dans la littérature pour des cas bien spécifiques, que nous qualifierons de pathologiques : l'oscillation acoustique est perturbée lors de coïncidence entre un mode de structure et la composante fondamentale de l'oscillation [1,2,3]. Par ailleurs, dans le cas d'un instrument à anche, [4] a montré qu'une coïncidence avec une harmonique du signal périodique peut conduire à une perturbation significative du contenu spectral de l'oscillation et donc du timbre. La présente étude s'est attachée à observer des effets de coïncidence entre un « mode piston » et les harmoniques 4 ou 3 de notes de trombone jouées avec une bouche artificielle. A ce jour, la conclusion est sans appel. Si la coïncidence provoque une grosse perturbation sur le signal accélérométrique axial au pavillon, la pression acoustique rayonnée est très peu perturbée, trop peu pour que l'effet soit audible. Peut-être qu'il existe des configurations plus

favorables à la mise en évidence d'effets sur le timbre de la pression rayonnée, pour cela il faudrait sans doute s'orienter vers des cuivres à paroi métallique plus fine et à diamètre plus grand.

Références

- [1] D.C. Miller, The influence of the material of wind instruments on the tone quality, *science*, 29, 151-171, 1909.
- [2] F. Gautier, G. Nief, J. Gilbert and J.P. Dalmont, Vibroacoustics of organ pipes Revisiting the Miller experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 131, 737-738, 2012.
- [3] C.N. Nederveen and J.P. Dalmont, Pitch and level changes in organ pipes due to wall resonances, *J. Sound Vib.* 271, 227-239, 2004.
- [4] G. Nief, F. Gautier, J-P. Dalmont and J. Gilbert, Influence of wall vibrations on the behaviour of a simplified wind instrument, *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 1320-1331, 2008.
- [5] J. Gilbert, S. Ponthus and J.F. Petiot, Artificial buzzing lips and brass instruments: experimental results, *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 1627-1632, 1998.
- [6] W. Kausel, D.W. Zietlow and T.R. Moore, Influence of wall vibrations on the sound of brass wind instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 3161-3174, 2010.
- [7] M. Secail-Geraud, F. Gautier, J. Gilbert and P. Hoekje, Analysis of the acoustic input impedance of a vibrating trombone bell, *Proceedings of the Third Vienna Talk on Musical Acoustics*, 2015.
- [8] T. Moore, W. Kausel, V. Chatziioannou, N. Etchenique and B. Gorman, Axial vibrations of brass wind instruments, *Proceedings of the Montreal ICA*, 2013
- [9] R. Pico, F. Gautier, The vibroacoustics of slightly distorted cylindrical shells: A model of the acoustic input impedance, *Journal of Sound and Vibration* 302(1-2):18-38 · April 2007