



SUJET DE THESE : **CONTRÔLE ACTIF DES CUIVRES : LE CAS DU TROMBONE**

- **LABORATOIRES D'ACCUEIL :**
 - [Equipe S3AM – Laboratoire STMS](#) –Ircam, 1 place Igor Stravinsky, 75004 Paris.
 - [Equipe LAM – Institut d'Alembert](#) – Campus Jussieu, 4 place Jussieu 75005 Paris.
 - Projet doctoral soutenu par le [Collegium Musicae](#).
- **DEBUT : Septembre 2020.**
- **ENCADRANTS : Brigitte d'Andréa-Novel, Henri Boutin, Thomas Hélie (S3AM – Laboratoire STMS), Benoît Fabre (LAM – Institut Jean Le Rond d'Alembert), Sorbonne-Université**
- **CONTEXTE**

L'application de contrôle actif aux instruments de musique apporte de nombreux avantages aux musiciens et compositeurs. En agissant sur sa vibration propre, cette technique permet à l'instrument de produire une plus large diversité de sons. Récemment, le contrôle actif a fait l'objet de nombreuses études sur les différentes familles d'instruments [2, 3, 5, 21], donnant ainsi naissance à plusieurs instruments augmentés [15, 17, 18]. Concernant les instruments à vent, deux projets récents ont permis de modifier les modes propres de la colonne d'air, dans un résonateur à géométrie fixe [19] et variable [8, 9], couplé à un oscillateur non-linéaire.
- **OBJECTIF**

L'objectif de cette thèse est d'agir par contrôle actif sur les modes propres de la colonne d'air dans les instruments de la famille des cuivres, afin de modifier d'une part le son rayonné, et d'autre part l'interaction entre la colonne d'air et les lèvres du musicien dans l'embouchure. Ces travaux s'appliqueront au trombone, en vue de produire de nouveaux sons et d'étudier son fonctionnement. Le sujet de thèse porte sur deux thèmes successifs :

1- Développement et simulation de méthodes modales pour le musicien.

L'instrument à vent sera modélisé par un résonateur connecté à une impédance de rayonnement, et couplé à un modèle de lèvres dans l'embouchure dont la dynamique non linéaire peut permettre l'établissement d'une oscillation stable [11]. Les non-linéarités du résonateur sont prises en compte, notamment pour simuler le cuivrage du trombone à fort niveau [16]. Le contrôle visera à attribuer les caractéristiques souhaitées aux modes propres de la colonne d'air dans le résonateur, afin d'obtenir un système cible.

On développera pour cela des méthodes modales, passives et robustes de **placement de pôle** reposant sur une représentation d'état. On s'intéressera également aux **méthodes de tracking** permettant d'atteindre le système cible en temps fini, par exemple lors du déplacement de la coulisse du trombone [22]. Afin d'effectuer un contrôle réaliste, les méthodes de contrôle seront développées en tenant compte des fonctions de transfert des transducteurs, ainsi que du **temps de latence** introduit par le contrôleur dans la boucle de rétroaction. Ces travaux utiliseront les résultats obtenus au cours de thèses récentes effectuées dans les équipes LAM de l'Institut d'Alembert [3] et S3AM du laboratoire STMS [19]. De plus, la **stabilité** et la **passivité** du système bouclé seront garanties par une modélisation passive du retard dans la boucle de rétroaction [13].

Afin de **synthétiser** le son produit par l'instrument à vent, nous simulerons les méthodes de contrôle ainsi développées en utilisant des modèles récents de lèvres, capables de vibrer de chaque côté des pics d'impédance d'entrée du résonateur [6], et des modèles éprouvés d'impédance de rayonnement [7]. Parmi les nombreuses possibilités offertes par le contrôle, nous chercherons en particulier à obtenir des **effets sonores** que le tromboniste ne peut obtenir sans contrôle actif :

- production de doubles notes et d'accords ;
- atténuation du niveau sonore sans modifier l'équilibre entre les composantes spectrales, ce que ne permet pas une sourdine ;
- amplification du niveau sonore sans modifier l'équilibre entre les composantes spectrales, pour réduire le cuivrage à fort niveau.

Le contrôle permettra également d'automatiser d'autres effets expressifs ou d'assister l'interprète lors de leur exécution:

- contrôle des paramètres de vibratos (excursions en fréquence et en amplitude et vitesse), habituellement réalisés en déplaçant la coulisse ou en modifiant la tension des lèvres ;
- contrôle de la quantité de cuivrage à faible niveau, habituellement imposé par le type de sourdine utilisé.

2- Utilisation du contrôle actif pour l'étude du trombone.

Banc de test robotisé. On développera, à partir d'une thèse récente [14], un banc de test robotisé, composé d'un **trombone** et d'une **bouche artificielle**. Le choix des transducteurs (technologie, nombre et position) fera l'objet d'une étude ambitieuse. Il devra permettre de mesurer et modifier des niveaux sonores très élevés (typiquement > 170 dB SPL [4]) dans une perce étroite (1.3 cm de diamètre pour un trombone ténor). On cherchera des solutions capables de contrôler la pression acoustique indépendamment à l'intérieur et à l'extérieur du résonateur. La coulisse du trombone sera également motorisée afin de pouvoir modifier les modes propres de la colonne d'air au cours du jeu. Afin de minimiser le retard dans la boucle de rétroaction, le contrôleur réalisera un **traitement à l'échantillon** [20]. Le résultat du contrôle sera ensuite évalué sur les mesures d'impédance d'entrée du trombone et sur le son rayonné.

Application du contrôle actif au trombone. On implémentera les méthodes de contrôle développées dans le thème 1, afin de réaliser un trombone augmenté, capable de produire les effets sonores listés précédemment. Elles seront appliquées et testées sur le **banc de test** décrit précédemment, puis dans des **conditions de jeu réelles** avec des musiciens professionnels. Le contrôle actif sera ensuite utilisé pour étudier l'interaction entre la colonne d'air et les lèvres du tromboniste. Pour cela, on visualisera les lèvres à l'aide d'un système de captation vidéo ultra-rapide. Le contrôle fin des pics d'impédance d'entrée permettra d'identifier et estimer les paramètres mécaniques de lèvres assurant leur auto-oscillation. Cette étude expérimentale visera à tester et améliorer les **modèles de lèvres** récents [1,4,10,12].

• REFERENCES

[1] S. Adachi and M. Sato. Trumpet sound simulation using a two-dimensional lip vibration model. Journal of the Acoustical Society of America, 99 :1200–1209, 1996.

[2] S. Benacchio. Contrôle actif modal appliqué aux instruments de musique à cordes. Thèse UPMC, Paris, 2014.

[3] H. Boutin. Méthodes de contrôle actif d'instruments de musique. Cas de la lame de xylophone et du violon. Thèse UPMC, Paris, 2011.

[4] H. Boutin, N. Fletcher, J. Smith, and J. Wolfe. Relationships between pressure, flow, lip motion, and upstream and downstream impedances for the trombone. *Journal of the Acoustical Society of America*, 137 :1195–1209, 2017.

[5] H. Boutin and J.-D. Polack. Modifying the resonances of a xylophone bar using active control. *Acta Acustica united with Acustica*, 101 :408–420, 2015.

[6] H. Boutin, J. Smith, and J. Wolfe. The acoustics of the trombone : how do players lip up and down ? *Proc. 26th International Congress on Sound and Vibration*, 2019.

[7] J.-P. Dalmont, Nederveen C.J., and Joly N. Regeneration in brass wind instruments. *Journal of Sound and Vibration*, 244 :505–534, 2001.

[8] B. d’Andréa Novel, B. Fabre, and J.-M. Coron. An acoustic model for automatic control of a slide flute. *Acta Acustica united with Acustica*, 96 :713–721, 2010.

[9] B. d’Andréa Novel, B. Fabre, and J.-M. Coron. An acoustic model to control an experimental slide flute. *Proc. of the CFA’12, Acoustics 2012*, 3831–3838, 2012.

[10] S.J. Elliott and J.M. Bowsher. Regeneration in brass wind instruments. *Journal of Sound and Vibration*, 83 :181–217, 1982.

[11] B. Fabre, J. Gilbert, A. Hirschberg and X. Pelorson. Aeroacoustics of musical instruments. *Annual review of fluid mechanics*, 44 :1-25, 2012.

[12] N. Fletcher. Autonomous vibration of simple pressure controlled valves in gas flows. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93 :2172–2180, 1993.

[13] T. Lebrun. Modélisation multi-physique passive, identification, simulation, correction et asservissement de haut-parleur sur des comportements cibles. Thèse UPMC, Paris, 2019.

[14] N. Lopes. Approche passive pour la modélisation, la simulation et l’étude d’un banc de test robotisé pour les instruments de type cuivre. Thèse UPMC, Paris, 2016.

[15] Feedrum. https://www.youtube.com/watch?v=chhxK_RhZIk.

[16] A. Myers, R.W. Jr Pyle, J. Gilbert, D.M. Campbell, J.P. Chick, and S. Logie. Effects of nonlinear sound propagation on the characteristic timbres of brass instruments. *Journal of the Acoustical Society of America* 131 :678-688, 2012.

[17] Hyvibe guitar. https://www.lagguitars.com/fr_FR/pages/videos-hyvibe.

[18] Magnetic resonator piano. <http://instrumentslab.org/research/mrp.html>.

[19] T. Meurisse. Contrôle actif appliqué aux instruments de musique à vent. Thèse UPMC, Paris, 2014.

[20] R. Piéchaud. A lightweight c++ framework for real time active control. *Real Time Linux Workshop*, Ircam, Paris, France, 2014.

[21] J.D. Rollow. Active Control of Spectral Detail Radiated by an air-loaded impacted membrane. PhD thesis, Pennsylvania State University, 2003.

[22] M. Wijnand, B. d’Andréa Novel, B. Fabre, T. Hélie, L. Rosier, and D. Roze. Active control of the axisymmetric vibration modes of a tom-tom drum. *Proc. IEEE 58th Conference on Decision and Control*, 6887–6892, 2019.

- **PROFIL RECHERCHÉ** : titulaire d'un master2 en mathématiques, contrôle ou acoustique. Intérêt pour la musique.

- **MODALITES DE CANDIDATURE** : CV + lettre de motivation à :

Henri Boutin : boutin@ircam.fr,

Brigitte d’Andréa-Novél : brigitte.dandreanovel@ircam.fr