

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Bouches artificielles asservies : étude de nouveaux outils pour l'analyse du fonctionnement des instruments à vent

Didier Ferrand¹, Thomas Hélie², Christophe Vergez¹, Baptiste Véricel^{1,2}, René Caussé²

¹ LMA, CNRS UPR 7051, 31 Chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20

² IRCAM, CNRS UMR 9912, 1 Place Igor Stravinsky, 75004 Paris

Depuis quelques décennies, l'utilisation de bouches artificielles en acoustique musicale s'est généralisée. Ces dispositifs expérimentaux ont déjà permis de nombreuses avancées dans la compréhension du fonctionnement des instruments à vent. Mais leur principale qualité qui est de figer les paramètres de contrôle (PC) de l'instrument pour des mesures maîtrisées, est également source de limitations. Nous proposons de lever ces restrictions tout en conservant la maîtrise des paramètres de contrôle (PC) grâce à des actionneurs asservis. Pour cela, nous utilisons des techniques standard de l'automatique. Une boucle de contrôle est formée en associant : (1) un capteur qui mesure la valeur de la variable (PC) à contrôler, (2) un système dit correcteur, c'est-à-dire, un algorithme qui en fonction de l'écart entre mesure et consigne génère une commande adaptée, et (3) un actionneur, organe piloté par la commande qui agit directement ou indirectement sur la variable (PC) à contrôler.

Nous présentons les premiers résultats d'expériences permises par deux bouches artificielles spécialisées qui ont été ainsi robotisées : l'une est adaptée aux instruments à anches ou à bec (flûte), et l'autre aux cuivres (grâce à des lèvres artificielles capables d'auto-osciller). Dans ces expériences, une ou plusieurs variables sont asservies sur des consignes statiques, lentement variables ou rapides qui peuvent être : le débit ou la pression d'air alimentant la bouche, la position de la bouche qui permet de gérer l'appui des lèvres sur l'embouche, volume d'eau dans les lèvres artificielles, etc. L'étude proposée ici se focalise sur l'évaluation de la qualité du contrôle obtenu en termes de précision, reproductibilité et robustesse et présente quelques applications. Elle permet de valider pertinence de cette approche. Il s'agit donc d'un premier pas vers une reproduction artificielle des moyens de contrôle dont dispose le musicien sur son instrument.

1 Introduction

Dans le cadre du projet ANR Consonnes, un objectif important était d'étudier des solutions pour asservir des bouches artificielles communément utilisées en acoustique musicale des instruments à vent. A la fin de ce projet, nous présentons les premières réalisations, en nous attachant à décrire les outils et leurs performances. Ces projets ont été menés à l'Ircam pour l'étude des cuivres (section 2), et au LMA pour l'étude des instruments à anche simple et des flûtes à bec (section 3).

2 Mise en oeuvre à l'Ircam : les cuivres

Depuis presque deux décennies, des travaux utilisant les bouches artificielles pour l'étude du jeu des cuivres ont été menés [1]. Un point critique de ces systèmes est la construction de lèvres synthétiques capables de reproduire des comportements typiques et de fournir des résultats suffisamment fiables : de telles versions exploitables (avec des paramètres mécaniques caractérisables) ont été obtenues par exemple à l'Ircam (voir [2]). Un second point est de calibrer et contrôler un tel système. La mise en place et la coordination d'un projet mécatronique d'élèves ingénieurs de l'Ecole des Mines de

Paris et d'élèves techniciens (BTS IRIS au lycée Diderot, Paris et BTS CPI, lycée Léonard de Vinci, Melun) a permis d'élaborer une première maquette (cf. figure 1) livrée en juin 2007.

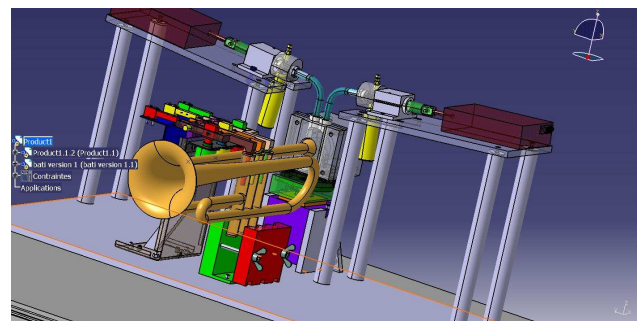


FIGURE 1 – Vue CATIA, proto. 2007, projet BARMstrong

Plusieurs évolutions mécaniques, électroniques et des systèmes dédiés aux asservissements ont été nécessaires pour aboutir en juillet 2009 à un système complet,

contrôlable et capable de produire des sons¹. Nous indiquons ci-dessous l'état actuel de la machine et donnons de premières illustrations de ses possibilités actuelles.

2.1 Description du système mécatronique

Aspects mécaniques Du point de vue mécanique, la bouche artificielle est composée d'une chambre creuse étanche (approchant le volume d'une cavité buccale humaine), alimentée (figure 2, droite) par une arrivée d'air. La face avant de la bouche est composée de deux lèvres synthétiques (maintenues dans des étuis) qui s'appuient en arrière sur une plaque (représentant les dents) avec une ouverture en fente (espace interdentaire). Ce système est fixé sur un translateur linéaire permettant de faire avancer ou reculer la bouche.

Les lèvres synthétiques sont des chambres cylindriques en latex remplies d'eau. Elles sont alimentées par tuyaux (très peu flexibles dans le sens radial et assez souple dans le sens de la longueur). Le pilotage du volume d'eau dans les lèvres réalisé par un système de type "seringue" est ainsi déporté.

Enfin, l'instrument est fixé sur un support et l'ensemble "translateur-bouche-support de l'instrument" est placé sur un rail dont la rigidité assure que le seul degré de liberté géométrique entre la bouche et l'embouchure est une translation (colinéaire au rail). L'ensemble mécanique (y compris les lèvres synthétiques) a été réalisé par Alain Terrier à l'Ircam.

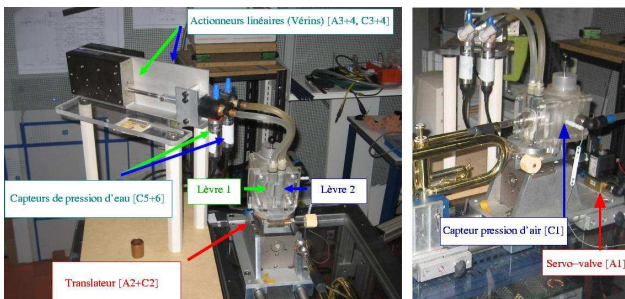


FIGURE 2 – Photographie du Robot (version juillet 2009).

Aspects électroniques, actionneurs et capteurs

Les actionneurs $[A_i]$ qui permettent la robotisation sont (voir figure 2) : $[A1]$ une électro-vanne qui pilote l'arrivée d'air dans la bouche, $[A2]$ un translateur qui pilote le déplacement de la bouche et permet de régler la force d'appui de la bouche sur l'embouchure, $[A3-4]$ deux vérins dont le déplacement pilote le volume d'eau dans les 2 lèvres artificielles et permet d'y régler la pression.

Les capteurs $[C_i]$ qui permettent les mesures et les asservissements sont : $[C1]$ un capteur de pression (statique et dynamique) dans la bouche, $[C2]$ un codeur

incrémental fournissant la position du translateur $[A2]$, $[C3-4]$ deux codeurs incrémentaux fournissant les positions respectives des vérins $[A3-4]$ (proportionnelles au volume d'eau injecté dans les lèvres artificielles, $[C5-6]$ deux capteurs de pression d'eau dans les lèvres, $[C7]$ un capteur de force d'appui "bouche-embouchure" (système amovible), $[C8]$ un capteur de pression acoustique dans l'embouchure, et $[C9]$ un anémomètre inséré dans la coulisse d'accord de la trompette.

A cela s'ajoutent : $[M]$ un microphone extérieur, $[T]$ un capteur de température de l'air dans la bouche. De façon spécifique pour la trompette, des doigts artificiels ont aussi été fabriqués à l'aide de 3 servo-moteurs $[S1-3]$ et 3 capteurs incrémentaux donnent la position $[P1-3]$ de leur enfoncement.

2.2 Asservissements et premiers résultats

Pour simplifier la mise en place d'asservissements et l'implantation de processus sur la plateforme expérimentale, l'interface homme-machine initialement réalisée par une carte RABBIT (BL2600) a été abandonnée au profit d'un système dSpace gérant les signaux des codeurs incrémentaux $[C2-4]$ et les entrées-sorties analogiques utilisées pour les autres actionneurs et capteurs. Ce dernier système qui permet d'effectuer le *design* des asservissements et des automates de contrôle sous Simulink/Matlab puis de les faire fonctionner en temps-réel sur des DSP a permis d'accélérer considérablement l'avancée des travaux.

Actuellement, les asservissements de bas niveau réalisés reposent sur des techniques standard d'automatique couramment utilisées dans l'industrie à base de PID (correcteur dit "proportionnel-intégrateur-dérivateur"). Dans ce type de bouclage, la partie "proportionnelle" permet de réduire l'erreur entre la valeur mesurée et la consigne à atteindre, la partie "intégrateur" permet d'éliminer toute erreur statique, la partie "dérivateur" est utilisée pour réduire le temps de réponse. Le réglage des paramètres a été effectué par la méthode de Ziegler-Nichols[3, p.134]. Cette méthode de type "boîte noire" présente une robustesse souvent intéressante et ne nécessite pas de connaissance pointue de modélisation du système et des organes de contrôle.

Les premiers asservissements sont ceux des actionneurs $[A_i]$ ($i=2,3,4$) sur les consignes de position $[C_i]$.

2.2.1 Etude des seuils d'oscillation et de la reproductibilité

Nous proposons ici une illustration de reproductibilité pour les seuils d'apparition et de disparition d'oscillations en fonction du débit d'air. Le protocole expérimental est le suivant.

Première étape Les positions $[C2-4]$ (précision de $\pm 5 \mu\text{m}$) des actionneurs $[A2-4]$ sont asservies sur des consignes constantes réglées pour avoir une note stationnaire, stable (pitons relevés) pour un débit U_b d'air statique typique d'une nuance mf (ici : $U_b^* \approx 4 \text{ L/min}$). Expérimentalement, on détermine un débit minimal $U_b^- < U_b^*$ garantissant l'absence d'oscillation et un débit

1. Un film est disponible à l'adresse suivante : <http://www.ircam.fr/anasy/helie/RobotizedArtificialMouth/index.html>

maximal $U_b^+ > U_b^*$ garantissant une oscillation stable (indépendamment d'un état ou régime passé).

Seconde étape On constitue une consigne pour [A1], périodique, de forme triangulaire symétrique, faisant osciller le débit d'air entre U_b^- et U_b^+ et on enregistre le son produit de manière synchrone. Afin d'avoir un comportement quasi-statique, la période du signal de la consigne est de $T = 60s$.

Troisième étape On détermine les instants auxquels un son apparaît (respectivement, disparaît) pour les parties croissantes (respectivement décroissantes) des consignes. La méthode employée est basée sur une détection de l'enveloppe temporelle du signal sonore qui subit une variation suffisamment significative pour détecter la présence ou non de son avec un seuil. Les instants fournis par cette méthode sont donnés avec une précision de l'ordre de $\delta t = 10ms$, d'où une précision sur le débit de l'ordre de $\delta U = \frac{U_b^+ - U_b^-}{T/2} \delta t \approx 2 \times 10^{-4} L/min$.

Résultats expérimentaux Les résultats obtenus pour un enchaînement de $N = 35$ périodes (durée d'acquisition $NT = 35 min$) conduisent à l'histogramme donné en figure 3.

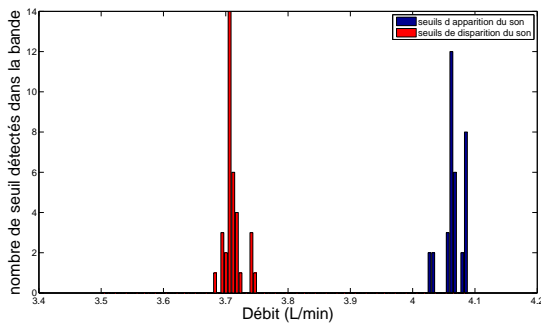


FIGURE 3 – Histogramme des seuils de disparition d'oscillation (débit décroissant, à gauche en rouge) et d'apparition (débit croissant, à droite en bleu)

Ceci conduit à un seuil moyen de disparition de $U_{disp} = 3,711 L/min$ avec un écart-type de $\sigma_{disp} = 0,014 L/min$, et à un seuil moyen d'apparition de $U_{app} = 4,065 L/min$ avec un écart-type de $\sigma_{app} = 0,016 L/min$. Notons que ces écarts-type sont représentatifs du système et non de la méthode de détection puisqu'ils sont supérieurs à δU . Ces deux modes séparés (approximativement gaussiens) mettent en évidence un hystérésis bien reproductible.

Enfin, après avoir purgé, rempli les lèvres d'eau et recherché une nouvelle configuration (similaire à la précédente) par la première étape, on a reproduit cette expérimentation. On retrouve des observations similaires avec des moyennes et écarts-type différents.

Ainsi, pour une configuration et un jeu de paramètres donnés, la plateforme permet de caractériser les seuils de bifurcation avec une bonne reproductibilité. Avec ce premier indice de fiabilité, il devient envisageable de cartographier ces seuils (et localiser des régimes de fonctionnement). Un travail allant dans ce sens va être lancé.

2.2.2 Exemple d'une commande dynamique : génération d'un pseudo-vibrato

Une première illustration de commande dynamique a été obtenue pour une variation sinusoïdale de la position du translateur, les consignes des autres paramètres de contrôle étant constantes (volume d'eau dans les lèvres et débit d'air). La position moyenne du translateur ainsi que les consignes constantes sont réglées pour avoir une note stationnaire stable. Pour l'illustration (figure 4), la sinusoïde est réglée à 1 Hz et avec une amplitude de 0.1 mm (la précision du codeur incrémental utilisé pour l'asservissement de la consigne est de 0.005 mm). En

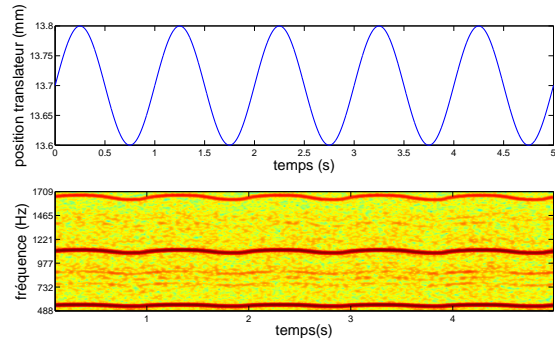


FIGURE 4 – Position du translateur [A2] en fonction du temps et spectrogramme du son obtenu.

pratique, des fréquences de 5 à 6 Hz conduisent à des sons vibrés typiques d'un "vibrato musical" et des tests montrent qu'à des fréquences plus élevées (au-delà de 20 Hz), l'asservissement en position est toujours fiable. Pour des fréquences plus basses, on vérifie que la position la plus grande (raideur équivalente des lèvres plus élevée) correspond à la note la plus aiguë et la position la plus faible à la plus grave.

2.2.3 Perspectives

Les perspectives associées à la composante "automatique" du projet sont essentiellement : (i) la modélisation du système et des organes de pilotage, (ii) l'estimation des paramètres du système et sa calibration (caractérisation des lèvres synthétiques et étude de leur vieillissement), (iii) l'amélioration des asservissements fondés sur la connaissance du modèle, e.g. par des méthodes de type observateur/retour d'état.

Par ailleurs cet outil servira à une prochaine confrontation théorie/expérience sur le jeu des cuivres, et plus précisément sur les bifurcations de régimes.

3 Mise en oeuvre au LMA : instruments à anche et flûte à bec

Les travaux au LMA se sont focalisés sur l'asservissement de la pression d'alimentation. Les réalisations mécaniques sont assurées par S. Devic et A. Busso (SERM du LMA).

3.1 Bouches artificielles développées

Le développement de l'asservissement en pression a commencé sur une évolution de la bouche multi-instruments (MIAM) équipée de deux lèvres en latex/eau permettant l'interfaçage avec un instrument à anche, un cuivre ou une flûte à bec (cf. figure 5).



FIGURE 5 – Bouche artificielle MIAM-v2 et clarinette

Par la suite une bouche artificielle dédiée à la clarinette a été développée (thèse de F. Silva), en rigidifiant le système de pince et avec une lèvre en vinyl remplie de glycerine, plus réduite, et plus rigide tout en assurant l'amortissement nécessaire au jeu (figure 6).

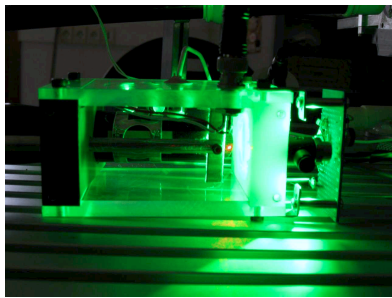


FIGURE 6 – Bouche artificielle dédiée à la clarinette

3.2 Premier dispositif de contrôle

La bouche artificielle, équipée d'un capteur de pression, est complétée par un système de contrôle en boucle fermée lui-même constitué d'électronique analogique pour la puissance (électrovanne) et d'une carte DSP pour télécharger des programmes d'asservissement numérique développés sous Matlab/Simulink. Les premiers essais ont utilisé un régulateur de type PID pour des besoins de robustesse du contrôle et ont montré le potentiel du système en permettant un suivi de pression avec une précision importante par rapport à une commande manuelle. Ce régulateur a néanmoins montré les limites du compromis performances / robustesse en ce qui concerne la régulation de la clarinette à cause du comportement très fortement non linéaire de l'instrument avec des phénomènes de pompage et d'instabilité pour certains points de fonctionnement ([4]). Pour pallier ces limitations le PID a été complété par une commande non-linéaire destinée à régulariser le comportement. Dans le cas où la régulation nécessitait le contrôle de la note émise elle-même, une boucle cascade utilisant en interne une régulation sur la pression bouche a été effectuée (cf. figure 7) à partir de l'écart par rapport à

une consigne donnée sur l'amplitude de la pression dans le bec. Dans le cas d'un pilotage en pression bouche, la consigne est donnée directement à la boucle interne en ouvrant la boucle externe (on retrouve alors le schéma plus traditionnel de la boucle fermée).

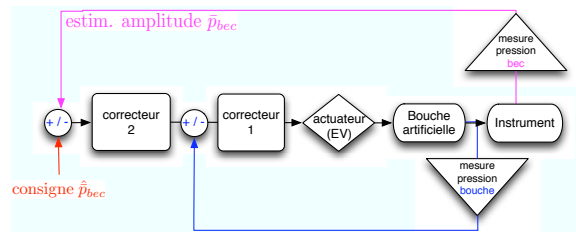


FIGURE 7 – Schéma de contrôle par boucle cascade

3.3 Améliorations du contrôle

Les principales améliorations des performances ont été, à l'issue de l'analyse du problème d'automatique en terme de modélisation par fonctions de transfert, différenciées selon le type d'instruments (flûte ou clarinette) et le type de trajectoire désirée.

3.3.1 Optimisation par type d'instrument

Pour élaborer et dimensionner un régulateur en boucle fermée plus optimisé, une modélisation du système a permis de mieux comprendre les limites constatées du contrôle. Une étude d'asservissement par type d'instrument est nécessaire. De façon globale un instrument est vu par le système de contrôle comme une fonction de transfert pression/débit entrant (l'instrument est vu au premier ordre comme une résistance à l'écoulement), dès lors que l'actionneur est une électrovanne en débit et que la grandeur asservie est en pression.

3.3.2 Optimisation par type d'expérience

De même, le contrôle est adapté et optimisé selon le type d'application. Pour une régulation de pression statique constante, le seul défi est de compenser les fluctuations du réseau d'air, et un régulateur simple de type PI peut suffire. Une bande passante élevée du système n'est pas nécessaire et par voie de conséquence les risques d'instabilité sont moindres. Au contraire, à supposer un réseau d'air naturellement stable, une bande passante faible aura l'avantage de filtrer le bruit inhérent au capteur de pression. Par contre, un asservissement pour produire des transitoires (cas de reproduction d'un transitoire d'attaque) est très demandeur en terme de dynamique au niveau de l'actionneur et l'asservissement doit être de bande passante élevée avec le risque d'instabilité du système lorsqu'on se rapproche de la fréquence de coupure de l'électrovanne (250Hz).

À partir de cette analyse, nous avons donc décliné les types de contrôles en 5 catégories différentes, que nous illustrons dans la suite de l'article : contrôle de la flûte en quasi statique (régulation) sur la pression bouche, ou en attaque, contrôle de la clarinette en quasi-statique (régulation) sur la pression bouche, ou sur la pression bec, et contrôle de la clarinette en attaque.

3.4 Illustrations des résultats obtenus

3.4.1 Flûte : régulation pression bouche

Une utilisation possible de la régulation en pression dans le cas flûte à bec est la détermination des différents régimes de l'instrument en appliquant une rampe contrôlée. La flûte présente une résistance à l'écoulement (caractéristique pression/débit) non linéaire mais monotone et de variation lente (sauf à débit quasi nul) permettant l'utilisation d'un simple régulateur PI auquel on a adjoint un gain adaptatif. Le sonogramme en figure 8 montre le résultat sur une rampe en pression bouche allant de très faibles valeurs (quelques dizaines de Pa) jusqu'à 3kPa. Ce dispositif a en particulier permis la mise en évidence de sons éoliens présents dans une plage de pression autour de 50Pa (travail en collaboration avec B. Fabre et F. Blanc, [5]). Bien connue sur les grands tuyaux d'orgues, leur existence n'avait jusque-là jamais été démontrée sur la flûte à bec. Leur observation nécessite en effet une maîtrise importante des conditions expérimentales, probablement inaccessible sans l'utilisation de la bouche artificielle asservie.

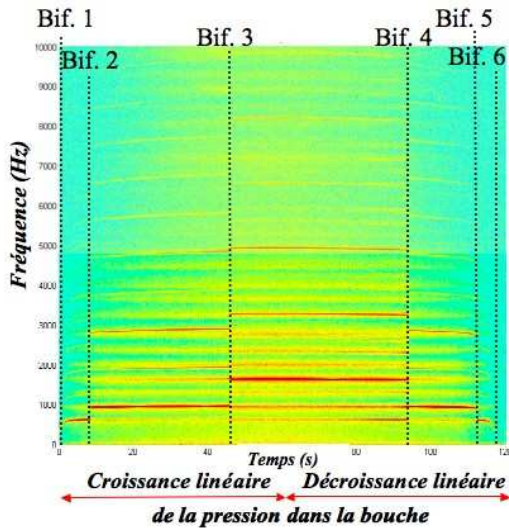


FIGURE 8 – Sonogramme de flûte a bec obtenu par une rampe en pression - doigté Bb sur une flûte alto Zen-On Bressan - collab. B. Fabre et F. Blanc, extrait de [5]

3.4.2 Flûte : transitoire d'attaques

La bouche artificielle est commandée dans ce cas pour restituer un profil de pression correspondant à un transitoire d'attaque enregistré dans la bouche d'un musicien. Cette restitution nécessite des transitoires rapides de constante de temps de l'ordre de 5 à 10ms. Dans le but de se rapprocher le plus possible du profil de référence, nous avons utilisé un algorithme de commande répétitive basé sur l'amélioration itérative du profil d'attaque en fonction d'un signal d'erreur à minimiser à chaque occurrence ([6]). Le résultat de la figure 9 est sans doute perfectible, mais montre que ce type d'évolution de la pression dans une bouche artificielle ne peut être envisagé sans l'apport de l'asservissement.

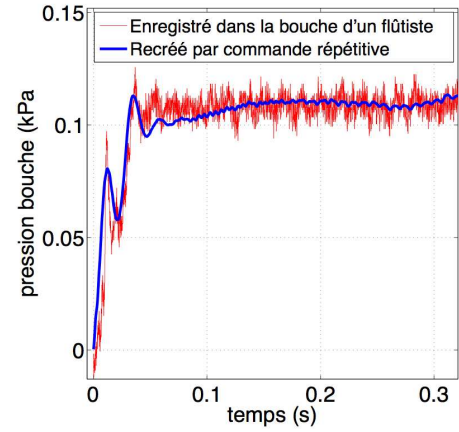


FIGURE 9 – Restitution d'un profil d'attaque de flûte à bec

3.4.3 Clarinette : régulation

La clarinette a un comportement fortement non linéaire avec inversion du signe de la dérivée de la caractéristique pression bouche / débit entrant. Dans ce cas le but du contrôle est d'abord d'assurer la précision d'une trajectoire désirée en pression (indépendamment d'aspects mimétiques comme un volume de bouche se rapprochant de celle d'un humain). Pour cet objectif un grand volume additionnel (120L) permet une régulation en pression plus précise car moins sensible aux fluctuations de débit provoquées par l'instrument, vu comme une charge consommant un débit extrêmement variable de façon fortement non linéaire. Une première application est l'obtention de diagrammes de bifurcations où la consigne de pression est une rampe lente de 0 à 5kPa pour atteindre le plaquage de l'anche (figures 10 et 11).

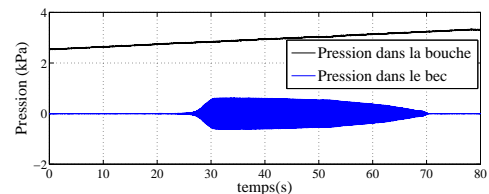


FIGURE 10 – Régulation de la clarinette : rampe de pression dans la bouche

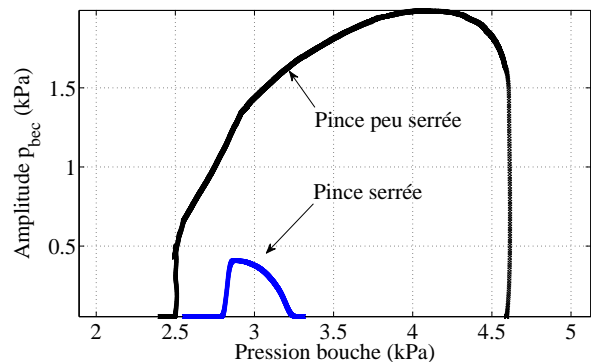


FIGURE 11 – Clarinette : diagrammes de bifurcation pour deux pinces différentes

Pour obtenir des bifurcations proches du seuil, on s'asservit sur un niveau souhaité de la pression bec sous

la forme d'une boucle cascade avec la pression bouche (comme présenté en figure 7). La consigne du niveau désiré de pression dans le bec est envoyée à la régulation de pression bouche. On gagne en détection de seuil et en caractérisation de la bifurcation dans des cas précis proches du seuil d'auto-oscillation (cf. figure 12). Ceci a été mis à profit dans [8]. Ici encore, l'apport de la

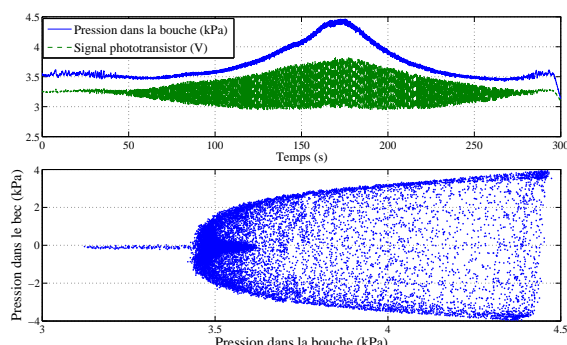


FIGURE 12 – Diagrammes de bifurcation précis en régulant sur l'amplitude de la pression dans le bec

bouche artificielle asservie est manifeste par rapport aux tentatives antérieures de mesures de seuils d'oscillation.

3.4.4 Clarinette : transitoire d'attaque

Dans ce domaine, les résultats sont préliminaires. La restitution d'attaque se fait par commande répétitive également, mais on est limité par la dynamique de l'actionneur. Il faut un dispositif de langue (ex : servovalve tout ou rien libérant subitement une pression pré-établie par la régulation amont de pression dans un volume). La figure 13 montre une attaque avec temps de montée de la pression dans la bouche de l'ordre de 35ms. Cette possibilité de la bouche artificielle a été utilisée et comparée à un transitoire d'attaque en synthèse sonore ([7]).

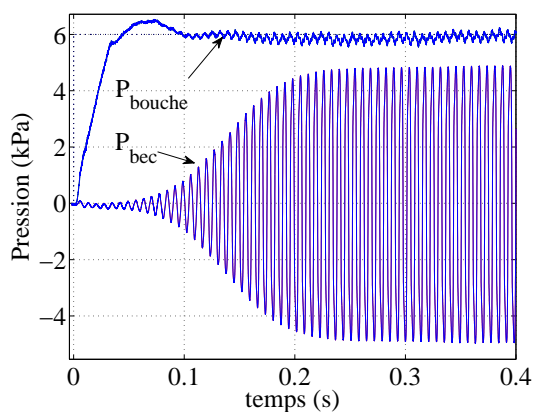


FIGURE 13 – Transitoire d'attaque sur une clarinette obtenu par commande répétitive.

3.5 Perspectives

Les activités futures vont davantage mettre l'accent sur le contrôle de régimes transitoires en pression pour obtenir des temps de montée beaucoup plus brefs (fonction "langue" pour une attaque 'te' au lieu du 'de'). Un

second objectif vise à proposer un asservissement de la pince pour les instruments à anche.

4 Conclusion

Les bouches artificielles asservies sont encore perfectibles mais sont opérationnelles. Les premiers résultats soulignent leur légitimité comme nouvel outil pour l'étude de la physique des instruments à vent.

Remerciements

Ce travail fait partie du projet ANR Consonnes.

Références

- [1] Gilbert J., Ponthus S., J.F. Petiot, "Artificial buzzing lips and brass instruments", *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 1627-1632 (1998).
- [2] Fréour V., Caussé R., Buys K., "Mechanical behaviour of artificial lips", *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*, Barcelone, Espagne, (2007), <http://articles.ircam.fr/textes/FReOUR07a/>.
- [3] Aström K., Hägglund T., "PID controllers : theory, design and tuning", *Instrument Society of America, USA*, 2nd edition (1995).
- [4] Ferrand D., Vergez C., "Blowing machine for wind musical instrument : toward a real-time control of the blowing pressure", *16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Ajaccio, France (2008).
- [5] Ferrand D., Vergez C., Fabre B., Blanc F., "High-precision regulation of a pressure controlled artificial mouth : the case of recorder-like musical instruments", *Acta Acustica united with Acustica* accepté pour publication (2010).
- [6] Hara S., Yamamoto Y., Omata T., Nakano M., "Repetitive Control System : A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals", *IEEE Transactions on Automatic Control* 33, 7 (1988).
- [7] Barthet M., Guillemain Ph., Kronland-Martinet R., Ystad S., "From Clarinet Control to Timbre Perception", *Acta Acustica united with Acustica* accepté pour publication (2010).
- [8] Ferrand D., Vergez Ch., Silva F., "Seuils d'oscillation de la clarinette : validité de la représentation exciteur-résonateur", CFA de Lyon (2010).