

CFA/VISHNO 2016

De la capacité d'une bouche artificielle à reproduire le geste d'un instrumentiste

A. Munoz Arancon, B. Gazengel et J.-P. Dalmont
LAUM-UMR CNRS 6613, Av. Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France
alberto.munoz@univ-lemans.fr



LE MANS

Ce travail présente une étude sur la capacité d'une bouche artificielle aspirante à reproduire le jeu d'une clarinette simplifiée. Le système étudié est composé d'un bec instrumenté connecté à un cylindre. L'instrument est joué d'une part par un musicien, d'autre part à l'aide de la bouche artificielle aspirante. Le bec permet la mesure de la pression dans la bouche du musicien, la pression acoustique dans le bec et le déplacement de l'extrémité de l'anche.

Le geste instrumental est caractérisé par les paramètres de jeu et les paramètres d'anche estimés par l'analyse de la partie stationnaire des signaux mesurés. Les paramètres de jeu considérés dans ce travail sont la pression moyenne dans la bouche et la valeur maximale du déplacement de l'anche. Les paramètres d'anche estimés à l'aide d'une méthode inverse sont la raideur non linéaire, l'amortissement équivalent de l'anche et l'ouverture au repos.

La bouche artificielle est réglée de façon à obtenir des valeurs de paramètres de jeu proches de ceux obtenus avec un musicien pour une nuance et une embouchure données. L'analyse et la comparaison d'un jeu de paramètres d'anche permet de quantifier la performance de la bouche artificielle à reproduire une situation de jeu. La gamme de fonctionnement de la bouche artificielle est ainsi définie pour pouvoir étudier à terme les caractéristiques d'anches considérées comme différentes.

1 Introduction

Les instruments de musique à vent tels que la clarinette ou le saxophone utilisent une anche simple, languette de roseau qui auto-oscille sous l'action d'une pression constante. L'anche joue ainsi le rôle d'une valve qui module le débit entrant. Pour leur vente, les anches sont caractérisées d'une part par leur géométrie (coupe), d'autre part par leur force, indiquée par le fabriquant à partir d'une mesure de raideur mécanique.

Pour le musicien, des anches de même marque, même coupe et même force possèdent des qualités subjectives différentes. Une enquête menée auprès de 375 musiciens a permis d'établir un histogramme donnant la répartition des anches jouables en concert ou inutilisables. Les résultats obtenus montrent que 20 à 30 % des anches sont utilisables pour le concert, et que 20 à 30 % sont inutilisables. De fait, musiciens et facteurs d'anches expriment le besoin de mieux caractériser les anches de façon à pouvoir prévoir les sensations perçues.

De façon à tenter de répondre à cette question, nous nous intéressons à la caractérisation des anches selon trois axes : caractérisation subjective, caractérisation *in vitro* et caractérisation *in vivo*.

L'étude des indicateurs subjectifs montre à ce jour que l'anche peut être décrite par deux indicateurs indépendants, reliés à la facilité d'émission et au timbre [1]. L'indicateur "qualité globale" n'est pas consensuel et dépend fortement du musicien.

Une étude des paramètres mécaniques équivalents à l'anche a été réalisée à l'aide d'un banc de mesures vibroacoustiques [2]. Ce banc permet de réaliser une analyse du premier mode de vibration des anches sans lèvres artificielle. Les résultats obtenus montrent que la raideur dynamique de l'anche estimée présente un coefficient de corrélation de 75% avec la facilité d'émission pour des anches de même force et de même coupe. Pour des anches de raideurs statiques très proches (variation de $\pm 1\%$), le coefficient de corrélation n'est plus que 41%.

Une étude des paramètres obtenus *in vivo* est en cours à l'aide d'un bec instrumenté [3]. Ce bec permet d'estimer les paramètres équivalents de l'anche en utilisant un modèle non-linéaire à un degré de liberté.

Enfin, différents travaux ont été réalisés sur des bouches artificielles permettant la caractérisation *in vitro* d'instruments à anche simple [4]. En particulier un travail a été mené pour tenter de caractériser les paramètres mécaniques des anches à l'aide d'une bouche artificielle et d'un bec instrumenté [5].

L'objectif de ce travail est de concevoir une bouche artificielle qui permet de comparer différentes anches et d'estimer des paramètres objectifs représentatifs de la qualité perçue de façon répétable. En particulier, l'objectif à plus court terme est d'évaluer la capacité de la bouche artificielle à reproduire le jeu d'un musicien d'un point de vue objectif.

Dans un premier temps, le dispositif expérimental est détaillé, quelques exemples de mesures sont présentés, et les différents paramètres sont définis. Trois familles de paramètres sont abordées : paramètres de contrôle, paramètres de jeu et paramètres d'anche. Le protocole expérimental est détaillé dans la section suivante. Les résultats, ainsi que la conclusion de cette recherche concluent ce manuscrit.

2 Dispositif expérimental

Cette section présente le dispositif expérimental développé pour caractériser les anches, à savoir une bouche artificielle. Le dispositif doit pouvoir reproduire le geste d'un musicien dans les gammes de jeu usuelles (pression d'alimentation, embouchure). Les contraintes liées à l'expérience sont les suivantes :

- pouvoir changer rapidement les anches pour effectuer de nombreux tests rapidement,
- mesurer les grandeurs physiques caractéristiques usuelles du jeu d'un musicien (pression statique, pression acoustique, déplacement de l'anche).

2.1 Description de la bouche artificielle

2.1.1 Principe général

Sachant qu'il est nécessaire de pouvoir changer les anches très facilement, les bouches artificielles

précédemment développées au LAUM ne sont pas adaptées au problème posé. La bouche artificielle développée ici utilise un système d'aspiration connecté à un résonateur cylindrique, lui même connecté au système bec et anche. Le bec, l'anche et la lèvres artificielle sont ainsi facilement accessibles pour l'opérateur.

Les différents constituants de la bouche artificielle sont (cf. figure 1) :

- Le bec et l'anche,
- un système de lèvres artificielle pouvant se déplacer dans deux directions (X,Y) (cf. figure 2)
- le résonateur (cylindrique sans trous latéraux dans ce travail),
- un volume de découplage (dit "volume tampon"),
- une vanne permettant de régler finement la valeur de la dépression dans le bec en jouant sur le débit de fuite,
- un système d'aspiration.

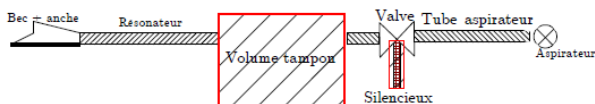


FIGURE 1 – Schéma de principe de la bouche artificielle.

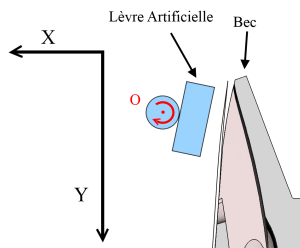


FIGURE 2 – Principe de la lèvre artificielle. Le support de la lèvre peut se déplacer dans les directions X et Y. La lèvre est en rotation autour de l'axe O.

Les différents éléments de la bouche artificielle sont détaillés ci-après.

2.1.2 Dimensions

Un premier prototype de bouche artificielle ne disposait pas de volume tampon [5]. Ce dispositif, bien que générant des auto-oscillations, ne permettait pas d'obtenir des signaux de pression représentatifs d'un signal de clarinette. Ce dysfonctionnement était dû au couplage entre le résonateur et le système d'aspiration. Pour réduire ce couplage, un volume tampon est introduit entre le résonateur et le système d'aspiration.

Pour évaluer les performances acoustiques du volume tampon, l'impédance d'entrée d'un modèle simplifié de bouche artificielle est calculée par la méthode des matrices de transfert. Les dimensions du système sont

données à la figure 3 pour deux configurations (volume tampon de diamètre 100 et 200 mm). La longueur du volume tampon est choisie ici de façon à ce que les résonances longitudinales du volume tampon n'affectent pas le résonateur cylindrique. Pour cela les fréquences de résonance du volume tampon (environ égales à $\frac{mc_0}{2L_v}$) doivent être égales aux fréquences d'anti-résonance du résonateur (également égales à $\frac{nc_0}{2L_r}$). Ainsi la longueur du volume tampon doit être la même que celle du résonateur pour éviter toute couplage entre le résonateur et le volume.

La figure 4 montre que l'ajout d'un volume tampon et d'un tube, débouchant sur une impédance de rayonnement permet de retrouver une impédance similaire à celle du résonateur cylindrique seul. Le système complet présente néanmoins une fréquence de résonance légèrement plus élevée que celles du résonateur seul. L'analyse de l'inharmonicité des pics de résonance montre que le système complet n'augmente pas l'inharmonicité, voire la réduit pour un volume tampon de diamètre 100 mm.

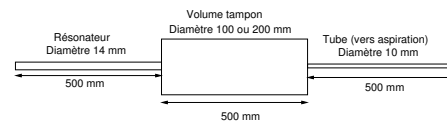


FIGURE 3 – Dimensions du système simplifié.

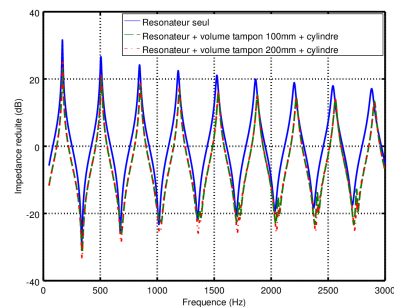


FIGURE 4 – Impédances acoustiques du résonateur seul et du système complet (résonateur - volume - tube) dont les dimensions sont données à la figure 3.

2.1.3 Lèvre artificielle

La lèvre artificielle, élément crucial pour le bon fonctionnement de la bouche artificielle est actuellement réalisée à l'aide d'un parallépipède de silicone, lui même collé à un cylindre de silicone en rotation autour d'un axe comme le montre la figure 2.

2.1.4 Bec instrumenté

Le bec instrumenté utilisé sur la bouche artificielle est réalisé à l'aide de techniques de prototypage rapide (imprimante 3D) suite à la tomographie d'un bec réel permettant d'obtenir un modèle 3D du bec. Des modifications de géométrie sont apportées au modèle avant fabrication afin d'intégrer les capteurs suivants comme détaillé dans [3] :

- deux photointerrupteurs *SG2BC* permettant de mesurer les déplacements de chaque côté de l'extrémité de l'anche,
- un capteur de pression Endevco 8507-C2 permettant la mesure des composantes continue et alternative de la pression dans le bec,
- deux accéléromètres 352C23 associés à un conditionneur PCB Piezotronics 482C.

Les capteurs de pression sont étalonnés à l'aide d'un tube à eau en régime statique. Les deux capteurs de déplacement nécessitent un étalonnage après chaque utilisation d'une anche, chaque anche possédant une réflectivité optique différente. Le principe de l'étalonneur des capteurs de déplacement est présenté à la figure 5. Il permet de positionner l'anche à deux ouvertures connues (0 et 0,7 mm) par rapport à l'extrémité du bec (canal anche-table).

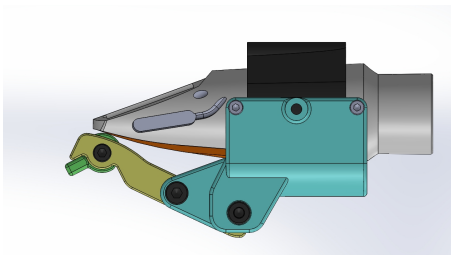


FIGURE 5 – Vue CAO de l'étalonneur des capteurs de déplacement et du bec instrumenté.

2.2 Exemples de signaux

La figure 6 montre un exemple de signaux obtenus à l'aide d'une anche en roseau et des capteurs décrits ci-dessus dans une des positions de la lèvre décrite au §4.1. La nuance utilisée dans ce cas est estimée *mezzoforte*.

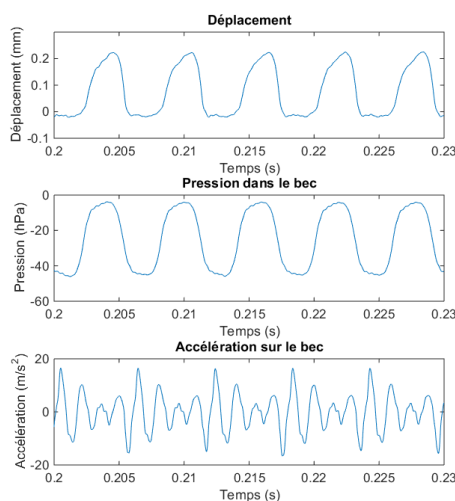


FIGURE 6 – Exemples de signaux obtenus à l'aide de la bouche artificielle à un niveau sonore de 161 dB dans le bec pour une pression statique -24,7 hPa.

La figure 6 montre le signal de déplacement obtenu d'un côté du bec, la pression dans le bec et l'accélération du bec sur un côté. La bouche fonctionnant en aspiration, le signal de pression dans le bec a une valeur moyenne négative. Sachant que la pression à l'extérieur du bec est la pression atmosphérique, cette valeur moyenne est l'opposé de la pression statique qui existerait dans la bouche du musicien en situation *in vivo*. La partie dynamique de la pression dans le bec est la pression acoustique.

Le signal de déplacement obtenu d'un côté du bec montre une ouverture maximale de 0,2 mm, la position $y = 0$ correspondant à la fermeture de l'anche. Les valeurs négatives du signal de déplacement correspondent à l'écrasement de l'anche à l'intérieur du bec.

Le signal d'accélération montre clairement les effets de choc de l'anche sur la table du bec. En effet, les valeurs maximales de l'accélération correspondent *a priori* aux instants où l'extrémité de l'anche est en contact avec le bec.

2.3 Paramètres et grandeurs mis en jeu

Nous présentons dans ce paragraphe les paramètres utilisés pour réaliser l'expérience décrite au §4.

2.3.1 Paramètres de "référence"

La bouche artificielle ne comportant pas de cavité sur le bec et l'anche, il est possible (en démontant le système de lèvre artificielle) à un musicien de la jouer comme une clarinette. Cette propriété est utilisée pour obtenir les paramètres de "référence" qui déterminent le geste du musicien que l'on cherche à reproduire. Dans ce cas, un deuxième capteur de pression est placé sur le bec pour mesurer la pression dans la bouche du musicien. Les paramètres de "référence" de ce travail sont ainsi :

- la valeur de la pression moyenne dans la bouche du musicien,
- La fréquence fondamentale du signal de pression dans le bec (fréquence de jeu),
- La valeur crête à crête d'un des deux signaux de déplacement de l'anche,
- La valeur efficace de la pression dans le bec.

2.3.2 Paramètres de contrôle et paramètres de jeu

Le geste instrumental réalisé à l'aide de la bouche artificielle est contrôlé d'une part à l'aide du débit de fuite (en contrôlant l'ouverture de la valve entre l'aspirateur et le volume tampon), d'autre part en jouant sur la position de la lèvre dans le plan X, Y .

Ces deux paramètres de contrôle permettent de chercher les régimes d'auto-oscillation. Dans le cas où l'auto-oscillation est possible, ce réglage permet de trouver un point de fonctionnement de la bouche artificielle. Pour ce point de fonctionnement, la bouche artificielle produit un ensemble de paramètres de jeu : pression moyenne, fréquence fondamentale, déplacement crête à crête, valeur efficace de la pression acoustique.

Il est à noter que le contrôle suivant l'axe Y est déterminant pour obtenir des auto-oscillations et que le contrôle sur l'axe X influe davantage sur la fréquence de jeu, le déplacement crête à crête et le niveau sonore dans le bec.

2.3.3 Paramètres d'anche

Les signaux de pression et de déplacement obtenus à l'aide de la bouche artificielle permettent d'estimer les paramètres d'anche équivalents selon la méthode décrite plus en détail dans [3]. L'équation décrivant l'ouverture de l'anche $y(t)$ est la suivante

$$R\dot{y}(t) + K_{nl}(y(t) - H) = -\Delta P(t), \quad (1)$$

où

$$\Delta P(t) = P_m - P_{mp}(t), \quad (2)$$

et R , K_{nl} sont respectivement l'amortissement et la raideur de l'anche.

L'effet d'"enroulement" de l'anche sur le bec est décrit par la raideur non linéaire K_{nl} [6], la non-linéarité étant décrite par les coefficients k_c et y_c . Cette raideur s'écrit

$$K_{nl} = \begin{cases} K - \frac{k_c(y-y_c)^2}{y(t)-H} & \text{si } y > y_c, \\ K & \text{si } y \leq y_c. \end{cases} \quad (3)$$

Finalement, les paramètres estimés sont K , k_c , y_c , R et H l'ouverture de l'anche au repos.

3 Protocole de mesures

De façon à évaluer la performance de la bouche artificielle pour reproduire le geste d'un musicien, une anche en roseau de saxophone ténor est utilisée. Dans un premier temps, un musicien joue la bouche artificielle comme une clarinette. Les signaux produits sont enregistrés d'une part et analysés à l'oscilloscope d'autre part. Cette première expérience permet d'estimer les valeurs des paramètres de "référence" du musicien. Dans un deuxième temps, la bouche artificielle est réglée en jouant sur les paramètres de contrôle (débit de fuite, position de la lèvres). En pratique, la pression moyenne dans le bec est d'abord réglée pour être identique en valeur absolue à la pression moyenne obtenue dans la bouche du musicien. Dans un deuxième temps, la position de la lèvres est choisie de telle sorte que la bouche permette une auto-oscillation et que la fréquence de jeu soit au plus proche de celle du musicien. Enfin, un compromis entre ces différents paramètres est recherché pour que les valeurs des autres paramètres de jeu (valeur crête à crête du déplacement et l'amplitude efficace de la pression acoustique) soient au plus proches des paramètres de "référence".

4 Résultats

4.1 Plages de fonctionnement

Pour une pression statique donnée (identique à celle du musicien), deux plages de fonctionnement de la bouche artificielle ont été trouvées pour reproduire au mieux

les paramètres de référence. Chaque plage est composée de plusieurs points de fonctionnement correspondant à différentes positions de la lèvres artificielle. Les positions de la lèvres pour ces deux plages sont présentées à la figure 7.

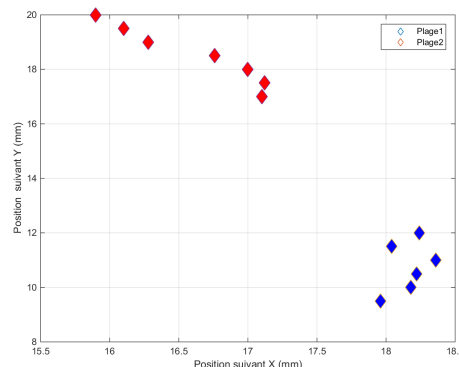


FIGURE 7 – Positions X, Y de la lèvres artificielle correspondant aux deux plages de fonctionnement de la bouche artificielle. La plage 1 correspond à une position de la lèvres à proximité du canal anche-table, la plage 2 correspond à une position de la lèvres plus près du talon de l'anche.

La position de référence de la lèvres ($X = Y = 0$) n'est pas définie dans le référentiel du bec. Néanmoins, pour la plage de fonctionnement 1, le bord supérieur de la lèvres artificielle est placé environ au niveau de l'extrémité de l'anche ($y \approx 10 - 12\text{mm}$). La deuxième plage de fonctionnement est placée à environ 8 mm de la plage 1 ($y \approx 18 - 20\text{mm}$), soit plus près du talon de l'anche.

4.2 Aptitude de la bouche à reproduire un geste

4.2.1 Paramètres de jeu

Pour les deux plages de fonctionnement identifiées, les valeurs moyennes des paramètres de jeu sont présentées au tableau 1 et sont comparées aux valeurs des paramètres de références obtenus à l'aide du musicien.

TABLEAU 1 – Paramètres de références et de jeu.

	Paramètres de référence	Paramètres de jeu plage 1	Paramètres de jeu plage 2
$ P_{stat} $ (hPa)	23,3	25,1	25,6
f_0 (Hz)	171,2	169,5	173,6
L_p (dB)	159,8	161,6	161,5
y (mm)	0,31	0,26	0,24
Y (mm)		10,5	18,5

Les résultats présentés au tableau 1 montrent que la pression d'alimentation de jeu est légèrement supérieure à la pression de référence (écart de 8 à 10 %), ceci étant lié au réglage pas assez fin du débit de fuite. La fréquence de jeu est proche de la fréquence de référence (écarts des fréquences moyennes compris entre -17 et +24 cent). Le niveau sonore dans le bec obtenu sur la bouche artificielle

est supérieur d'environ 2 dB à celui obtenu par le musicien. Pour les deux plages de fonctionnement l'amplitude crête à crête du déplacement de l'anche reste néanmoins significativement inférieure au déplacement de référence (écart de -16 à -20 %).

4.2.2 Diagrammes caractéristiques

A partir des signaux de pression et déplacement mesurés, il est possible de représenter les diagrammes caractéristiques du geste du musicien et de la bouche artificielle. Les figures 8 et 9 montrent ces diagrammes pour les plages de fonctionnement 1 et 2 respectivement.

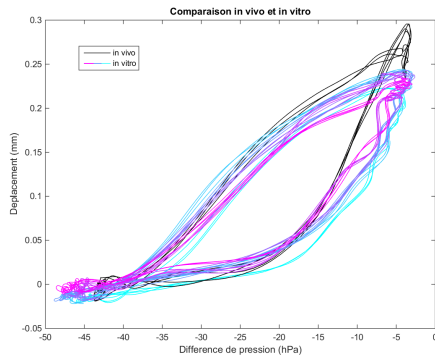


FIGURE 8 – Diagramme caractéristique de l'anche obtenu par le jeu d'un musicien (*in vivo*) et par la bouche artificielle (*in vitro*) pour la plage de fonctionnement 1.

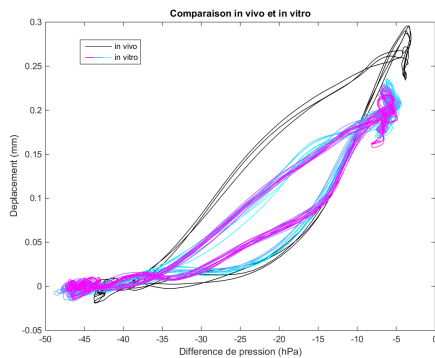


FIGURE 9 – Diagramme caractéristique de l'anche obtenu par le jeu d'un musicien (*in vivo*) et par la bouche artificielle (*in vitro*) pour la plage de fonctionnement 2.

L'analyse des diagrammes caractéristiques montre que la plage de fonctionnement 1 (lèvre à proximité du canal-anche table) produit un geste instrumental plus proche du geste du musicien que la plage 2. La figure 8 montre néanmoins que le diagramme caractéristique obtenu sur bouche artificielle diffère du diagramme de référence pour $y > 0,15$ mm, c'est à dire lorsque l'anche s'éloigne de la table du bec et vient en appui sur la lèvre artificielle. Ceci tend à montrer que les propriétés mécaniques de la lèvre artificielle sont encore trop éloignées de propriétés d'une lèvre réelle pour reproduire le geste du musicien. En revanche, l'enroulement de l'anche sur le bec ($y < 0,1$

mm) est le même dans les deux cas (musicien ou bouche artificielle).

4.2.3 Paramètres d'anche

Les performances de la bouche artificielle peuvent être aussi évaluées en comparant les paramètres d'anche estimés dans les deux situations (jeu du musicien, jeu de la bouche artificielle).

Les paramètres d'anche estimés à partir des signaux générés par le musicien (*in vivo*) sont présentés dans le Tableau 2. Ils constituent les paramètres de référence.

TABLEAU 2 – Paramètres d'anche (*in vivo*) estimés pour une mesure en nuance *mezzoforte*.

K_{ref} (10^7 Pa/m)	H_{ref} (10^{-3} m)	R_{ref} (10^3 Pa·s/m)
1,08	0,3	1,11
$\pm 3,7 \%$	$\pm 5,5 \%$	$\pm 4,5 \%$

Les paramètres d'anche estimés à partir des signaux générés par la bouche artificielle (*in vitro*) pour les deux plages de fonctionnement sont présentés aux figures 10, 11 et 12 sous forme de valeurs relatives aux valeurs de référence données au tableau 2.

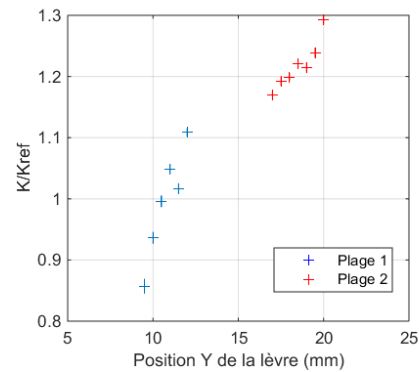


FIGURE 10 – Valeurs relatives des raideurs d'anche pour les deux plages de fonctionnement.

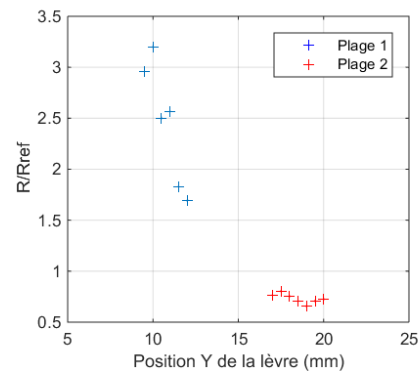


FIGURE 11 – Valeurs relatives des amortissements d'anche pour les deux plages de fonctionnement.

Les raideurs obtenues sur bouche artificielle sont proches de celle estimée *in vivo*, spécialement pour la plage

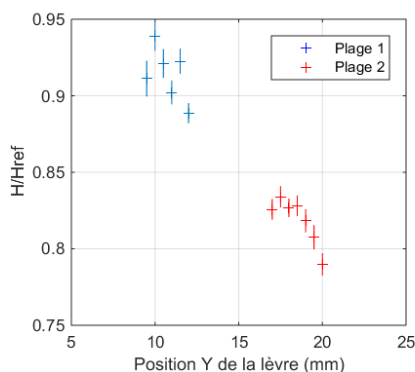


FIGURE 12 – Valeurs relatives des ouvertures au repos pour les deux plages de fonctionnement.

1. Pour la plage 2, les raideurs du système lèvres-anche sont plus élevées que pour la plage 1. Dans les deux cas, la raideur augmente lorsque la lèvres s'éloigne de l'extrémité de l'anche.

L'amortissement estimé pour la plage 1 est supérieur à l'amortissement de référence (*in vivo*) et vaut en moyenne le double. Pour la plage 2, l'amortissement est plus faible que la valeur de référence (environ 0,7 fois la valeur de référence). La valeur de l'amortissement décroît lorsque la lèvres s'éloigne de l'extrémité de l'anche. La variance sur les valeurs d'amortissement est beaucoup plus importante que sur les valeurs de raideur.

Pour la plage de fonctionnement 1, l'ouverture au repos obtenue sur bouche artificielle est très proche de l'ouverture imposée par le musicien (écart de 5 à 10 %). Pour la plage 2, l'ouverture est plus faible (écart moyen de 20 %).

5 Conclusion

La bouche artificielle aspirante développée dans ce travail permet de jouer des anches en roseau sans difficulté, ce qui la distingue *a priori* des bouches artificielles présentées dans les travaux antérieurs. En présence d'une lèvres artificielle, elle peut être utilisée comme une bouche artificielle classique (mode de fonctionnement *in vitro*). Le retrait de la lèvres artificielle permet à un musicien de la jouer comme un instrument réel (mode de fonctionnement *in vivo*).

La recherche des positions de lèvres artificielle permettant d'obtenir des auto-oscillations montre l'existence de deux plages de fonctionnement. Pour ces deux plages, la comparaison des paramètres de jeu *in vitro* et des paramètres de référence (*in vivo*) montre une assez bonne concordance.

La comparaison des diagrammes caractéristiques obtenus dans les deux situations montre que la bouche artificielle reproduit assez bien le jeu du musicien lorsque la lèvres est proche de l'extrémité de l'anche, ce qui n'est pas une position correspondant au jeu naturel d'un musicien. Dans ce cas, la différence entre les deux modes de jeux est essentiellement visible lorsque l'anche vient en contact avec la lèvres.

Lorsque l'anche près de l'extrémité de l'anche, une petite variation de la position de la lèvres entraîne une

grande variation des paramètres de jeu. Le système est donc très sensible à la position de la lèvres. Pour la deuxième plage, la sensibilité à la position est plus faible mais les paramètres estimés *in vitro* sont plus éloignés des paramètres de référence (*in vivo*). La lèvres artificielle est ici l'élément à améliorer pour mieux reproduire le geste d'un musicien, par exemple en utilisant un cylindre de latex rempli de glycérine [7].

A plus long terme, la répétabilité de paramètres de jeu et des paramètres d'anche doit être évaluée pour une même position de lèvres. Ce dispositif sera ensuite utilisé pour estimer les paramètres obtenus avec différents musiciens, différentes nuances et différentes anches.

Remerciements

Les auteurs remercient l'équipe de projet (Clément BALESTE, Antoine CAILLARD, Vincent DANGLA, Hamza ICHKAHKH) de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans pour l'étude et la réalisation du prototype de bouche artificielle.

Références

- [1] Jean-François Petiot, Pierric Kersaudy, Gary Scavone, Stephen McAdams, and Bruno Gazengel. Modeling of the subjective quality of saxophone reeds. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 19.
- [2] Bruno Gazengel, Jean Pierre Dalmont, and Jean Francois Petiot. Link between objective and subjective characterizations of bb clarinet reeds. *Applied Acoustics*, 106 :155–166, 2016.
- [3] Alberto Muñoz Arancón, Bruno Gazengel, Jean-Pierre Dalmont, and Ewen Conan. Estimation of saxophone reed parameters while playing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, revision in progress, 2016.
- [4] John Backus. Vibrations of the reed and the air column in the clarinet. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 33(6) :806–809, 1961.
- [5] Alberto Muñoz Arancón, Bruno Gazengel, and Plantier Guy Dalmont, Jean Pierre. Comparative study of different physical models describing the reed behaviour in artificial playing conditions. In *ISMA 2014*, 2014.
- [6] Vasileios Chatziioannou and Maarten van Walstijn. Estimation of clarinet reed parameters by inverse modelling. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4) :629–639, 2012.
- [7] Bruno Gazengel, Thomas Guimezanes, Jean-Pierre Dalmont, Jean Baptiste Doc, Sylvain Fagart, and Y Lèveillé. Experimental investigation of the influence of the mechanical characteristics of the lip on the vibrations of the single reed. In *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, Barcelona, Spain*, 2007.