

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Caractérisation expérimentale de becs de saxophone ténor à l'aide  
d'un musicien artificiel fonctionnant en aspiration**

B. Gazengel<sup>a</sup>, L. Descuns<sup>a</sup> et P. Eveno<sup>b</sup>

<sup>a</sup>LAUM, Avenue O Messiaen, 72000 Le Mans, France

<sup>b</sup>SyoS, 3 Cité de l'Ameublement, 75011 Paris, France

bruno.gazengel@univ-lemans.fr

Les instruments à anche simple utilisent pour fonctionner un bec qui permet au musicien de positionner l'anche et d'appliquer une surpression dans la bouche, créant ainsi des auto-oscillations pour une pression statique dans la bouche du musicien supérieure à une pression appelée "pression de seuil". Les caractéristiques géométriques du bec ont une influence importante sur les sensations du musicien (facilité de jeu, timbre, homogénéité, ...), elles-mêmes liées à des caractéristiques physiques telles que la pression de seuil, le centre de gravité spectral. De façon à adapter les becs aux souhaits du musicien, il est aujourd'hui possible de proposer rapidement différentes géométries de bec (externes, internes) grâce à l'impression 3D. La conception de ces becs nécessite de comprendre le lien qui existe entre les paramètres géométriques et les sensations du musicien ou les paramètres objectifs qui peuvent être mesurés en situation de jeu (naturelle ou artificielle). Dans ce travail, un machine à aspirer munie d'une lèvre artificielle et utilisant un résonateur cylindrique est mise en œuvre pour caractériser plusieurs becs de géométries différentes. Pour chacun des becs, la pression de seuil est estimée à l'aide de la mesure du diagramme de bifurcation obtenu en faisant varier la pression d'alimentation. Par ailleurs, le centre de gravité spectral et la fréquence fondamentale sont estimés en fonction de la pression d'alimentation. Dans un premier temps, différentes mesures sont réalisées à l'aide d'un bec et de plusieurs anches de façon à choisir une anche qui présente une faible sensibilité à la position de la lèvre artificielle. Dans un deuxième temps, les paramètres objectifs mesurés sur la machine à aspirer sont comparés aux descripteurs subjectifs (facilité de jeu, timbre) obtenus à l'aide de 3 saxophonistes professionnels.

## 1 Introduction

Les instruments à vent tels que le saxophone ou la clarinette sont composés d'un résonateur couplé à un bec équipé d'une languette en roseau appelée anche. Sous l'action d'une pression constante appliquée par le musicien, le système est mis en état d'auto-oscillation ce qui permet la production du son. Outre les caractéristiques du résonateur (impédance d'entrée), les propriétés mécaniques de l'anche et la géométrie du bec déterminent les indicateurs de qualité de l'instrument tels que la facilité d'émission, la justesse et le timbre. Au cours de ces dernières années, plusieurs études ont été réalisées sur les anches de saxophones [1–3] et plus récemment sur une bouche artificielle aspirante [4, 5].

Parallèlement, la start-up SYOS développe des becs de saxophone sur mesure [6] et travaille sur les liens entre les sensations des musiciens et les paramètres physiques d'un bec. De ce fait, la rapidité de fabrication et les réponses aux demandes des musiciens seront améliorées. Cette démarche nécessite de développer une méthode de caractérisation objective des becs et de rechercher des corrélations entre les indicateurs objectifs proposés et les descripteurs subjectifs définis grâce aux rencontres avec des saxophonistes professionnels.

L'objectif de ce travail est de développer et évaluer une méthode expérimentale permettant de caractériser les becs à l'aide d'indicateurs objectifs pouvant à terme être mis en relation avec les descripteurs subjectifs. La méthode proposée s'appuie sur la mesure de diagrammes de bifurcation [7] obtenus pour différents becs et pour une anche de référence. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage de Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) de mesures physiques [8].

La première partie de ce document présente la bouche artificielle utilisée pour réaliser les diagrammes de bifurcation et définit les indicateurs utilisés. La méthodologie de comparaison des becs est également présentée, notamment en fixant un paramètre de contrôle, l'ouverture au repos. Enfin l'incertitude de mesure des indicateurs est estimée.

La deuxième partie présente les tests préliminaires réalisés à l'aide d'un bec et de trois anches. Les raideurs mécaniques de ces anches sont estimées à l'aide d'un banc de mesure statique et sont comparées aux pressions de seuil

mesurées à l'aide de la bouche artificielle.

La troisième partie présente la méthode employée pour choisir une anche dite "de référence" pour caractériser les becs. Enfin trois becs de géométries différentes sont caractérisés à l'aide de la bouche artificielle et sont évalués par des musiciens professionnels. Les indicateurs objectifs et les descripteurs subjectifs obtenus sont comparés pour évaluer l'aptitude de la bouche artificielle à discriminer les becs.

## 2 Système expérimental

### 2.1 Bouche artificielle

Le principe de la bouche artificielle utilisée dans le cadre de ce travail est présenté à la figure 1. Une description plus complète est donnée dans [5].

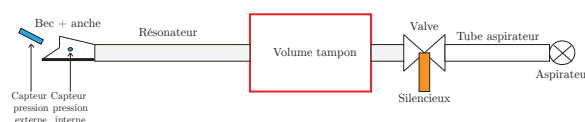


FIGURE 1 – Schéma de la bouche artificielle (issu de [8]).

La bouche artificielle fonctionne en dépression. Ceci permet d'exercer une pression inférieure à la pression atmosphérique dans le bec en conservant la pression atmosphérique à l'extérieur du bec. La différence de pression créée sur l'anche permet l'auto-oscillation tout en conservant un accès facile à l'anche. Le dispositif expérimental est constitué de trois parties :

- un résonateur cylindrique de longueur constante (50 cm),
- un dispositif aéraulique permettant l'aspiration et le réglage de la dépression,
- un volume tampon permettant de découpler acoustiquement le résonateur du système aéraulique.

Une lèvre artificielle en latex vient en contact avec l'anche pour simuler l'action de l'instrumentiste. Il est

possible de déplacer cette lèvre sur deux axes orthogonaux par le moyen de vis micrométriques.

Deux capteurs de pression (Endevco 8507C) permettent de mesurer respectivement la pression dans le bec et à l'extérieur du bec. L'étalonnage de ces capteurs se fait en statique en imposant une pression stable avec un tube à eau. On fait l'hypothèse que les capteurs sont étalonnés en dynamique [9].

## 2.2 Exemples de signaux de mesures

La figure 2 montre le signal de pression dans le bec (haut) le signal pression extérieure (bas).

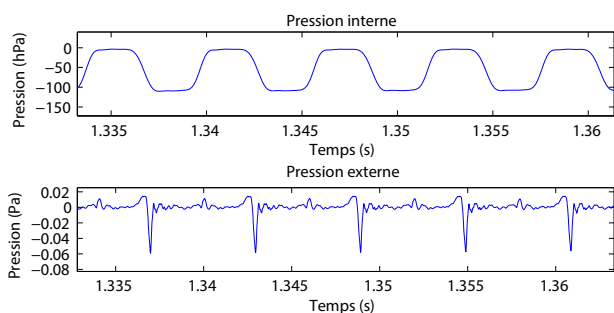


FIGURE 2 – Exemples de signaux pressions interne (haut) et externe (bas) mesurés (issu de [8]).

La pression dans le bec est à valeur moyenne négative, correspondant à la valeur de la dépression dans le bec. Par ailleurs, elle oscille entre une pression nulle (pression atmosphérique) et deux fois la valeur moyenne. L'analyse de cette pression permet d'estimer les indicateurs objectifs recherchés (présentés ci-dessous §2.3). Les pics observés sur la pression à l'extérieur du bec sont *a priori* dus à l'impact de l'anche contre le bec lors de son oscillation, ils correspondent donc à la pression minimum du bec. L'analyse de la pression externe permet aussi d'estimer des indicateurs objectifs pouvant être utiles à terme.

## 2.3 Indicateurs

Les indicateurs objectifs étudiés dans ce travail sont :

- la pression de seuil,
- la fréquence de jeu (fréquence fondamentale) et son évolution en fonction de la pression d'alimentation,
- le centre de gravité spectral et son évolution en fonction de la pression d'alimentation.

Chacun de ces trois indicateurs nécessite de mesurer le diagramme de bifurcation en faisant varier la pression d'alimentation en fonction du temps.

### 2.3.1 Estimation du diagramme de bifurcation

Le diagramme de bifurcation est obtenu en plaquant l'anche sur le bec (dépression importante) et en faisant tendre la pression d'alimentation vers zéro. Ce diagramme est estimé en calculant l'évolution temporelle des valeurs moyenne et efficace de la pression dans le bec. Il est représenté en traçant la pression efficace dans le bec en fonction de la pression moyenne dans le bec.

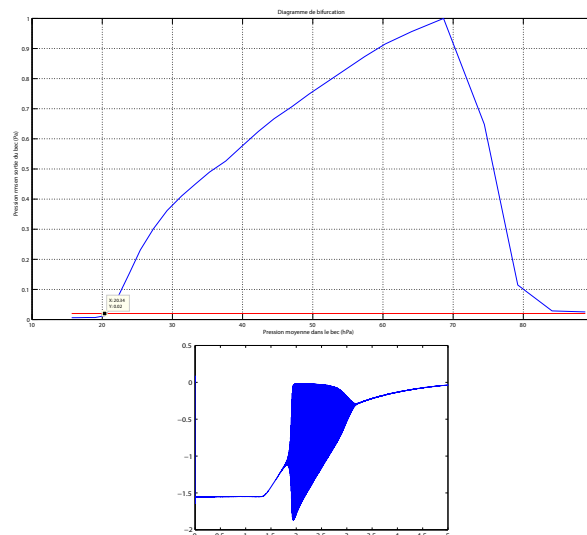


FIGURE 3 – Exemple d'un diagramme de bifurcation et de son signal temporel (issu de [8]).

### 2.3.2 Indicateurs estimés

La pression de seuil est estimée en sélectionnant le point d'inflexion du diagramme de bifurcation. Les centres de gravité spectraux interne et externe sont estimés à l'aide des spectres des pressions interne et externe. La fréquence fondamentale du signal est estimée à l'aide d'une recherche de zéro du signal de pression interne.

## 2.4 Méthodologie de comparaison des becs

De façon à comparer différents systèmes bec-anche, il est nécessaire de fixer certains paramètres pour l'expérience. Nous choisissons ici de fixer l'ouverture (distance entre l'extrémité de l'anche et du bec) au repos en utilisant une anche de référence et différents becs. Pour cette expérience, le contrôle de l'ouverture au repos est réalisé grâce à un capteur de déplacement optique *Fiberoptic RC62* ou à l'aide d'un appareil photographique. Pour ce dernier l'analyse d'image permet d'estimer l'ouverture au repos. L'utilisation du capteur optique nécessite d'utiliser des becs de même couleur possédant ainsi le même coefficient de réflexion optique.

## 2.5 Étude de répétabilité

Une étude de répétabilité est réalisée dans différentes conditions pour s'assurer de la robustesse de la mesure des critères objectifs. Les conditions de l'étude sont les suivantes :

- test 1 : modification de la pression d'alimentation en fermant la vanne manuellement,
- test 2 : modification de la pression d'alimentation en arrêtant l'aspirateur,
- test 3 : démontage et remontage du bec,
- test 4 : comparaison de deux becs dont la géométrie initiale est identique.

Le placement de l'anche étant une source d'incertitude non négligeable, les becs utilisés pour le test 4 sont munis d'une butée pour placer l'anche à la même position.

Pour chaque test, cinq essais sont réalisés, l'incertitude relative  $U(x)$  sur la variable  $x$  est estimée par  $U\%(x) = 100 * \frac{\bar{x}}{U(x)}$ , où  $U(x) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{5}}$ .  $\sigma(x)$  est l'écart-type et  $\bar{x}$  est la valeur moyenne des cinq valeurs mesurées. Les résultats sont présentés au tableau 1 et montre que la bouche artificielle permet d'estimer les indicateurs objectifs avec une erreur relative inférieure à 2%. Par ailleurs, ces tests montrent qu'il est préférable de stopper la source de dépression (plutôt que de faire varier la pression manuellement).

TABLEAU 1 – Incertitudes relative (en %) des critères objectifs pour différentes conditions d'essais.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Pseuil	1,29	0,4	1,56	1,203
CGS interne	1,53	0,58	1,82	0,911
CGS externe	0,97	0,74	7,81	2,139
$f_0$	1,17	1,08	0,18	0,274

### 3 Tests préliminaires

Les mesures présentées dans cette section ont pour objectif de valider le fonctionnement de la bouche artificielle et l'estimation de la pression de seuil. Trois anches (deux anches de marque "Rigotti GOLD" de force 2.5 et 3 ainsi que sur une anche synthétique "Forestone") sont étudiées. D'une part, leur raideur est mesurée à l'aide d'un banc statique, d'autre part les pressions de seuil de ces trois anches sont estimées sur la bouche artificielle en utilisant un même bec.

#### 3.1 Mesure de raideur statique

Le banc de mesure utilisé pour effectuer la mesure de raideur d'anche de saxophone est celui présenté dans [10]. Le principe consiste à appliquer différentes masses connues sur l'anche et à mesurer le déplacement de celle-ci au point d'application de la force. Ceci permet de déterminer la raideur de l'anche pour différentes abscisses du point d'application de la force.

Le déplacement de ces anches a été évalué pour trois positions de la tête d'appui  $d$ , une première en bout d'anche ( $d = 0$ ), une deuxième à  $d = 5 \text{ mm}$  et la troisième à  $d = 10 \text{ mm}$ . Il a été nécessaire d'utiliser une dizaine de masses différentes pour appliquer des forces jusqu'à 1N. Les raideurs des 3 anches pour les différentes positions sont répertoriées dans le tableau 2.

#### 3.2 Estimation de la pression de seuil

L'objectif de ces mesures est d'établir une estimation de la pression de seuil comme présenté au §2.3.2. Il est possible de comparer les raideurs des 3 anches mesurées avec leur pression de seuil.

Les graphiques représentant les diagrammes de bifurcation des trois anches sont représentés en figure 14. La position de la lèvres est  $x_l = 12,5 \text{ mm}$ ,  $y_l = 12,1 \text{ mm}$  dans le référentiel décrit par Munoz [5].

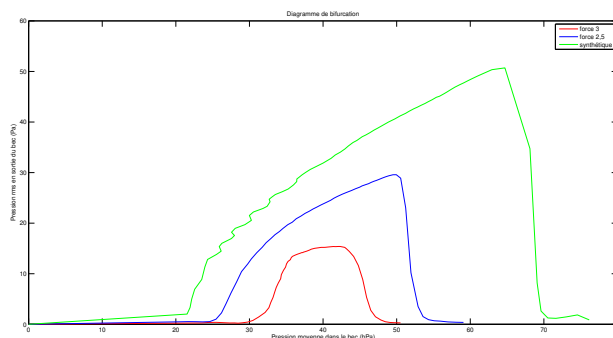


FIGURE 4 – Diagramme de bifurcation sur les 3 anches (issu de [8]).

Les pressions de seuil estimées pour les trois anches sont données dans le tableau 2.

La pression de seuil est corrélée à la raideur mesurée au bout de l'anche ( $d = 0 \text{ mm}$ ) (cf. tableau 2). On peut noter que la raideur statique n'évolue pas de la même façon en fonction du point d'application de la force lors de la mesure de la raideur statique.

TABLEAU 2 – Raideur des 3 anches (pour les 3 positions de mesure) et pressions de seuil estimées sur la bouche artificielle.

Anche	synthétique	2,5	3
Raideur $d = 0$ (N/m)	679,82	782,2	876,95
Raideur $d = 5 \text{ mm}$ (N/m)	1873	2643,4	2831,9
Raideur $d = 1 \text{ cm}$ (N/m)	5271,9	7535	6694,8
Pression de seuil (hPa)	22,2	28,1	32,1

### 4 Choix d'une anche de référence

L'objectif de cette partie est de choisir une anche pour caractériser les différents becs étudiés. Celle-ci doit conserver les mêmes caractéristiques dans le temps. Elle ne doit donc pas être affectée par des changements de température ou d'humidité et ne doit pas s'user trop vite. Pour cette raison, trois anches de synthèse (Fiber, Forestone et Legere) sont retenues.

Par ailleurs, il est souhaitable que la position de la lèvres n'ait pas une grande influence sur les critères objectifs étudiés. L'évolution de ces critères est étudiée en fonction de la position  $x_l$  de la lèvres pour les trois anches retenues. La position moyenne est celle préconisée dans [5] et l'étendue de mesure est  $\pm 1 \text{ mm}$  autour de cette position (par pas de 0.1 mm).

Les résultats obtenus permettent de retenir l'anche synthétique « forestone » qui montre des variations faibles de la pression de seuil et du CGS en fonction de  $x_l$  (cf. figure 5).

### 5 Résultats

Dans cette partie, trois becs fournis par la start-up SYOS sont étudiés (notés A, B, C dans la suite). Ils possèdent des butées pour placer l'anche à la même position. Ils ont

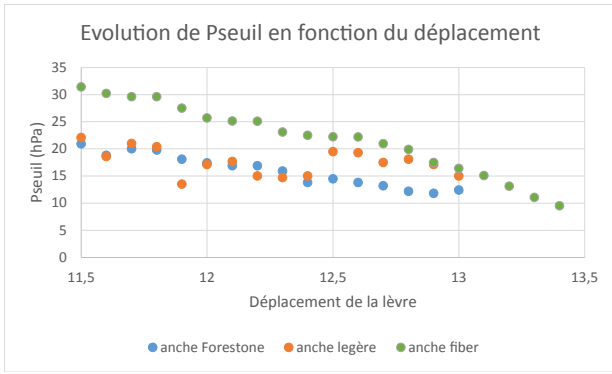


FIGURE 5 – Évolution de la pression de seuil pour les trois anches synthétiques en fonction de  $x_l$  (issu de [8]).

été testés au préalable par dix musiciens professionnels pour évaluer les critères “facilité d’émission” et “timbre (mat-brillant)”.

### 5.1 Critères objectifs

Les mesures sont réalisées en contrôlant l’ouverture au repos grâce au capteur optique (les trois becs ayant la même couleur). La lèvres artificielle est placée à  $x_l = 5$  mm,  $y_l = 1.6$  mm [5]. Pour chaque bec, deux mesures sont réalisées en plaquant l’anche puis en arrêtant l’aspirateur. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6. Cette figure permet d’estimer les valeurs des pressions de seuil et les valeurs des centres de gravité spectraux à la pression de seuil. Ces valeurs sont données dans le tableau 3.

TABLEAU 3 – Pressions de seuil, CGS interne et externe estimés à la valeur de la pression de seuil.

Bec	Pression de seuil (hPa)	CGS interne	CGS externe
Bec A	17,6	1.53	23,6
Bec B	19,1	1.34	9,8
Bec C	20,1	1.43	7,1

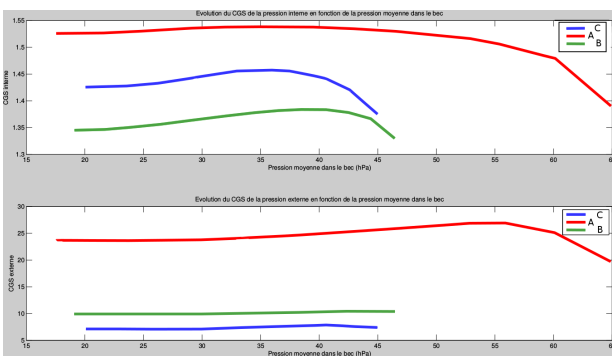


FIGURE 6 – Evolutions des CGS pour les trois becs en fonction de la pression moyenne dans le bec. Courbe du haut : CGS interne, courbe du bas : CGS externe (issu de [8]).

La figure 6 montre que le bec A est bien plus timbré que les deux autres. Les bcs B et C présentent des CGS différents pour les pressions interne ou externe. Le bec C est plus timbré que le B pour la pression interne et moins timbré

que le B pour la pression externe. Il est à noter que les CGS internes ont tendance à s’inverser avec de petits changements de réglage de la bouche, ce qui ne permet pas de conclure aujourd’hui sur la pertinence du CGS interne.

### 5.2 Lien avec les descripteurs subjectifs

La figure 7 montre les valeurs estimées des descripteurs subjectifs difficulté d’émission et timbre pour les trois bcs (sur une échelle de 0 à 10). Il apparaît que les deux descripteurs semblent corrélés. Le bec le plus facile et le plus brillant est le bec A, le plus difficile et le plus mat est le bec C.

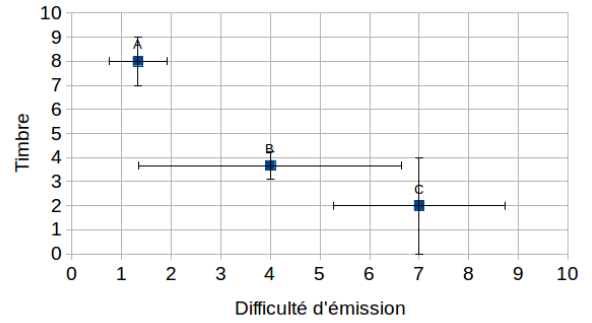


FIGURE 7 – Espace des descripteurs subjectifs difficulté d’émission et brillance.

Les figures 8 et 9 montrent les indicateurs objectifs estimés à partir des diagrammes de bifurcation. Pour la configuration expérimentale choisie, les deux indicateurs objectifs représentatifs sont la pression de seuil et le CGS externe. Il est à noter que les valeurs des CGS sont sensibles au réglage de la lèvres artificielle et qu’il est difficile de tirer des conclusions définitives.

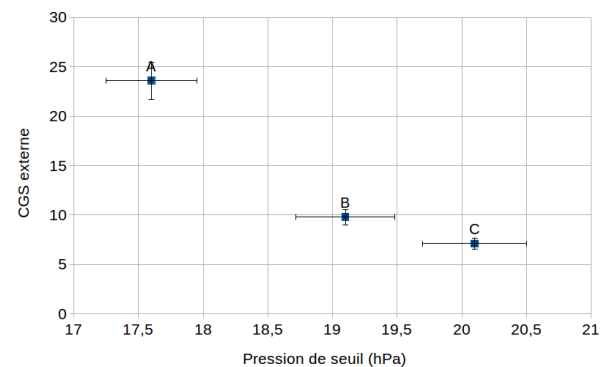


FIGURE 8 – Espace des descripteurs objectifs pression de seuil et CGS externe.

## 6 Conclusion

Dans ce travail, une bouche artificielle en aspiration est utilisée pour caractériser objectivement les caractéristiques de différents bcs. La répétabilité du dispositif est estimée en étudiant l’incertitude sur la pression de seuil, sur les centres de gravité spectraux issus des pressions mesurées dans le bec et à l’extérieur du bec et sur la fréquence fondamentale. Les résultats obtenus montrent une incertitude inférieure à 5%

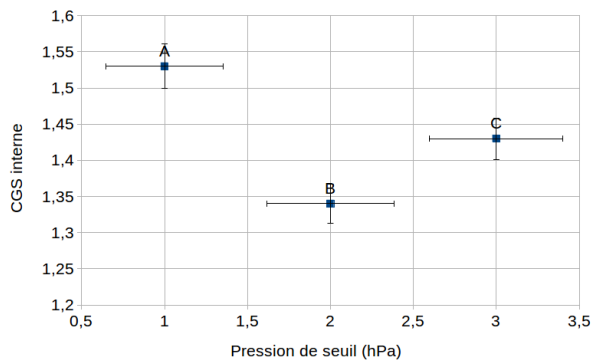


FIGURE 9 – Espace des descripteurs objectifs pression de seuil et CGS interne.

sur ces trois indicateurs. De façon à tester les bords de façon comparable, une anche de référence est choisie de façon à ce que les critères objectifs varient peu en fonction de la position de la lèvre artificielle. En utilisant cette anche de référence, trois prototypes de bords réalisés en impression 3D et possédant des géométries différentes sont caractérisés à l'aide de la bouche artificielle. Parallèlement ils sont évalués par des musiciens professionnels.

La comparaison des descripteurs subjectifs estimés (facilité d'émission dans les graves, timbre) et des indicateurs objectifs (pression de seuil, centre de gravité spectraux) montre que pour la configuration expérimentale utilisée, la pression de seuil et le centre de gravité spectral de la pression externe semblent expliquer les descripteurs subjectifs. Ce résultat est à prendre avec précaution dans la mesure où la position de la lèvre artificielle joue un rôle important sur les valeurs des centres de gravité spectraux.

A l'avenir, l'influence de la position de la lèvre artificielle et de la nature de cette lèvre doit être étudiée pour évaluer la possibilité de caractériser objectivement des bords de géométries différentes.

## Références

- [1] 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.
- [2] Alberto Muñoz Arancón, Bruno Gazengel, Jean-Pierre Dalmont, and Ewen Conan. Estimation of saxophone reed parameters during playing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5) :2754–2765, 2016.
- [3] Jean-François Petiot, Pierric Kersaudy, Gary Scavone, Stephen McAdams, and Bruno Gazengel. Investigation of the relationships between perceived qualities and sound parameters of saxophone reeds. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(5) :812–829, 2017.
- [4] Alberto Muñoz Arancón, Bruno Gazengel, and Jean-Pierre Dalmont. De la capacité d'une bouche artificielle à reproduire le geste d'un instrumentiste. In *Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, 11-15 avril 2016*, 2016.
- [5] Alberto Muñoz Arancón. *New techniques for the characterisation of single reeds in playing conditions*. PhD thesis, Septembre 2017. Le Mans Université.
- [6] Syos (shape your own sound). <https://www.syos.co/>. Consulté le 26 février 2018.
- [7] J.P. Dalmont and C. Frappé. Oscillation and extinction thresholds of the clarinet : Comparison of analytical results and experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122 :1173, 2007.
- [8] Lucas Descuns. Etude sur les bords de saxophone syos. Rapport de stage DUT, Le Mans Université, 2017.
- [9] A Munoz, B Gazengel, and JP Dalmont. Caractérisation objective des bords de saxophone en situation de jeu : Etude comparative des modèles physiques décrivant le comportement de l'anche. In *Congrès Français d'Acoustique, Poitiers, 22-25 Avril 2014*, 2014.
- [10] Frédéric Ablitzer and Bruno Gazengel. Caractérisation expérimentale de la déformée statique d'anches simples par méthodes optiques. In *Congrès Français d'Acoustique, Le Havre, 23-27 Avril 2018*.