



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

## Recherche d'indicateurs de qualité d'anches simples – partie 1 : estimation des paramètres équivalents en régimes statique et quasi-statique

B. Gazengel <sup>a</sup>, J.-P. Dalmont <sup>a</sup>, E. Hendrickx <sup>b</sup>, M. Paquier <sup>b</sup>, V. Koehl <sup>b</sup>

<sup>a</sup> LAUM, UMR 6613, Institut d'Acoustique - Graduate School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université, France,

<sup>b</sup> Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, Université de Bretagne Occidentale, France



L'anche simple utilisée sur les clarinettes ou saxophones reste une partie de l'instrument encore mal connue. De façon à tenter de comprendre la variabilité des anches perçue (par les musiciens), un musicien artificiel en dépression (MAD) est utilisé pour estimer les paramètres équivalents à l'anche en régimes statique et quasi-statique. Ce dispositif permet la mesure de la force d'appui de la lèvre sur l'anche, de la pression dans le bec et du débit entrant dans l'instrument lorsque l'anche s'ouvre lentement (quelques secondes). Ces mesures conduisent à l'estimation de la raideur mécanique et à celle de la section d'ouverture de l'anche en fonction de la pression généralisée (définie grâce à l'aire équivalente à l'anche). La description de la section d'ouverture à l'aide d'un modèle équivalent permet d'accéder à 4 paramètres. Au final, l'ensemble de ces mesures donne accès à 6 paramètres physiques caractéristiques de l'anche.

Un ensemble d'anches joué par un musicien (humain) à plusieurs reprises (anches neuves, rodées, jouées 1 puis 2 fois) est caractérisé à l'aide du MAD et une analyse de la variance a été effectuée sur les paramètres équivalents. Les résultats montrent que trois paramètres présentent des effets significatifs susceptibles d'expliquer le vieillissement de l'anche.

## 1 Introduction

L'anche simple utilisée sur les instruments tels que la clarinette ou le saxophone est souvent une préoccupation majeure des musiciens. Ceux-ci peuvent choisir la marque, la coupe et la force de l'anche mais ne peuvent pas prévoir précisément ses performances en termes de facilité d'émission, de timbre, de stabilité de l'intonation, de capacité à jouer pianissimo ou fortissimo, etc.

D'un point de vue physique, l'anche est souvent assimilée à un ressort. En effet, le modèle physique le plus simple considère le bec et l'anche comme une soupape dont la section d'ouverture est modifiée par l'anche proportionnellement à la pression dans la bouche jusqu'à la fermeture du canal de l'anche. Dans ce modèle, l'anche est modélisée par deux paramètres : la raideur de l'anche et l'ouverture de l'anche en l'absence de pression dans la bouche. Il a été démontré que le premier paramètre peut être lié à la sensation globale de facilité de jeu et au timbre [1], le second étant une caractéristique intrinsèque de l'embouchure. Cependant, ce deuxième paramètre ne permet pas de prédire les autres sensations de jeu.

Une caractérisation physique plus fine des anches est donc nécessaire. Différentes stratégies peuvent être choisies. Caractériser le matériau de l'anche en termes de densité, de propriétés élastiques et d'amortissement est une approche possible, mais le lien avec les sensations est loin d'être évident [2]. Une autre possibilité est de mesurer les propriétés vibratoires des anches sur un banc spécifique. Ceci a été fait par plusieurs auteurs [1, 3, 4, 5] mais semble être une impasse car l'interaction entre l'anche et le bec est ignorée. Une dernière stratégie consiste à caractériser le système global anche-bec qui constitue l'excitateur. Ceci peut être fait en régime dynamique [6, 7] ou de manière quasi-statique [8], [9].

Nous choisissons ici de caractériser l'excitateur de façon quasi-statique, c'est-à-dire sans oscillation de l'anche. Le système expérimental est constitué d'un bec relié à un aspirateur, d'une anche et d'une lèvre artificielle. La dépression créée dans le bec permet de plaquer l'anche sur le bec et l'arrêt de la dépression permet une ouverture lente de l'anche. Au cours de cette ouverture, la pression dans le bec et le débit entrant dans le canal anche-table (du bec) sont mesurés, le débit étant estimé grâce à un diaphragme calibré

comme proposé par [10, 11]. Cette mesure permet d'estimer la section aéraulique du canal anche-table en fonction de la pression moyenne dans le bec et de la force appliquée par la lèvre.

Dans la littérature, l'ouverture de l'anche à pression nulle est généralement considérée comme un paramètre fixe [12] chapitre 9. Ceci est un peu artificiel puisque le musicien fait varier l'ouverture moyenne du canal anche-table en appliquant simultanément une pression dans la bouche et une force sur l'anche avec la lèvre (et les dents). Il semble donc plus pertinent de considérer l'ouverture du canal anche-table comme une fonction simultanée de la force des lèvres et de la pression d'alimentation. Afin de mesurer la force des lèvres, un capteur de force est inclus dans le banc.

Dans ce travail, nous définissons l'effet combiné de la pression d'alimentation et de la force de l'anche comme une pression "généralisée".

L'objectif est ici d'estimer la section d'ouverture en fonction de la pression généralisée et d'en déduire les paramètres physiques équivalents à l'anche à l'aide d'un modèle de raideur non linéaire, ces paramètres permettant de caractériser différentes anches pour différentes situations. Dans un premier temps le modèle décrivant l'excitateur est présenté, la notion de pression généralisée est définie et un modèle de raideur non linéaire est proposé pour décrire l'enroulement de l'anche sur la table du bec. Dans un deuxième temps, le système expérimental utilisé pour caractériser les anches est décrit et la méthode d'estimation des paramètres équivalents à l'anche est présentée. Pour finir, cette méthode de mesure et d'estimation est appliquée à un ensemble de 8 anches jouées 4 fois et les paramètres estimés sont analysés par une analyse de la variance (ANOVA).

## 2 Modèle de l'excitateur

### 2.1 Modèle usuel

Le système excitateur (bec + anche + lèvre) est généralement décrit par deux équations. La première équation modélise le débit entrant dans le canal de l'anche

grâce à l'équation de Bernoulli [13]

$$U_c(t) = S(t) \operatorname{sgn}[\Delta p(t)] \sqrt{\frac{2|\Delta p(t)|}{\rho}}, \quad (1)$$

avec  $U_c$  le débit volumique dans le canal anche-table,  $S$  la section du canal,  $\Delta p = P_m - p$  avec  $P_m$  la pression dans la bouche,  $p$  la pression dans le bec et  $\rho$  la masse volumique de l'air (voir figure 1).

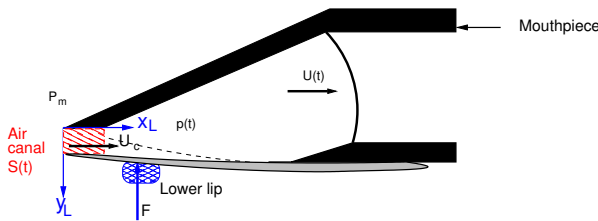


FIGURE 1 – Vue du système excitateur et des quantités physiques.

La deuxième équation modélise l'anche comme un système mécanique à un degré de liberté

$$M \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + R \frac{dS(t)}{dt} + \frac{S(t) - S_{0F}}{C} = -\Delta p(t), \quad (2)$$

où  $M$ ,  $R$  et  $C$  sont respectivement la masse surfacique équivalente de l'anche, l'amortissement et la souplesse. La souplesse de l'anche est plus souvent exprimée par la raideur  $K = 1/C$  [14].  $S_{0F}$  est la section du canal anche-table lorsque la pression d'alimentation est nulle et qu'une force  $F$  est appliquée par la lèvre sur l'anche.

La fermeture de l'anche sur le bec peut être considérée soit en écrivant  $U_c(t) = 0$  si  $S(t) < 0$  [15] soit en introduisant une fonction non linéaire  $S(\Delta p)$  [16]. Munoz *et al* [17] et Taillard [11] montrent qu'il est probablement plus pertinent de considérer une raideur non linéaire que de prendre en compte l'inertie. Pour cette raison, nous considérons ici un comportement quasi statique qui permet de négliger l'amortissement et les effets d'inertie.

## 2.2 Notion de pression généralisée

Dans le modèle décrit ci-dessus, le musicien peut agir sur la pression de la bouche  $P_m$  et la force des lèvres sur l'anche  $F$ . Ces grandeurs sont considérées comme des quantités statiques car leurs variations sont lentes par rapport à la période du signal de pression dans le bec. Sachant que la force des lèvres et la pression dans la bouche ont tendance à réduire le canal anche-table, il est donc raisonnable de supposer que les deux effets peuvent être additionnés. En d'autres termes, un changement de variables peut être effectué en écrivant

$$S(\Delta p, F) = S(\Delta p + F/A_r, \Delta p - F/A_r), \quad (3)$$

où  $A_r$  est une surface équivalente pour la pression de sorte que  $S$  ne dépende pas localement de  $\Delta p - F/A_r$ . Cette surface

équivalente est alors définie par

$$A_r = \frac{\frac{\partial S}{\partial \Delta p}}{\frac{\partial S}{\partial F}}, \quad (4)$$

puisque, dans ce cas,  $\frac{\partial(\Delta p - F/A_r)}{\partial S} = 0$ . En utilisant cette hypothèse, nous définissons la pression généralisée

$$\Delta p_g = \Delta p + F/A_r, \quad (5)$$

qui permet d'utiliser les modèles classiques quelle que soit la force de la lèvre.

## 2.3 Modèle de raideur non linéaire

Pour une petite différence de pression généralisée  $\Delta p_g$  (grandes valeurs de section  $S$ ), on considère en général que la section d'ouverture est une fonction linéaire de  $\Delta p_g$  [9]. Les deux paramètres  $S_{00}$  (section d'ouverture à pression  $\Delta p$  et force nulles, soit  $\Delta p_g = 0$ ) et  $C$  (souplesse de l'anche) permettent donc de définir la pression de fermeture théorique  $P_M = \frac{S_{00}}{C}$ .

Pour des valeurs élevées de la pression généralisée  $\Delta p_g$ , la section d'ouverture devient une fonction non linéaire de  $\Delta p_g$  [18, 14, 17]. Par ailleurs, pour les fortes pression on peut observer avec certaines anches un débit résiduel lié au fait que l'anche ne ferme pas complètement le canal ou bien que l'air s'infiltré à travers l'anche. Nous proposons dans ce travail un modèle qui prend en compte la fuite résiduelle et un modèle qui n'ajoute qu'un seul paramètre pour la non-linéarité. La fuite résiduelle est modélisée par une section de fuite  $S_L$ . La partie non linéaire est modélisée par une parabole centrée sur la pression de fermeture théorique avec fuite résiduelle  $P'_M = \frac{S_{00} - S_L}{C}$  :

$$S = S_{00} - C \Delta p_g, \Delta p_g < P'_M - P_b \quad (6)$$

$$S = \frac{C}{4P_b} (\Delta p_g - P'_M - P_b)^2 + S_L, P'_M - P_b < \Delta p_g < P'_M + P_b \quad (7)$$

$$S = S_L, \Delta p_g > P'_M + P_b, \quad (8)$$

où  $P_b$  est la pression caractérisant l'étendue de la plage non linéaire de  $S(\Delta p_g)$ . On notera que  $S(\Delta p_g)$  et sa dérivée première sont continues (cf. figure 2).

Chaque anche est ainsi caractérisée par 5 paramètres : la surface  $A_r$ , la section d'ouverture au repos  $S_{00}$ , la section de fuite  $S_L$ , la souplesse  $C$  (ou la pression de fermeture  $P'_M$ ) et l'étendue de la plage non linéaire  $P_b$ .

## 3 Système expérimental

Le système expérimental est conçu afin de mesurer les caractéristiques  $S(\Delta p_g)$  et de comparer facilement plusieurs anches. Pour cette raison, l'excitateur est placé à l'air libre et une pression négative  $-\Delta p$  est créée dans le bec comme proposé dans [10]. Il n'y a pas de cavité buccale dans cette expérience mais nous définissons tout de même la pression d'alimentation comme  $P_m = P_{atm} - \langle p \rangle$ , où  $P_{atm}$  est la pression atmosphérique et  $\langle p \rangle$  la pression moyenne dans le bec.

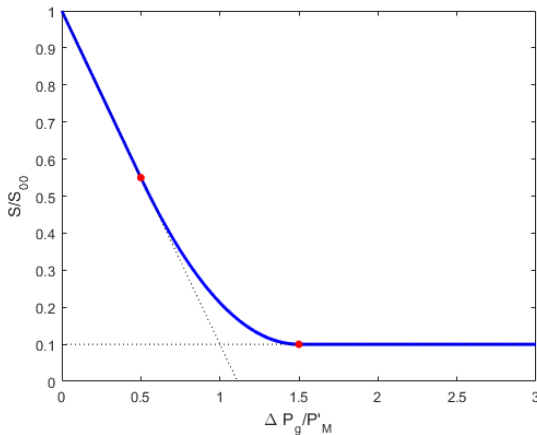


FIGURE 2 – Caractéristique théorique non linéaire  $S(\Delta P_g)$ .  $S_{00}$  est la section d'ouverture au repos (pression dans la bouche et force de la lèvres nulles),  $S_L$  est la section de fuite,  $P'_M$  est la pression de fuite ( $S = S_L$ ). Les points rouges indiquent les limites de la partie parabolique entre  $P'_M - P_b$  et  $P'_M + P_b$ . Dans cet exemple,  $P_b = P'_M/2$  et  $S_L = S_{00}/10$ .

### 3.1 Description

Le système expérimental est composé de deux parties, l'excitateur et le dispositif expérimental décrit ci-dessous (figure 3). L'excitateur est constitué d'un bec de saxophone ténor (Vandoren TL5 optimum, ouverture 2,05 mm, longueur de la table 23 mm) fixé sur une plaque reliée à une partie cylindrique. La lèvre artificielle est en silicone (CopsilGES-30, dimensions 30 mm x 20 mm x 10 mm) moulée sous vide. La lèvre est collée sur une dent semi-cylindrique. La position de la lèvre est contrôlée par deux vis micrométriques. Le positionnement des anches sur le bec selon l'axe  $x_L$  se fait à l'aide d'une cale permettant d'assurer une mise en place répétable de l'anche sur l'embouchure. Enfin, une ligature "optimum Vandoren" est utilisée afin de serrer l'anche sur l'embouchure. La position de la ligature est choisie par l'opérateur comme si un saxophoniste montait l'anche sur le bec en vérifiant visuellement sa position.

Un diaphragme est placé dans le tube reliant le bec au système d'aspiration afin d'augmenter la pression seuil [9] de telle sorte qu'aucune oscillation n'apparaisse. Ce diaphragme est aussi utilisé comme élément déprimogène pour la mesure du débit. Le système expérimental est connecté à un volume  $V$  qui est relié à un aspirateur utilisé pour créer la dépression dans le bec.

Deux capteurs de pression différentielle sont utilisés. Le capteur monté dans le bec est un Honeywell TBPANS001PGUCV permettant une mesure de la pression différentielle  $\Delta p$  en quasi statique ( $< 2kHz$ ) sur une plage de 1 PSI. Le capteur de pression installé au niveau du diaphragme est un Endevco 8507-C2 permettant une mesure de la pression différentielle  $\Delta p_U = p_1 - p_2$  en conditions statiques et dynamiques pour une large gamme de fréquence ( $< 50kHz$ ).

Les deux capteurs sont connectés à une carte

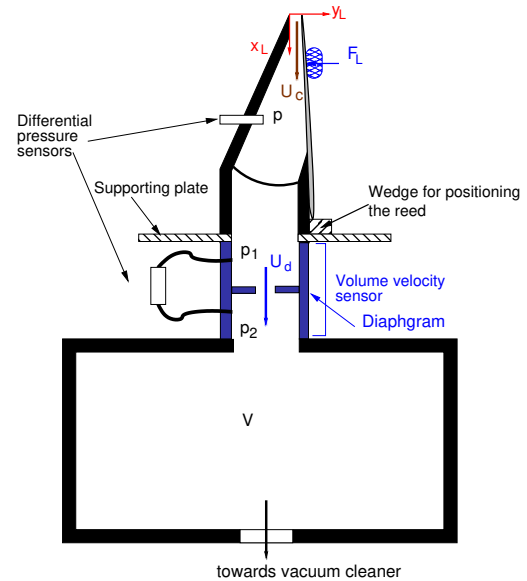


FIGURE 3 – Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des caractéristiques en régime quasi-statique. Le capteur de pression dans le bec mesure  $-\Delta p$  et le capteur de pression dans le diaphragme mesure  $\Delta p_U = p_1 - p_2$ .

d'acquisition de données BNC-2110 de National Instrument, qui est contrôlée par le logiciel Octave. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 120 Hz. Les signaux sont filtrés en passe-bas à l'aide d'un filtre FIR (fonction fir1, 201 coefficients) avec une fréquence de coupure de 2 Hz.

Un capteur de force Omega Engineering Inc. LCM703-5, force maximale 5 N est monté entre la lèvre artificielle et le système supportant la lèvre.

### 3.2 Signaux typiques

Pour une position de lèvre ( $x_L, y_L$ ) donnée, il est possible de fermer l'anche et de l'ouvrir en régime quasi-statique. La figure 4 montre un exemple de pression mesurée dans le bec  $-\Delta p(t)$  et de pression mesurée dans le capteur de débit  $\Delta p_U(t)$  pour six anches différentes et pour une position de lèvre donnée.

Elle montre qu'après l'arrêt de l'aspirateur ( $t \approx 0$ ), l'anche est d'abord fermée ( $t < 0.5$  s) puis elle s'ouvre lentement. Dans cet exemple, le temps nécessaire à l'ouverture complète de l'anche est d'environ 4 secondes en raison de la constante de temps de l'ensemble du système (diaphragme, volume, ...). Le signal de pression  $-\Delta p(t)$  est un peu différent pour les différentes anches, ce qui suggère que la dynamique est différente. La pression différentielle dans le capteur de débit est clairement différente pour les différentes anches, l'anche A18 montrant une chute de pression maximale de 400 Pa dans le capteur de débit alors que l'anche A15 montre un maximum de 200 Pa.

L'effet de la position de la lèvre  $y_L$  est montré sur la figure 5 pour une anche. La chute de pression dans le capteur de débit est clairement différente pour les différentes positions de la lèvre. L'anche présente une valeur maximale  $\Delta p_U(t) \approx 1400 cm^3/s$  pour  $y_L = -1.1$  mm correspondant à

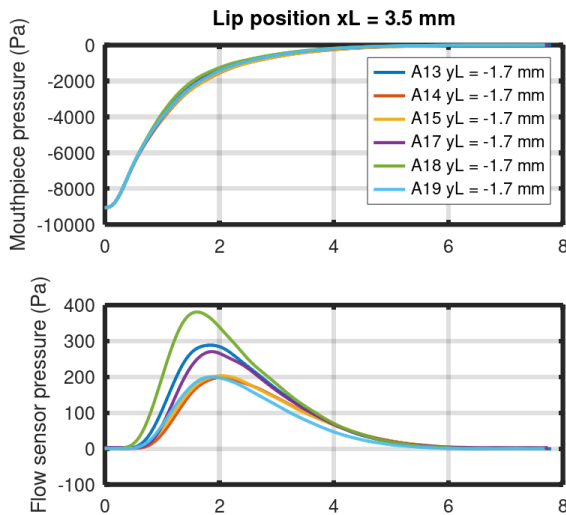


FIGURE 4 – Comparaison des signaux de pression obtenus pour 6 anches différentes

l'embouchure optimale alors que  $\Delta p_U(t) \approx 250 \text{ cm}^3/\text{s}$  pour  $y_L = -1.7 \text{ mm}$  (embouchure plus serrée).

## 4 Estimation des paramètres équivalents

### 4.1 Caractéristique aéraulique

En faisant l'hypothèse que le débit  $U_c$  entrant dans le canal anche-table est identique au débit mesuré au niveau du diaphragme  $U_d$  (hypothèse de fluide incompressible), la section aéraulique peut être écrite pour une force  $F$  donnée

$$S(t) = S_d \sqrt{\frac{|\Delta p_U(t)|}{|\Delta p(t)|}}, \quad (9)$$

où  $S_d$  est la section du diaphragme. Un exemple de caractéristiques  $S = f(\Delta p, F)$  est présenté à la figure 6 pour différentes positions de lèvres  $y_L$ . Cette figure montre que la section au repos  $S_{0F}$  diminue linéairement en fonction de la force d'appui de la lèvre.

On observe qu'une rotation d'axe  $z$  peut être appliquée à ce faisceau de courbes de façon à ce que la surface se réduise à une courbe indiquant qu'il existe une valeur  $A_r$  telle que la section  $S$  ne dépende pas de  $\Delta p - F/A_r$  (figure 7).

Une analyse en composantes principales de la partie linéaire de la caractéristique  $S = f(\Delta p, F)$  permet d'estimer une valeur initiale de l'aire équivalente  $A_r$ . Une minimisation au sens des moindres carrés (fonction leasqr de Octave) permet de trouver la valeur optimale de  $A_r$  qui minimise la distance entre la caractéristique généralisée mesurée et le modèle (équations 6, 7, 8). Un exemple de comparaison mesure-modèle est présenté à la figure 8. Ce résultat montre que l'anche s'enroule dès qu'une contrainte est appliquée à l'anche. On n'observe donc pas ici de zone de linéarité pour les faibles pression. Cet effet a été observé pour la majorité des anches étudiées (avec ce bec et cette lèvre en particulier).

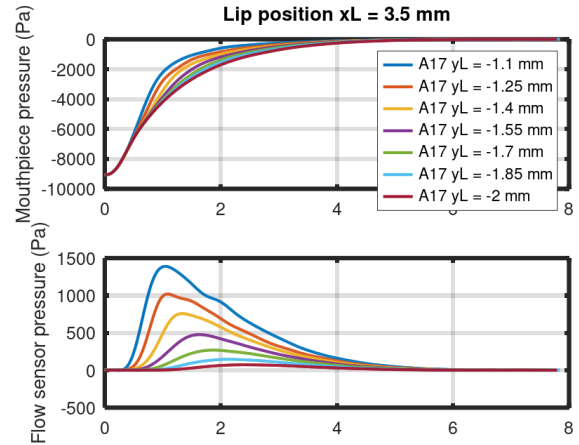


FIGURE 5 – Exemple de signaux de pression mesurés pour une anche et pour six positions de lèvres différentes. En haut : pression dans le bec  $-\Delta p(t)$ , en bas : pression dans le capteur de débit  $\Delta p_U(t)$ .

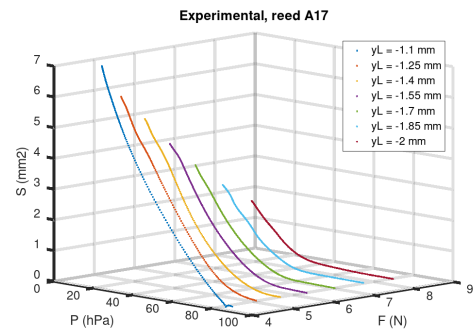


FIGURE 6 – Exemple de caractéristique  $S = f(\Delta p, F)$  estimée par mesure quasi-statique.

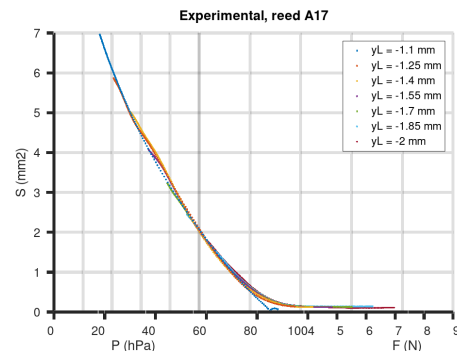


FIGURE 7 – Exemple de caractéristique  $S = f(\Delta p, F)$  après rotation optimale autour de l'axe  $z$ .

### 4.2 Caractéristique mécanique

Le dispositif expérimental permettant de mesurer la position de la lèvre  $y_L$  et la force  $F$  appliquée par la lèvre sur l'anche, il est également possible d'estimer la raideur mécanique  $K_{LR}$  vue par la lèvre définie comme la pente de la



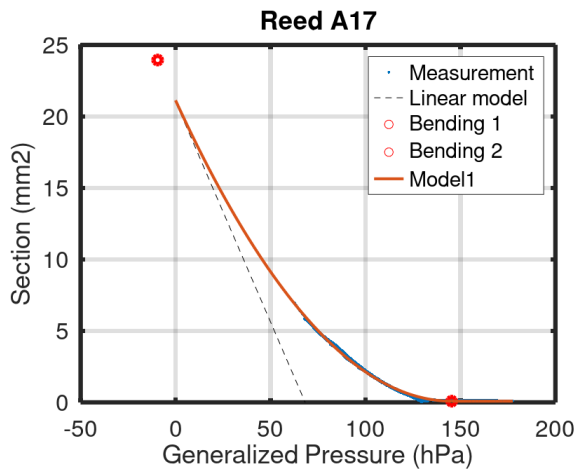


FIGURE 8 – Exemple d’identification réalisé en utilisant la caractéristique généralisée.

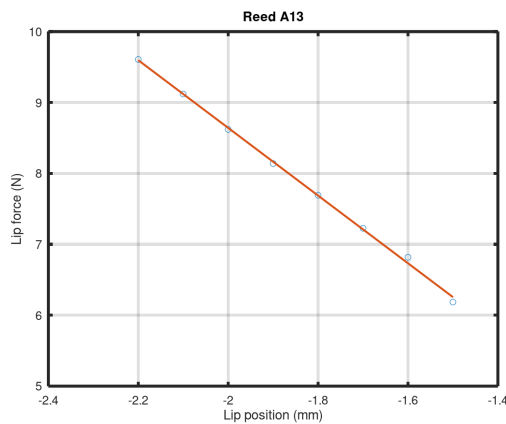


FIGURE 9 – Relation entre la position de la lèvres et la force appliquée sur l’anche. o : résultats expérimentaux, - : droite de régression permettant d’estimer  $K_{LR}$  (pente de la droite).

caractéristique liant la force au repos (pression dans le bec nulle) et la position de la lèvres  $y_L$  (figure 9).

## 5 Résultats

### 5.1 Échantillons testés

Dans cette section, un lot de 8 anches roseau (d’Addario reserve saxophone Tenor 3+) est caractérisé à l’aide du dispositif expérimental décrit ci-dessus. Ces anches sont mesurées à 4 reprises :

- Anches neuves
- Anches rodées (après jeu de moins de une minute par jour pendant une semaine par un musicien)
- Anches jouées 1 fois (après un premier jeu de quelques minutes par un musicien dans le cadre d’un test perceptif [19])

- Anches jouées 2 fois (après un deuxième jeu de quelques minutes par un musicien dans le cadre d’un test perceptif [19])

Les mesures ont été réalisées à  $J0$  (anches neuves),  $J0 + 11$  jours (anches rodées) et  $J0 + 13$  jours (anches jouées 1 fois mesurées le midi, anches jouées 2 fois mesurées le soir). Au cours de cette expérience les anches sont stockées dans un boîtier permettant de conserver une hygrométrie à peu près constante (non mesurée au cours de l’expérience).

### 5.2 Analyse de la variance

Des analyses de la variance (ANOVA) ont été effectuées pour évaluer les effets simples des facteurs “anches” (8 niveaux) et “répétition” (4 niveaux) sur les estimations de chacun des 6 paramètres équivalents à l’anche.

Les résultats obtenus montrent un effet significatif de la répétition pour tous ces indicateurs ( $p < 0.01$  dans tous les cas). Le dispositif expérimental permet donc d’observer un effet significatif de l’évolution des anches dans le temps.

Pour la raideur mécanique  $K_{LR}$  et pour l’aire équivalente  $A_r$ , il n’existe pas d’effet significatif de l’anche. Cela suggère que ce paramètre est indépendant de l’anche mais pourrait dépendre de sa coupe. Pour les autres indicateurs issus du modèle ( $S_{00}$ ,  $P_M$ ,  $P_b$ ,  $S_L$ ), les résultats obtenus montrent toujours un effet significatif ( $p < 0.05$  dans tous les cas). Ainsi, le dispositif expérimental permet d’observer des variations significatives selon l’anche mesurée pour 4 des 6 paramètres équivalents estimés.

## 6 Conclusion

Le banc de mesure développé s’est montré efficace pour caractériser le comportement d’anches simples en régime quasi-statique (ouverture lente de l’anche). En introduisant la pression généralisée, somme de la pression de l’air et de la pression de la lèvres, nous avons pu montrer qu’il est possible d’estimer une caractéristique unique valable quelle que soit l’ouverture au repos. La pression de lèvres est définie comme la force divisée par une surface équivalente qui a pu être déterminée pour chaque anche. Cette surface ne semble pas dépendre significativement de l’anche et les résultats confirment ceux obtenus par P.-A. Taillard [11] qui ne mesurait pas la force mais seulement le déplacement de la lèvres. En complément le banc de mesure permet d’estimer la raideur mécanique du système anche-lèvres.

Afin de ramener chaque anche à un nombre limité de paramètres, la caractéristique de chaque anche mesurée a été modélisée à l’aide d’une fonction définie par morceaux. Dans le premier, pour les faibles pressions généralisées, la fonction est affine paramétrée par la section d’ouverture au repos ( $\Delta p_g = 0$ ) et la pression de fermeture en l’absence de lèvres ( $S(P'_M) = 0$ ). Le second est une parabole paramétrée par son extension en pression et qui traduit l’enroulement de l’anche sur la table du bec. Le troisième et dernier correspond à la quasi-fermeture du canal anche table paramétrée par une section de fuite résiduelle. L’anche est

ainsi modélisée par 4 paramètres auxquels on peut ajouter la surface équivalente utilisée dans la définition de la pression généralisée. Huit anches dans quatre conditions différentes (anches neuves, rodées, jouées une ou deux fois) ont pu être caractérisées. Les analyses de la variance effectuées sur 6 indicateurs montrent un effet significatif de la condition pour tous les indicateurs et suggèrent qu'il est possible de mesurer l'évolution dans le temps pour tous les paramètres. Par ailleurs, il existe un effet significatif de l'anche pour 4 des 6 paramètres utilisés dans le modèle de caractéristique (ouverture à pression et force nulles, pression de fermeture, pression d'enroulement et section de fuite). Ces analyses préliminaires suggèrent que le musicien artificiel est un outil prometteur pour suivre l'évolution des anches dans le temps et pour classer les anches à l'aide d'indicateurs issus du modèle. Des analyses complémentaires (hiérarchiques, en composantes principales, etc.) permettront de définir plus précisément la nature et le nombre des indicateurs permettant la classification des anches. Par ailleurs l'influence de la lèvres et en particulier de sa surface devra être investiguée.

A terme le banc de mesure pourra être utilisé en outre pour caractériser le comportement dynamique des anches et estimer des paramètres dynamiques équivalents (masse, amortissement). Par ailleurs le processus de mesure et d'estimation des paramètres pourra être appliqué à différentes séries d'anches évaluées en parallèle dans le cadre de tests perceptifs.

## Remerciements

Les auteurs remercient Hervé Mézière, Emmanuel Brasseur, Eric Egon et Jacky Maroudaye pour la conception et la réalisation du dispositif expérimental ainsi que le saxophoniste qui a participé aux tests perceptifs.

## Références

- [1] Bruno Gazengel, Jean-Pierre Dalmont, and Jean-François Petiot. Link between objective and subjective characterizations of bb clarinet reeds. *Applied Acoustics*, 106 :155–166, 2016.
- [2] Donald Jay Casadonte. *The Clarinet Fieed : an introduction to its biology, chemistry, and physics*. PhD thesis, The Ohio State University, 1995.
- [3] Pierre-André Taillard, Franck Laloë, Michel Gross, Jean-Pierre Dalmont, and Jean Kergomard. Statistical Estimation of Mechanical Parameters of Clarinet Reeds Using Experimental and Numerical Approaches. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(3) :555–573, May 2014.
- [4] Karl A Stetson. Study of clarinet reeds using digital holography. *Optical Engineering*, 53(11) :112305–112305, 2014.
- [5] Fabrice Pinard, Benoit Laine, and Holger Vach. Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113 :1736, 2003.
- [6] Tokihiko Kobata and Tohru Idogawa. Pressure in the mouthpiece, reed opening, and air-flow speed at the reed opening of a clarinet artificially blown. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 14(6) :417–428, 1993.
- [7] Alexander Mayer. Riam (reed instrument artificial mouth) a computer controlled excitation device for reed instruments. In *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2003, SMAC 03*, volume 1, pages 279–282. Royal Swedish Academy of Music, 2003.
- [8] André Almeida, Christophe Vergez, and René Caussé. Quasistatic nonlinear characteristics of double-reed instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1) :536–546, 2007.
- [9] Jean-Pierre Dalmont, Joël Gilbert, and Sébastien Ollivier. Nonlinear characteristics of single-reed instruments : Quasistatic volume flow and reed opening measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(4) :2253, 2003.
- [10] Alberto Muñoz Arancón, Bruno Gazengel, and Jean-pierre Pierre Dalmont. Comparison of Human and Artificial Playing of a Single Reed Instrument. *Acta Acustica united with Acustica*, 104 :1104–1117, 2018.
- [11] Pierre-André TAILLARD. *Theoretical and experimental study of the role of the reed in clarinet playing*. PhD thesis, Le Mans Université, 2018.
- [12] Antoine Chaigne and Jean Kergomard. *Acoustics of musical instruments*. Springer, 2016.
- [13] A. Hirschberg, R. W. A. van de Laar, J-P. Marrou-Maurières, A. P. J. Wijnands, J. H. Dane, S. G. Kruijswijk, and A. J. M Houtsma. A quasi-stationary model of air flow in the reed channel of single-reed woodwind instruments. *Acustica*, 70 :146–154, 1990.
- [14] Vasileios Chatziioannou and Maarten van Walstijn. Estimation of clarinet reed parameters by inverse modelling. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4) :629–639, 2012.
- [15] Philippe Guillemain, Jean Kergomard, and Thierry Voinier. Real-time synthesis of clarinet-like instruments using digital impedance models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(1) :483–494, 2005.
- [16] Maarten Van Walstijn and Federico Avanzini. Modelling the mechanical response of the reed-mouthpiece-lip system of a clarinet. part ii : A lumped model approximation. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(3) :435–446, 2007.
- [17] 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.
- [18] Federico Avanzini and Maarten van Walstijn. Modelling the mechanical response of the reed-mouthpiece-lip system of a clarinet. part i. a one-dimensional distributed model. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(3) :537–547, 2004.
- [19] Vincent Koehl, Etienne Hendrickx, Mathieu Paquier, Bruno Gazengel, and Jean-Pierre Dalmont. Recherche d'indicateurs de qualité d'anches simples – partie 2 : approche subjective. In *Congrès Français d'Acoustique*, Marseille, France, 2022.