



Caractérisation objective des anches de saxophone en situation de jeu : Étude comparative des modèles physiques décrivant le comportement de l'anche

A. Munoz, B. Gazengel et J.-P. Dalmont

LAUM CNRS UMR 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

alberto.munoz@univ-lemans.fr

Ce travail porte sur l'étude de la qualité des anches de saxophone. Sachant qu'une certaine proportion des anches est considérée comme insatisfaisante par les musiciens, il s'avère intéressant, pour le musicien et pour le facteur d'anches, de disposer de moyens permettant de prévoir la qualité des anches. L'objectif à long terme de cette étude vise ainsi à comprendre quels paramètres physiques déterminent la qualité perçue par les instrumentistes.

Le papier proposé s'attache à évaluer la pertinence de différents modèles physiques décrivant le comportement de l'anche en situation de jeu réelle (*in vivo*). D'une part, certaines grandeurs physiques (pression, déplacement de l'anche) caractérisant le jeu du musicien sont mesurées à l'aide d'un bec instrumenté. D'autre part, les grandeurs mesurées sont utilisées pour estimer les paramètres propres à des modèles physiques de complexité croissante. Plusieurs modèles linéaires et non-linéaires sont ainsi étudiés pour un ensemble d'anches perçues comme très différentes et leur validité est discutée. Pour chaque paramètre associé à un modèle, les valeurs estimées sont comparées qualitativement aux sensations des musiciens.

1 Introduction

Le jeu d'instruments de musique à vent tels que la clarinette ou le saxophone nécessite d'utiliser l'anche simple, languette de roseau qui permet l'auto-oscillation de l'instrument 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 fabricant 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. On considère empiriquement que 30 % des anches sont utilisables pour le concert, 40 % pour les répétitions et 30 % sont difficiles à jouer. De fait, les musiciens et facteurs d'anches expriment le besoin de mieux caractériser les anches de façon à pouvoir expliquer 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 [8]. L'indicateur "qualité globale" n'est pas consensuel et dépend fortement de chacun des musiciens.

L'étude des paramètres mécaniques équivalents à l'anche a été réalisée à l'aide d'un banc de mesure vibroacoustique [5] comme proposé par Pinard *et al* [10]. Ce banc permet de réaliser une analyse modale des anches sans lèvre ou avec lèvre. Les résultats obtenus montrent que les paramètres estimés sont très sensibles à l'humidité et que la répétabilité des mesures est très mauvaise en présence d'une lèvre artificielle. Enfin, ces paramètres équivalents ne montrent pas de corrélation évidente avec les indicateurs subjectifs.

L'étude des paramètres obtenus *in vivo* a été réalisée à l'aide d'un premier bec instrumenté mesurant la pression dans la bouche et à l'aide de mesures de la pression rayonnée [4]. Les résultats obtenus permettent d'estimer la pression de seuil et des paramètres caractérisant le timbre du son rayonné. Ces paramètres montrent une assez bonne corrélation avec les indicateurs subjectifs mais n'expliquent pas

l'influence des paramètres mécaniques de l'anche. De façon à tenter d'estimer les paramètres caractérisant l'anche, un deuxième bec instrumenté a été proposé dans le cadre de la caractérisation *in vivo* [7]. Les résultats montrent que la prise en compte des pertes mécaniques pourrait expliquer le rôle joué par l'anche. Néanmoins ces travaux n'utilisent pas de modèle physique de comportement de l'anche.

L'objectif de ce travail est donc de développer un bec instrumenté plus adapté aux expériences *in vivo* et d'estimer les paramètres équivalents à l'anche à l'aide de modèles physiques.

2 Système étudié

Le système étudié est constitué du bec, de l'anche et de la lèvre du musicien (figure 1).

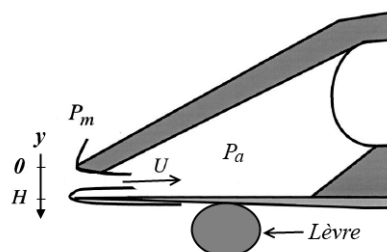


FIGURE 1 – Schéma du bec, de l'anche et de la lèvre (issu de [3]).

Les grandeurs physiques mises en jeu dans ce système sont classées en deux familles :

- grandeurs lentement variables (contrôle de l'instrumentiste) :
 - pression dans la bouche $P_m(\tau)$
 - Ouverture anche - table $H(\tau)$
 - jeu de paramètres équivalents à l'anche $\vec{\theta}(\tau)$
- grandeurs rapidement variables (instantanées) :
 - pression acoustique dans le bec $P_a(t)$,
 - position instantanée de l'anche $y(t)$.

t et τ sont respectivement les temps observés sur une faible échelle temporelle et sur une grande échelle temporelle. Le jeu de paramètres $\vec{\theta}(\tau)$ inclut les paramètres d'anche décrits dans le modèle présenté au §4.

Il faut noter que théoriquement, $P_m = P_m(\tau)$, mais

l'expérience montre qu'il y a du son à l'intérieur de la bouche, donc $P_m = P_m(t, \tau)$.

3 Système expérimental

L'objectif du système expérimental est d'estimer en situation de jeu (*in vivo*) les valeurs des paramètres physiques cités ci-dessus, $P_m(t, \tau)$, $P_a(t)$, $y(t)$ et $H(\tau)$. Pour cela, un bec instrumenté a été réalisé. Le principe de ce bec est donné ci-dessous (§3.1). Le résonateur utilisé pour ces expériences est un tube cylindrique de diamètre interne 14 mm et de longueur 1 m, représentant ainsi une clarinette simplifiée.

3.1 Bec instrumenté

Le bec instrumenté est un prototype réalisé en impression 3D à partir d'un modèle de bec déjà existant. A partir d'une tomographie (rayons X) du bec existant, il est possible d'extraire la géométrie du bec réel (fichier .STL) et de l'importer dans un logiciel de CAO de façon à obtenir un modèle numérique 3D du bec. Ce modèle numérique peut être ensuite modifié pour prévoir l'implantation de capteurs (perçages, surépaisseurs) comme le montre la figure 2.

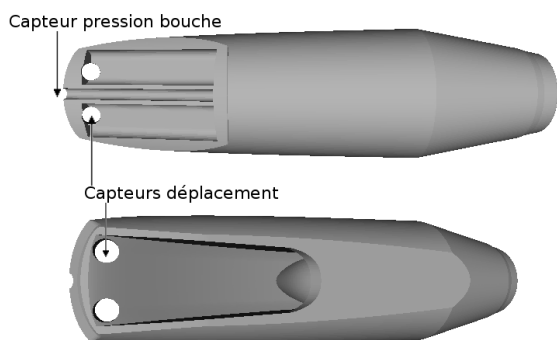


FIGURE 2 – Vue du modèle CAO du bec modifié pour l'implantation des capteurs.

Le bec est ensuite réalisé en PA12 (nylon) par une technique de frittage de poudre.

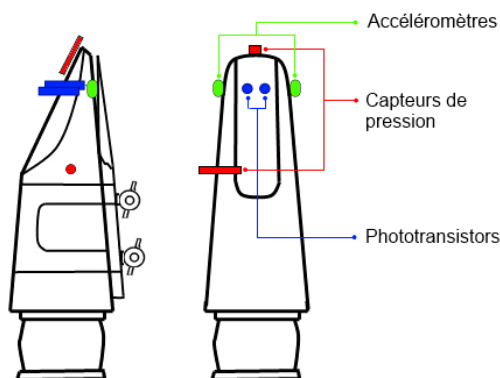


FIGURE 3 – Schéma du bec instrumenté.

3.2 Système de mesure

Les capteurs utilisés dans le bec visent à mesurer les pressions $P_a(t)$ (acoustique) et $P_m(\tau)$ (bouche) ainsi que le déplacement de l'anche des deux côtés (droite, gauche). Par ailleurs, deux accéléromètres sont positionnés à droite et à gauche du bec au voisinage du canal anche-table (figure 3) de façon à identifier les chocs éventuels entre l'anche et la table du bec. Les signaux sont acquis à l'aide d'une carte d'acquisition National Instrument BNC-2110 à une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz.

3.2.1 Capteurs

Les capteurs de pression utilisés sont des Endevco 8507-C2 associés à un conditionneur développé au laboratoire. Les capteurs de déplacement sont des phototransistors SG2BC dont le principe est présenté dans [7]. Le conditionnement de ces capteurs est présenté plus en détail dans [7]. Les accéléromètres sont des PCB Piezotronics 352C23 associés à des conditionneurs PCB Piezotronics 482C Series.

3.2.2 Étalonnage des capteurs

Les capteurs de pression sont étalonnés en statique à l'aide d'un tube à eau en imposant au capteur une pression statique contrôlée. L'étalonnage relatif des deux capteurs en dynamique n'est pas réalisé et nous faisons l'hypothèse actuellement qu'ils sont strictement identiques, ce qui doit être vérifié ultérieurement. Par ailleurs, nous faisons l'hypothèse que la pression acoustique est constante (grande longueur d'onde) dans le bec, ce qui permet de la mesurer à une dizaine de mm de l'extrémité de l'anche.

L'étalonnage des capteurs de déplacement est réalisé comme suit en statique. Une anche dont la position y est connue grâce à un système de déplacement utilisant un comparateur est déplacée depuis la position $y = 0$ jusqu'à la position $y = H_0$ correspondant à l'ouverture totale en l'absence de lèvres.

La réponse de ces capteurs est clairement non-linéaire comme le montre la figure 4. La compensation de cette non-linéarité est réalisée en considérant la plage de fonctionnement $y \in [0, H_0]$ et en calculant les coefficients d'un polynôme d'ordre 3 qui représente la réponse mesurée.

Étant donné que nous mesurons le déplacement de l'anche, il est nécessaire d'estimer au mieux la référence de position ($y = 0$). En effet, les capteurs ne sont pas disposés au niveau du canal-anche table. Ils ne mesurent donc pas le déplacement y présenté à la figure 1 mais un autre déplacement $\tilde{y}(t)$. Par ailleurs, l'anche peut subir des phénomènes de flexion transverse qui biaisent l'estimation du déplacement y . De façon à s'affranchir des effets de flexion transverse vus par les capteurs, la position $y = 0$ est estimée en calculant la dérivée de la tension de sortie du capteur en fonction de la distance et en considérant un seuil pour cette dérivée.

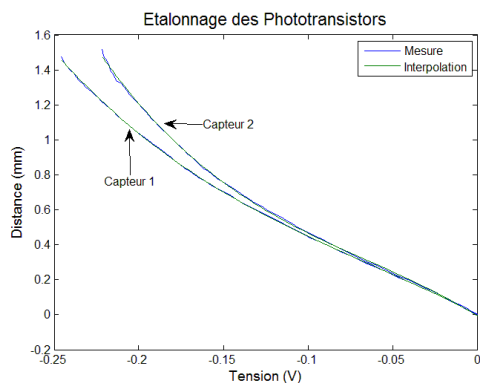


FIGURE 4 – Étalonage des signaux moyennes de sortie des phototransistors en fonction de la distance en mesure statique.

Bien que l'étalonnage décrit ci-dessus permette a priori de connaître la référence de position ($y = 0$), il s'avère que les capteurs possèdent à ce jour une dérive dans la valeur de la tension de sortie après une utilisation de quelques dizaines de minutes. De fait, l'estimation de l'origine est réalisée lors d'une mesure à nuance *forte* permettant d'obtenir un régime d'anche battante pour lequel l'anche vient en contact avec la table du bec.

Enfin, il est à noter que la réponse en tension du capteur dépend de la nature de l'anche, notamment de son coefficient de réflectivité optique (figure 5).

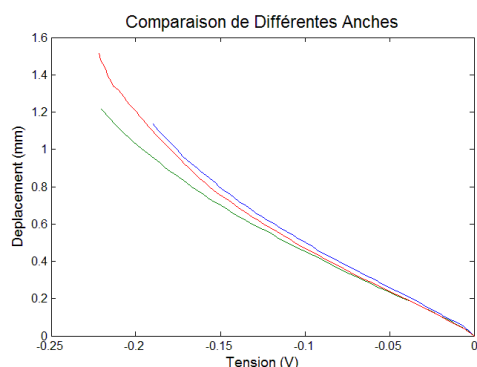


FIGURE 5 – Comparaison de la tension relevée par le capteur 2 en fonction de la distance pour trois anches différentes.

La réponse dynamique des capteurs de déplacement a été évaluée précédemment dans [7]. Les résultats obtenus montrent que la bande passante de ces capteurs est de l'ordre de [0-2 KHz], ce qui doit être confirmé par des mesures complémentaires. Enfin, l'étalonnage relatif des deux capteurs de déplacement n'a pas été réalisé. Nous faisons l'hypothèse que les capteurs sont strictement identiques ce qui devra être vérifié ultérieurement.

3.3 Exemple de signaux mesurés

Nous présentons aux figures 6 et 7 un exemple de signaux de différence de pression définie à l'équation 2, de déplacement et d'accélération mesurés *in vivo* pour une note jouée à la nuance *piano* et à la nuance *forte*.

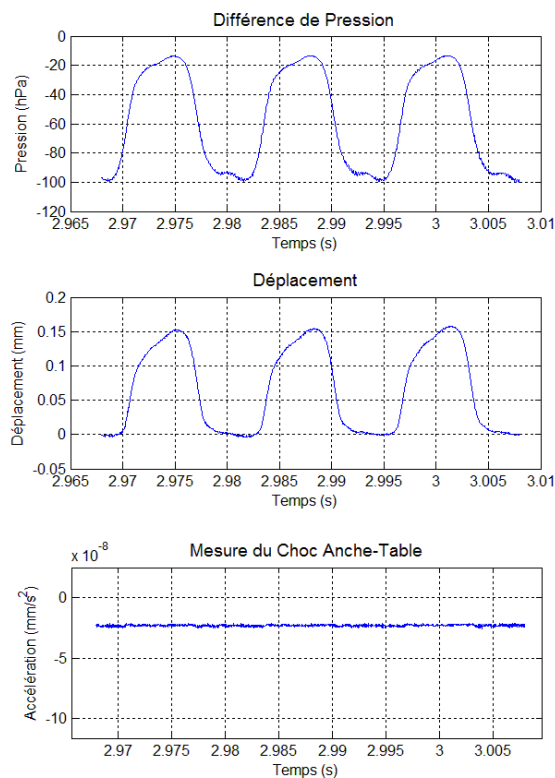


FIGURE 6 – Nuance *piano*.

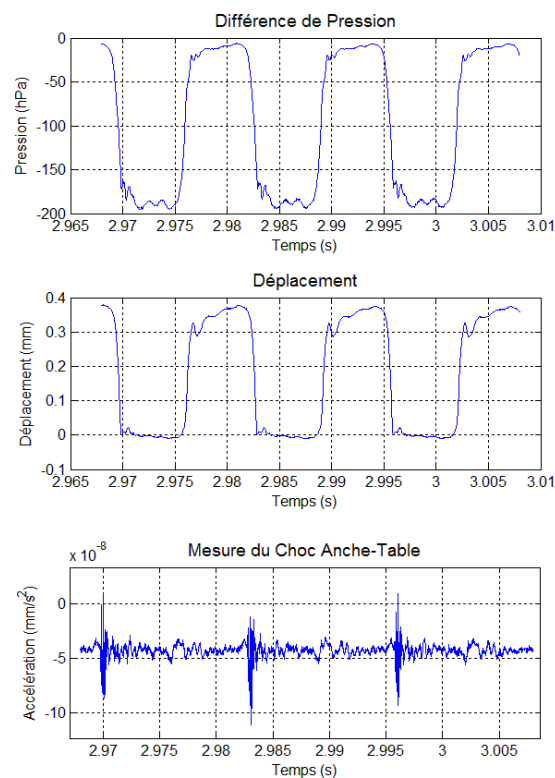


FIGURE 7 – Nuance *forte*.

Les figures 6, 7 donnent a priori les informations suivantes, utiles pour construire un modèle physique de l'anche :

- La réponse en déplacement ne semble pas montrer de hautes fréquences comme la pression dans la bouche, ce qui tend à confirmer la bande passante réduite de ces capteurs.
- Les signaux d'accélération montre des chocs entre l'anche et le bec, particulièrement pour la dynamique *forte*.

La figure 8 montre la relation entre la différence de pression ΔP et le déplacement y pour deux nuances (*piano*, *forte*). Pour la nuance *piano*, cette figure montre une relation non linéaire entre pression et déplacement (pour $\Delta P < -70$ hPa) et un effet d'hystérésis. Pour la nuance *forte*, ces deux phénomènes existent. A cela s'ajoute l'effet du choc sur la table du bec ($\Delta P \simeq -200$ hPa) et l'oscillation de l'anche du côté de la lèvres ($\Delta P \simeq 0$ hPa).

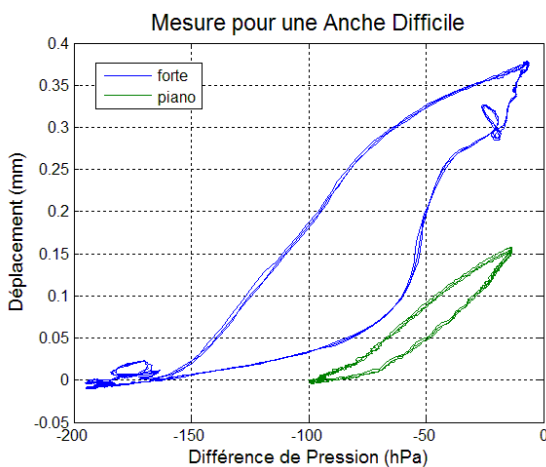


FIGURE 8 – Exemple de relation déplacement y en fonction de ΔP .

4 Modèle de comportement de l'anche

4.1 Modèle linéaire

Les modèles usuels décrivant le comportement de l'anche font l'hypothèse d'un comportement linéaire pour de petites amplitudes y . De fait, l'équation décrivant le mouvement y de l'anche s'écrit :

$$M(\tau) \ddot{y}(t) + R(\tau) \dot{y}(t) + K(\tau) [y(t) - H(\tau)] = \Delta P(t, \tau), \quad (1)$$

où

$$\Delta P(t, \tau) = P_m(t, \tau) - P_a(t). \quad (2)$$

$M(\tau)$, $R(\tau)$, $K(\tau)$ sont respectivement la masse, l'amortissement et la raideur équivalents à l'anche et dépendent du geste du musicien, ce qui permet de les considérer comme lentement variables dans le temps.

L'équation 1 montre que l'anche est non battante tant que $\Delta P(t, \tau) > -K(\tau)H(\tau)$. Pour une différence de pression plus forte (en valeur absolue), il y a un contact entre l'anche et le bec à son extrémité.

4.2 Modèle non linéaire

Dans le cas d'amplitudes plus élevées, il est raisonnable de considérer un modèle non linéaire décrivant l'enroulement de l'anche sur la table du bec. Ce modèle, proposé dans la référence [2] s'écrit aux basses fréquences (effet d'amortissement et d'inertie ignorés) en considérant les conventions d'orientation de la figure 1 :

$$K(\tau) (y(t) - H(\tau)) - k_c(|y(t) - y_c|)^\alpha = \Delta P(t, \tau), \quad (3)$$

où

$$\begin{aligned} |y - y_c| &= 0 \text{ si } y > y_c, \\ |y - y_c| &= y - y_c, \text{ si } y < y_c. \end{aligned}$$

k_c et α sont des coefficients qui permettent de décrire l'enroulement. Le paramètre α est choisi égal à 2 dans ce travail comme proposé dans la référence [2].

Le comportement dynamique de l'anche peut être aussi pris en compte dans ce modèle en écrivant que le mouvement de l'extrémité de l'anche vérifie :

$$M(\tau) \ddot{y}(t) + R(\tau) \dot{y}(t) + K(\tau) (y(t) - H(\tau)) = \Delta P(t, \tau) + k_c(|y(t) - y_c|)^\alpha. \quad (4)$$

Dans ce cas, 6 paramètres décrivent le comportement de l'anche (en supposant que $\alpha = 2$).

4.3 Modèle d'anche battante

Dans le cas où l'anche est battante (contact entre l'anche et l'extrémité du bec), il est possible de considérer un modèle de choc inélastique [1] :

$$y(t) = 0, \quad (5)$$

si $y(t) < 0$. Néanmoins, les observations expérimentales réalisées par Picart *et al* [9] montrent que, pour une clarinette jouée sur bouche artificielle, on peut observer un rebond de l'anche lors de son contact avec le bec. Dans ce cas, un modèle de choc élastique peut être proposé comme suit

$$\dot{y}(t + dt) = -\dot{y}(t), \quad (6)$$

$\dot{y}(t)$ et $\dot{y}(t + dt)$ sont respectivement les vitesses de l'extrémité de l'anche juste avant et après le choc.

5 Identification de paramètres

L'objectif de cette partie est d'estimer certains paramètres des équations présentées ci-dessus. L'identification des paramètres d'un modèle à partir de signaux mesurés constitue un domaine spécifique du traitement de signal. Différentes méthodes peuvent être utilisées comme décrit dans [6]. Ces méthodes s'appuient sur la minimisation d'une erreur entre les données mesurées et issues du modèle (figure 9).

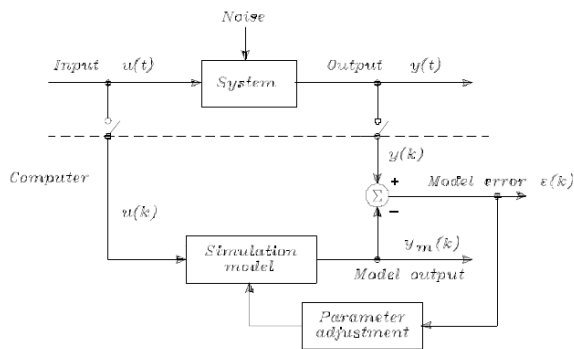


FIGURE 9 – Principe général de l'estimation de paramètres. issu de [6].

5.1 Modèles utilisés pour l'identification

5.1.1 Modèle “ $K H$ ” linéaire basses fréquences

Dans un premier temps, le modèle d'anche non battante est considéré aux basses fréquences et les effets d'inertie et d'amortissement sont ignorés. Dans ce cas, l'équation 1 s'écrit

$$K(\tau)[y(t) - H(\tau)] = \Delta P(t, \tau), \quad (7)$$

et les paramètres K et H sont estimés à l'aide d'une interpolation linéaire d'ordre 1 dans le plan $\Delta P - y$.

5.1.2 Modèle “ $R K H$ ” linéaire

Dans un second temps les effets d'amortissement de l'anche sont considérés. L'équation 1 est considérée en ignorant les effets d'inertie et s'écrit ainsi

$$R(\tau)\dot{y}(t) + K(\tau)[y(t) - H(\tau)] = \Delta P(t, \tau), \quad (8)$$

5.1.3 Modèle “ $R K_{NL} H$ ” non linéaire

Les effets liés à l'enroulement de l'anche sont pris en compte par l'équation 9. Les effets d'amortissement sont aussi considérés pour rendre compte des observations expérimentales, ce qui conduit à

$$R(\tau)\dot{y}(t) + K(\tau)(y(t) - H(\tau)) = \Delta P(t, \tau) + k_c(|y(t) - y_c|)^\alpha. \quad (9)$$

5.2 Méthode d'identification

L'outil d'identification SENSTOOLS [6] est utilisé pour identifier les paramètres des différents modèles en comparant les déplacements calculés et mesurés connaissant le signal d'excitation (ΔP). La minimisation d'erreur entre les grandeurs mesurées et prédites est réalisée à l'aide de la méthode de Gauss-Newton.

6 Résultats

Nous présentons ici les résultats de mesure et d'identification obtenus pour quatre anches de saxophone ténor. Ces anches sont de même marque, de même coupe et de même force. Deux anches sont considérées subjectivement comme faciles et possédant

un son timbré (anches F_a et F_b). Deux autres anches sont considérées comme difficiles et produisant un timbre mat (anches D_a et D_b).

6.1 Signaux mesurés

Les signaux sont obtenus en jouant successivement une note à deux nuances (*forte* puis *piano*). Cette expérience est répétée deux fois. Lors de la nuance forte, l'anche est battante ce qui permet d'estimer la référence de position $y = 0$. Cette référence de position reste un point difficile à déterminer à l'heure actuelle et cette devra être améliorée à l'avenir. La figure 10 montre un exemple de pression acoustique dans le bec et de déplacement des deux côtés de l'anche.

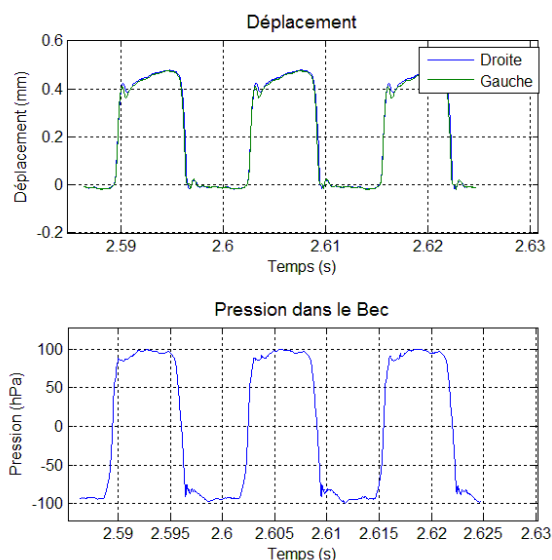


FIGURE 10 – Allure des signaux expérimentaux de déplacement pour les deux côtés et de la pression dans le bec.

6.2 Paramètres de jeu

Les signaux de déplacement, pression, et accélération sont dans un premier analysés dans la partie stationnaire du signal pour estimer des paramètres de jeu (niveau sonore, Centre de Gravité Spectral, ...) comme présenté dans [8]. Le niveau sonore dans le bec est présenté à la figure 11 pour les deux nuances (*piano*, *forte*) et les deux acquisitions réalisées pour chaque anche. Le niveau sonore varie de ± 1 dB pour chaque nuance. La différence de niveau sonore entre les deux nuances est de 10 dB environ. Il est donc possible de considérer que les anches sont jouées dans les mêmes conditions pour les deux nuances.

Le centre de gravité spectral (CGS) de la pression dans le bec est présenté à la figure 12. Il montre que les anches de type D et F peuvent être distinguées par cet indicateur pour la nuance *forte*.

D'autres paramètres, tels que la pression de seuil [8] seront analysés ultérieurement.

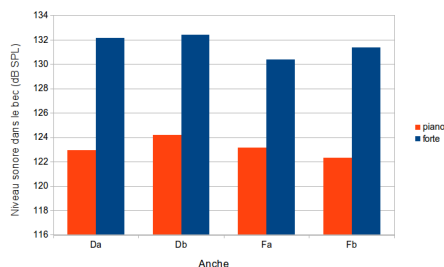


FIGURE 11 – Niveau sonore dans le bec pour les 4 anches et les 2 nuances.

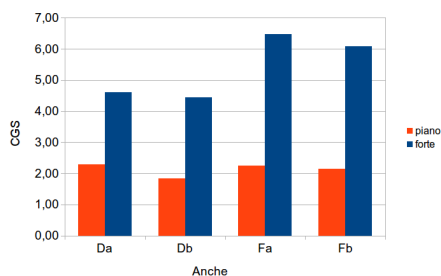


FIGURE 12 – Centre de Gravité Spectral de la pression dans le bec pour les 4 anches et les 2 nuances.

6.3 Paramètres d'anche identifiés

Les signaux de pressions (bec, bouche) et de déplacement des deux cotés de l'anche ont permis l'identification des paramètres des différents modèles présentés au §5.1. Cette identification est réalisée pour les deux nuances, les deux acquisitions et pour des extraits de signaux obtenus au début et à la fin de la partie stationnaire du signal. Les paramètres sont estimés à l'aide de l'analyse de 10 périodes environ. Les erreurs d'estimation associées aux différents modèles sont données au tableau 1.

À terme, cette identification permettra de suivre les paramètres équivalents du modèle en fonction du temps et ainsi de décrire l'évolution de l'embouchure dans le temps.

Les figures 13 et 14 montrent les résultats d'identification pour l'anche D_b et les nuances *piano* et *forte*. Il apparaît que même si le modèle $R K_{NL} H$ conduit à une erreur plus faible que pour les autres modèles, les effets de choc ($y \simeq 0$) et d'oscillations $y \simeq H$ ne sont pas expliqués par ce modèle à la nuance *forte*. La prise en compte des modèles donnés par les équations 1 et 6 pourrait permettre d'identifier ces phénomènes.

Nuance	<i>piano</i>	<i>forte</i>
Modèle $K H$	$e \simeq 12\%$	$e \simeq 12\%$
Modèle $R K H$	$e \simeq 6\%$	$e \simeq 8\%$
Modèle $R K_{NL} H$	$e \simeq 1\%$	$e \simeq 3\%$

TABLEAU 1 – Ordres de grandeurs des erreurs d'estimation donnés par SENSTOOLS pour les différents modèles et nuances.

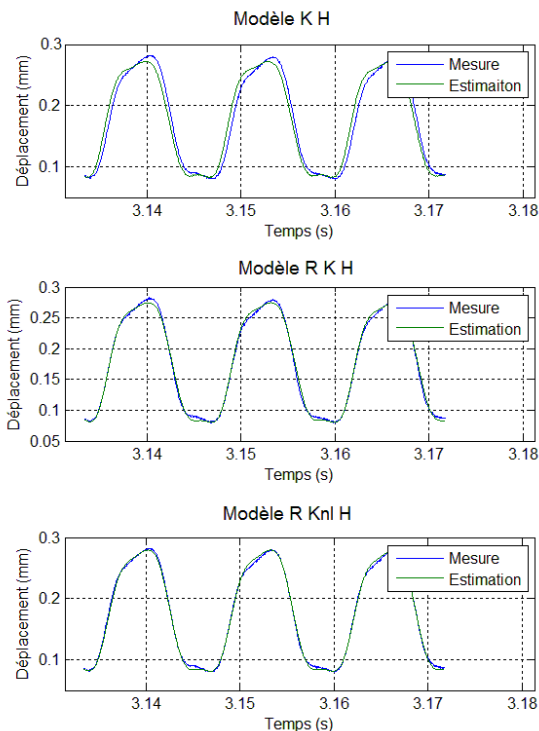


FIGURE 13 – Vue des signaux de déplacement (droite) mesurés et estimés par les trois modèles (nuance *piano*).

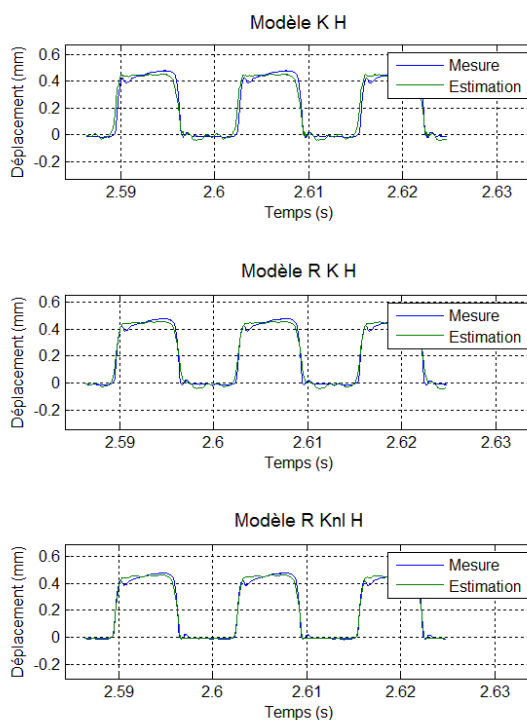


FIGURE 14 – Vue des signaux de déplacement (droite) mesurés et estimés par les trois modèles (nuance *forte*).

6.4 Relation paramètres physiques - type d'anche

De façon à expliquer l'influence des paramètres physiques sur la qualité perçue des anches (facile, difficile), une analyse de la variance est réalisée à l'aide du logiciel Tanagra [11].

Pour la nuance *piano*, celle-ci montre que les variables hauteurs, raideurs et amortissements des trois modèles sont significatives (expliquent la variance observée sur l'indicateur subjectif). En revanche, les paramètres caractérisant la non-linéarité (k_c et y_c de l'équation 3) ne le sont pas.

Pour la nuance *forte*, l'analyse de la variance montre que seules la raideur et l'amortissement issus du modèle non linéaire (R et K de l'équation 4) sont significatifs.

Enfin une analyse en composantes principales [8] réalisées pour les trois raideurs et deux facteurs d'amortissement montre un espace tridimensionnel qui explique environ 97 % de la variance. Les trois axes sont sensiblement portés par :

1. les raideurs des modèles linéaires K associées aux hauteurs H . Ces deux grandeurs sont fortement corrélées et sont inversement proportionnelles (le musicien diminue l'ouverture de l'anche H lorsque K augmente),
2. les facteurs amortissements des modèles R K H et R K_{NL} H ,
3. La raideur K_{NL} du modèle non-linéaire.

Enfin, ces trois familles de critères sont mieux décorréllées pour la nuance *piano* que pour la nuance *forte*.

7 Conclusion

Un bec instrumenté développé spécifiquement pour accueillir des capteurs a été développé à l'aide d'une technique de tomographie et d'impression 3D. Ce bec, équipé de capteurs de pression, de deux capteurs de déplacement (phototransistors) et de deux accéléromètres. Ces capteurs permettent la mesure de la pression acoustique dans le bec et de la pression dans la bouche, du déplacement de l'extrémité de l'anche des deux cotés (droit, gauche) et de l'accélération du bec des deux côtés (droit, gauche). Suite à un étalonnage des capteurs qui doit encore être amélioré, il est possible d'obtenir les signaux de pression, déplacement et accélération *in vivo* pour différentes anches de saxophone, considérées comme difficiles ou faciles.

L'application d'une méthode d'identification basée sur des modèles de complexité croissante (raideur seule, raideur - amortissement, raideur non linéaire - amortissement) permet d'estimer les paramètres des modèles. L'erreur d'estimation du modèle est d'autant plus faible que la complexité du modèle est grande. Néanmoins, le modèle le plus complexe ne permet pas de relater les phénomènes observés pour les positions extrêmes de l'anche (chocs sur le bec, oscillation propre sur la lèvre).

L'analyse des paramètres estimés pour les différentes anches, pour deux nuances (*piano* et *forte*) et pour les deux côtés (droit, gauche) montre que les paramètres décrivant le phénomène d'enroulement ne sont pas significatifs pour expliquer les grandeurs subjectives (anche facile / difficile). Par ailleurs, une analyse en composantes principales des autres grandeurs montre que les paramètres pouvant expliquer les sensations subjectives constituent trois familles (raideurs des

modèles linéaires, amortissement, raideur du modèle non linéaire).

Les perspectives à ce travail sont d'une part l'amélioration du dispositif expérimental (étalonnage, robustesse), d'autre part l'identification de paramètres caractérisant les comportements de l'anche aux positions extrêmes et enfin l'analyse des différents paramètres pour tenter d'expliquer les paramètres de jeu (CGS, ...) et les sensations des musiciens.

Références

- [1] 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.
- [2] Vasileios Chatzioannou and Maarten van Walstijn. Estimation of clarinet reed parameters by inverse modelling. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4) :629–639, 2012.
- [3] 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.
- [4] B Gazengel and JP Dalmont. Mechanical response characterization of saxophone reeds. In *6th Forum Acusticum*, 26 June-1 July 2011.
- [5] B. Gazengel, J.-F. Petiot, and M. Soltes. Objective and subjective characterization of saxophone reeds. In *Proceedings of Acoustics 2012*, 23-27 April 2012.
- [6] Morten Knudsen. Experimental modelling of dynamic systems. *Lecture notes*, 2004.
- [7] Alberto Munoz, Bruno Gazengel, and Jean Pierre Dalmont. *In vivo* and *in vitro* characterization of single cane reeds. In *SMAC 2013*, 2013.
- [8] Jean-François Petiot, Pierrick Kersaudy, Gary Scavone, Stephen McAdams, and Bruno Gazengel. Modeling of the subjective quality of saxophone reeds. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 19.
- [9] Pascal Picart, Julien Leval, Francis Piquet, Jean P Boileau, Thomas Guimezanes, and Jean-Pierre Dalmont. Tracking high amplitude auto-oscillations with digital fresnel holograms. *Optics express*, 15(13) :8263–8274, 2007.
- [10] 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.
- [11] Ricco Rakotomalala. Tanagra : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche. In *Actes de EGC'2005*, pages 697–702, 2005.