Application expérimentale du bilan de puissance réactive à la mesure de l'anche de saxophone

Xavier Boutillon, V. Gibiat

► To cite this version:

Xavier Boutillon, V. Gibiat. Application expérimentale du bilan de puissance réactive à la mesure de l'anche de saxophone. Journal de Physique IV Proceedings, 1994, 04 (C5), pp.C5-665-C5-668. 10.1051/jp4:19945144 . jpa-00252822

HAL Id: jpa-00252822

<https://hal.science/jpa-00252822>

Submitted on 1 Jan 1994

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Application expérimentale du bilan de puissance réactive à la mesure de l'anche de saxophone

X. BOUTILLON et V. GIBIAT*

Laboratoire d'Acoustique Musicale, UMR 9945 du CNRS, Ministère de la Culture, Université Paris 6, Boîte Courrier 161, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

** Laboratoire Ondes et Acoustique, URA 1503 du CNRS, Université Paris 7, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France*

Abstract : The reactive power balance approach is capable of linking the dynamics of a reed represented by a spring and that of the resonator which is played. A simple-reed instrument do not play exactly at the frequencies of the impedance peaks. Therefore, each mode of the pipe absorbs (or provides) reactive power. Their sum is equal to that provided by the spring which stands for the reed in our model. We have experimentally determined the input impedance of a saxophone and its internal spectrum for various notes and playing conditions. The model yields a value for the stiffness of the reed when played by a machine or a musician. The measured values are consistent with those given by the literature on isolated reeds.

Résumé : La notion de bilan de puissance réactive permet de lier le fonctionnement d'une anche modélisée par un ressort à celui du résonateur qu'elle excite. Un instrument à anche simple ne joue pas exactement sur les fréquences des pics d'impédance. Chaque partiel du tuyau absorbe donc (ou fournit) une puissance réactive. Leur somme algébrique est égale à celle fournie par le ressort qui représente l'anche. Sur le plan expérimental, nous avons mesuré le spectre de pression interne d'un saxophone et son impédance d'entrée pour différentes notes et nuances. La modélisation précédente permet d'obtenir une détermination de la raideur de l'anche *en situation de jeu*. Les valeurs mesurées sont voisines de celles relevées dans la littérature sur des anches isolées.

1. Analyse du fonctionnement d'un tuyau mis en vibration par une anche simple

La pression acoustique p dans un tuyau sonore est importante pour les harmoniques du fondamental situés au-dessous d'une fréquence de coupure caractéristique du tuyau. Cette fréquence de coupure place la plupart des harmoniques présents dans le tuyau au-dessous des valeurs habituellement admises pour la fréquence de résonance d'une anche simple de clarinette ou de saxophone. En première approximation, il est donc raisonnable de modéliser cette dernière par un simple ressort de raideur k . En négligeant les effets de la force de Bernoulli, on peut écrire que l'anche vibre sous l'effet de la différence entre la pression dans la bouche $p_B(t)$ et la pression dans le tuyau $p(t)$. Si l'anche a une surface S , son élongation $y(t)$ par rapport à sa position de repos $y=0$ sera donnée par l'équation :

$$S (p_B - p) = k y \quad (1)$$

La deuxième hypothèse d'un fonctionnement simplifié consiste à supposer que le flux d'air f_e qui traverse l'embouchure est proportionnel à la différence $p_B - p$ ainsi qu'à l'ouverture créée par l'anche :

$$(p_B - p)(y_0 - y) = R f_e \quad (2)$$

Enfin, on supposera que le flux d'air créé par le mouvement de l'anche est immédiatement transféré dans le tuyau. Pour une anche en rotation, ce flux vaut :

$$f_a = \frac{S}{2} \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

En remplaçant y par son expression en fonction de p , le flux dans le tuyau f , somme des flux f_a et f_e s'écrit :

$$f = -\frac{S^2}{2k} \frac{dp}{dt} + (p_B - p) \frac{y_0}{R} - (p_B - p)^2 \frac{S}{Rk} \quad (4)$$

Lorsqu'on calcule l'aire du cycle décrit en une période T du signal par le point courant dans le plan (p , f), seul le premier terme réalise une intégrale non nulle :

$$A = - \int_T f dp = \frac{S^2}{4k} \sum_n p_n^2 \omega_n^2 T$$

$$\text{soit :} \quad A = \frac{S^2 \pi^2}{k T} \sum_n p_n^2 n^2 \quad (5)$$

Par ailleurs, l'aire de ce cycle peut également se calculer à partir de la relation entre p et f donnée par le tuyau. On décompose p et f en séries de Fourier $\sum_n p_n \exp[i(\omega_n t + \psi_n + \phi_n)]$ et $\sum_n f_n \exp[i(\omega_n t + \psi_n)]$ où les p_n et les f_n sont positifs et où ϕ_n est la phase de l'impédance acoustique à chaque fréquence multiple de la fréquence de jeu $Z_n = \frac{p_n}{f_n} \exp(i\phi_n)$. Il vient alors : $A = \sum_n p_n^2 \frac{\pi n}{|Z_n|} \sin \phi_n$ (6)

Une équation semblable, appelée bilan de puissance réactive, a déjà été présentée pour une corde frottée par un archet [1]. Combinée avec l'équation (5), elle permet d'exprimer la raideur de l'anche en fonction de la vibration dans le tuyau.

$$\frac{k}{S^2} = \frac{\pi}{T} \frac{\sum_n p_n^2 n^2}{\sum_n p_n^2 \frac{n}{|Z_n|} \sin \phi_n} \quad (7)$$

On peut résumer la situation de la manière suivante : à cause de l'inharmonicité des pics de résonance d'un tuyau, les harmoniques de la fréquence de jeu ne peuvent coïncider avec les fréquences de résonance du tuyau. A la fréquence de jeu, certains modes du tuyau consomment de la puissance réactive (ceux dont la résonance est située au-dessus de l'harmonique correspondant) et d'autres en génèrent éventuellement. L'anche pour sa part en génère toujours puisque sa fréquence de résonance est supposée au-dessus de toutes les fréquences considérées. La combinaison des équations (5) et (6) exprime simplement que la puissance réactive ainsi définie est globalement conservée.

2. Approche expérimentale

Deux mesures sont à effectuer : l'impédance d'entrée du tuyau et la pression acoustique au niveau du bec, lorsque l'instrument fonctionne. Tous les termes de l'équation (7) sont alors connus, ce qui permet de caractériser l'anche en *situation normale (ou artificielle) de jeu*. C'est ce que nous avons réalisé.

Notre premier essai expérimental sur la clarinette n'a pas été concluant : dans un tuyau cylindrique, les impédances aux fréquences multiples pairs du fondamental sont très faibles (antirésonances) ainsi que l'amplitude des harmoniques correspondants. L'expression de la puissance réactive (6) fait donc intervenir

des termes simultanément très faibles au numérateur et au dénominateur et la rend ainsi extrêmement sensible aux erreurs de mesures, tant du spectre de la vibration que de l'impédance d'entrée du tuyau.

Nous avons donc opéré sur le saxophone, tuyau conique où le problème ne se pose pas.

Les impédances du saxophone (le bec ayant été remplacé par un cylindre de volume équivalent) ont été mesurées par la méthode TMTC [2].

Lorsque l'instrument est joué avec l'anche montée sur le bec, la pression acoustique est mesurée par un capteur microphonique à électret placé à l'intérieur du bec, le plus près possible de l'extrémité du bec. Les signaux sont échantillonnés à 10 kHz, ce qui est largement suffisant pour le spectre interne.

Le saxophone oscille à des fréquences proches de celles des pics de résonance du tuyau ; l'expression (7) est donc très sensible à la fréquence de jeu. Nous l'avons déterminée par ASD [3].

Le spectre de pression interne est obtenu par transformée de Fourier. Les impédances sont calculées aux harmoniques de jeu par interpolation sur les données préalablement acquises.

3. Résultats et commentaires

Les éléments précédents sont utilisés pour la détermination de k/S^2 par l'équation (7). Plusieurs notes à différentes nuances ont été jouées, soit par une bouche artificielle, soit par un saxophoniste. Les coefficients mesurés restent dans le même ordre de grandeur.

Une échelle de 100 sur nos mesures de k/S^2 correspond à une valeur de $2.5 \cdot 10^6$ uSI. Pour une surface de 1 cm^2 , la raideur correspondante serait de 250 N/m. Les indications que nous obtenons sont assez proches de celles obtenues par Nederveen [4] et Marandas et al. [5].

Pour une même note (doigté de si bémol médium) jouée en embouchure artificielle avec une variation de la pression d'alimentation, le coefficient k/S^2 reste stable à 3% près lorsque la valeur RMS de la pression interne baisse de moitié.

Conditions expérimentales	Valeur de k/S^2 mesurée (unités arbitraires)
Si bémol grave, joué naturellement, nuance <i>mf</i>	53
Sol médium, joué naturellement, nuance <i>mf</i>	120
Sol médium, joué naturellement avec une embouchure différente, une nuance <i>mf</i> ..	380
Si bémol médium, joué avec une bouche artificielle dans une nuance <i>mf</i> , fréquence de jeu 278.5.	124.2
Si bémol médium, joué avec une bouche artificielle dans une nuance <i>mp</i> , fréquence de jeu 278.2.	125
Si bémol médium, joué avec une bouche artificielle dans une nuance <i>p</i> , fréquence de jeu 278.1.	129.5

Comme à la fois l'amplitude des harmoniques et celle des hauteurs de pics diminuent lorsque n augmente dans l'expression (7), il importe de savoir si la valeur calculée de k/S^2 converge en fonction de n . La Figure 1 est typique de ce que nous obtenons en général ; les harmoniques doivent être pris en compte jusqu'à ceux représentant entre 1% et 10% de l'amplitude du plus intense. Cette convergence expérimentale est analogue à celle constatée dans le cas d'une corde frottée [6]. Nous n'avons pas cherché à déterminer analytiquement les conditions de convergence de l'expression (7).

Il importe également de vérifier si la valeur calculée de k/S^2 varie dans des proportions raisonnables avec la fréquence de jeu. Si tel n'était pas le cas, l'incertitude inévitable sur la détermination de la fréquence de jeu rendrait le résultat du calcul inexploitable. Pour autant que l'indique la Figure 2 (représentative des autres situations rencontrés), la valeur calculée de k/S^2 est bien fiable. L'approximation du modèle rend de toutes façons illusoire la quête d'une détermination trop précise de k/S^2 .

Avec une surface vibrante estimée de 0.5 à 1 cm^2 , les déterminations de raideur d'anche que nous avons effectuées conduisent à des fréquences de résonance de l'anche relativement faibles (1000 Hz environ). L'hypothèse selon laquelle cette fréquence dépasse celles des harmoniques présents dans le

saxophone n'est donc que partiellement vérifiée. Le problème de cohérence entre notre résultat et l'hypothèse ayant servi au calcul est toutefois minimisé par la convergence rapide de k/S^2 en fonction de n .

4. Conclusion

La méthode que nous présentons ici permet de mesurer un coefficient de raideur pour une anche en situation de jeu, et ceci pour la première fois, à notre connaissance. Les valeurs mesurées sont compatibles avec d'autres déterminations faites sur une anche isolée. La pertinence de l'approche du fonctionnement d'un instrument à vent par la notion de puissance réactive est également illustrée.

La caractérisation de l'anche reste toutefois très rudimentaire et n'incorpore pas en particulier l'hypothèse de viscoplasticité [4]. L'exploration d'une large gamme de doigtés et de nuances reste à faire pour cerner quelle identité de l'anche peut ainsi être obtenue.

5. Références bibliographiques

- [1] Boutillon X., Analytical Investigation of the flattening effect : The reactive power balance rule. J. Acoust. Soc. Am. **90** (2), pp. 754-763 (1991).
- [2] Gibiat V. et Laloë F., Acoustical Impedance Measurements by the two Microphones Three Calibration (TMTC) Method, J. Acoust. Soc. Am. **88**, pp. 2533-2566 (1990).
- [3] Gibiat V., Jardin P., Wu F., Analyse Spectrale Différentielle : applications aux signaux SONAR de Myotis Mistacinus, Acustica **63** p. 91-... (1987).
- [4] Nederven C.J., Acoustical Aspects of Woodwind Instruments, (p. 30), Frits Knuf Ed., Amsterdam 1969.
- [5] Marandas E., Gibiat V., Besnainou Ch., Grand N., Caractérisation mécanique des anches simples d'instruments à vent, 3ème Congrès Français d'Acoustique (Toulouse, 1994).
- [6] Faure C.-A., Boutillon X., Détermination et Etude expérimentale de la fréquence d'oscillation d'une corde frottée, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, N°11, p. 1377-1382 (1993).

Figure 1 : Valeur du coefficient k/S^2 en fonction du nombre d'harmoniques pris en compte dans le deuxième membre de l'équation (7). La note est un Si bémol grave, joué par un saxophoniste dans une nuance *mf*.

Figure 2 : Variation de la valeur du coefficient k/S^2 en fonction de la fréquence fondamentale choisie pour le calcul des impédances. La note est un Si bémol médium, jouée *mf* avec une bouche artificielle. La fréquence de jeu mesurée par ASD était de 278.5 Hz. La valeur du coefficient k/S^2 correspondante est de 126 unités arbitraires soit 3.15 uSI.