



Analyse expérimentale de l'effet de l'inharmonicité des instruments à anche simple - Cas du saxophone alto

J.-B. Doc et C. Vergez

CNRS-LMA, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

jbdoc@lma.cnrs-mrs.fr

Pour les instruments de musique à vent, l'inharmonicité des fréquences de résonance est une des grandeurs considérées, en facture instrumentale, comme représentatives de la qualité d'un instrument. L'inharmonicité peut altérer le timbre ainsi que la justesse de l'instrument. Pour les saxophones, l'inharmonicité des fréquences de résonances est principalement causée par la troncature de la perce conique ainsi que par la présence des trous latéraux.

Le but de ce travail est de mettre en avant expérimentalement l'effet de l'inharmonicité des fréquences de résonances sur la nature des régimes d'oscillation produits par un instrument à anche simple.

Un piston est fixé au niveau du bocal d'un saxophone alto afin de diminuer progressivement la première fréquence de résonance, ce qui permet de modifier l'inharmonicité de l'instrument. Une bouche artificielle est utilisée afin de mettre en oscillation l'instrument avec des paramètres de contrôle constants (paramètre d'embouchure et pression statique dans la bouche). Ces paramètres sont évalués expérimentalement par le biais d'une mesure de la caractéristique non linéaire.

Par modification des paramètres de contrôle et de l'inharmonicité, une grande diversité de régimes d'oscillation est observée expérimentalement. Ces régimes sont identifiés par l'analyse du signal de pression à l'intérieur du bec. En particulier, des régimes d'oscillation quasi-périodiques sont produits sous forme de sons multiphoniques.

1 Introduction

Les instruments de musique de la famille des vents sont construits autour de formes géométriques simples (tube cylindrique, cône ...). La fabrication de ces instruments sous leurs forme finale impose d'apporter des modifications au guide d'ondes de base : des trous latéraux sont percés et une embouchure y est ajoutée (ce qui implique de tronquer le cône pour les saxophones). Ces modifications ont notamment pour conséquence d'altérer l'harmonicité des fréquences de résonance de l'instrument.

L'inharmonicité des fréquences de résonance influe directement sur la justesse de jeu de l'instrument [1] (particulièrement lors du changement de registre) ainsi que sur le timbre des sons produits [2]. De plus, l'inharmonicité des fréquences de résonance d'un instrument à vent peut faciliter la production de sons multiphoniques. Dans ce cas, le régime d'oscillation de l'instrument est quasi-périodique [3]. L'inharmonicité constitue donc un aspect essentiel à considérer dans la conception d'instruments à vents.

Des sons multiphoniques peuvent être facilement obtenus avec des instruments à vent lorsqu'ils sont joués de manière non-conventionnelle, par exemple lorsqu'un musicien utilise des doigtés de fourche ou joue avec une position d'embouchure peu académique. Ces multiphoniques ont la particularité d'être perçus comme des sons roulants ou battants [4] et sont très utilisés en Jazz ou en musique contemporaine. A contrario, même lorsque l'instrument est joué de manière conventionnelle, des régimes d'oscillation quasi-périodiques peuvent être produits de manière indésirable. Les facteurs d'instruments cherchent donc à éviter ce genre de comportement, qui nuit à la jouabilité de l'instrument.

La production d'oscillations quasi-périodiques a déjà été étudiée pour les tuyaux d'orgues et les flutes [5, 6, 7]. Cependant, pour le cas des instruments à anche [8, 9] l'émergence des régimes quasi-périodiques n'est pas encore parfaitement comprise. Toutefois, l'article [10] présente une première étude expérimentale mettant en avant l'influence de l'inharmonicité des fréquences de résonance d'un saxophone sur la production de régimes quasi-périodiques. Récemment, ces travaux ont été

complétés par une étude [11] basée sur l'utilisation d'un modèle d'instrument à anche simple montrant que les paramètres de contrôle pouvaient également avoir une influence déterminante sur la production de régimes quasi-périodiques.

Cet article présente le résultat d'expérimentations ayant pour but de retrouver les tendances prédites numériquement par l'article [11]. Pour cela, l'expérience de Dalmont et coll. [10] est reproduite : un piston est fixé au niveau du bocal d'un saxophone alto afin de pouvoir modifier la fréquence de la première résonance de l'instrument sans modifier celle de la deuxième résonance. L'inharmonicité des premiers modes de l'instrument peut ainsi être modifiée artificiellement. Une bouche artificielle est utilisée afin de mettre en oscillation l'instrument avec des paramètres de contrôle constants (paramètre d'embouchure et pression statique dans la bouche). Les paramètres de contrôle sont évalués expérimentalement pour chaque expérience par le biais de la mesure de la caractéristique non linéaire, relation reliant le débit d'air entrant à la pression statique dans la bouche. Une cartographie des différents régimes d'oscillation dans l'espace des paramètres de contrôle est alors réalisable.

Dans un premier temps le dispositif expérimental ainsi que les méthodes servant à le caractériser sont présentés. Les méthodes de traitement des données expérimentales sont ensuite détaillées. En dernière partie, les résultats expérimentaux sont présentés.

2 Caractérisation du dispositif expérimental

2.1 Dispositif expérimental

Le saxophone alto utilisé pour l'expérience est un instrument d'étude de marque Yamaha (modèle YAS-280). Pour cette expérience, une anche de la marque Plasticover (force 3) est placée sur un bec standard de la marque Yamaha (modèle 4C). Pour reproduire les différents doigtés utilisés par la suite, des morceaux de liège sont insérés sous les mécanismes du clétage afin de maintenir fermées les clefs souhaitées.

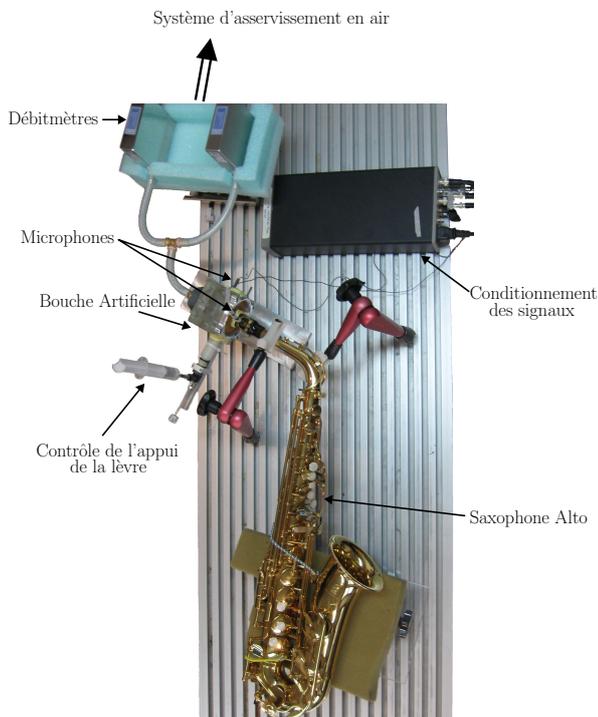


FIGURE 1 – Présentation du dispositif expérimental.

Des tendeurs élastiques sont également employés pour maintenir fermées certaines clefs.

La figure 1 présente le dispositif expérimental où le saxophone est mis à l'horizontale afin d'être relié à la bouche artificielle. La bouche artificielle est construite autour d'une boîte en plexiglas d'un volume intérieur de 15cm^3 . L'asservissement en air de la bouche artificielle est assuré par un système de régulation contrôlant l'ouverture d'une électrovanne placée en amont d'un réservoir d'air. Ce système de régulation temps réel est contrôlé par ordinateur et fonctionne en boucle fermée, utilisant comme donnée d'entrée la mesure de la pression statique à l'intérieur de la bouche. Ce système a fait l'objet d'un développement spécifique afin de faire varier avec une grande précision la pression dans la bouche au cours du temps (les détails techniques sont présentés par l'article [12]). Des rampes de pression peuvent ainsi être générées par la bouche artificielle.

La figure 2 schématise le fonctionnement de la bouche artificielle. Le bec de l'instrument est raccordé à la bouche artificielle en passant par un joint en caoutchouc assurant l'étanchéité du système. Une lèvres artificielle est placée en contact avec l'anche afin d'amortir sa vibration lorsque l'instrument est joué. La lèvres artificielle est composé d'un tube en latex dans lequel de l'eau est mis sous pression par le biais d'une seringue. L'action de la seringue permet donc de modifier l'appui de la lèvres sur l'anche, ce qui a pour effet de changer l'ouverture du canal d'anche au repos. La lèvres artificielle est placée à environ 1cm de l'extrémité du bec (voir figure 2).

La mesure de la pression statique à l'intérieur de la bouche artificielle ainsi que la mesure de la pression acoustique dans le bec est assurée par deux microphones Endevco (modèle 8507C-5) reliés à un boîtier de conditionnement. Un débitmètre de la marque Bürket (type 8701) est utilisé pour la mesure du débit d'air entrant dans la bouche artificielle. Un module

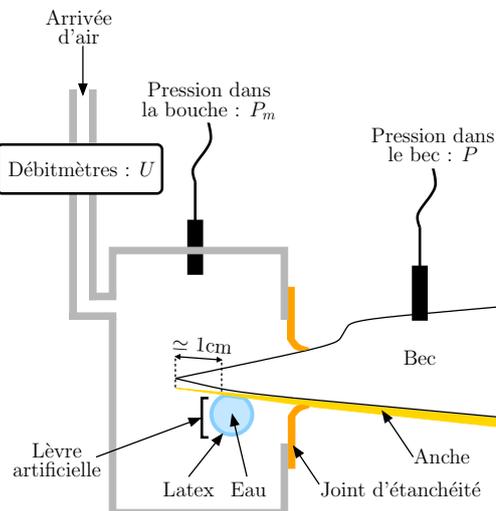


FIGURE 2 – Schéma de principe de la bouche artificielle.

d'enregistrement NI9215 transmet à un ordinateur l'acquisition de l'ensemble des signaux expérimentaux à une fréquence d'échantillonnage de 44kHz .

2.2 Caractérisation de l'oscillateur

Le système bec et anche présenté précédemment constitue un oscillateur acoustique qui va permettre de faire jouer l'instrument. En se référant aux modèles usuels d'instrument à anche simple [13], ce système peut être caractérisé par deux grandeurs physiques : le débit d'air U à travers le canal de l'anche et la différence de pression ΔP entre la pression dans la bouche P_m et celle dans le bec P (le débit d'air produit par l'anche lors de son déplacement est ici ignoré). La fonction reliant ces deux grandeurs représente la caractéristique non linéaire [14] de l'oscillateur (noté CNL) et s'exprime par :

$$\begin{cases} U = \frac{\zeta}{Z_c} (P_M - \Delta P) \sqrt{\frac{|\Delta P|}{P_M}} \text{sgn}(\Delta P) & (1a) \\ U = 0 & \text{si } \Delta P < P_M, \\ & \text{si } \Delta P > P_M, \end{cases} \quad (1b)$$

où P_M est la pression de placage de l'anche sur le bec et où le paramètre d'embouchure ζ est défini par la relation

$$\zeta = Z_c S \sqrt{\frac{2}{\rho P_M}}, \quad (2)$$

avec Z_c l'impédance caractéristique du résonateur, S la section représentant l'ouverture du canal d'anche au repos et ρ la masse volumique de l'air.

Les paramètres P_M et ζ peuvent être estimés expérimentalement grâce à la mesure de la CNL de l'oscillateur. La figure 3 présente un exemple de mesure pour un réglage donné de la bouche artificielle. Cette mesure permet d'estimer une valeur maximum de pression P_{max} et le débit d'air correspondant U_{max} . Puisque $P_M = 3P_{\text{max}}$, le paramètre d'embouchure est alors obtenu d'après la relation

$$\zeta = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} Z_c. \quad (3)$$

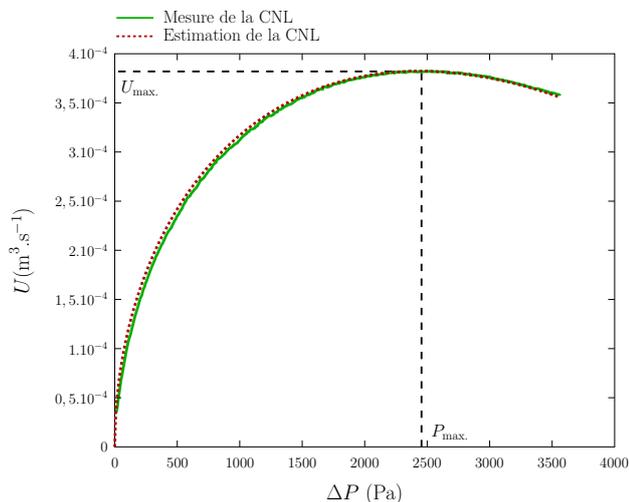


FIGURE 3 – Mesure de la caractéristique non linéaire (CNL) sur un saxophone alto pour un réglage spécifique de la bouche artificielle ($\zeta \simeq 0.45$), comparaison avec l'estimation théorique (eq. (1)).

La CNL décrite par l'équation (1) peut alors être calculée en utilisant les deux grandeurs P_M et ζ . Comme le montre la figure 3, l'équation (1) décrit parfaitement l'évolution de la CNL mesurée. De plus, l'estimation de la pression de placage P_M permet également d'évaluer la grandeur adimensionnée γ , définie comme le rapport entre la pression statique dans la bouche et la pression de placage $\gamma = P_m/P_M$.

Pour chaque expérience, une estimation expérimentale des paramètres ζ et γ (imposés par la bouche artificielle) permet de situer dans l'espace des paramètres de contrôle de l'oscillateur les différents régimes d'oscillation produits par l'instrument.

2.3 Caractérisation du résonateur

Un capteur d'impédance [15] est utilisé afin de mesurer l'impédance d'entrée du saxophone alto pour les différentes configurations testées. Pour cette étude, le doigté de sol au premier registre (G') est utilisé. Un piston est fixé au niveau du bocal du saxophone alto afin de pouvoir modifier la première fréquence de résonance de l'instrument pour ce doigté. En modifiant la longueur du piston (notée L_p), l'inharmonicité des deux premières fréquences de résonance de l'instrument est modifiée artificiellement. Pour la suite, l'inharmonicité est définie par la relation : $(f_2 - f_1)/f_1$, où f_n est la n -ième fréquence de résonance de l'instrument.

La figure 4 présente l'impédance d'entrée réduite du saxophone pour les deux positions extrêmes du piston. Lorsque le piston est fermé ($L_p = 0$), les fréquences de résonance de l'instrument sont harmoniques et $\Delta f/f = 100\%$. Lorsque $L_p = 7\text{cm}$, l'inharmonicité de l'instrument est maximum et vaut $\Delta f/f = 110\%$. L'impédance d'entrée du saxophone est mesurée pour différentes positions de la course du piston afin d'évaluer l'inharmonicité de l'instrument en fonction de L_p .

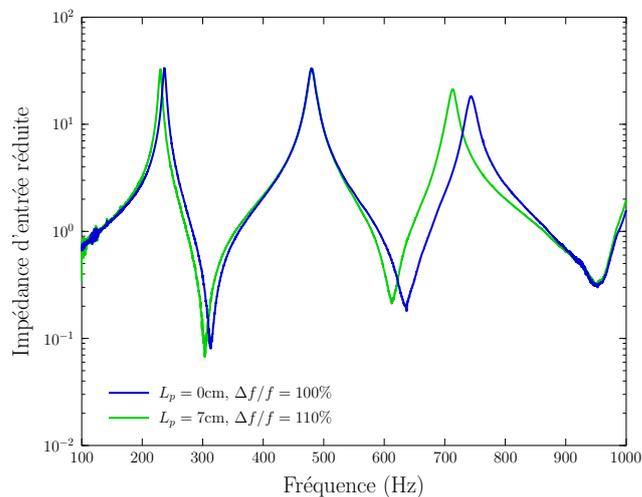


FIGURE 4 – Impédance d'entrée réduite du saxophone en fonction pour le doigté G' et pour deux longueurs du piston L_p .

3 Traitement des données

La mesure et l'analyse de la pression acoustique dans le bec de l'instrument permettent d'identifier les différents régimes d'oscillation obtenus. Pour cela, une identification des fréquences et des amplitudes instantanées des signaux expérimentaux sert de support à un processus d'identification des régimes d'oscillation.

3.1 Détection des fréquences et des amplitudes instantanées

Le signal acoustique mesuré dans le bec peut être décomposé sous forme de fréquences et d'amplitudes instantanées. Il est important de pouvoir suivre l'évolution temporelle de ces grandeurs puisque les mesures s'effectuent à pression variable.

Un spectrogramme est calculé à partir du signal de pression mesuré dans le bec. Le niveau de pression dans le bec étant de forte amplitude, le rapport signal sur bruit est très élevé. Cela rend possible une détection des maxima locaux des amplitudes et des fréquences instantanées sur le spectrogramme. La fonction *findpeaks* de Matlab est employée à cet effet. Une contrainte sur l'amplitude de l'émergence des pics permet de localiser précisément chaque partiel du signal de pression.

La figure 5 présente un exemple de spectrogramme calculé à partir d'un signal acoustique mesuré à l'intérieur du bec de l'instrument. Les traits en pointillés représentent la localisation des fréquences instantanées de ce signal. On constate que toutes les composantes du spectrogramme sont correctement identifiées.

3.2 Régimes d'oscillation

Un algorithme est spécialement développé afin d'identifier les différents régimes d'oscillation. Sur chaque pas de temps du spectrogramme, les différentes fréquences et amplitudes instantanées sont analysées afin de déterminer la nature du régime d'oscillation. Trois types de régimes d'oscillation sont recherchés dans cet ordre : régime statique (pas de son),

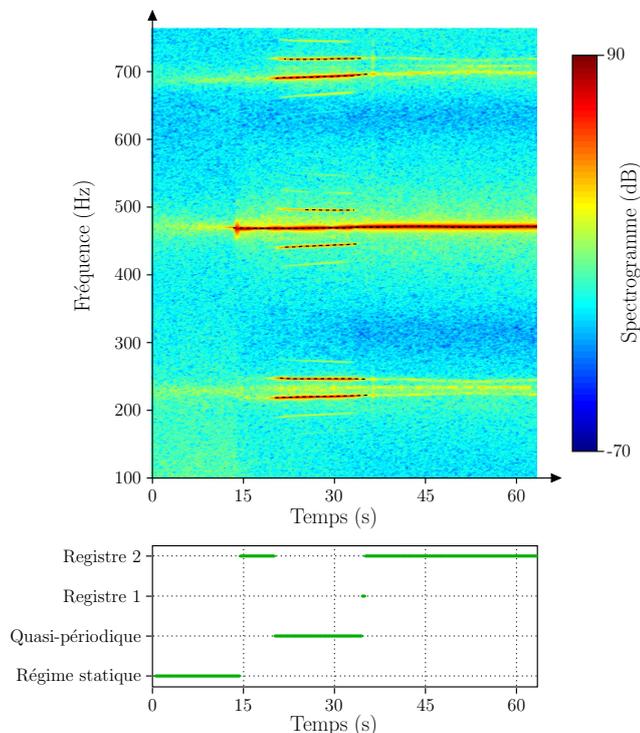


FIGURE 5 – Spectrogramme d'un signal de pression mesuré à l'intérieur du bec pour une rampe de pression montante. La localisation des fréquences instantanées est représentée en trait pointillé sur le spectrogramme. Le diagramme en bas de la figure présente la donnée de sortie de l'algorithme d'identification des régimes.

régime quasi-périodique (composé de deux fréquences incommensurables) et régime périodique (dont la fréquence fondamentale peut varier).

Description de l'algorithme :

- Sur un pas de temps donné, si aucune fréquence instantanée n'est détectée ou si toutes les amplitudes instantanées sont inférieures à une valeur seuil : le régime d'oscillation est identifié comme statique.
- Lorsque plusieurs fréquences instantanées sont détectées, on calcule le rapport entre chaque fréquence voisine. Si au moins un de ces rapports de fréquences est compris dans l'intervalle $[0.7, 1.3]$ alors le régime d'oscillation est identifié comme quasi-périodique.
- Lorsqu'au moins une fréquence instantanée est détectée, la plus petite fréquence est comparée à celles des fréquences des registres correspondants au doigté utilisé. S'il y a correspondance à plus ou moins 5 pourcent, le régime d'oscillation est identifié comme périodique.

La figure 5 présente un exemple de donnée de sortie de l'algorithme d'identification. Pour cet exemple, la mesure est réalisée sur une rampe de pression montante débutant en dessous du seuil d'auto-oscillation. Un régime statique est donc identifié sur les 15 premières secondes de l'enregistrement. Sur l'intervalle $t = [20, 35](s)$, plusieurs composantes inharmoniques du spectre apparaissent, un régime quasi-périodique est

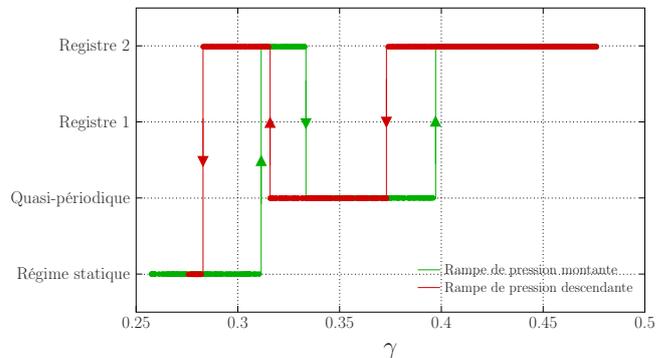


FIGURE 6 – Exemple d'identification des régimes d'oscillation pour une expérimentation ($\Delta f/f = 110\%$ et $\zeta = 0.31$), comparaison entre une rampe de pression montante et descendante.

donc identifié. Pour le reste de la mesure un régime périodique est identifié comme le second registre de l'instrument ($\simeq 460$ Hz), ce qui est correct puisque la première résonance est située vers 230Hz (voir figure 4).

Cette méthode de traitement des données expérimentales, simple à mettre en place, apparaît comme parfaitement adaptée au type de signaux qui seront analysés par la suite. Cependant, cette méthode étant discrète en temps, des erreurs lors des changements de régimes d'oscillation peuvent apparaître. Comme on peut le voir sur la figure 5, un registre 1 est identifié sur quelques échantillons lors du passage entre le quasi-périodique et le registre 2 ($t = 35s$). Cela ne perturbe cependant pas la lecture globale de l'identification des régimes d'oscillation.

4 Résultat expérimentaux

4.1 Déroulement de l'expérience

Le but de cette expérience est de cartographier dans l'espace des paramètres de contrôle (γ et ζ) le type de régime d'oscillation produit pour différentes valeurs d'inharmonicité de l'instrument. De part le dispositif expérimental, l'inharmonicité et le paramètre d'embouchure ne peuvent pas varier automatiquement (voir section 2.1). Par contre, le système d'asservissement en air permet un contrôle très précis de la pression statique dans la bouche artificielle. C'est pourquoi, afin de limiter le nombre d'acquisitions, la mesure s'effectue sur des rampes de pression montante et descendante de 60 secondes chacune. Ces rampes débutent systématiquement avant le seuil d'auto-oscillation ($\gamma \simeq 0.25$) et se terminent lorsque les régimes d'oscillation restent stables ($\gamma \simeq 0.5$). Pour chaque modification des réglages de la bouche artificielle, les paramètres ζ et P_M sont estimés expérimentalement par mesure de la CNL (voir partie 2.2).

4.2 Comportement hystérétique

Les mesures étant réalisées avec des rampes de pression, les seuils de déclenchement des régimes d'oscillations varient en fonction du sens d'évolution de la pression dans la bouche artificielle. La figure 6 représente

un exemple d'identification des régimes d'oscillation pour une configuration donnée ($\Delta f/f = 110\%$ et $\zeta = 0.31$). On constate que les seuils de déclenchement diffèrent légèrement entre les rampes de pression montantes et descendantes. La progression lente de la rampe de pression (25 Pa/s) assure une identification similaire des plages de jeu des différents régimes d'oscillation. Ainsi et pour simplifier la lecture des résultats expérimentaux, il ne sera montré par la suite que les mesures obtenues avec des rampes de pression montantes.

4.3 Quasi-périodicité

Dans cette partie, l'influence de l'inharmonicité sur la production de régime d'oscillation quasi-périodique est étudiée. Pour cela, des cartographies dans l'espace des paramètres de jeux (γ et ζ) sont réalisées à partir de données expérimentales collectées pour plusieurs valeurs d'inharmonicité. La figure 7 présente le résultat des mesures effectuées, le régime statique n'est pas affiché pour faciliter la lecture des résultats. Il est à noter que les mesures sont focalisées dans une certaine région de l'espace (γ, ζ) puisqu'en dehors de celle-ci aucun régime quasi-périodique n'a été obtenu (cela est en accord avec les observations de l'article [11]).

Voici les principales tendances révélées par les résultats expérimentaux (figure 7) :

- plus l'inharmonicité est grande et plus la zone de quasi-périodicité est importante ;
- en dessous d'une valeur seuil d'inharmonicité (estimée ici à $\Delta f/f = 106\%$), il devient très difficile de produire des oscillations quasi-périodiques ;
- par ajustement des paramètres de contrôle il est possible de sélectionner les différents registres d'oscillation périodiques ;
- la zone de quasi-périodicité est localisée à l'interface des différents régimes périodiques susceptibles d'être joués.

L'inharmonicité apparaît bien comme une condition essentielle à la production de régimes d'oscillation quasi-périodiques. Au vu de ces résultats expérimentaux, l'inharmonicité conditionne également les capacités de l'instrument à pouvoir jouer sur le premier et le troisième registre périodique.

5 Conclusion

Un dispositif expérimental a été mis au point afin de mettre en évidence l'influence de l'inharmonicité des fréquences de résonances d'un instrument à anche simple sur la production d'oscillations quasi-périodiques. Des cartographies dans l'espace des paramètres de jeux permettent de mettre en avant une grande diversité de régimes d'oscillation produits par l'instrument. En particulier, il a été montré que l'inharmonicité des fréquences de résonances a une influence très forte sur la production d'oscillation quasi-périodique.

Une perspective à ce travail consisterait à étudier l'influence de l'inharmonicité sur la fréquence de jeu des régimes périodiques.

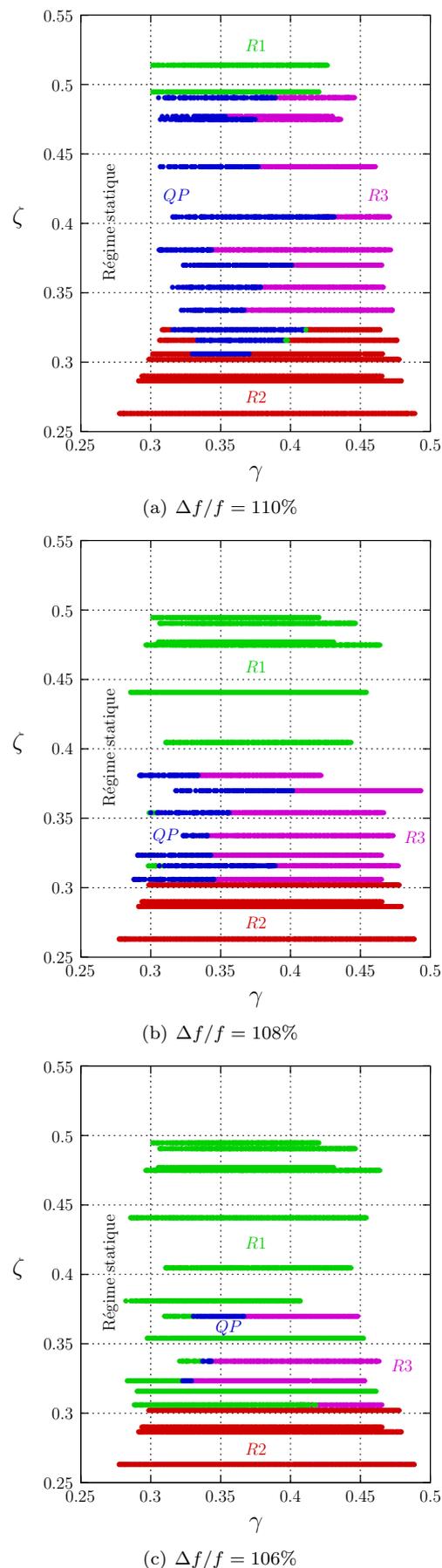


FIGURE 7 – Cartographie des régimes d'oscillation à l'intérieur de l'espace des paramètres de contrôle (γ et ζ) pour différentes valeurs d'inharmonicité (doigté G').

R_n : n ème registre périodique et QP : régime quasi-périodique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Joël Gilbert pour ses précieux conseils. Ce travail a été réalisé dans le cadre du Labex MEC (ANR-10-LABX-0092) et du projet A*MIDEX (ANR-11-IDEX-0001-02), financé par les «Investissements d’Avenir», programme du gouvernement français géré par l’Agence Nationale de la Recherche française (ANR).

Références

- [1] N. H. FLETCHER et H. D. ROSSING : *The physics of musical instruments*. Springer-Verlag, 1998.
- [2] A. H. BENAÏE : *Fundamentals of musical acoustics*. Oxford University Press, 1976.
- [3] V. GIBIAT : Phase space representations of acoustical musical signals. *Journal of Sound and Vibration*, 123(3):529 – 536, 1988.
- [4] J. BACKUS : Multiphonic tones in the woodwind instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2):591–599, 1978.
- [5] N. H. FLETCHER : Sound production by organ flue pipes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60(4), 1976.
- [6] N. H. FLETCHER et L. M. DOUGLAS : Harmonic generation in organ pipes, recorders, and flutes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(3), 1980.
- [7] J. W. COLTMAN : Jet offset, harmonic content, and warble in the flute. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4):2312–2319, 2006.
- [8] D. H. KEEFE et B. LADEN : Correlation dimension of woodwind multiphonic tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(4):1754–1765, 1991.
- [9] T. IDOGAWA, T. KOBATA, K. KOMURO et M. IWAKI : Nonlinear vibrations in the air column of a clarinet artificially blown. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(1):540–551, 1993.
- [10] J.-P. DALMONT, B. GAZENGEL, J. GILBERT et J. KERGOMARD : Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments. *Applied Acoustics*, 46(1):19 – 60, 1995.
- [11] J.-B. DOC, C. VERGEZ et S. MISSOUM : A minimal model of a single-reed instrument producing quasi-periodic sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, Accepted, 2013.
- [12] D. FERRAND, Ch. VERGEZ, B. FABRE et F. BLANC : High-precision regulation of a pressure controlled artificial mouth : The case of recorder-like musical instruments. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(4):701–712, 2010.
- [13] A. CHAIGNE et J. KERGOMARD : *Acoustique des instruments de musique*. Belin, 2008.
- [14] J.-P. DALMONT, J. GILBERT et S. OLLIVIER : Nonlinear characteristics of single-reed instruments : Quasistatic volume flow and reed opening measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(4):2253–2262, 2003.
- [15] J.-P. DALMONT et J.-C. Le ROUX : A new impedance sensor for wind instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5):3014, 2008.
- [16] F. SILVA, V. DEBUT, J. KERGOMARD, C. VERGEZ, A. DEBLEVID et P. GUILLEMAIN : Simulation of single reed instruments oscillations based on modal decomposition of bore and reed dynamics. *In Proceedings of the International Congress of Acoustics*, Sept 2007.