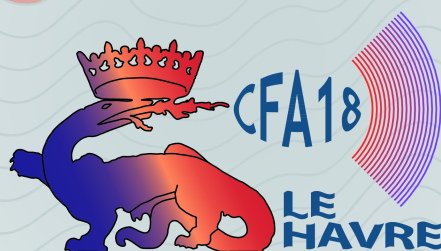


CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Analyse des fréquences de jeu d'instruments à vent en fonction de la nature de leur embouchure et de leur impédance d'entrée

N. Grauer^a, A. Guilloteau^a, M. Curtit^a, J. Cabaret^a et J. Gilbert^b

^aITEMM, 71 Avenue Olivier Messiaen, 72000 Le Mans, France

^bLAUM - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France

alexis.guilloteau@itemm.fr

Dans le cadre du développement du projet PAFI, le pôle d'innovation de l'artisanat de l'ITEMM met à disposition des facteurs d'instruments des outils de modélisation d'impédance d'entrée à partir d'une perce associée. La prédiction des fréquences de jeu issues de ces modèles reste encore un vaste sujet de recherche. La présente étude se concentre sur l'analyse des fréquences de jeu qui sont ensuite comparées aux données d'impédance d'entrée mesurées. Des campagnes de mesures ont été réalisées sur un ensemble d'instruments choisis pour représenter les différents systèmes excitateurs présents dans la famille des instruments à vent. Ainsi des fréquences de jeu d'une flûte traversière, de deux trompettes et d'un Uilleann Pipes sont étudiées sur des musiciens de niveaux intermédiaires à professionnels et pour trois niveaux de nuances musicales. Les écarts entre les fréquences de jeu, fréquences de la gamme tempérée et fréquences de résonance, sont analysés. Cela permettra à terme de guider le facteur d'instruments quant à l'estimation a priori des fréquences de jeu à partir des fréquences de résonances calculées ou mesurées d'un instrument donné.

1 Introduction

L'étude du couplage musicien-instrument est un sujet d'actualité. Dans le cadre de développement d'outils d'aide à la facture destinée aux facteurs d'instruments à vent, de nombreuses études sont réalisées (par exemple [3] et [4]). L'étude présente une démarche similaire à celle proposée dans [7] pour la trompette et est étendue à d'autres types d'instruments présentant des embouchures différentes. L'embouchure de type jet d'air sur biseau sera étudiée au travers de mesures réalisées sur une flûte traversière, et l'embouchure de type anche double sera étudiée au travers de mesures réalisées sur un Uilleann Pipes.



Figure 1: Instruments étudiés : flûte traversière Parmenon #477, trompette BACH Stradivarius ML 37 et Uilleann Pipes Ronan Olivier 1602.

Les propriétés de jeu des instruments auto-oscillants dépendent principalement des caractéristiques de leur système excitateur et de leur impédance d'entrée. Les résultats expérimentaux présentés proposent une quantification de l'influence du système excitateur sur la justesse de ces instruments.

Les protocoles de mesure en situation de jeu et de mesure d'impédance ainsi que les outils et méthodes de post-traitements utilisés sont brièvement décrits dans la deuxième partie et les résultats sont présentés par instrument dans la troisième. Dans chaque sous-partie sont décrits et présentés la perce de l'instrument étudié, les protocoles de mesure de façon plus détaillée, ainsi que les justesses des fréquences de jeu et de résonance mesurées dans le référentiel du tempérament égal. Enfin, les fréquences de jeu et de résonance sont comparées.

2 Matériels et méthodologie

Les fréquences des notes du tempérament égal sont notées F_{temp} . Le La3 (ou A3) est utilisé comme référence à 440 Hz. Les F_{temp} sont définies par :

$$F_{temp}(n) = 440 \times 2^{\frac{n}{12}} \quad (1)$$

avec n , entier correspondant au nombre de demi-tons supérieurs ou inférieurs à la référence. Dans notre étude, les fréquences considérées, tous instruments confondus, vont du Do1 à 65.4 Hz au Do6 à 2093 Hz, soit 5 octaves.

L'écart entre les fréquences de jeu F_{jeu} et les fréquences des notes du tempérament égal F_{temp} est calculé en cent :

$$Ecart_{cent} = 1200 \times \log_2 \left(\frac{F_{jeu}}{F_{temp}} \right) \quad (2)$$

2.1 Protocole de mesure en situation de jeu

Le protocole de mesure en situation de jeu est largement inspiré de celui utilisé dans l'article [7]. Il a été adapté à chaque instrument et sera décrit en détail en troisième partie. Les enregistrements ont été réalisés à une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz avec un microphone placé à un mètre du musicien dans l'axe de la source rayonnante principale. Les musiciens ont joué des suites de notes tenues 1.5 seconde environ, entrecoupées de silences. Les fréquences de jeu sont ensuite extraites à partir de l'autocorrélation des signaux, sur cette même durée d'acquisition. Il a été demandé aux musiciens de favoriser la nuance à la justesse des notes.

2.2 Protocole de mesure d'impédance

Les mesures d'impédance sont réalisées avec le pont d'impédance développé par le CTTM (cf. manuel d'utilisation [11]). La reproductibilité des mesures évaluée

dans [10] et [12] est estimée à 4 cents en fréquence et à un décibel en amplitude. La calibration du capteur réalisée à chaque session de mesure est validée par la mesure d'un tube de référence en début de session. Des pièces d'adaptation sur-mesure, réalisées en impression 3D, sont utilisées pour assurer l'étanchéité du raccordement entre la tête d'impédance et les instruments mesurés. Dans le cas de la trompette, l'embouchure est directement placée sur le capteur. Dans [9], en situation de jeu la température de l'air à l'intérieur de l'instrument est estimée à 28°C. Lorsque les fréquences de résonance mesurées sont comparées aux fréquences des notes jouées, la température relevée au cours des mesures d'impédance est ajustée à 28°C.



Figure 2 : Pièces d'adaptation utilisées pour mesurer l'impédance du tube de calibration (en haut à gauche), de la flûte traversière (en bas à gauche) et du « chanter » du Uilleann Pipes (à droite).

3 Résultats

3.1 Flûte traversière

Quatre musiciens ont joué la flûte traversière dont la perce est présentée en figure 3, selon 3 nuances différentes : piano, mezzo-forte et forte. L'exercice demandé consistait à jouer la partition présentée en figure 4. Un seul enregistrement par exercice, par nuance et par musicien a été réalisé. La répétabilité de la justesse d'un musicien est évaluée à partir de la répétition d'une même note intercalée dans une série : le La4.

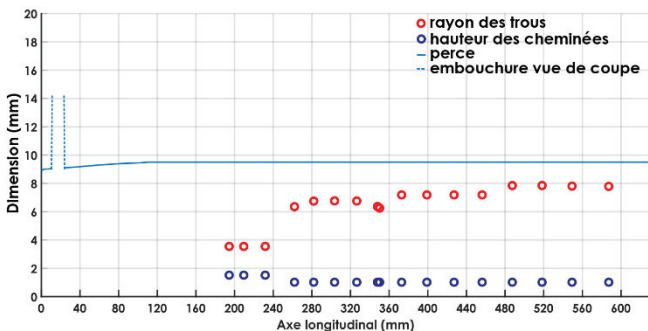


Figure 3 : Evolution du rayon interne de la flûte traversière étudiée, en trait plein. Les tirets correspondent à l'ouverture de l'embouchure. Les dimensions des trous latéraux sont représentées par les cercles rouges, et les hauteurs de cheminées par les cercles bleus.



Figure 4 : Flûte traversière. Gamme chromatique jouée lors des enregistrements. La répétition du La4 intercalé dans la gamme donne un aperçu de la répétabilité du musicien.

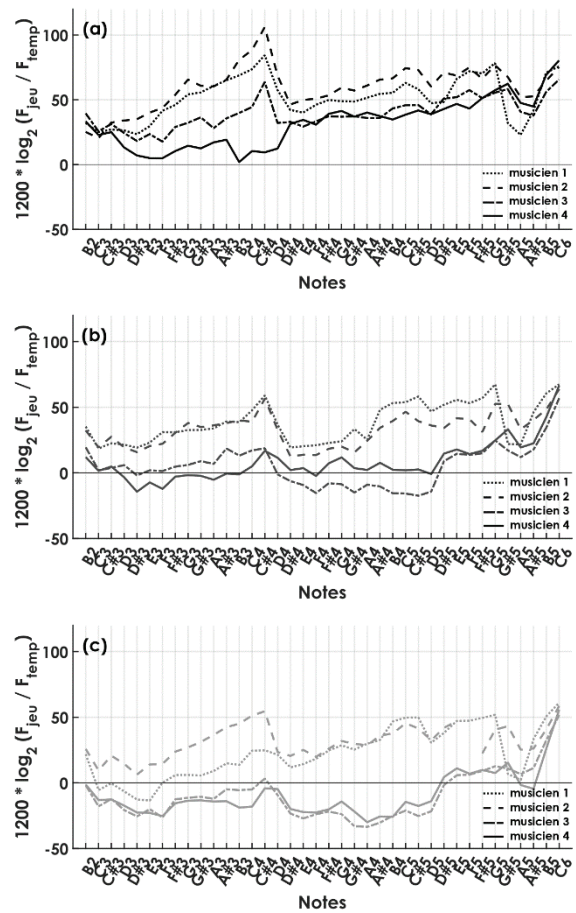


Figure 5 : Flûte traversière. Écart en cent entre les fréquences des notes jouées forte (a), mezzo-forte (b), piano (c) par les musiciens et les fréquences des notes du tempérament égal. L'intonation mesurée sur l'un des quatre musiciens est représentée par un même style de ligne.

Le jeu du musicien 1 sur la note La4 considérée est répétable à 2 cents près pour la nuance piano, 4 cents près pour la nuance mezzo et 8 cents près pour la nuance forte. Respectivement pour les musiciens 2, 3 et 4, il vient : 3, 1, et 6 cents, 2, 5 et 5 cents, 2, 6 et 4 cents. L'ensemble des résultats des mesures de fréquences de jeu par nuance est présenté en figure 5. De manière générale, la fréquence de jeu des quatre musiciens a tendance à baisser à mesure que

la nuance diminue. Une forte irrégularité dans la justesse est observable à la transition de registre de l'instrument. Les écarts en cent entre les fréquences des notes jouées par les musiciens 3 et 4 et F_{temp} diminuent lorsque la nuance diminue. En revanche, la justesse des musiciens 1 et 2 diminue de forte à mezzo mais le jeu mezzo et piano est relativement le même. Les musiciens 1 et 2 jouent plus aigu que les musiciens 3 et 4. Les deux sous-ensembles d'individus formés par les musiciens 1 et 2 d'une part, et par les musiciens 3 et 4 d'autre part, mettent en évidence des différences de gestes en situation de jeu. Un musicien qui couvre la lumière de l'embouchure, autrement dit qui bouche partiellement celle-ci a tendance à jouer plus bas qu'un musicien dont le jeu est plus relevé et découvert. De plus, les musiciens ont tendance à changer de position de jeu au niveau de l'embouchure en fonction des notes [16].

Les fréquences de résonance de la flûte traversière sont extraites d'une unique série de mesure (figure 6) réalisée d'après le protocole décrit dans la section 2.2.

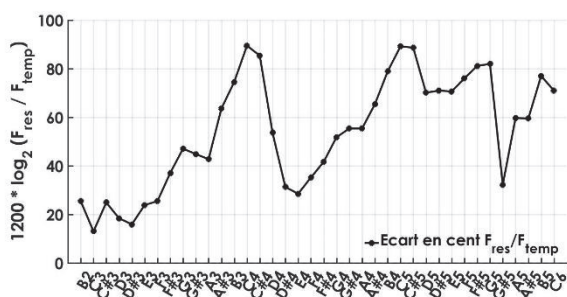


Figure 6 : Flûte traversière. Écart en cent entre les fréquences de résonance mesurées et les fréquences des notes du tempérament égal. Mesures réalisées à une température ambiante moyenne de 20.6°C. 21 cents doivent être ajoutés à ces résultats pour ajuster F_{res} à 28°C.

Les écarts en cent entre F_{res} et F_{temp} sont calculés à partir de l'équation (2). De même que les écarts en cent entre F_{jeu} et F_{temp} , les écarts en cent entre F_{res} et F_{temp} augmentent pour le premier registre (du ré au do#). On observe la même tendance pour le second registre.

Les écarts en cent entre F_{jeu} et F_{res} sont calculés à partir de la formule (2), F_{res} ayant été ajusté à 28°C. Les valeurs médianes de l'ensemble de ces écarts sont décrites par musicien respectivement pour les nuances piano, mezzo et forte :

- Musicien 1 : -52, -38, -23 cents
- Musicien 2 : -43, -47, -16 cents
- Musicien 3 : -83, -71, -40 cents
- Musicien 4 : -83, -67, -44 cents.

La variation de la fréquence de jeu entre le jeu forte et piano est de 35 cents en moyenne à plus ou moins 6 cents près. A partir de ces médianes, il possible de dire qu'en situation de jeu piano, les fréquences de jeu sont plus basses que F_{res} de 65 cents en moyenne, de 55 cents en situation de jeu mezzo et de 31 cents pour le jeu forte.

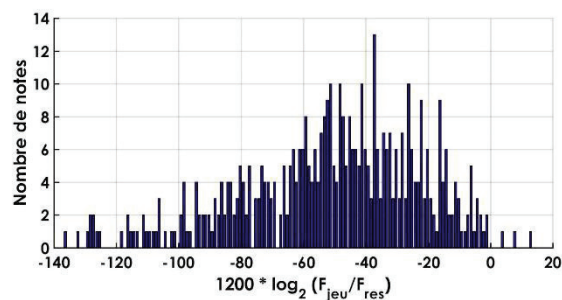


Figure 7 : Flûte traversière. Distribution des écarts entre les fréquences de jeu et les fréquences de résonance toutes notes et nuances confondues.

456 notes ont été jouées. La distribution des écarts approche une loi normale centrée en -51 cents. Au seuil de 95%, cette moyenne est comprise dans l'intervalle [-54 ; -48] cents.

3.2 Trompette

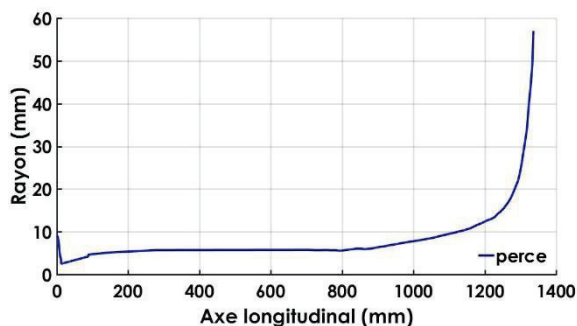


Figure 8 : Perce de la trompette 2 avec embouchure.

Quatre musiciens ont participé aux enregistrements. L'exercice demandé consistait à jouer les registres 2 à 6 de quatre doigtés, pour 3 nuances (p, mf et f), et cela 3 fois par musicien avec 2 trompettes, nommées trompette 1 et trompette 2. La trompette 1 est une trompette Yamaha et la trompette 2, une BACH Stradivarius ML 37. Les doigtés sont notés 0, 1, 12, 123 et correspondent respectivement aux configurations suivantes : aucun piston en jeu (0), premier piston enfoncé (1), premier et second pistons enfoncés (12) et les trois pistons enfoncés (123). Lors de toutes les mesures, la coulisse d'accord générale est tirée d'1 cm. Pour le doigté 123 la coulisse d'accord du troisième piston est en plus tirée de 3 cm.

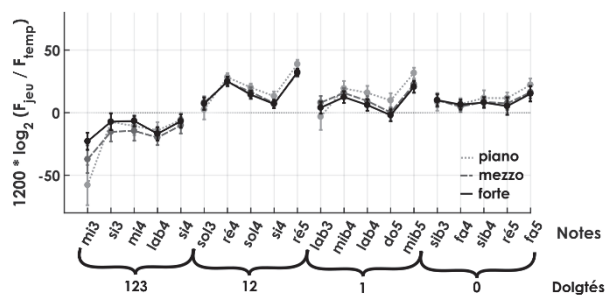


Figure 9 : Trompette. Écart en cent entre les fréquences moyennes des notes jouées par les 4 musiciens et les fréquences des notes du tempérament égal par nuances.

La reproductibilité est présentée graphiquement sur la figure 9 : une barre de dispersion est évaluée à partir des 24 notes jouées pour une nuance, deux trompettes, et les 3 répétitions de la même note jouée par 4 musiciens. Les répétabilités des musiciens 1, 2, 3 et 4 sont respectivement de 6, 8, 9 et 6 cents sur l'ensemble des notes, soit 360 notes jouées par musicien.

Les mesures d'impédance sont moyennées à partir des 3 mesures réalisées par doigtés et sont répétables à 1 cent près pour chaque trompette (cf. figure 10). Les mesures du doigté 123 ont été réalisées la coulisse d'accord du troisième piston tirée de 3 cm comme en situation de jeu.

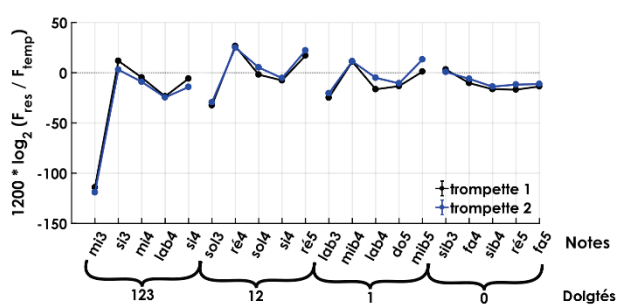


Figure 10 : Trompette. Écart en cent entre les fréquences de résonance mesurées des deux trompettes et les fréquences des notes du tempérament égal. Mesures réalisées à une température ambiante moyenne de 22°C. 17 cents doivent être ajoutés pour ajuster F_{res} à 28°C.

Les écarts en cent entre F_{jeu} et F_{temp} et les écarts entre F_{res} et F_{temp} suivent les mêmes tendances (cf. figures 9 et 10) par doigtés. En moyenne, les fréquences de jeu sont supérieures aux fréquences de résonance mesurées d'environ 10 cents sans le régime 2 et de 15 cents tous régimes confondus. Ces moyennes sont proches des écarts moyens annoncés dans [7] : 15 cents sans le second régime et 22 cents tous régimes confondus, avec un écart-type de 5 cents.

Les médianes des écarts en cent entre les fréquences des notes jouées par un musicien et les fréquences de résonance mesurées ajustées à 28°C pour les nuances piano, mezzo et forte sont les suivantes :

- Musicien 1 : 19, 14, 15 cents
- Musicien 2 : 7, 8, 10 cents
- Musicien 3 : 16, 9, 12 cents
- Musicien 4 : 25, 21, 19 cents.

La variation de la fréquence de jeu entre le jeu forte et piano est de 5 cents en moyenne à plus ou moins 2 cents près. A partir de ces médianes, il est possible de dire qu'en situation de jeu piano, les fréquences de jeu sont plus hautes que F_{res} de 17 cents en moyenne, de 13 cents en situation de jeu mezzo et de 14 cents pour le jeu forte, tous régimes confondus.

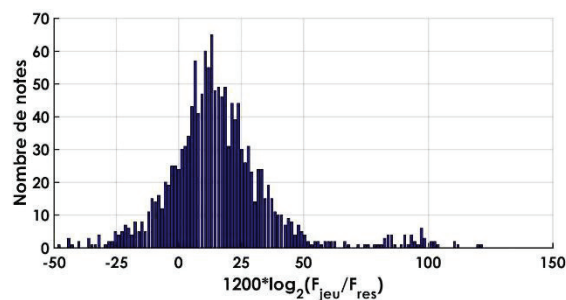


Figure 11 : Trompette. Distribution des écarts en cent entre les fréquences de jeu et les fréquences de résonance toutes notes et nuances confondues.

Un nombre total de 1400 notes jouées a été analysé. La distribution des écarts suit une loi normale centrée en 15.6 cents. Au seuil de 95%, la moyenne est comprise entre 14 et 17 cents.

3.3 Uilleann Pipes

Le Uilleann Pipes est un instrument de la famille des cornemuses [6]. Dans sa version la plus simple, il est composé d'un soufflet, d'une poche et d'un « chanter ». Le soufflet, actionné par le coude, permet une entrée d'air vers le chanter. Ce « chanter », fléché en figure 1 et étudié par la suite, permet de jouer sur environ deux octaves. Traditionnellement les notes du « chanter » suivent un tempérament de Zarlino, différent du tempérament égal utilisé pour les autres instruments de cet article. Le tempérament de Zarlino permet une « intonation juste », et favorise notamment les intervalles de tierce pure. Les écarts en cent entre les notes du tempérament du « chanter » et celles du tempérament égal sont renseignés en figure 12. Le facteur accorde le si du « chanter » à 0 cent par rapport au si du tempérament égal. Un doigté de fourche alternatif non étudié permet de jouer un si de Zarlino à -16 cents.



Figure 12 : Ecarts en cent entre les fréquences des notes du tempérament du « chanter » étudié et celles des notes du tempérament égal.

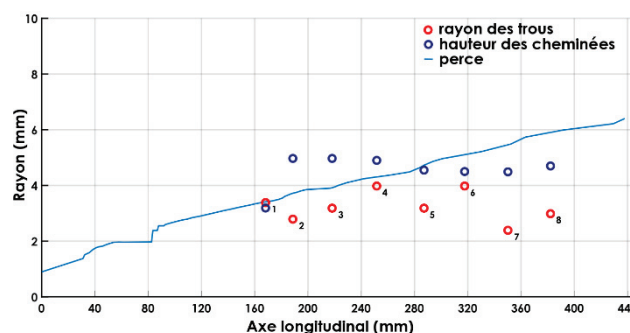


Figure 13 : Perce du « chanter » du Uilleann Pipes étudié (figure 1). Les rayons des trous latéraux numérotés de 1 à 8 (voir figure 14) sont représentés par les cercles rouges et les hauteurs de cheminées par les cercles bleus.

Les résultats présentés sur le Uilleann Pipes concernent les mesures réalisées sur un même « chanter » (figures 1 et 13). Le facteur [14] ayant fourni l'instrument en a été l'unique musicien. Les mesures de justesse ont été réalisées sur deux anches nommées A et K. La première est considérée comme moins rigide que la seconde par le musicien. L'anche A constitue la préférence du musicien car elle lui permet de jouer à un niveau sonore plus élevé sans passer directement au régime supérieur contrairement à l'anche K. Pour obtenir une nuance un peu plus forte, il lui a été demandé de jouer en mode « surpression » mais cela n'est pas représentatif d'une situation de jeu réel. Les notes ont été jouées pour une pression de fonctionnement usuelle (situation dite de « jeu normal ») avec les anches A et K, et en surpression avec l'anche A.

N° - Trous	Doigtés standards "On the Knee"									Doigtés "Off the Knee"				
	D	E	F#	G	A	B	c1	c#	d	E'	F#'	G'	A'	B'
1 - Back_D	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●
2 - C#	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●
3 - B	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○
4 - A	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	○	○
5 - G	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○
6 - F#	●	●	○	○	●	●	○	●	●	●	○	○	○	○
7 - E	●	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●
8 - Ghost_D	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bottom_D	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○

Figure 14 : « Chanter » du Uilleann Pipes. Table des doigtés des notes jouées.

L'exercice demandé consistait à jouer les notes des doigtés (cf. figure 14) standards « On the knee » des régimes 1 et 2, puis des doigtés alternatifs « Off the knee » pour lesquels seul le régime 1 est joué. Les notes « On the knee » sont jouées en appuyant l'extrémité ouverte du chanter sur la cuisse du musicien. Cette extrémité correspond au trou nommé bottom_D dans la table des doigtés. Celui-ci est donc ouvert lorsque les doigtés « Off the knee » sont utilisés. Cela donne l'impression d'un volume sonore légèrement plus élevé. Le changement de doigtés entre « On » et « Off » est utilisé pour modifier la nuance. Chaque note est jouée 3 fois. La répétabilité du jeu du musicien est évaluée à partir de ces 3 mesures et est illustrée graphiquement en figure 15.

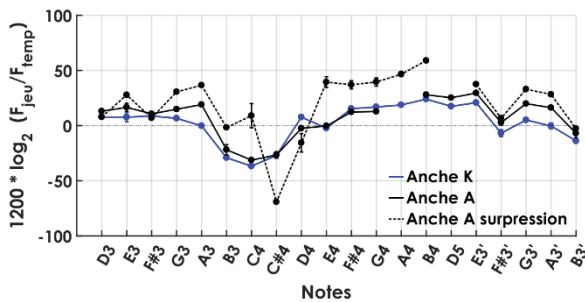


Figure 15 : « Chanter » du Uilleann Pipes. Écart en cent entre les fréquences des notes jouées et les fréquences des notes du tempérament égal.

La médiane en valeur absolue des écarts en cent entre les fréquences des notes jouées en situation de jeu normal et

celles des notes jouées en surpression du doigté « On the knee » est de 11 cents pour le premier régime et de 29 cents pour le second régime. Elle est de 8 cents au regard des doigtés « Off the knee ».

Les fréquences de résonance du « chanter » sont issues d'une unique mesure. Les impédances d'entrée mesurées ont été ajustées afin de prendre en compte le volume physique de l'embouchure. L'ajustement consiste en l'ajout d'un cône de longueur 31 mm, de rayon d'entrée 0,895 mm et de rayon de sortie 1,375 mm à l'entrée de l'instrument.

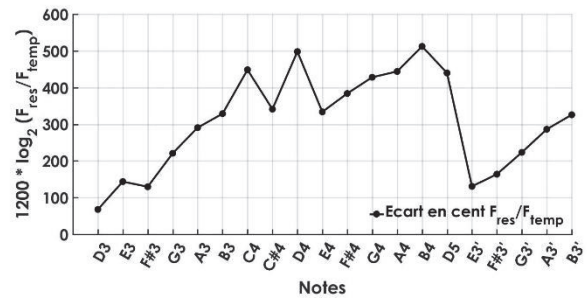


Figure 16 : « Chanter » du Uilleann Pipes. Écart en cent entre les fréquences de résonance mesurées et les fréquences des notes du tempérament égal. Mesures réalisées à une température ambiante moyenne de 18.2°C.

Un fait notable sur cet instrument est le passage de la note C_4 à $C\#4$. En effet, la variation de la première fréquence de résonance ne suffit pas à expliquer le changement de justesse entre ces deux notes, car celles-ci sont identiques (cf. figure 15). La différence mesurée entre les deux notes sur cette figure étant de cent cents environ, cela signifie que les fréquences de leurs premières résonances sont identiques. Or en situation de jeu normal, l'écart entre ces deux notes est bien mesuré à un demi-ton dans la figure 14. Ce phénomène peut peut-être s'expliquer par une contribution du résonateur, l'embouchure n'étant pas manipulable par le musicien et les pressions d'excitation restant proches note à note.

D'après [2], l'inharmonicité d'un résonateur peut être responsable d'une variation de fréquence de signe équivalent. Cependant, sur un instrument comme le Uilleann Pipes, il est difficile d'extraire une inharmonicité de manière identique et aussi précise que sur un instrument à trous latéraux usuel étant donnée la fréquence de coupure particulièrement basse de son réseau (cf. par exemple [13]), estimée ici autour de 800 Hz. Néanmoins, il semble que le paramètre d'inharmonicité soit ajusté et considéré par les facteurs d'Uilleann Pipes lors de sa réalisation.

Les écarts en cent entre F_{res} et F_{Temp} augmentent par registre. Les écarts présentés en figure 15 et ceux en figure 16 ne suivent pas la même évolution en fréquences.

Les médianes des écarts en cent entre les fréquences des notes jouées en situation de jeu normal sont de -243 cents toutes anches confondues, de -240 cents pour l'anche K et de -243 cents pour l'anche A. En surpression, la médiane est de -213 cents.

Au début du registre 1, les écarts en cent entre F_{jeu} et F_{res} sont de 55 et 101 cents pour les doigtés « On the knee » et « Off the knee ». En fin de registre, ils sont de 498 et 329 cents. Au début et en fin du second registre du doigté « On the knee », ils sont de 334 et 415 cents.

Contrairement aux instruments à anche double, chez les instruments à anche simple [5] les écarts entre fréquences de jeu et fréquences des notes de la gamme tempérée évoluent de la même manière que les écarts en cent entre F_{res} et F_{temp} en fonction des doigtés. Les fréquences des notes jouées à l'aide d'une bouche artificielle d'une clarinette et d'un saxophone sont plus basses que les fréquences de résonance mesurées. Respectivement les écarts sont de 20 et 15 cents au début du premier registre et de 55 et 40 cents à la fin de celui-ci. Au début du second registre les écarts sont de 20 et 10 cents et de 80 et 60 cents à la fin.

Conclusion

Dans le cadre de développement d'outils d'aide à la facture destinée aux facteurs d'instruments à vent, il est important de connaître la relation entre fréquences de jeu et fréquences de résonance, ces dernières pouvant être prédites de manière assez précise. L'étude a consisté à étudier expérimentalement cette relation entre fréquences de jeu et fréquence de résonance pour trois instruments à vent ayant un système excitateur différent : la trompette, la flûte traversière, le Uilleann Pipes.

Dans le cas de la trompette, les lèvres vibrantes sont le système excitateur. Les fréquences de jeu sont supérieures aux fréquences de résonance mesurées d'environ 15 cents à plus ou moins 5 cents toutes nuances confondues et tous régimes confondus.

Dans le cas de la flûte traversière à jet d'air sur biseau et d'après la figure 7, les fréquences de jeu sont inférieures aux fréquences de résonance de 51 cents.

La plupart des fréquences des notes jouées à la trompette et à la flûte traversière peuvent être prédites à partir des mesures d'impédance d'entrée : leur justesse évolue de la même manière que celle des fréquences de résonance en fonction des doigtés, à un offset près.

En revanche, dans le cas du Uilleann Pipes de système excitateur de type anche double, il est difficile de conclure quant à la variation des fréquences de jeu en fonction des fréquences de résonance mesurée. La figure 16 met en évidence le fait que l'embouchure contribue à la variation de la longueur vibrante effective en situation de jeu. Cependant, pour continuer l'analyse, une connaissance plus élargie des paramètres de l'anche aurait été nécessaire pour quantifier la variation des fréquences de jeu en fonction des fréquences de résonance.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier des facteurs pour les prêts d'instruments et le temps consacré à ce travail, à savoir l'Atelier Parmenon flûtes [15], Stéphane Barra [1], ainsi que Ronan Olivier [14]. Merci également aux

professeurs du conservatoire du Mans et à leurs élèves ainsi qu'aux étudiants musiciens de l'Itemm d'avoir participé à cette étude.

Références

- [1] S. Barra, <http://abc-musique.fr/>, site internet [consulté le 20 mars 2018]
- [2] X. Boutillon, *Analytical investigation of the flattening effect: the reactive power balance rule*. The Journal of the Acoustical Society of America, 90:754, 1991
- [3] M. Campbell, C. Greated, *The musician's guide to acoustics*. Schirmer Books, 1988, Ch.9. Brass instruments, 303–407
- [4] A. Chaigne, J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*. Belin, 2008
- [5] J.-P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert, J. Kergomard, *Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments*. Applied Acoustics 46 (1995) 19–60
- [6] J.-P. Dalmont, G. Le Vey, *The irish Uilleann pipe: a story of lore, hell and hard D*, International Symposium on Musical Acoustics, 2014
- [7] P. Eveno, J.-F. Petiot, J. Gilbert, B. Kieffer, R. Causse. *The relationship between resonances frequencies and playing frequencies in trumpets*. Acta Acustica united with Acustica, Hirzel Verlag, 2014, 100 (2), pp.362–374
- [8] N. H. Fletcher, T. D. Rossing, *The physics of musical instruments*. Springer-Verlag, 1991, Ch.14. Lip-driven Brass instruments, 365–393
- [9] J. Gilbert, L. M. L. Ruiz, S. Gougeon, *Influence de la température sur la justesse d'un instrument à vent*, Proceedings of Congrès Français d'Acoustique, Tours, 2006
- [10] A. Guilloteau, *Conception d'une clarinette logique*, Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, 2015, Annexe B
- [11] J.-C. Le Roux, E. Portier, *Capteur d'impédance manuel d'utilisation*, Centre de Transfert de Technologie du Mans, 2008
- [12] J.-C. Le Roux, J.-P. Dalmont, B. Gazengel, *A new impedance tube for large frequency band measurement of absorbing materials*, Proceeding of Acoustics08 congrès, 2008
- [13] E. Moers, J. Kergomard, *On the cutoff frequency of clarinet-like instruments. Geometrical versus acoustical regularity*. Acta Acustica united with Acustica, 97(6):984–996, 2011
- [14] R. Olivier, <http://www.ronan-olivier.net/>, site internet [consulté le 20 mars 2018]
- [15] Atelier Parmenon, <https://www.parmenon.fr/>, site internet [consulté le 20 mars 2018]
- [16] C. Vauthrin, *Acoustique et respiration dans le jeu musical des instruments à vent: application aux flûtes*, Thèse de doctorat, Paris 6, 2015