



Détection de défauts dans un instrument de type clarinette par impédancemétrie

Alexis GUILLOTEAU

Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

Université Pierre et Marie Curie

Stage au LMA de 5 mois (Mars-Juillet 2011)



Encadrants :

Jean KERGOMARD, Christophe VERGEZ, Philippe GUILLEMAIN

Contact Buffet-Crampon :

Michael JOUSSERAND

Memoire de stage présenté pour le diplôme de

Master II ATIAM

2010 - 2011

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage Jean Kergomard, pour la sagesse de ses conseils et sa compréhension. Je remercie également mes encadrants Christophe Vergez et Philippe Guillemain pour leur disponibilité.

Je tiens à remercier Michael Jousserand qui m'a permis de découvrir le monde de la facture instrumentale. Et également, Eric et Raphaël pour leur passion de la clarinette.

Un grand merci à Alain Busso pour son support technique indispensable.

Finalement, un grand merci à tous les stagiaires, ingénieurs et chercheurs des équipes S2M et PA.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Tests subjectifs	3
2.1	Résultats des séances de tests avec l'essayeur 1	4
2.1.1	Première séance de tests	4
2.1.2	Deuxième séance de tests	5
2.2	Résultats des séances de tests avec l'essayeur 2	5
2.2.1	Première séance de tests	5
2.2.2	Deuxième séance de tests	6
2.3	Analyse des résultats des tests	6
3	Evaluation du capteur d'impédance	9
3.1	Comparaison des mesures aux modèles d'impédance	10
3.1.1	Impédance d'entrée du tube rayonnant	10
3.1.2	Modèles de rayonnement	11
3.1.3	Écarts des mesures aux modèles théoriques	12
3.2	Conclusion	13
4	Mesure de l'impédance d'entrée des 7 clarinettes	15
4.1	Déroulement des mesures	16
4.1.1	Dispositif expérimental	16
4.1.2	Répétabilité des mesures d'impédances d'entrée et écarts "inter-clarinettes"	17
4.2	Analyse des résultats	20
4.2.1	Aide à la localisation de fuites	20
4.2.2	Amplitude de la première résonance et facilité d'émission	22
4.2.2.1	Approche théorique	23
4.2.2.2	Evolution des premières résonances des 7 clarinettes	25
4.2.3	Rôle de l'inharmonicité sur la facilité d'émission	27
4.2.3.1	L'inharmonicité du résonateur de clarinette	28
4.2.3.2	Inharmonicité inter-résonances et facilité d'émission	29
4.2.3.3	Analyse de l'inharmonicité des 7 clarinettes	30

4.2.4	Ecart entre fréquence nominale et fréquence de résonance	30
4.3	Conclusion	34
5	Conclusion générale	35
6	Annexes	37
6.1	Coupe longitudinale d'un bec de clarinette	37
6.2	Doigtés de la clarinette	38
6.3	Répétabilité du capteur d'impédance	39
6.4	Résultats de chaque doigté	49
	Références	55

1

Introduction

La facture instrumentale a su au fil des décennies développer un savoir-faire exceptionnel lui permettant de concevoir des instruments de grande qualité. Ce n'est que grâce à la collaboration des musiciens que de tels instruments ont put être réalisés. Il ne peut donc être que le point central de toute étude sur la mise en évidence de défauts d'un instrument de musique. Bien que chaque musicien a une manière qui lui est propre d'aborder sa pratique instrumentale, il existe cependant des caractéristiques subjectives communes indispensables à la bonne appréciation des instruments de la famille des bois comme la clarinette. Musiciens, facteurs et scientifiques s'accordent sur le fait que l'instrument doit : Avoir une régularité de sa réponse à un certain effort fourni, permettre une large étendue de dynamique, avoir un rayonnement efficace et une bonne sonorité, avoir une intonation stable et juste et finalement permettre une bonne articulation de jeu. De toutes ces composantes, participant au retour haptique et sonore du musicien, il est nécessaire de déterminer laquelle a le plus d'influence sur l'impression de qualité globale d'un instrument afin de préciser les constituantes subjectives principales d'un défaut.

A l'échelle d'une industrie, la production en grand nombre de clarinettes de même série s'écartant le moins possible de la référence est primordiale. C'est pourquoi le dernier maillon de la chaîne de contrôle/qualité est constitué de musiciens (appelés essayeurs), experts dans l'identification d'imperfections, qui disposent d'une bonne connaissance de l'instrument et du savoir-faire de l'entreprise. Leur rencontre, au sein de l'entreprise Buffet-Crampon qui a prit part à ce projet de stage, a donc été le premier pas de cette étude visant à identifier les causes physiques des défauts ou différences observables sur des clarinettes. Ce rapport commence donc par l'analyse des tests réalisés auprès de ces essayeurs sur 7 clarinettes en Sib de même série afin de tenter d'identifier leurs critères d'évaluation.

La première difficulté de ce stage a alors été d'évaluer la capacité du capteur d'impédance, développé au CTTM, à discerner des instruments proches et ainsi de préciser dans quelle mesure il peut être utile au facteur d'instruments dans l'aide à l'identification de défauts sur sa chaîne de contrôle/qualité. Bien que la procédure expérimentale de la mesure d'impédance d'entrée d'instruments à vent ait fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies, ce capteur est très récent et peu d'études ont été réalisées le concernant. C'est pourquoi en deuxième partie de ce rapport il est question d'établir un mode opératoire assurant une bonne reproductibilité des conditions de mesure à partir des résultats obtenus sur une charge acoustique simple (tube) comparée à son modèle théorique.

La clarinette peut être considérée comme un oscillateur auto-entretenu, où un système excitateur (l'anche) vient transformer une source d'énergie continue (la pression dans la bouche du musicien) en énergie acoustique. Le résonateur à trous latéraux de la clarinette vient ensuite interagir avec ce système d'excitation non linéaire qui conditionne le fonctionnement global de l'instrument. L'analyse des différents régimes d'oscillation résultant de ce couplage à l'aide de modèles numériques est un domaine d'étude très complexe, mais qui, dans le cas du régime périodique, permet d'approximer certains paramètres de l'instrument, comme par exemple sa fréquence de jeu et sa pression dans le bec. Bien que ces aspects dépendent également, mais à moindre importance, des paramètres d'embouchure du musicien, l'analyse des résonances de chaque clarinette est donc un indicateur indispensable à cette étude. Après s'être assuré que la précision du capteur permettait d'identifier clairement des instruments de même série, la troisième partie de ce rapport tente de faire le lien entre les dires des musiciens et les résultats de mesure d'impédance effectués sur un ensemble de doigtés sélectionnés. L'étude se restreint au premier registre de l'instrument, considéré comme principalement utilisé par le musicien pour établir son jugement. On s'attardera sur le lien étroit qui peut exister entre la facilité d'émission et la justesse de la clarinette à partir de l'analyse des deux premiers pics de résonance en relation avec une approximation linéaire du comportement de l'anche que peut modifier le musicien.

2

Tests subjectifs

La chaîne de contrôle/qualité de l'usine de facture instrumentale participant à cette étude, inclut une dernière phase de recherche d'imperfections, réalisée par des musiciens appelés essayeurs, sur chacune des clarinettes, afin d'en apporter les derniers réglages avant leurs commercialisations. Le point de vue de ces essayeurs, experts dans la recherche de dissemblances entre clarinettes de modèle similaire, est très précieux et constitue la base de cette étude d'identification de défauts/différences sur cet instrument.

Deux séries de tests ont été réalisées afin analyser les termes employés par deux essayeurs pour qualifier les différences ou défauts présents sur 7 clarinettes en Sib (tableau 2.1). Cinq de ces clarinettes sont de même modèle (noté A), développé par le fabricant, et correspondent à la série étudiée. Ces 5 clarinettes de même modèle sortent de la même chaîne de production et sont donc très similaires. Ensuite, un modèle supplémentaire (noté B) correspondant à une gamme de qualité équivalente du fabricant, mais de perce différente. Et enfin une clarinette d'un fabricant concurrent, de gamme de qualité équivalente, notée modèle C. Ces clarinettes sélectionnées ne sont pas passées par la phase de contrôle/qualité au préalable des tests et il nous est donc impossible de connaître leur potentiel de défaillance. C'est pour cela qu'une des clarinettes de modèle A a été modifiée par un barillet plus étroit que l'original (partie de la clarinette la plus proche du bec).

Ces tests ont été réalisés les 15 et 16 mars 2011 au sein de l'entreprise de facture instrumentale. Il a été demandé aux essayeurs de classer par ordre de préférence ces sept clarinettes, et de motiver leurs choix. Des caches disposés sur les numéros de série les rendent indifférenciables (sauf pour la clarinette de modèle concurrent noté C). Le test est réalisé le lendemain sur les mêmes clarinettes. Ces séances de tests ont été enregistrées.

N°	Modèles de clarinettes	Commentaires
1	A	-
2	A	Barillet plus étroit
3	A	-
4	A	-
5	A	-
6	B	Série différente
7	C	Concurrent

Table 2.1: *Description des clarinettes utilisées pour les phases de tests à l'usine de facture instrumentale.*

2.1 Résultats des séances de tests avec l'essayeur 1

L'essayeur 1 utilise une ouverture de bec et une force d'anche standard. Il teste l'instrument en jouant des gammes et des exercices techniques sur plusieurs dynamiques de jeu.

2.1.1 Première séance de tests

Ses principaux critères de sélection sont la justesse et la facilité d'émission. La facilité d'émission correspond à la pression ou l'effort que doit exercer le musicien pour obtenir la dynamique qu'il souhaite. Après avoir testé une première fois chaque clarinette, l'essayeur revient sur chacune pour préciser ses choix dans l'ordre de son classement :

- 1 : Cette clarinette est très homogène en émission. Ce qui permet un choix d'anches étendu.
- 6 : Très homogène également, seulement elle semble plus retenue que la précédente. Marcherait mieux avec une anche plus faible. Cependant le son est plus rond, plus doux ce qui permet de conclure sur une meilleure couleur sonore.
- 5 : Problème d'homogénéité notamment sur le doigté Sol-Ré, et sur la main droite de l'instrument, il est plus fermé plus difficile d'émission.
- 3 : L'ensemble de l'instrument est trop serré, difficile d'émission, et ceci de manière homogène sur tout l'instrument.
- 4 : Assez proche de la clarinette numéro 3. Cependant le son est plus agressif, et clair, et comporterait trop d'harmoniques aigus. Le son manque de rondeur (contrairement à la 6).
- 2 : Ici réel défaut. Elle mériterait de retourner à l'atelier pour un contrôle de la perce, car l'instrument est "bouché". Il y a un gros problème d'émission sur toute l'étendue de l'instrument.
- 7 : Problème d'émission, des problèmes sur les doigtés Sib, Sol-Ré et Ré-La à l'émission et à la justesse. Modèle différent et inconnu du musicien, nécessite un temps d'adaptation et de prise en main.

2.1.2 Deuxième séance de tests

Pour cette deuxième séance les mêmes clarinettes sont testées, en attribuant des lettres, cette fois, à chacune des clarinettes. Par souci de clarté nous allons conserver dans ce rapport la même signalisation pour chaque séance de tests. Cette séance-ci est globalement plus courte, nous n'avons que de brefs commentaires sur chacune des clarinettes. Les voici dans l'ordre de préférence :

- 1 : Homogène, facile d'émission.
- 6 : Moins colorée, plus veloutée.
- 3 : Moins homogène, un peu plus serrée, main gauche plus retenue, Ré un peu bouché.
- 2 : Plus difficile à l'émission, plus claire que la 3.
- 5 : Très retenue, Sol-Ré bouché.
- 4 : Retenue dans la main gauche, fermée, dure d'émission.
- 7 : -

2.2 Résultats des séances de tests avec l'essayeur 2

L'essayeur 2 utilise un bec plus ouvert avec une force d'anche standard. Il joue l'air de Figaro du *Barbier de Seville* de Rossini, pour tester la clarinette en jeu rapide, et l'introduction de la première sonate de Brahms pour piano et clarinette, jeu plus lent. Certains termes très spécifiques ont été définis lors de ces entretiens et il convient donc de les préciser avant de donner la description de chaque instrument.

2.2.1 Première séance de tests

L'homogénéité est ici précisée comme la facilité d'émission de manière égale sur tout l'instrument sans inclure d'expression ou d'action de jeu. Autrement dit sans attaque ni modification de la gorge, ou bien de la bouche et pour une pression identique. Le terme "centré" est lié à ce même critère d'homogénéité, considéré dans un contexte de jeu expressif. Il constitue une sensation globale sur tout l'instrument qui semble être liée à la facilité de passage d'une note à l'autre. Un instrument un peu fermé, serré (émission difficile) peut être très "centré". L'important est ici de noter que facilité de jeu et facilité d'émission sont dissemblables. Le lien entre ces critères semble être imputable à l'ouverture du bec (Annexe 6.1). Un instrument "large" permettrait de choisir plus facilement le son souhaité et donc la possibilité de faire varier son contenu harmonique.

Voilà à présent le classement de l'essayeur 2, avec ses annotations spécifiques sur chaque clarinette :

- 6 : Très centrée, et très large. Facile d'émission.
- 1 : Très large, moins centrée que la 6.
- 3 : Ouverte, facile, homogène. Bien.

- 4 : Pas très large, et pas très ouverte. Plus facile d’émission dans les médiums que la 2.
- 2 : Un peu plus facile d’émission que la 5. Très large mais pas centrée.
- 5 : Différence entre corps du haut et corps du bas. Assez homogène, fermé dans l’ensemble surtout pour le corps du haut. Très (trop) centrée, rendrait l’instrument moins large.
- 7 : Problème d’émission et de justesse. Mi, Fa, Fa $\sharp$ et Sol pas homogènes. Main gauche très serrée.

2.2.2 Deuxième séance de tests

Voilà directement le classement d’essayeur 2 pour cette séance :

- 6 : La plus facile d’émission, très large et centrée.
- 3 : -
- 2 : Coté fermé main gauche, mais pas trop mal. La plus large.
- 1 : Assez fermée.
- 5 : Très fermée.
- 4 : Très fermée.
- 7 : -

2.3 Analyse des résultats des tests

Cette série de tests réalisée à l’usine de facture instrumentale montre que le res-senti du musicien est difficile à décrire avec des paramètres subjectifs bien définis. La facilité d’émission semble en tout cas être le critère le plus déterminant et particulière-ment son homogénéité. Pour cela nous avons besoin de distinguer deux types de facilité d’émission : globale, correspondant à l’effort nécessaire pour mettre en fonctionnement l’instrument ; et locale, liée à la pression dans la bouche (effort du musicien) nécessaire pour jouer une note bien particulière de l’instrument. Finalement, la facilité d’émis-sion directement définie par les essayeurs serait reliée à ce que l’on appellera facilité d’émission globale. Et l’homogénéité serait, après discussion avec les essayeurs, reliée à la régularité de la facilité d’émission locale sur les différents registres de l’instrument.

Ces deux derniers critères, facilité d’émission globale et homogénéité de la facilité d’émission locale, sont utilisés par les deux essayeurs et semblent être les plus importants à leurs yeux en terme de qualité et confort de jeu qu’offre un résonateur de clarinette. Le reste de l’étude sera attaché aux appréciations laissées sur chacun des instruments concernant ces critères.

Le tableau 2.2 permet de faire ressortir 4 groupes distincts. 6 et 1 sont très bien classées. Les clarinettes 2 et 3 moyennement (sont plus difficiles à juger). Bien que la clarinette 2 ait été jugée par l’essayeur 1 comme étant défectueuse cela n’a pas été corroboré par le deuxième essayeur et lors de la deuxième séance de test. Ensuite, les clarinettes 5 et 4 dans les plus mauvaises. La 7 est un cas à part car très différente, mais semble parfaite pour mettre en évidence les défauts plus nuancés des autres clarinettes. Les doigtés dit de “gorge” entre le Fa $\sharp$ 3 et le Si $\sharp$ 3, en haut du premier registre, sont reconnus par les essayeurs comme problématiques (en justesse et facilité d’émission). Ils correspondent aux doigtés pour lesquels la clarinette a le plus de trous latéraux ouverts. Il y a également les changements de registre Ré3-La4, et Sol2-Ré4, qui sont des facteurs déterminants sur l’appréciation générale de l’instrument.

Classements								
Essayeur 1	Séance 1	1	6	5	3	4	2	7
	Séance 2	1	6	3	2	5	4	7
Essayeur 2	Séance 1	6	1	3	2	5	4	7
	Séance 2	6	3	2	1	5	4	7

Table 2.2: Classements des deux essayeurs sur les deux journées de tests. Les clarinettes de modèle A sont représentées en bleu, le modèle B en rouge et le modèle C en noir.

3

Evaluation du capteur d'impédance

Le but des expériences réalisées dans le cadre de ce stage est d'évaluer le capteur d'impédance développé au CTTM afin d'effectuer des mesures précises sur des résonateurs de clarinettes. L'impédance d'entrée d'un instrument de musique est définie comme le rapport des amplitudes complexes de pression et de débit acoustique à l'entrée de l'instrument. Cette dernière quantité est la plus difficile à mesurer. Ainsi certains dispositifs de mesure cherchent à fixer le débit acoustique en le régulant sur une gamme de fréquence donnée à partir de signaux glissants. Le protocole défini dans [3] assure cette constance en contrôlant l'excitation de la source à l'aide d'une boucle de rétroaction et d'une résistance acoustique. Ensuite, dans [1] Benade et Ibbi réalisent cette régulation en amont à partir des caractéristiques de la source couplée à une charge acoustique considérée.

D'autres méthodes de mesure de l'impédance d'entrée sont également détaillées par Dalmont dans [4], et [5]. Le capteur utilisé lors de ce stage s'inspire directement de la méthode à 2 microphones et 3 calibrations décrite par Gibiat et Laloë dans [10], où le débit acoustique émis par la source est estimé à l'aide d'une cavité dont les caractéristiques à l'ordre 0 sont connues.

La sensibilité relative des microphones et les fuites au sein du pont d'impédance restent à être déterminées lors d'une phase de calibration partielle, couvercle fermé. Un protocole expérimental est alors défini afin d'assurer la reproductibilité des conditions de mesure, et ceci dans le but d'évaluer la répétabilité des résultats obtenus à partir d'un tube rayonnant (est située en annexe 6.3). La confrontation de ces résultats à des modèles théoriques permet ensuite de vérifier la précision du capteur sur la bande fréquentielle fixée pour l'étude, afin de conserver un processus lié à une bonne calibration du capteur assurant la mesure fine de l'impédance d'entrée des clarinettes.

3.1 Comparaison des mesures aux modèles d'impédance

3.1.1 Impédance d'entrée du tube rayonnant

L'impédance d'entrée d'un tube ouvert à son extrémité, de longueur l et de rayon a , s'écrit,

$$Z_e(\omega) = Z_c \tanh[\Gamma l + \arctanh(\frac{Z_R}{Z_c})], \quad (3.1)$$

avec $\Gamma = j\frac{\omega}{v_\phi} + \alpha$, la constante de propagation. Ici, α et v_ϕ sont les constantes d'atténuation et de dispersion liées aux effets de couches limites visco-thermiques. α est exprimée au deuxième ordre de l'inverse du nombre de Stokes (5.142), p.212, [12]. L'impédance caractéristique Z_c correspond à l'expression complexe donnée par (5.143), p.213, [12]. Z_R correspond à l'impédance de rayonnement du tube.

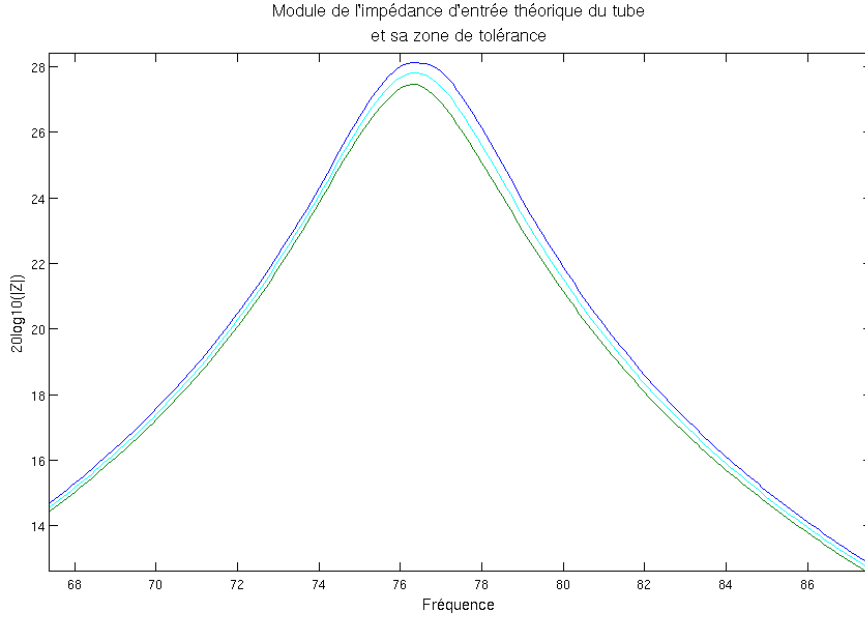


Figure 3.1: Visualisation du module de l'impédance théorique du tube, rayonnant sur un écran fini, autour du premier pic de résonance. Les courbes extrêmes correspondent à la zone de tolérance déterminée par les incertitudes sur les paramètres du modèle pris en compte. L'incertitude sur les amplitudes des résonances et antirésonances est d'environ 5 %, et de 4 cents sur les fréquences.

Les paramètres à prendre en compte pour ce modèle sont $l = 109$ cm, $a = 7$ mm, et T la température en Kelvin qui influe sur la vitesse de propagation des ondes acoustiques,

$$c(T) = 331,45 \sqrt{\frac{T}{T_0}}, m.s^{-1} \quad (3.2)$$

où $T_0 = 273,16$ K. Bien que la température soit mesurée avant chaque série d'acquisitions afin de procéder à une normalisation des courbes d'impédance à 20 °C (avec la relation 6.1 de l'annexe 6.3), elle peut varier au cours de la séance et son incertitude est estimée à 0.5 °C. L'incertitude sur la longueur du tube est de 0.5 mm et celle sur le rayon est de 0.25 mm. La variation du modèle d'impédance sur les 8 combinaisons d'incertitudes possibles permet d'établir une zone de tolérance de la courbe théorique en conservant leurs valeurs extrêmes (figure 3.1). Ceci vise à estimer l'incertitude qu'apportent ces paramètres sur le modèle. La tolérance du modèle sur les fréquences de résonance et d'antirésonance est de l'ordre de 4 cents, et de 5 % sur leurs amplitudes respectives. Les expressions et domaines de validité des modèles d'impédance de rayonnement du tube sont analysés dans le paragraphe suivant.

3.1.2 Modèles de rayonnement

L'impédance de rayonnement à l'extrémité du tube s'exprime de la manière suivante,

$$Z_R = \frac{\rho c}{S} \frac{1 + R_l}{1 - R_l}, \quad (3.3)$$

où R_l est le coefficient de réflexion. Les modèles utilisés dans cette étude reposent sur la formule approchée du coefficient de réflexion,

$$R_l = \frac{1 + n_1 j k a}{1 + d_1 j k a + d_2 (j k a)^2}, \quad (3.4)$$

avec les paramètres d_1 , d_2 et n_1 des équations (12.130) et (12.134), p. 589 de [12], pour les modèles avec écran infini et sans écran, respectivement. L'erreur relative sur ces deux types de rayonnement (en module et en phase) est inférieure à 8 % pour $ka \leq 2$ (montré par Silva [15]). Le domaine de validité de ces approximations inclut donc très largement notre domaine d'étude où $ka \leq 0,25$ (correspond à une limite fréquentielle supérieure de 2000 Hz).

Le modèle de rayonnement avec écran fini repose sur une autre formule approchée définie par l'équation (12.136), p.590, [12]. Elle prend en compte le cas d'un écran circulaire correspondant à la l'épaisseur du tube. Le rayon extérieur du tube considéré est ici de $b = 13$ mm. La précision pour ce modèle est estimée inférieure à 0.02a pour la correction de longueur et inférieure à 1 % pour le module du coefficient de réflexion. D'après [7], ces conditions sont remplies lorsque $a/b \geq 0.2$, $ka < 1.5$ et $kb < 3.5$ et englobent les dimensions de notre tube pour la bande de fréquence utilisée.

3.1.3 Ecart des mesures aux modèles théoriques

Afin de vérifier la validité des résultats donnés par le capteur d'impédance, il est possible de les comparer à des modèles théoriques connus d'impédance d'entrée de tube rayonnant. La variation des fréquences et des amplitudes de résonance et d'antirésonance des mesures d'impédance (réalisées après chaque recalibration partielle), est obtenue par comparaison aux trois modèles décrits précédemment. Ces résultats sont reportés sur la figure 3.2.

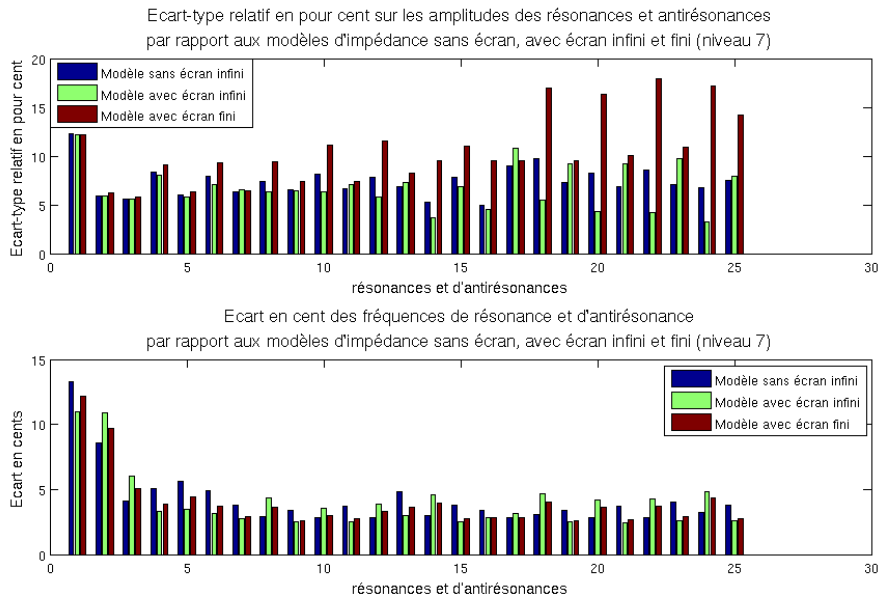


Figure 3.2: *Ecart-type relatif des amplitudes et fréquences de résonance et d'antirésonance mesurées, comparées aux modèles sans écran, avec écran infini et fini. Le pourcentage d'erreur sur l'amplitude est globalement de 8 %, excepté pour les dernières antirésonances où il avoisine les 15 %. L'écart en fréquence est globalement de 10 cents pour les premières résonances et antirésonances, et se stabilise à 4 cents jusqu'à 2000 Hz.*

L'écart sur l'amplitude des modèles est globalement de 8 % sur la totalité de la bande fréquentielle d'étude, avec des mesures plus proches du modèle sans écran pour les 4 dernières résonances, alors que le modèle avec écran se rapproche plutôt des dernières valeurs d'antirésonances. Le modèle avec écran fini est globalement le plus éloigné des résultats expérimentaux, avec un écart allant jusqu'à 15 %. L'écart en cent des fréquences mesurées aux modèles est de 10 cents pour le premier pic de résonance et le premier creux d'antirésonance. Sur le reste de la bande d'étude cet écart se stabilise autour de 4 cents. On notera que le modèle sans écran est ici plus proche des fréquences des dernières antirésonances que le modèle avec écran. Le modèle d'impédance d'entrée avec impédance de rayonnement sans écran semble être plus proche des résultats

expérimentaux. Les écarts mesurés sur l'amplitude et la fréquence correspondent globalement aux incertitudes des modèles définies par la zone de tolérance. En comparant une mesure d'impédance du tube avec le modèle sans écran, la bonne calibration du capteur est assurée si la mesure est bien contenue dans cette zone de tolérance.

3.2 Conclusion

Toutes les séries de mesures réalisées dans le cadre de ce rapport ont pour but d'établir un protocole expérimental sur la phase de calibration du capteur d'impédance assurant une bonne répétabilité des mesures d'impédance d'entrée de clarinettes. Pour cela la caractérisation de la chaîne de mesure est établie à l'aide d'une charge acoustique dont le comportement est connu. Les mesures sont réalisées sur un tube ouvert à son extrémité et comparées à des modèles théoriques prenant en compte trois types de rayonnement : sans écran, avec écran infini et fini. Après avoir fixé un mode opératoire assurant la reproductibilité de conditions de calibration et de mesure, on cherche à estimer la répétabilité du capteur. Les écarts-types relatifs sur les amplitudes de résonance et d'antirésonance sont alors estimés inférieurs à 8 % sur la totalité de la bande fréquentielle comprise entre 25 et 2000 Hz. Les écarts en cents mesurés sur les fréquences de résonance et d'antirésonance sont inférieurs à 3 cents.

Les écarts aux modèles théoriques sont de 10 % en début de bande sur l'amplitude et se stabilisent à 5 % pour les résonances avec le modèle de rayonnement sans écran. Ce modèle de rayonnement semble donc s'approcher le plus des mesures réalisées. Les écarts en fréquence sont de l'ordre de 10 cents pour les premières résonance, et antirésonance, et se stabilisent autour de 4 cents. Ces résultats correspondent aux incertitudes apportées par les paramètres des modèles et permettent de conclure à la validité des mesures réalisées.

Bien que le protocole de calibration assure une bonne reproductibilité des mesures (défini en annexe 6.3) ainsi qu'un écart acceptable au modèle de tube, il semble nécessaire de réaliser une mesure complémentaire du tube avant chaque séance de mesure des résonateurs d'instruments afin de vérifier que les écarts au modèle théorique s'inscrivent toujours dans sa zone de tolérance.

4

Mesure de l'impédance d'entrée des 7 clarinettes

Les résultats des tests réalisés auprès des essayeurs permettent d'affirmer que la facilité d'émission globale et également l'homogénéité de la facilité d'émission locale sont des indicateurs déterminants sur son appréciation générale. La facilité d'émission locale est définie par le musicien comme la pression dans la bouche à exercer pour émettre un son d'une certaine dynamique (ou nuance) pour un doigté défini, alors que l'homogénéité est reliée à la régularité de son évolution sur les différents registres de l'instrument. Dans cette étude, on suppose que le musicien se base essentiellement sur le premier registre pour évaluer ces indicateurs. En effet, c'est pour le premier registre que le "champ de liberté" du musicien est le plus faible et donc qu'il est le plus contraint par le comportement même du résonateur. Par exemple, la variation de fréquence relative, que le musicien contrôle avec son embouchure, devient plus importante pour les registres supérieurs.

La mesure de l'impédance d'entrée des 7 clarinettes testées permet d'extraire les valeurs d'amplitude et de fréquence de résonance pour chaque doigté. Les doigtés pour lesquels les mesures ont été réalisées englobent les notes définies comme problématiques par les essayeurs lors des phases de tests. Elles comprennent les doigtés du bas du premier registre du Mi₂ au Sol₂, le Ré₃ correspondant aux médiums, et les doigtés dits "de gorge" du Fa₃ au La₃ (représentation des différents doigtés de la clarinette en annexe 6.2 avec leurs fréquences nominales associées).

D'abord il est nécessaire de connaître la répétabilité du capteur, à partir du protocole expérimental défini pour la mesure d'impédance sur clarinette, afin de vérifier que les écarts de mesure inter-clarinettes sont clairement identifiables. La mise en évidence de fuites au niveau des tampons d'une clarinette a permis de réaliser une étude complémentaire sur la localisation de fuites. L'importance des pertes au sein d'un résonateur de clarinette ayant une influence directe sur le niveau de pression dans le bec pour des

paramètres d'excitation similaires, une étude des amplitudes des premières résonances a été réalisée afin de tenter de mettre en parallèle la facilité d'émission déterminée par les essayeurs et également de comprendre une propriété qui leur est chère, l'homogénéité. La facilité d'émission est un mécanisme complexe qui fait intervenir bien des paramètres, c'est pourquoi le rôle de l'inharmonicité inter-résonances a été abordé ainsi que le réglage des premières fréquences de résonance par rapport à la fréquence des notes associées du tempérament égal, appelée fréquence nominale.

4.1 Déroulement des mesures

4.1.1 Dispositif expérimental

Avant de commencer les mesures il est nécessaire de s'assurer de l'étanchéité de la connexion entre le pont d'impédance et les clarinettes. Lors de ce stage une pièce adaptatrice a donc été créée à partir d'un bec de clarinette découpé dans sa dimension transverse (figure 4.1), l'étanchéité est alors obtenue grâce à la partie en liège du bec. Cette partie permet également de faciliter la connexion de la clarinette au dispositif et se traduit par un gain de temps considérable. La découpe du bec a été réalisée de façon à conserver le tronçon du bec à rayon interne constant ($r=7,5$ mm). Pour la pièce fabriquée, la section est identique à celle du bec et son volume total correspond au volume interne du bec. Soit $V_{bec} = V_{adapt} = 11,4 \pm 0,3$ cm³, incertitude liée à la mesure de la masse d'eau équivalente, et intervient sur 2 mm par rapport à la longueur effective de la clarinette.

Après une calibration du capteur d'impédance et une mesure sur tube permettant de vérifier la validité des paramètres de calibration obtenus (cf. section 3.2), les mesures sur clarinettes sont réalisées sur les 10 doigtés du premier registre sélectionnés et sur la bande fréquentielle définie lors de la caractérisation du capteur, c'est-à-dire de 25 Hz à 2000 Hz. Le signal d'excitation est un sinus glissant de 10 secondes et la réponse en fréquence est moyennée sur 10 mesures. Soit environ 2 minutes par mesure, les doigtés étant réalisés par l'opérateur, il est indispensable de conserver une étanchéité optimale sur toute cette durée. La mesure de toutes les impédances d'entrée de ces 10 doigtés nécessite, pour une seule clarinette, environ 45 minutes. La phase de préparation (calibration + vérification avec tube) avant chaque séance de mesure est d'environ 30 minutes. Ceci, dans le cadre d'une utilisation industrielle de contrôle/qualité peut paraître problématique, et demanderait une étude complémentaire afin de définir, par exemple, des doigtés clés pour l'interprétation des résultats, ou bien réduire le temps des mesures (diminution du moyennage et de la durée du signal d'excitation) jusqu'à un niveau de dégradation acceptable. Rappelons que les essayeurs passent en moyenne 10 minutes par instrument, en y incluant le diagnostic.

La température et son évolution au cours de la séance est associée à chacune des mesures ce qui permet ensuite de réaliser la normalisation à 20°C au cours de la phase de traitement, en utilisant la relation 6.1 définie dans l'annexe 6.3. Ainsi, les courbes expérimentales sont comparables entre doigtés et entre clarinettes.

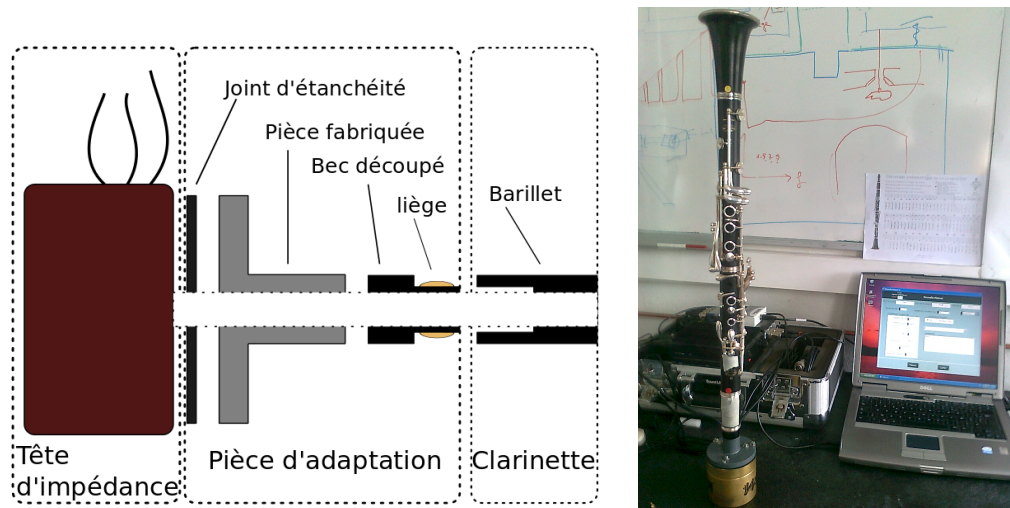


Figure 4.1: (à gauche) Schéma descriptif de la pièce adaptatrice assurant la connexion de la clarinette au dispositif de mesure d'impédance. (à droite) Photographie du montage expérimental avec le PC d'acquisition, les dispositifs de conditionnement et d'amplification des signaux de mesure et d'excitation, et le capteur d'impédance connecté à une clarinette en Si b à l'aide de la pièce adaptatrice.

4.1.2 Répétabilité des mesures d'impédances d'entrée et écarts "inter-clarinettes"

Afin de vérifier que les différences de mesure entre clarinettes (inter-clarinettes) sont clairement identifiables comme telles, il est nécessaire au préalable de quantifier les différences entre mesures obtenues sur une seule clarinette. La figure 4.2 représente 4 mesures d'impédance d'entrée effectuées sur la clarinette 1 pour le doigté de Mi2 avec recalibration du capteur entre chaque mesure, ce qui implique un démontage du dispositif complet.

Les écarts observables sont de l'ordre de 1 dB en amplitude et 4 cents en fréquence pour les deux premières résonances. Ensuite la comparaison de ces résultats, obtenus sur une seule clarinette, avec les mesures des 7 clarinettes représentées dans la figure 4.3 montre que les écarts inter-clarinettes sont globalement supérieurs.

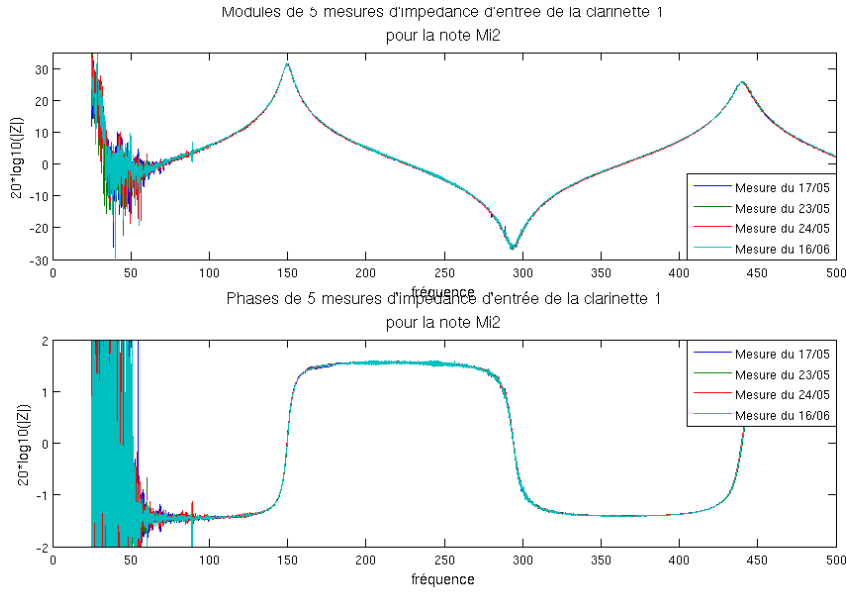


Figure 4.2: Comparaison de 4 mesures réalisées, après démontage/remontage complet du dispositif et sur 4 journées différentes, pour le doigtés de Mi2 sur la clarinette 1. La visualisation est restreinte au 2 premiers pics de résonance entre 0 et 500 Hz. La variabilité des résultats des 2 premières résonances est de 1 dB en amplitude et 4 cents en fréquence.

L'impédance mesurée de la clarinette 5 semble présenter des pertes importantes qui peuvent être expliquées par la présence de fuites au niveau d'un ou plusieurs tampons (doigté de Mi2, tous les trous sont bouchés). Cet aspect sera plus détaillé dans la section suivante. La représentation de la figure 4.4 offre une meilleure visualisation de ces écarts pour un doigté identique. Seules les amplitudes des premiers pics de résonance y sont représentés à leurs fréquences correspondantes, ainsi que les amplitudes des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3. Cette visualisation permet de mieux apprécier les écarts des résultats de mesure et également les inharmonicités inter-résonances. La totalité des doigtés sont visibles avec cette représentation en annexe 6.4. Les valeurs d'amplitudes des premiers pics se répartissent sur 10 dB environ et les fréquences des deuxièmes pics sur 20 cents, pour le Mi2. Ces résultats ne prennent pas en compte la mesure réalisée sur la clarinette 5 où les pertes sont trop importantes. De manière générale les écarts inter-clarinettes sont de l'ordre de 8 dB environ sur les amplitudes, et en moyenne supérieures à 10 cents sur les fréquences, des premiers pics de résonance. Finalement, la variabilité des résultats inter-clarinettes est bien supérieure à la répétabilité du capteur et permet de s'assurer de la pertinence des résultats de mesure.

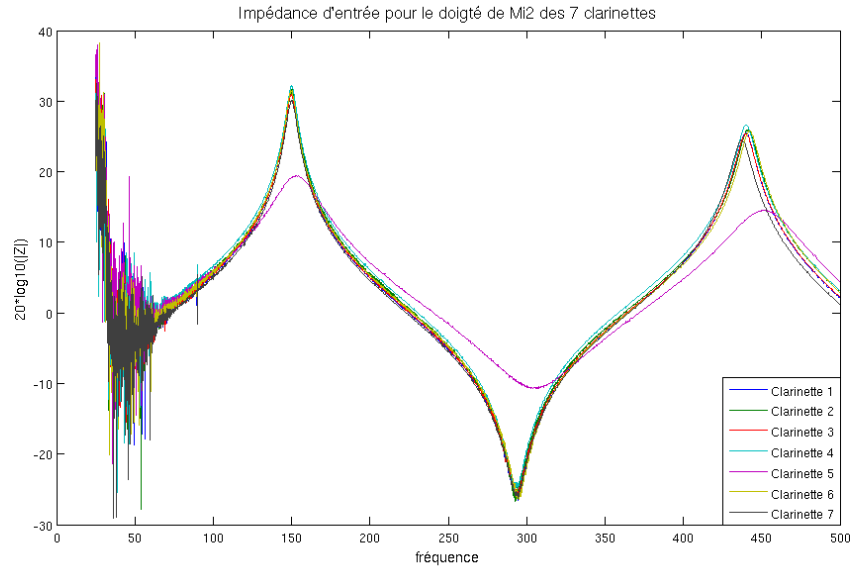


Figure 4.3: Superposition des 7 mesures d'impédance d'entrée des clarinettes à l'étude pour le doigté de Mi2. La mesure réalisée sur la clarinette 5 met en évidence des pertes importantes qui peuvent être reliées à la présence de fuites au niveau d'un ou de plusieurs tampons.

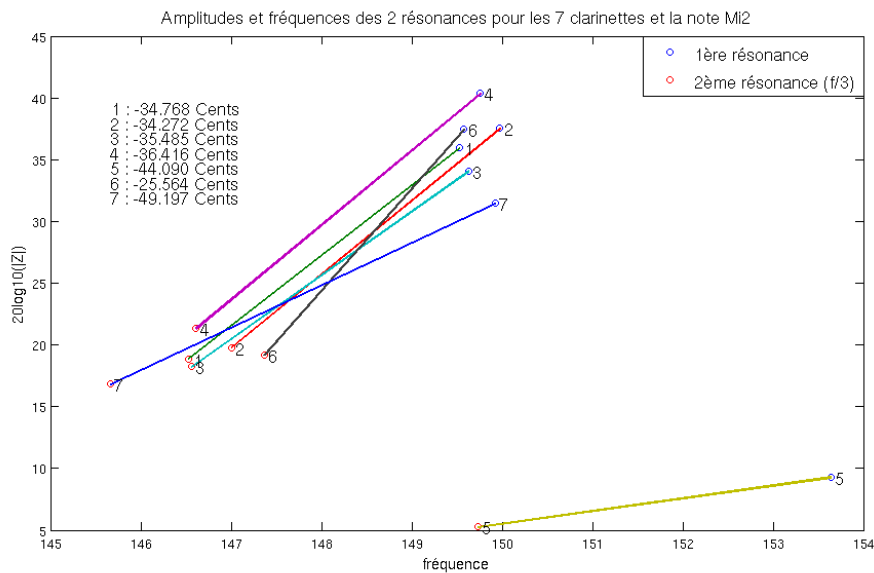


Figure 4.4: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celle des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Mi2.

4.2 Analyse des résultats

Une fois que les mesures d'impédance d'entrée de chaque clarinette sont réalisées, les valeurs des modules d'amplitudes et les fréquences des 2 premières résonances sont identifiées à partir de l'annulation de l'argument de l'impédance. Cette méthode permet d'obtenir une incertitude sur la détection de ces résonances de l'ordre du pas fréquentiel de la mesure, c'est-à-dire 0.1 Hz.

4.2.1 Aide à la localisation de fuites

Dans la section précédente, la figure 4.3 montre la présence de pertes liées à des fuites au niveau d'un ou de plusieurs tampons de la clarinette 5. Même si la vérification de l'étanchéité de la clarinette est effectuée lors de la phase finale de contrôle de l'instrument par les essayeurs, la localisation de fuites à l'aide de la mesure de l'impédance nous a semblé une approche intéressante et a donc fait l'objet d'une courte étude.

La variabilité des conditions de fuite se vérifie sur la figure 4.5 en comparant 3 mesures d'impédance de la clarinette 5. Les impédances mesurées sur les doigtés de Fa2 et Fa#2 sont également affectées par la présence de pertes ce qui n'est pas le cas du Sol2. Cela permet de penser qu'une fuite est située au niveau d'un des 3 derniers tampons (associées aux doigtés de Mi2, Fa2, Fa#2).

En se basant sur l'impédance d'entrée d'un tube ouvert de longueur effective L similaire au Mi2 de la clarinette, un modèle théorique de fuite peut être réalisé en plaçant une impédance acoustique en parallèle assimilable à celle d'un tube capillaire d'expression (eq.(5.155), p.217, [12]),

$$Z_{fuite} = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{8l_v}{R^2} + j \frac{4\omega}{3c} \right] l_{cap}, \quad (4.1)$$

où l_v correspond à l'épaisseur de couche limite visqueuse, et S , R et l_{cap} la section, le rayon et la longueur du tube capillaire. Dans notre cas, seule la partie résistive a été conservée afin de limiter le nombre d'inconnues du problème. De plus l'inertance ne joue aucun rôle sur la décroissance du premier pic d'impédance. L'impédance du tube s'obtient, pour une fuite localisée à une distance l de l'entrée, à partir de la relation des impédances ramenées des 2 tronçons de tube (p.166, [12]) et de leurs conditions limites,

$$\begin{pmatrix} P_e \\ Z_c U_e \end{pmatrix} = M(l) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{fuite} & 1 \end{pmatrix} M(L-l) \begin{pmatrix} P_s \\ Z_c U_s \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

où

$$M(L) = \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma L) & j \sinh(\Gamma L) \\ j \sinh(\Gamma L) & \cosh(\Gamma L) \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

correspond à la matrice de transfert. Une forte résistance acoustique agit comme une diminution de la longueur effective du tube au niveau du capillaire, ce qui explique la formation du deuxième pic de résonance de fréquence plus élevée à mesure que l'importance de la fuite augmente.

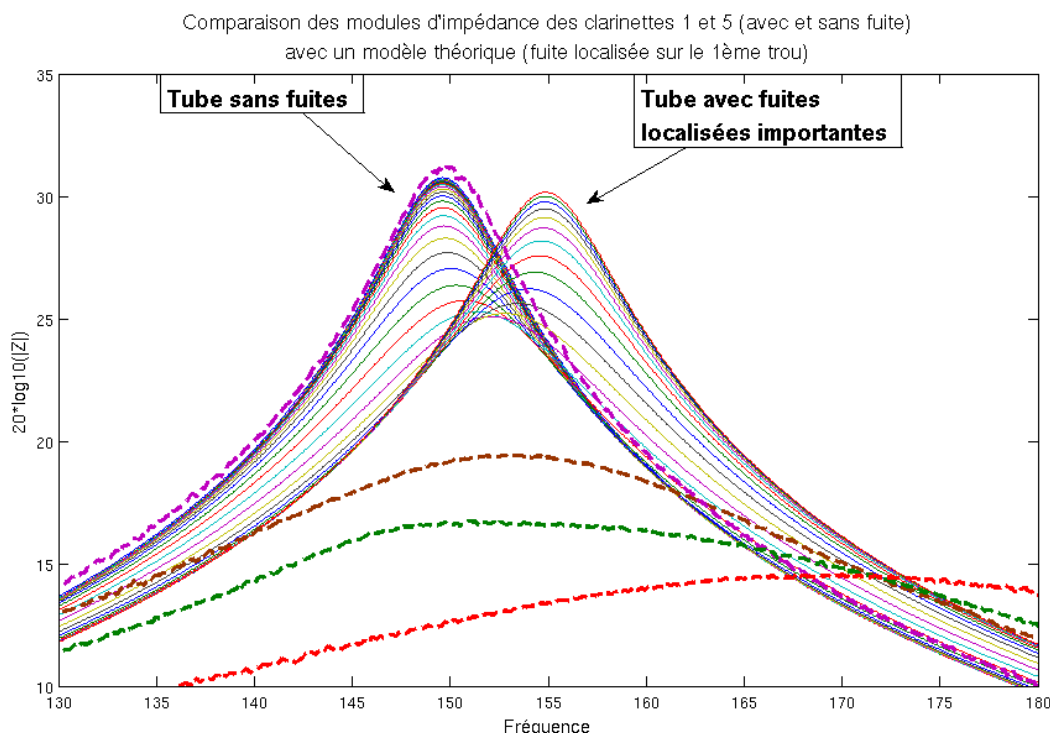


Figure 4.5: Comparaison entre les premières résonances des impédances expérimentales réalisées pour le doigté de Mi2 et un modèle théorique de fuites . Les tracés épais correspondent aux mesures : (tracé bleu en pointillé) clarinette 1 (pas de pertes et sert seulement de référence), (3 courbes pointillées supplémentaires) mesures d'impédance sur la clarinette 5, décroissance variable du premier pic d'impédance liée aux pertes. Les traits fins correspondent aux allures du modèle théorique où la résistance acoustique est progressivement accrue. La fuite est placée, sur ce modèle, à une distance correspondante du premier tampon le plus proche de l'extrémité ouverte de la clarinette.

La figure 4.5 montre que la décroissance théorique du premier pic d'impédance admissible pour une fuite située au niveau du premier tampon est bien trop faible pour correspondre aux décroissances observables sur les 3 résultats expérimentaux. Ainsi, la fuite ne serait pas située au niveau de ce tampon. La figure 4.6 effectue la même comparaison que la figure 4.5 mais pour des modèles de fuites localisées au niveau des deuxième et troisième tampons en partant de l'extrémité ouverte de la clarinette.

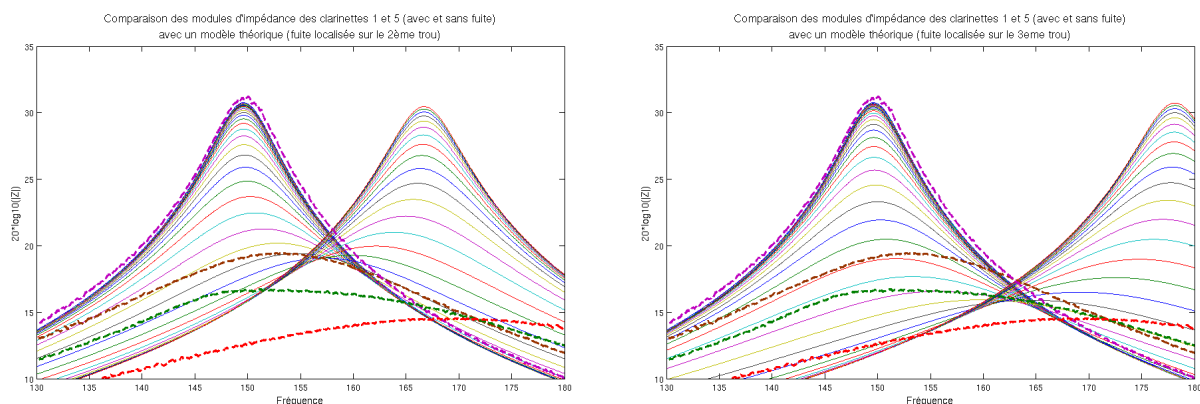


Figure 4.6: Même représentation que la figure 4.5. Les mesures sont cette fois comparées à des modèles théoriques pour différentes valeurs d'une fuite située au niveau des deuxième (à gauche) et troisième (à droite) tampons.

La décroissance admissible par la théorie est, même pour une fuite située au niveau du troisième tampon, toujours plus faible pour au moins une des courbes expérimentales, ce qui nous permet de penser que l'on est en présence de fuites combinées entre le deuxième et le troisième tampon. Bien que la comparaison aux modèles de courbes expérimentales permettent de situer une fuite isolée, la localisation de fuites combinées, ou multiples, nécessite l'approfondissement du modèle théorique, ce qui n'a pas été réalisé lors de ce stage.

L'influence de ces fuites sur les mesures peut être liée à une légère détérioration du clétage apparue après les phases de tests, ce qui expliquerait pourquoi les essayeurs ne les aient pas remarquées. Les mesures réalisées sur ces doigtés de la clarinette 5 seront par la suite écartés de l'analyse.

4.2.2 Amplitude de la première résonance et facilité d'émission

Les tests subjectifs avec les essayeurs ont révélé l'importance de la facilité d'émission globale et l'homogénéité de la facilité d'émission locale sur l'appréciation générale d'une clarinette. D'après leurs dires la facilité d'émission correspond à l'intensité du signal émit par la clarinette pour un effort similaire. Autrement dit, plus un instrument est facile et plus le niveau de pression acoustique interne est grand pour une surpression statique dans la bouche identique. A partir des modèles numériques décrivant le fonctionnement de la clarinette, il est alors possible, sous certaines conditions, de mettre en parallèle ces quantités.

4.2.2.1 Approche théorique

La clarinette peut être modélisée comme un oscillateur auto-entretenu, où le comportement linéaire de l'anche et du résonateur sont conditionnés par un couplage non linéaire entre la pression quasi-statique (à variations lentes) dans la bouche du musicien et la pression acoustique dans le bec. La figure 4.7 montre un schéma de fonctionnement de ce couplage.

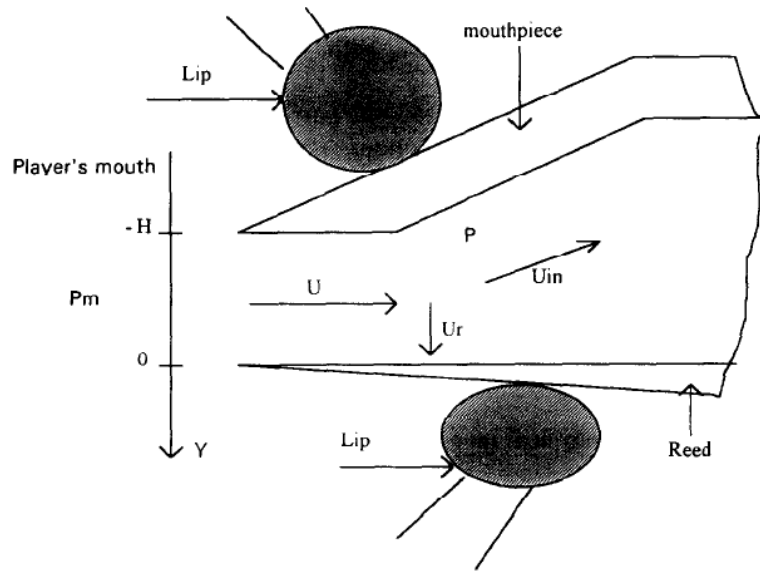


Figure 4.7: Représentation de l'embouchure de la clarinette (tirée de [6]). Le Débit d'air u dans le canal d'anche dépend de l'ouverture de l'anche et de la différence de pression entre la bouche p_m et le bec p .

D'après la relation d'écoulement stationnaire de Bernoulli l'expression non linéaire sur le débit dans le canal d'anche s'écrit en variables adimensionnées,

$$u(\tilde{p}) = \zeta(1 + \tilde{p} - \gamma)\sqrt{|\gamma - \tilde{p}|} \text{sign}(\gamma - \tilde{p}), \quad (4.4)$$

où $\tilde{p} = p/P_M$ et correspond à la pression dans le bec p adimensionnée par la pression de plaquage statique de l'anche qui dépend de la raideur par unité de surface de l'anche K et s'exprime $P_M = KH$. Cette relation peut être obtenue pour $\omega_r \gg \omega_1$, respectivement la pulsation de résonance de l'anche et de la première résonance de l'instrument, où l'anche peut être considérée comme un simple ressort. Avec également $\gamma = p_m/P_M$, où p_m correspond à la pression dans la bouche. L'équation (4.4) est définie pour $\tilde{p} > \gamma - 1$ et vaut 0 sinon. Et enfin le paramètre lié à l'embouchure du musicien,

$$\zeta = Z_c w H \sqrt{\frac{2}{\rho P_M}}, \quad (4.5)$$

où w correspond à largeur du canal d'anche, et $Z_c = \rho c/S$ l'impédance caractéristique de l'entrée de la clarinette de section S . Un musicien, qui déplace ses lèvres le long de la table du bec, modifie la position à l'équilibre de l'anche H et donc le paramètre ζ .

A partir des méthodes de résolution de ce système auto-oscillant basées sur l'équilibrage harmonique (p.430, [12], et [9]), en réalisant une simplification du résonateur à un mode (d'impédance $Z_1(\omega) = 1/Y_1(\omega)$), et en tronquant le nombre d'harmoniques présent dans p à 1, on obtient l'expression de son amplitude,

$$|P_1|^2 = \frac{Y_1 - A}{3C}, \quad (4.6)$$

pour de faibles oscillations proches du seuil d'oscillation ($A = Y_1$) où le signal est presque sinusoïdal. Les termes

$$A = \zeta \frac{3\gamma - 1}{2\sqrt{\gamma}} \text{ et } C = -\zeta \frac{\gamma + 1}{16\gamma^{5/2}} \quad (4.7)$$

sont issus développement de l'équation (4.4) à l'ordre 3 en p , où seuls les coefficients antisymétriques ont été conservés. p est un signal contenant principalement des harmoniques impairs (spécifiques aux instruments à résonateur cylindrique comme la clarinette). L'équation (4.6) n'a de solutions que pour $A > Y_1(\omega_1)$ (réelle) et donc que $\omega_J = \omega_1$, où ω_J la pulsation de jeu de la clarinette.

Le module de l'amplitude du premier harmonique, pour des embouchures et géométries internes du résonateur invariantes, est donc globalement plus élevé si $Y_1(\omega_1)$ est faible comme le montre bien le diagramme de bifurcation de la figure 4.8 pour différentes valeurs de pertes au sein du résonateur. L'admittance du premier mode, ici purement réelle pour le régime oscillant, est proportionnelle au terme de pertes noté η sur le graphique tiré de [9]. De plus le seuil d'oscillation (noté γ_{th}) a tendance à augmenter avec l'importance des pertes présentes dans le résonateur. Cette représentation n'est valable que dans la configuration en anche non battante et donc pour des valeurs de $\gamma < 1/2$ environ.

La facilité d'émission peut donc être reliée (sous les approximations définies dans cette section) à l'impédance de la première résonance mesurée sur chacune des clarinettes disponibles pour l'étude. On sait également que le paramètre ζ peut être relié à la facilité d'émission : plus ce paramètre est grand et plus, à $Y_1(\omega_1)$ équivalent, le seuil d'oscillation s'abaisse et de manière générale $|P_1|$ augmente d'après la relation (p.437, [12]),

$$|P_1|^2 \simeq \frac{2}{3}(\gamma - \gamma_{th}) \text{ où } \gamma_{th} = \frac{1}{3} + \frac{\alpha l}{\zeta} \frac{2}{3\sqrt{3}}. \quad (4.8)$$

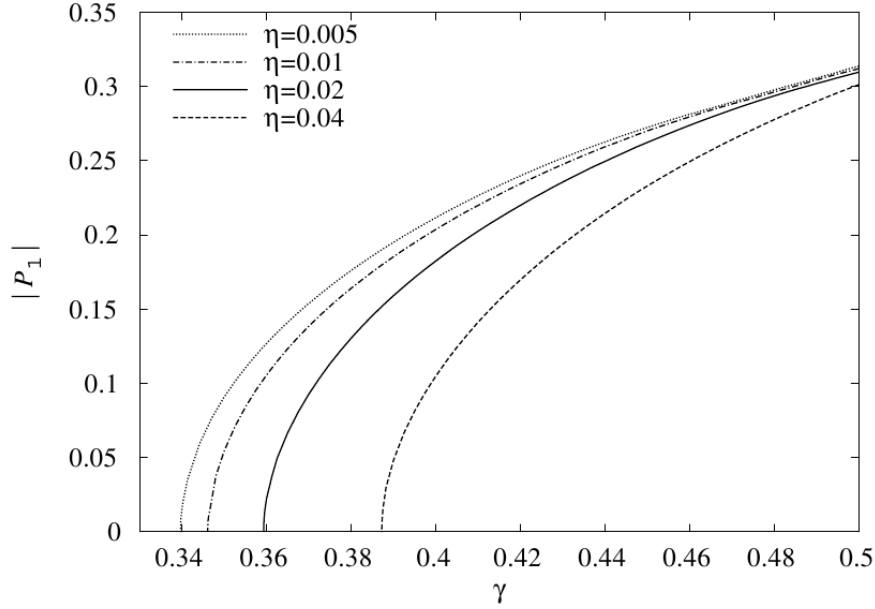


Figure 4.8: Diagramme de bifurcation pour différentes valeurs de pertes η au sein du résonateur. L'équilibrage harmonique y est réalisé jusqu'à la neuvième harmonique et pour un $\zeta = 0,4$. γ n'est ici représenté que pour des faibles oscillations et ne prend pas en compte le régime en anche battante $\gamma > 1/2$. (figure tirée de [9])

4.2.2.2 Evolution des premières résonances des 7 clarinettes

En réalité, le résonateur de clarinette n'est pas exactement cylindrique, les effets réactifs de la perce ont également une influence sur l'amplitude du premier pic d'impédance mesurée. Etant donné que la géométrie exacte du résonateur nous est inconnue et que l'état de surface interne peut varier d'une clarinette à l'autre (modifiant ainsi l'épaisseur de la couche limite visqueuse), nous ne sommes pas en mesure de déterminer la cause des variations des $|Z_1(\omega_1)|$ mesurés. Cependant, comme le montre le paragraphe précédent, c'est bien cette amplitude qui conditionne la pression dans le bec pour une même pression d'alimentation.

Les amplitudes des premières résonances de chaque doigté des 7 clarinettes sont mesurées et affichées sur la figure 4.9. Les appréciations données par les essayeurs dans le chapitre 2 relatives à la facilité d'émission globale et l'homogénéité d'un instrument sont comparées avec les résultats de mesures. Rappelons qu'un des essayeurs utilise un bec plus ouvert, ce qui se traduit dans le modèle théorique par des valeurs de ζ relativement plus élevées et un bec plus ouvert serait moins affecté par une clarinette difficile à l'émission (d'après (4.8)). Les premiers pics d'impédance sont plus faibles pour des doigtés correspondant à de grandes longueurs effectives de l'instrument. En effet, le facteur modale (effets réactifs de la perce) est inversement proportionnel à la longueur effective et l'effet des pertes visco-thermique est d'autant plus important que

cette longueur augmente. Les instruments définis comme homogènes (clarinettes 1 et 6) varient le moins d'un doigté à un autre du premier registre. La clarinette 4 jugée plus facile que la clarinette 2 sur les notes médium effectivement des résonances plus fortes de 4 dB sur ces doigtés (Sol2, Ré3, et Fa#3). Le Ré3 de la clarinette 3 a été défini par l'essayeur 1 comme "bouché" et on remarque un affaissement de l'impédance d'environ 4 dB pour ce doigté relativement aux autres clarinettes de la même série. Les pics d'impédance de cette clarinette présentent la même évolution que les clarinettes 1 et 6, jugées homogènes et faciles d'émission, mais sont de plus faibles amplitudes, ce qui expliquerait que l'essayeur 1 (qui a une ouverture de bec plus faible) l'ait jugée difficile d'émission, contrairement à l'essayeur 2, mais que tout deux trouvent l'instrument homogène. Globalement la clarinette 7 a des résonances de faible amplitude ce qui expliquerait la grande difficulté d'émission qu'ont pu rencontrer les essayeurs sur cet instrument.

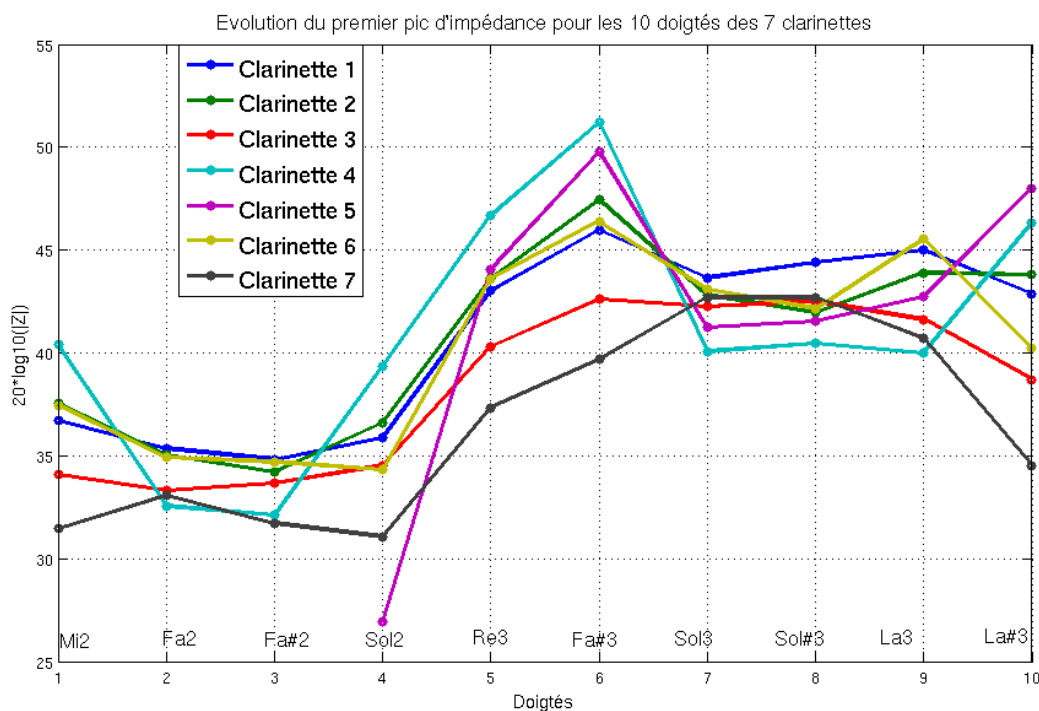


Figure 4.9: Evolution de $|Z_1(\omega_1)|$ mesurée sur les 10 doigtés étudiés sur les 7 clarinettes. Les clarinettes 1 et 6 sont définies comme homogènes et faciles d'émission par les essayeurs et ont l'évolution la moins chahutée sur le premier registre, contrairement aux clarinettes 4 et 5 jugées difficiles d'émission et très inhomogènes. A cause des fuites mises en évidence dans la section précédente, les 3 premières résonances de la clarinette 5 ne sont pas affichées. La clarinette 3 a la même évolution que les clarinettes définies comme homogènes, seulement ses résonances sont de plus faibles amplitudes.

De manière générale, à mesure que l'on monte le premier registre, et que la longueur effective l'instrument diminue, les pertes diminuent également ce qui se traduit par des valeurs de $|Z_1(\omega_1)|$ plus grandes et donc une meilleure facilité d'émission. Cela correspond bien à la définition que les essayeurs ont donné de l'homogénéité, qui semble correspondre à une évolution non pas stationnaire de la facilité d'émission locale, mais en tout cas continue et la moins chahutée possible. La facilité d'émission globale quant à elle, correspondrait alors à la moyenne des $|Z_1(\omega_1)|$.

Sur le doigté de Fa $\sharp$ 3 les écarts d'amplitudes entre instruments atteint environ 12 dB et on remarque une forte variation d'amplitude entre Fa $\sharp$ 3 et Sol3 pour les clarinettes jugées inhomogènes. La variabilité sur cet enchaînement pourrait peut-être servir d'indicateur de l'homogénéité d'une clarinette, ce qui présenterait un gain de temps non négligeable sur une chaîne de contrôle/qualité. Enfin la clarinette 2 a globalement la même évolution en amplitude sur tout le registre mais a été jugée plus difficile à l'émission. Cet instrument a été, au préalable des phases de tests, modifié avec un barillet plus étroit, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'inharmonicité inter-résonances. Le rôle de cette inharmonicité sur la facilité d'émission est discuté dans la section suivante.

4.2.3 Rôle de l'inharmonicité sur la facilité d'émission

À de plus fortes valeurs de pression dans le bec, la fréquence de jeu ne dépend plus que de la seule première fréquence de résonance de l'instrument, car la contribution des autres pics d'impédance, et en particulier la deuxième résonance, se fait plus grande. Bien que cette variation de la fréquence de jeu, due à l'inharmonicité inter-résonances, n'ait pas d'influence directe sur la facilité d'émission, un rapport harmonique des deux premières résonances assure une production du son stable. Principalement, l'inharmonicité d'un résonateur est liée à la présence de trous latéraux, à la forme de la perce de l'instrument et aux effets des pertes visco-thermiques. Cette inharmonicité inter-résonances en cents peut être définie par la relation,

$$IH = \frac{1}{5,78.10^{-4}} \frac{f_n - nf_1}{nf_1}, \quad (4.9)$$

où l'indice de f_n correspond aux modes du résonateur. Cette expression de l'inharmonicité est définie à partir de la valeur d'un cent = $5,78.10^{-4}$ qui correspond à un centième de demi-ton. Après avoir défini les diverses causes de l'inharmonicité d'un résonateur de clarinette et notamment l'effet du changement de section apporté par la modification du barillet de la clarinette 2, son effet sur la facilité d'émission sera discuté et comparé aux résultats expérimentaux obtenus sur les 7 clarinettes.

4.2.3.1 L'inharmonicité du résonateur de clarinette

Le résonateur de clarinette est très similaire à un tuyau cylindrique (dont l'inharmonicité inter-résonances très faiblement positive est liée à la présence de dispersion des effets visco-thermiques). L'introduction de systèmes acoustiques, propres à la clarinette, connectées en parallèle ou en série, modifie son impédance d'entrée. L'ajout d'un trou latéral ou d'une discontinuité de section apportent une certaine correction de longueur au système global modifiant ainsi l'inharmonicité inter-résonances. Ces corrections de longueur équivalente sont décrites dans les articles [8] et [13]. La contribution spécifique d'un barillet plus étroit sur l'inharmonicité inter-résonances de la clarinette 2 peut être modélisée par une contraction localisée de la section de rapport $\alpha = S'/S = 0,9216$ (rapport des sections mesurées) et s'exprime,

$$IH \simeq \frac{4}{3\pi}(\alpha - 1)(\sin^3 2k_1(l + l') - \sin^3 2k_1 l), \quad (4.10)$$

où k_1 est la pulsation liée à la longueur effective de la clarinette, $l = 6,2$ cm la position de la discontinuité par rapport à l'entrée du résonateur et $l' = 3$ cm la longueur de la discontinuité. La figure 4.10 montre l'inharmonicité théorique apportée par un barillet plus étroit ainsi que l'écart entre l'inharmonicité mesurée de la clarinette 2 et l'inharmonicité moyenne des autres clarinettes de modèle A (afin de mettre en évidence l'effet du barillet sur l'inharmonicité de la clarinette 2).

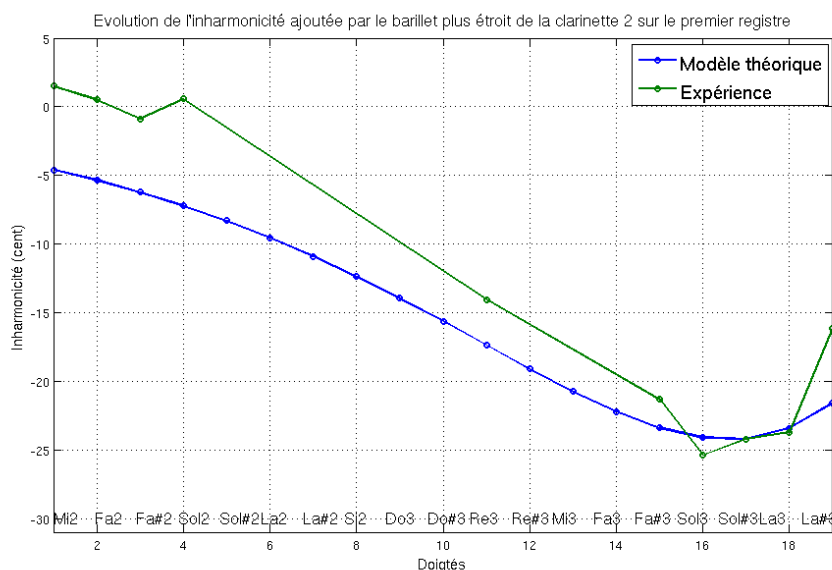


Figure 4.10: (En bleu) Modèle théorique, obtenue à partir de l'équation (4.10), de l'inharmonicité apportée par la modification du barillet de la clarinette 2. (En vert) Ecart de la clarinette 2 à la moyenne des inharmonicités des autres clarinettes de modèle A.

4.2.3.2 Inharmonicité inter-résonances et facilité d'émission

Près du seuil d'oscillation le signal de pression dans le bec ne contient principalement que le premier harmonique mais à mesure que le spectre s'enrichit avec l'augmentation de la pression dans la bouche du musicien, l'effet de l'inharmonicité du résonateur sur la fréquence de jeu se renforce. D'après le "théorème de Worman" défini dans [17] l'amplitude du n -ième harmonique est proportionnel à la puissance n -ième du premier harmonique. Le domaine de validité de ce théorème reste tout de même très proche du seuil d'oscillation bien en deçà du régime en anche battante (autour de $\gamma = 1/2$). A partir de l'expression obtenue par X. Boutillon [2], dont le domaine de validité dépasse largement celui du théorème de "Worman" et qui repose sur la puissance réactive, la variation de fréquence de jeu (p.441, [12]) en fonction de l'inharmonicité s'obtient par,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{1 + \sigma'} \text{ où } \sigma = \sum_{n \geq 3} n^2 \delta_n \left| \frac{P_n}{P_1} \right|^2 \text{ et } \sigma' = \sum_{n \geq 3} n^2 \left| \frac{P_n}{P_1} \right|^2. \quad (4.11)$$

Le terme ε correspond à la variation de fréquence de jeu par la relation $\omega_J = \omega_1(1 + \varepsilon)$. Alors que δ_n correspond à l'inharmonicité du résonateur qui s'écrit $\omega_n = n\omega_1(1 + \delta_n)$. Dans le cas de la clarinette, où l'inharmonicité est principalement négative sur le premier registre, la fréquence de jeu de l'instrument a donc tendance à baisser alors que γ augmente, l'article de J. Gilbert et coll. [11] montre bien cet affaïssement de fréquence obtenue avec la méthode d'équilibrage harmonique.

Or, l'instrumentiste dispose de moyens d'ajustement de sa fréquence de jeu en jouant sur ses paramètres d'embouchure. En effet, le débit de l'anche, noté u_r sur la figure 4.7, vient s'ajouter au débit à l'entrée du résonateur u_{in} et va jouer le rôle d'une admittance additionnelle, comparable à une compliance acoustique qui augmenterait le volume du bec, en parallèle de l'admittance d'entrée. Ce terme supplémentaire se traduit aux basses fréquences par une correction de longueur du résonateur (p.412, [12]),

$$\Delta l_H = \frac{\rho c^2}{P_M} \frac{S_r}{S} H, \quad (4.12)$$

où S_r est la surface effective de l'anche, et décroît à mesure que le musicien "pince" son embouchure. On considère, ici, que le musicien peut principalement faire varier la position de ses lèvres sur la table du bec et modifier le produit $S_r H$ intervenant dans la correction de longueur. Un autre phénomène lié à l'amortissement d'anche participe en faveur du musicien pour lui permettre d'ajuster la fréquence de jeu. Cette correction de longueur additionnelle définie par l'équation (9.133), p.461, [12] (dans le cas où la fréquence de résonance de l'anche k_r est élevée),

$$\Delta l_q = \frac{q_r \zeta}{k_r \sqrt{3}}, \quad (4.13)$$

dépend du paramètre d'amortissement q_r , lié à la condition d'appui des lèvres du musicien sur l'anche, que l'on supposera ici constante. Et donc, pour les mêmes considérations que précédemment, ce paramètre est également proportionnel à l'ouverture du bec, H , par l'intermédiaire du paramètre ζ . En définitive, le musicien doit augmenter sa fréquence de jeu pour contrebalancer l'effet de l'inharmonicité et donc diminuer la correction de longueur et par la même occasion le paramètre H . Cependant, dans la section précédente, on a pu voir que la diminution de ζ avait tendance à rehausser le seuil d'oscillation ce qui a des répercussions sur la facilité d'émission. Egalement, des valeurs de ζ relativement plus faibles contribuent à l'allongement du transitoire (p.421, [12]) d'attaque ce qui peut nuire au confort du musicien et donc être relié indirectement à la facilité d'émission. De manière générale la facilité d'émission est détériorée avec l'augmentation de l'inharmonicité inter-résonances, d'après [6], car cette dernière favorise la production de régimes d'oscillations quasi-périodiques et correspond, dans le cas où ce régime n'est pas souhaité, à la limite de jouabilité de l'instrument.

4.2.3.3 Analyse de l'inharmonicité des 7 clarinettes

Les deuxièmes pics de résonance des d'impédances d'entrée mesurées sur chaque clarinette sont détectés à l'aide de la même méthode basée sur l'annulation de l'argument. A partir de ces résultats sont déduites les valeurs d'inharmonicité inter-résonances pour chaque doigté et représentées dans la figure 4.11. L'effet de l'évasement terminal et du pavillon pour le doigté de Mi2 (tous les trous fermés), ainsi que celui plus important du trou de registre ouvert sur le doigté de La $\sharp$ 3, se font clairement ressentir sur l'allure générale de l'inharmonicité.

Globalement les clarinettes du modèle A, exceptée la clarinette 2, ont des allures d'inharmonicité sur le premier registre très similaires. Ce qui, d'après la section précédente, permet de faire le lien avec le fait que les essayeurs aient trouvé la clarinette 2 plus difficile d'émission alors que l'évolution de l'amplitude de ses premiers pics d'impédance est très similaire à celle des clarinettes 1 et 6, définies comme homogènes. La clarinette 7 est également très inharmoine comparativement aux clarinettes des modèles A et B non modifiées, et ceci expliquerait donc un peu plus son classement obtenu lors des tests subjectifs. On sait également qu'une faible inharmoine contribue également à l'amélioration de la couleur tonale de la clarinette [6] (appréciation de la sonorité par les musiciens). La clarinette 6 (de modèle B) est très peu inharmoine dans le bas du registre et les essayeurs ont remarqué une "meilleur couleur sonore" (ou bien "rondeur", "velouté" cf. section 2) de ce modèle dans les graves.

4.2.4 Ecart entre fréquence nominale et fréquence de résonance

Dans cette partie, on étudie la fréquence des premières résonances par rapport aux fréquences nominales, correspondant à la hauteur des notes définie par la gamme tempérée pour chaque doigté. Ce rapport de fréquence en cents (figure 4.13) est transformé

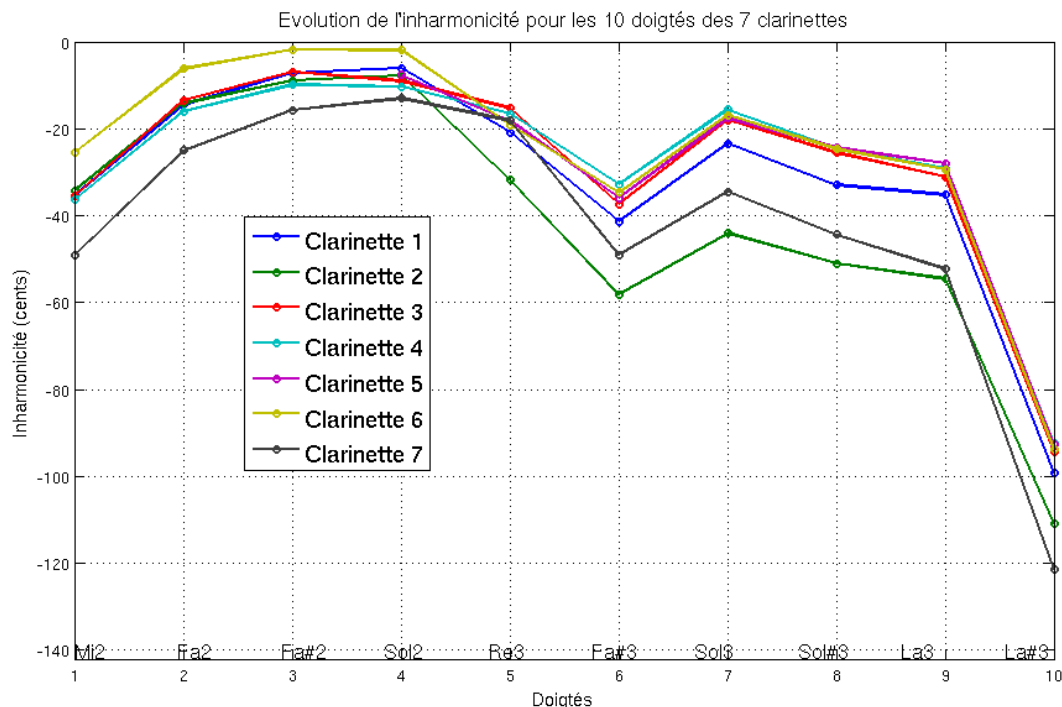


Figure 4.11: Evolution de l'inharmonicité inter-résonances (en cents) mesurée sur les 10 doigtés des 7 clarinettes. L'effet du barillet plus étroit de la clarinette 2 se voit nettement à mesure que l'on monte le registre.

en correction de longueur relative à la longueur effective de l'instrument (figure 4.12). Cette donnée correspond donc à la correction de longueur que doit apporter le musicien au niveau de son embouchure pour jouer juste. Bien sûr à cela il faudrait ajouter la correction de longueur imposée par la variation de fréquence due à l'effet de l'inharmonicité. Le principe de cette représentation est de vérifier si la correction de longueur est la plus stable possible sur le registre assurant au musicien de ne pas avoir à trop corriger pour passer d'un doigté à l'autre et par la même occasion vérifier si les fréquences de résonances sont "bien réglées" par rapport aux fréquences nominales. Je rappelle que l'estimation du volume équivalent de la pièce adaptatrice impose une incertitude de 2 mm sur la longueur effective de la clarinette.

En résumé, si le résonateur de clarinette était parfaitement harmonique, la correction de longueur affichée sur ce graphique devrait être la plus constante possible afin de permettre au musicien de ne pas avoir à modifier son embouchure pour jouer juste, et participerait à un certain confort de jeu. Lorsque l'inharmonicité varie fortement d'un doigté à l'autre comme par exemple pour l'enchaînement Mi2-Fa2 (environ 20 cents) la fréquence de résonance du Mi2 doit être relativement plus élevée par rapport à la

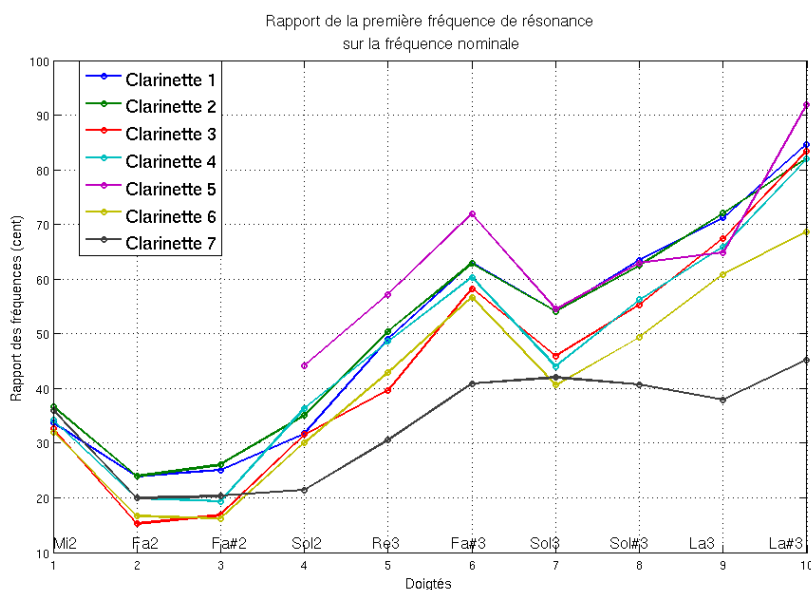


Figure 4.12: Rapport de fréquence en cents entre fréquence de résonance et fréquence nominale.

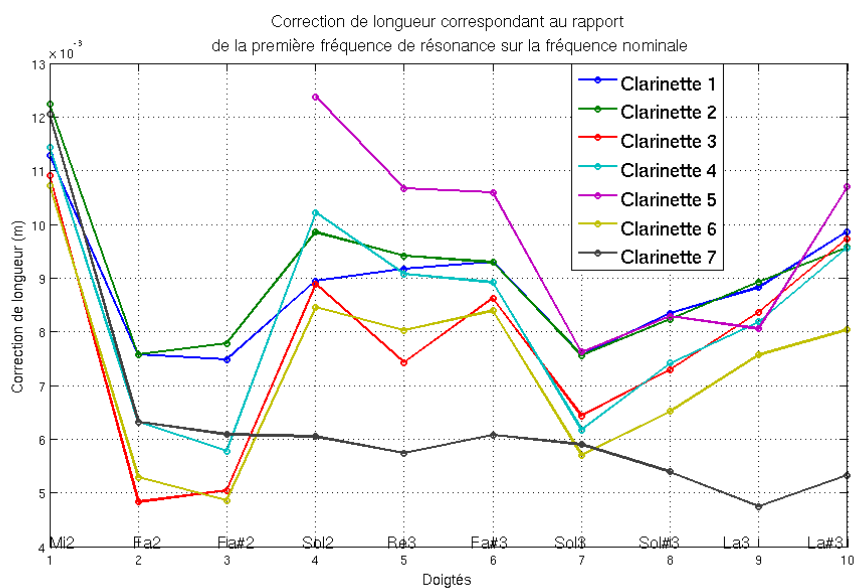


Figure 4.13: Correction de longueur, tirée du rapport de fréquence de la figure 4.12, que doit réaliser le musicien avec ses paramètres d'embouchure pour jouer juste. L'effet de l'inharmonicité inter-résonances sur la fréquence de jeu doit également être ajouté à la correction de longueur du musicien.

fréquence nominale que pour le doigté de Fa2. Le constructeur du modèle C (clarinette 7) prend bien en compte cet enchainement et ce modèle reste très stable sur le reste du registre malgré une inharmonicité variable.

Comme le montre la figure 4.14, l'effet de l'inharmonicité sur la fréquence de jeu semble avoir été pris en compte pour le réglage de la première fréquence de résonance des clarinettes de modèle A et B, permettant ainsi au musicien de rester dans une plage de paramètres d'embouchure la plus stable et participerait donc au confort du musicien. Cependant ces allures sont calculées avec le choix assez arbitraire, pour avoir un ordre de grandeur de l'effet d'un seul harmonique P_3 , et un rapport $|P_3/P_1| = 0.2$ couramment observée en pratique, sur la fréquence de jeu de l'instrument. A la transition du doigté de Fa#3-Sol3 l'inharmonicité augmente considérablement (20 cents environ), ce qui se traduit par une diminution de la correction de longueur et permettrait au musicien de ne pas avoir à modifier ses paramètres d'embouchure en fonction de ce changement d'inharmonicité. On retrouve la même tendance pour le passage du La3 au La#3. La clarinette 1 a la correction de longueur la plus stable tout en prenant en compte l'effet de l'inharmonicité et c'est peut-être ce qui a contribué à ce qu'elle soit bien appréciée par les essayeurs. On notera également les corrections de longueur très faibles des doigtés de Fa2 et Fa#2 des clarinettes 3, 4 et 6, qui sont généralement reconnus par la plupart des musiciens comme trop bas.

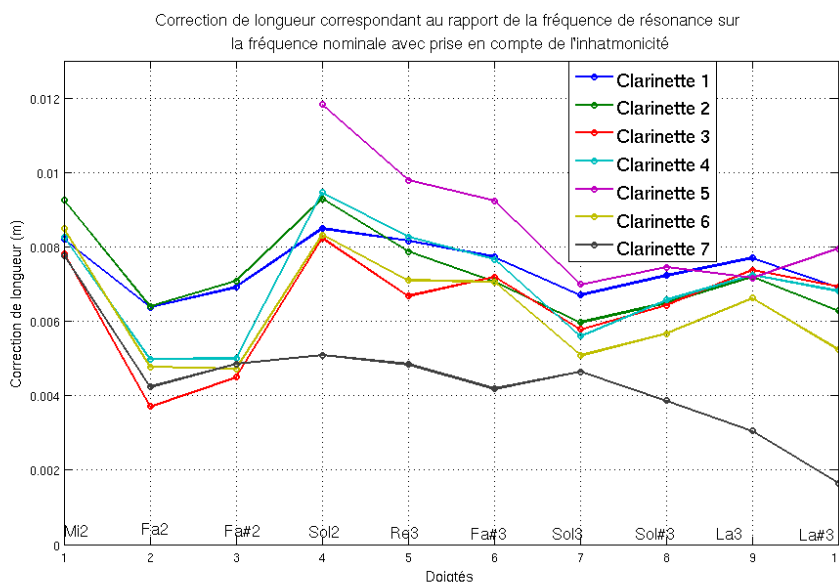


Figure 4.14: Correction de longueur que doit réaliser le musicien avec ses paramètres d'embouchure pour jouer juste. L'effet de l'inharmonicité sur la fréquence de jeu y est amoindri en considérant un cas particulier de l'influence d'un seul harmonique supplémentaire $|P_3/P_1| = 0.2$.

4.3 Conclusion

Le principal objectif de ce chapitre est de mettre en correspondance des appréciations de clarinettistes expérimentés avec des mesures d'impédances réalisées sur un jeu de 7 clarinettes Sib, dont 5 appartiennent à la même série. Les mesures réalisées avec le capteur d'impédance montrent des différences de mesures significatives pour tenter d'établir un lien avec les dires des musiciens. Le critère qui apparaît comme primordial pour les musiciens est la facilité d'émission que permet le résonateur de clarinette. On distinguera deux types de facilité d'émission : globale, qui correspondrait à l'impression générale de l'effort nécessaire pour jouer une clarinette ; locale, qui serait en lien avec l'effort que doit exercer le musicien pour jouer une note en particulier. Ce qui apparaît surtout important au musicien quant à ce dernier point est sa régularité sur l'instrument, appelée homogénéité.

En première approximation, la facilité d'émission peut être reliée à la relation qui peut exister entre pression dans la bouche (correspondant à l'effort du musicien) et pression dans le bec (liée à la pression externe et donc à la dynamique de jeu associée) et dont les méthodes numériques basées sur l'équilibrage harmonique permettent de donner des éléments de réponse. La présence d'une première résonance forte s'avère donc nécessaire pour faciliter l'émission d'un doigté de l'instrument. La facilité d'émission globale peut être reliée à la moyenne des amplitudes des premiers pics d'impédance, alors que l'homogénéité correspondrait à une évolution régulière de celles-ci.

Par ailleurs, il semble que l'inharmonicité inter-résonances joue également un rôle non négligeable sur la facilité d'émission. L'inharmonicité, principalement négative pour la clarinette, a tendance à faire baisser la fréquence de jeu, ce qui demanderait un effort supplémentaire au musicien qui doit modifier son embouchure en conséquence. De plus, dans le cas particulier de la clarinette, cette modification de la correction de longueur à pour conséquence de rallonger les transitoires d'attaques qui nuisent au confort de jeu du musicien.

Le réglage de la première fréquence de résonance de chaque doigté par rapport à sa fréquence nominale correspondante semble déterminante pour le confort du musicien. La répartition de la correction de longueur la plus constante possible (qui signifie pour le musicien de faibles modifications de son embouchure) améliorerait la jouabilité de l'instrument surtout si l'effet de l'inharmonicité y est pris en compte.

Finalement, des aspects subjectifs comme la facilité d'émission globale, l'homogénéité, et à une certaine mesure la couleur tonale peuvent être mis en évidence par l'intermédiaire du capteur d'impédance sous certaines approximations. Seulement, il resterait à mettre en évidence les conséquences de l'allongement des transitoires sur le confort de jeu du musicien et son influence sur la facilité d'émission.

5

Conclusion générale

Cette étude sur la faisabilité de l'introduction d'un capteur d'impédance dans une chaîne de contrôle/qualité pour l'aide à la détection de défauts est très exploratoire. En effet, il existe peu de travaux réalisés en lien aussi direct avec une problématique de la facture instrumentale. Bien que l'aide à la facture soit de nos jours et depuis des décennies un domaine de recherche très actif, relier le comportement d'un instrument à vent à ses attributs musicaux reste un problème complexe.

La première partie de ce stage a permis de dégager l'importance de la facilité d'émission sur l'impression de qualité globale de la clarinette. On notera en particulier la régularité de l'évolution de la facilité d'émission locale de chaque note sur le premier registre pour une même sollicitation du musicien, associée à l'homogénéité. Et également l'impression d'effort nécessaire à la mise en fonctionnement de l'instrument, qualifiée par la facilité d'émission globale. Ces résultats ont été dégagés à partir de l'analyse des tests subjectifs réalisés sur 2 essayeurs. Même si aucun défaut n'a été détecté à l'issue de ces phases de tests sur les clarinettes étudiées, il a été possible de relever des différences dans l'attribution des critères subjectifs pour chacun des instruments.

A partir d'une caractérisation du capteur réalisée afin de vérifier la validité des résultats de mesure d'impédance d'entrée sur un tube par la comparaison à un modèle théorique. On peut conclure que les différences mesurées entre clarinettes sont significatives.

En théorie et avant le mode d'anche battante, la facilité d'émission locale peut être mise en relation à l'amplitude de la première résonance (cas du premier registre), principalement conditionnée par les pertes visco-thermiques. L'analyse des premières résonances d'une clarinette permet en grande partie d'expliquer des résultats subjectifs observés comme l'inhomogénéité et la facilité d'émission globale. L'homogénéité correspondrait alors, pour des amplitudes d'excitation pas trop élevées, à une régularité de l'évolution des amplitudes de la première résonance et la facilité d'émission globale à

leur moyenne sur le registre.

Pour une des clarinettes de modèle A, dont l'inharmonicité inter-résonances a été grandement perturbée par l'ajout d'un barillet plus étroit, il n'est pas possible de faire ce lien. En effet, l'inharmonicité joue un rôle important sur l'abaissement de fréquence de jeu de l'instrument (cas d'une inharmonicité négative) à mesure que son spectre interne s'enrichit. Il est alors possible de faire le lien entre variation de fréquence de jeu et un certain affaïssement de la facilité d'émission par le biais de la correction de longueur que le musicien doit réaliser pour réajuster l'instrument. Cette ajustement se traduit par une diminution de l'ouverture de l'embouchure qui a pour conséquence de rehausser le seuil d'oscillation et également la durée du transitoire d'attaque. De plus, dans des cas particuliers où l'inharmonicité inter-résonances est importante on sait que des régimes d'oscillation quasi-périodique apparaissent, ce qui constituerait la limite de jouabilité de l'instrument.

Ensuite, il est possible d'associer un certain confort de jeu de l'instrumentiste à la constance de la correction de longueur nécessaire pour jouer juste sur un registre. Cet aspect est directement relié au réglage de la fréquence de résonance, auquel il faut prendre en compte l'effet de l'inharmonicité sur la fréquence de jeu, par rapport à la fréquence nominale. Une des clarinettes remplissant ces conditions a été très bien appréciée par les essayeurs.

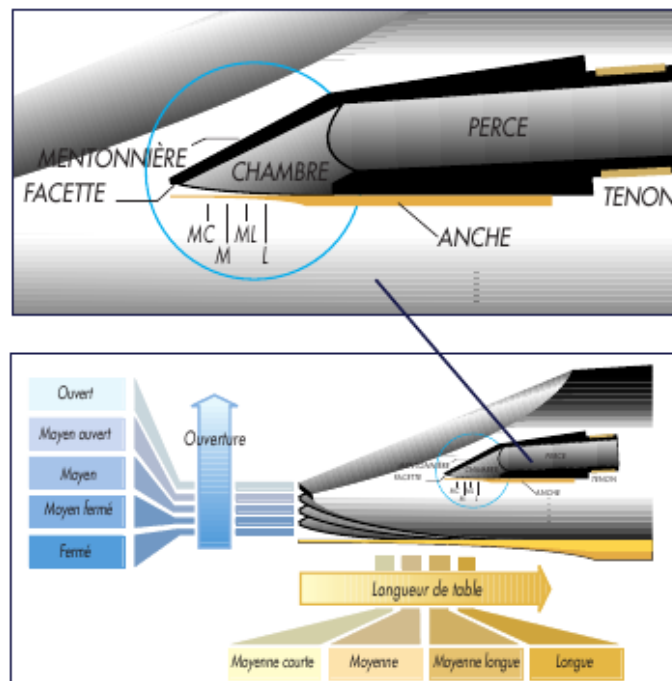
Le lien de ces affirmations avec des réalités théoriques n'est valide que sur une zone étroite de la branche de bifurcation du régime périodique proche du seuil d'oscillation et donc loin du régime en anche battante. En incluant les impédances mesurées dans le modèle assez complet de simulation numérique on pourrait analyser le comportement qu'aurait l'instrument en situation de jeu et également accéder à certains paramètres de l'embouchure.

En définitive, le capteur d'impédance est un outil suffisamment précis pour permettre de faire le lien entre des mesures physiques et des propriétés subjectives d'une clarinette. Bien qu'aucun instrument défectueux n'ait été à l'étude lors de ce stage, l'utilisation de ce capteur s'est révélé efficace pour mettre en évidence des différences minimales. Son utilisation dans une chaîne de contrôle/qualité peut donc être justifiée même si le temps nécessaire à la réalisation des mesures sur clarinettes est bien supérieur à celui de l'analyse des essayeurs. Le choix de doigtés clés peut être envisagé (comme par exemple le passage du Fa $\sharp$ 3 au Sol3) pour diminuer le temps nécessaire au diagnostic de l'instrument. Les résultats mis à jour lors de ce stage donnent avant tout des pistes de travail sur ce sujet encore très exploratoire.

6

Annexes

6.1 Coupe longitudinale d'un bec de clarinette



Pour une même ouverture : table plus longue = anche plus forte, table plus courte = anche plus facile.

Pour une même longueur de table : bec plus ouvert = anche plus facile, bec plus fermé = anche plus forte.

Figure 6.1: Coupe longitudinale d'un bec de clarinette (en haut). Schéma descriptif de l'ouverture et de la longueur de table d'un bec de clarinette (en bas).

6.2 Doigtés de la clarinette

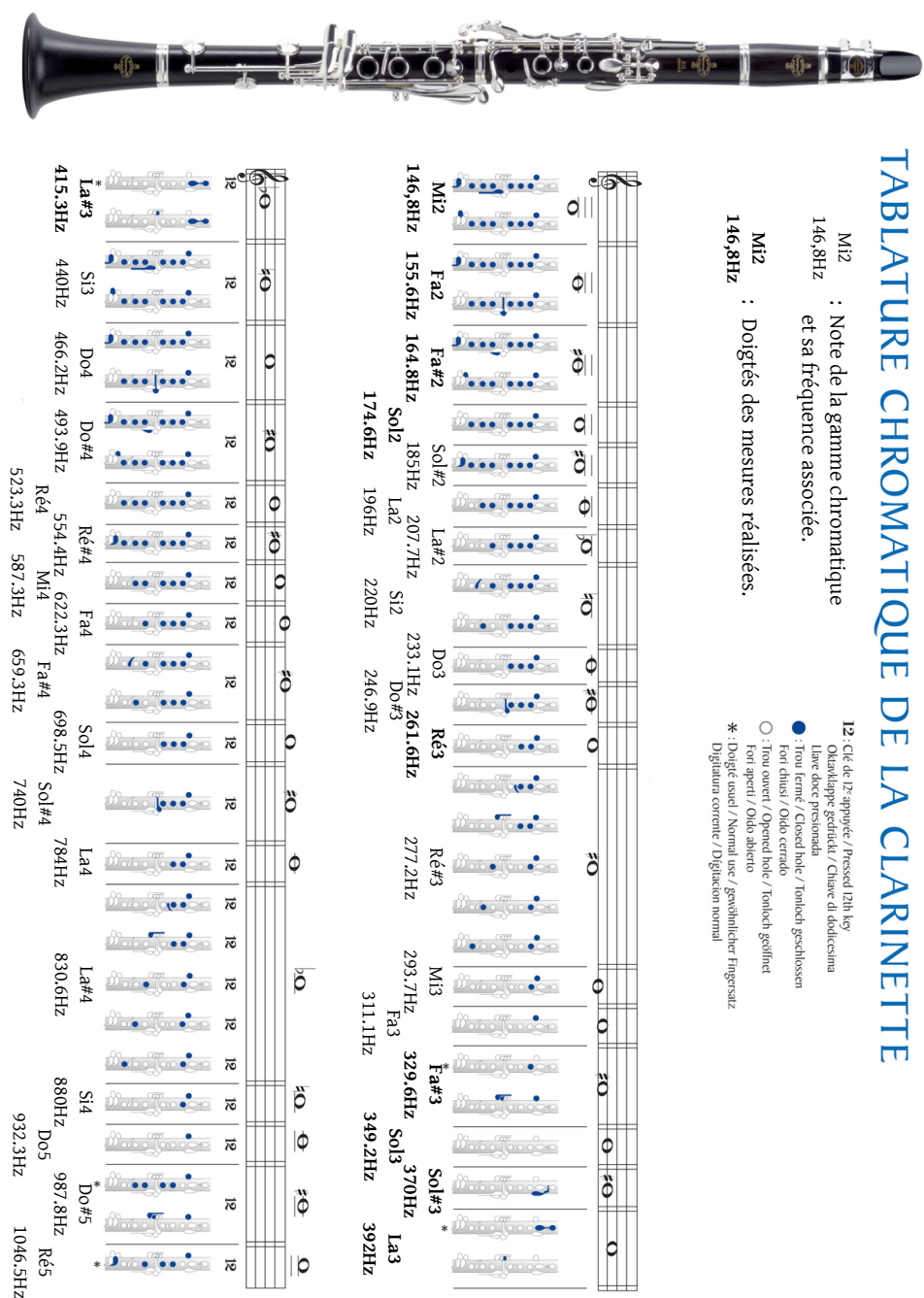


Figure 6.2: *Tablature chromatique de la clarinette en $S\flat$ (lorsque l'instrument joue un Do on entend un $S\flat$). Les notes et fréquences associées sont données en dessous de chaque doigté. Les mesures réalisées au cours de cette étude correspondent aux doigtés en gras.*

6.3 Répétabilité du capteur d'impédance

Description du dispositif expérimental

Le capteur d'impédance est constitué d'une source de débit matérialisée par une cellule piézoélectrique fermant une cavité arrière et connectée à une cavité débouchant sur la charge acoustique à mesurer (visible dans [14]). La pression mesurée dans la cavité arrière fermée est proportionnelle au débit injecté par la source à l'ordre zéro. L'ajout d'un autre microphone à l'entrée du capteur, permet d'obtenir le rapport pression sur vitesse acoustique et donc l'impédance d'entrée à partir de la fonction de transfert des signaux de pression mesurés. Le signal d'excitation de la source est généré par la carte son de l'ordinateur puis amplifié. Les signaux des microphones sont récupérés par la carte d'acquisition NI9233, après conditionnement.

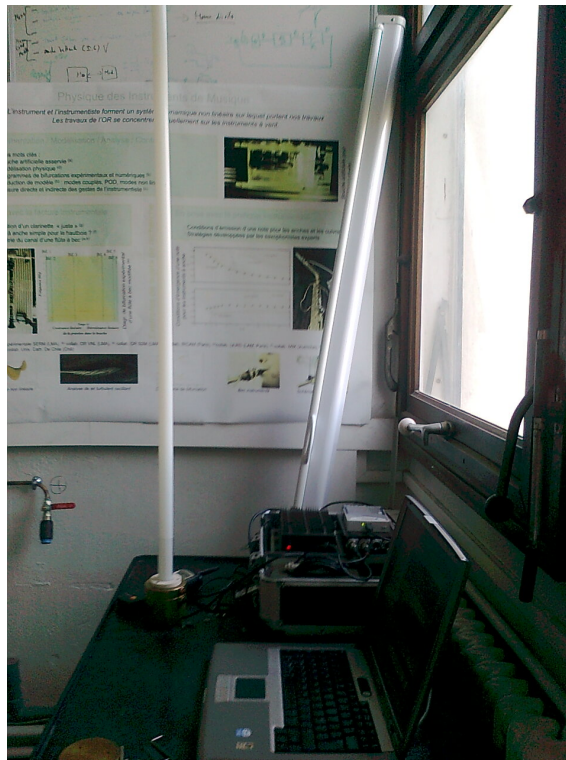


Figure 6.3: *Dispositif expérimental de mesure d'impédance d'entrée d'un tube ouvert. L'étanchéité de la connexion entre le tube et le capteur d'impédance se fait par l'intermédiaire d'une pièce adaptatrice et d'un joint torique.*

La phase de calibration est réalisée couvercle fermé (cavité avant fermée) avant chaque mise en service de l'appareil. Le nombre de moyennes est fixé à 20, et le niveau d'excitation de l'amplificateur à 5. Ce réglage permet de s'écarter des phénomènes parasites à la calibration (bruit, saturation des microphones, distorsion de la cellule piézoélectrique). Le couvercle est bien fermé et de la graisse à vide vient assurer l'étanchéité de la cavité. La fixation du tube dans le plan de référence du capteur est réalisée à l'aide d'une pièce adaptatrice et d'un joint torique (figure 6.3). Les dimensions du tube sont : $l = 1.09$ cm de long, $a = 7$ mm de rayon interne et $b = 13$ mm de rayon externe. La mesure d'impédance d'entrée du tube est ensuite réalisée sur une gamme fréquentielle de 25 à 2000 Hz à partir de signaux glissants de 10 secondes, et sur 10 moyennes. Ceci est réalisé afin d'inclure le deuxième pic de résonance du Sib3, note la plus aigüe du premier registre de la clarinette, situé à 1250 Hz et qui constitue la limite supérieure minimum de l'étude sur cet instrument.

L'influence de la température sur la vitesse de propagation des ondes apporte des écarts de 3 cents pour chaque variation de 1°C. Les mesures sont alors normalisées à 20°C par dilatation de l'axe des fréquences d'un coefficient $a = c(20)/c(t)$ correspondant au rapport des vitesses de propagation des ondes. La relation, $c(t) = 331,45 \cdot \sqrt{(t + T_0)/T_0}$, qui lie vitesse de propagation et température, permet alors de réaliser cette normalisation sur l'impédance mesurée,

$$Z(\omega_{20^\circ C}) = Z(\omega_t^\circ C * a), \quad (6.1)$$

où $T_0 = 273.16$ K, et t la température (en °Celsius) à laquelle est effectuée la mesure d'impédance.

La température influe également sur l'amplitude des modes car elle intervient dans la partie réelle de la constante de propagation, définie plus loin dans la section 3.1.1, et au niveau de l'impédance caractéristique à l'entrée du résonateur. La variation des pertes avant 2000 Hz est inférieure à 0.16 % pour un écart de 1°C, et peut donc être négligée. Seulement, l'impédance caractéristique est inversement proportionnelle à la racine carrée d'une dilatation de température. On a pu constater un écart maximum de 8°C sur les différentes séances de mesure. Ce qui correspond à une variation d'environ 1 dB sur l'impédance caractéristique. Une normalisation à 20°C de l'impédance caractéristique peut donc être envisageable, mais n'a pas été appliquée aux mesures considérées lors de cette étude.

Ensuite les 25 résonances et antirésonances comprises dans la bande fréquentielle d'étude sont localisées en recherchant les minimums de la valeur absolue de la partie imaginaire de chaque mesure d'impédance. La précision fréquentielle de la mesure étant de l'ordre de 0.1 Hz et la partie imaginaire ayant une pente suffisante aux résonances et aux antirésonances, cette méthode de localisation permet d'obtenir une précision de l'ordre du pas fréquentiel, excepté lorsque la mesure est réalisée pour un rapport

signal à bruit trop faible (aux basses fréquences pour les premiers pics de résonance et d'antirésonance) où elle est estimée à 1 Hz.

Dans les deux sections suivantes on cherche à évaluer la répétabilité du capteur d'impédance. Ce qui correspond à l'estimation de la variance des résultats d'amplitude et de fréquence des résonances et antirésonances du tube, sur un ensemble de séries de mesures nécessitant recalibration du dispositif. Un protocole expérimental est donc fixé et permet de s'assurer de la bonne reproductibilité du capteur et ainsi de faire le moins possible varier les conditions de mesure (liées à l'opérateur, et à la température).

Écarts intra-calibrations

Dans ce paragraphe deux niveaux d'excitation de la source sont pris en compte : un réglage à 5 de l'amplificateur et un réglage à 7. La comparaison des écarts intra-calibration permet d'évaluer la variance des résultats obtenus au sein d'une série de mesures réalisée sans prendre en considération l'influence de la phase de calibration du capteur. Ici, 5 mesures d'impédance ont été réalisées à chaque recalibration du capteur. 4 recalibrations ont été réalisées à un réglage de 5 de l'amplification lors des mesures et 3 recalibrations à un réglage de 7. Des valeurs des amplitudes $Z_{i,j,k}$ et fréquences $F_{i,j,k}$ des résonances et antirésonances est déduite la variance intra-calibration (d'après [16]),

$$S_{p_{X_k}}^2 = \frac{1}{J(I-1)} \sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^I X_{i,j,k} - \bar{X}_{j,k} \right)^2, \quad (6.2)$$

où k correspond aux modes résonants et antirésonants, dans l'ordre croissant d'apparition sur l'axe des fréquences, détectées pour la mesure i de la calibration j . J correspond au nombre total de calibrations pour lesquels I mesures sont réalisées. La quantité $\bar{X}_{j,k}$ correspond à la moyenne de $X_{i,j,k}$ sur les i . Cette variance intra-calibration revient au calcul de la variance sur un nombre $I * J$ de mesures. Seulement pour des raisons pratique elles ont été réalisées en plusieurs fois. Elle correspond à la moyenne des variances des résultats obtenus sur chaque série, et ne prend donc pas en compte l'influence de la recalibration du capteur effectuée entre les séries de mesures. L'écart-type relatif sur l'amplitude en pour cent et l'écart sur la fréquence en cents sont déduit de cette variance puis affichés dans la figure 6.4.

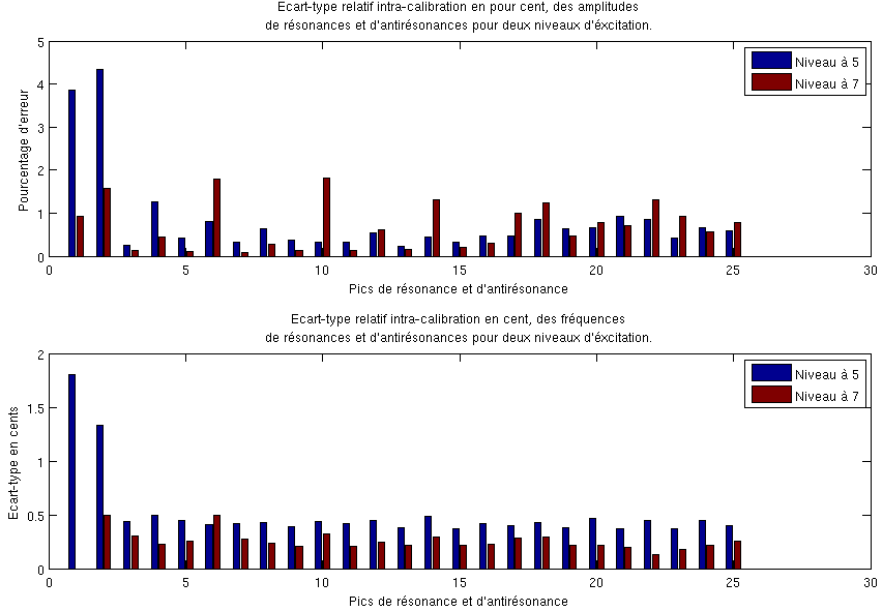


Figure 6.4: *Écarts-types relatifs intra-calibration sur les amplitudes et fréquences de résonance (impair) et d'antirésonance (pair) du tube ouvert. Ces écarts correspondent à la moyenne des variances des résultats au sein d'une même série de mesures.*

Les écarts sur les résultats au sein des séries de mesure pour chaque calibration du capteur sont très faibles (autour de 1 % sur l'amplitude et 0.5 cents sur la fréquence) sur toute la bande d'étude, excepté pour les mesures réalisées à une amplification de 5 où ces écarts atteignent presque 4 % sur les premières résonances et antirésonances. D'après ces résultats le niveau d'excitation à privilégier pour les mesures sur le tube correspond à un réglage de 7 de l'amplificateur, et constitue ainsi le meilleur rapport signal sur bruit possible d'atteindre avec l'appareil. A un niveau légèrement au dessus le signal émis par la source se distord et fausse ainsi les mesures. En respectant cela une seule mesure réalisée par calibration partielle est suffisamment représentative de la qualité de cette dernière.

Écarts inter-calibrations

L'influence de la phase de calibration sur les résultats de mesures peut alors être identifiée avec l'étude des écarts inter-calibrations. La variance inter-calibrations s'écrit,

$$S_{\bar{X}_k}^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\bar{X}_{j,k} - \bar{\bar{X}}_k)^2, \quad (6.3)$$

avec $\bar{X}_{j,k} = X_{i,j,k}$ car une seule mesure par calibration est suffisamment représentative de la qualité de sa réalisation. L'écart-type relatif en pour cent sur les amplitudes et

l'écart en cents sur les fréquences des résonances et antirésonances sont ensuite déduits de (6.3) et affichés dans la figure 6.5, pour 8 recalibrations du capteur.

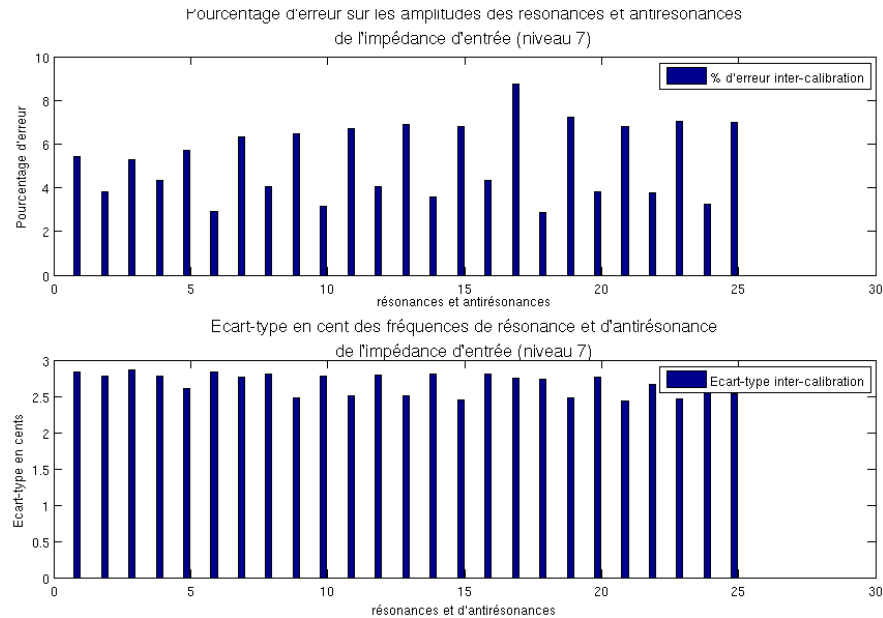


Figure 6.5: *Ecart-type relatif sur les amplitudes en pour cent et écart en cent sur les fréquences de résonance (paire) et d'antirésonance (impaire). Ces résultats sont obtenus à partir de mesures effectuées sur 8 calibrations. Les résultats sur l'amplitude des modes ne varient globalement pas plus de 8 %, et de 3 cents sur la fréquence entre les calibrations.*

La répétabilité des résultats de mesures du capteur d'impédance et pour ce protocole expérimental est de 8 % (0.7 dB) sur l'amplitude des résonances, de 4 % pour les antirésonances et de 3 cents sur les fréquences. Ceci semble correct dans le cadre d'une étude sur la clarinette. Reste à présent à confronter ces résultats expérimentaux à des modèles d'impédance de tube ouvert.

Discussions sur le capteur d'impédance

La phase de calibration partielle a posé lors de ces tests un certain nombre de questions quant à sa bonne réalisation. Cette étape est nécessaire avant chaque série de mesures afin de vérifier la sensibilité relative des microphones et les paramètres de fuites susceptibles de changer au cours du temps et d'évoluer avec la température, et l'hygrométrie. Seulement l'opérateur apporte lui aussi sur cette phase sa contribution avec la possibilité de modifier deux paramètres : le niveau d'excitation et le serrage du couvercle.

Niveau d'excitation à la calibration

A chaque phase de calibration du capteur d'impédance, cavité avant fermée, la fonction de transfert des microphones 1 et 2 est mesurée sur une gamme de fréquence de 10 à 1000 Hz avec des signaux à balayage d'une seconde et sur 20 moyennes. Le paramètre K_r est déduit de la moyenne de la réponse en cavité infinie sur la gamme de fréquence de 400 à 800 Hz, là où elle est supposée la plus stationnaire. Et ce paramètre correspond à la sensibilité relative des microphones. Ensuite les paramètres de fuites au niveau de chaque microphone sont estimés sur la plage de fréquence de 30 à 110 Hz. Il est donc nécessaire de vérifier le niveau d'excitation afin d'éliminer le plus possible la présence de parasites. Bien que la fermeture du couvercle permette d'améliorer le rapport signal sur bruit de la réponse en cavité, il est préférable de localiser un réglage où il est maximisé tout en évitant de faire saturer les microphones et de faire apparaître les distorsions liées à la source. La figure 6.6 montre des réponses en cavité infinie mesurées pour 3 niveaux d'excitation (réglage de l'amplificateur à 4, 6, et 7). Pour évaluer la quantité de désordre de chacune de ces fonctions, le critère d'entropie,

$$E(s[n]) = - \sum_n s[n] \ln(s[n]), \quad (6.4)$$

leur a été appliqué. Une faible entropie révèle une mesure peu parasitée.

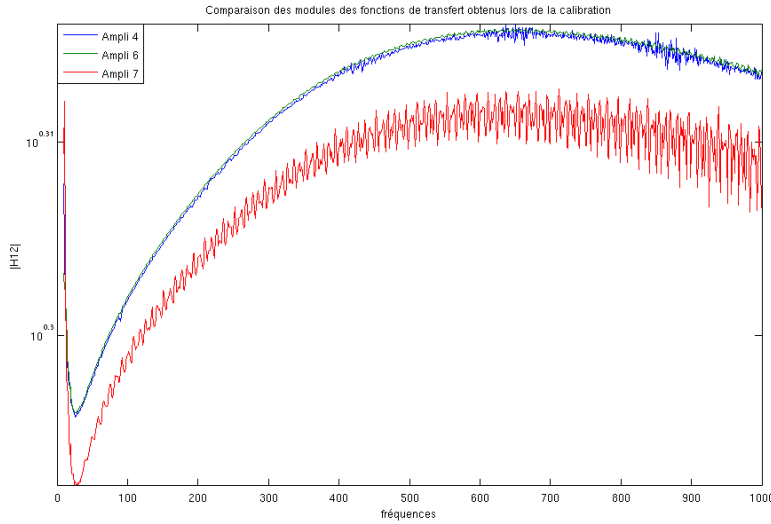


Figure 6.6: Modules des fonctions de transfert des courbes de calibration en fonction de la fréquence pour trois niveaux du signal d'excitation. Pour le plus grand niveau d'amplification la courbe est très perturbée.

Les réponses en cavité réalisées aux réglages de 4 et 6 se superposent presque parfaitement, excepté le fait que l'entropie pour le réglage à 4 est légèrement plus élevée (lié rapport signal à bruit plus faible). Au niveau 7 la mesure est complètement dégradée soit par la saturation des microphones (la sécurité incluse dans le logiciel semble avoir un seuil de tolérance trop élevé) soit par les distorsion liées à la source. Les paramètres récoltés à ces niveaux d'excitation sont montrés dans le tableau 6.1.

Paramètres		K_r	τ_1	τ_2
Première Calibration	Ampli : 4	2.20016	$17 \cdot 10^{-5}$	$17 \cdot 10^{-5}$
	Ampli : 6	2.20242	$18.25 \cdot 10^{-5}$	$18.53 \cdot 10^{-5}$
	Ampli : 7	2.17377	$15.32 \cdot 10^{-5}$	$15.45 \cdot 10^{-5}$
Deuxième Calibration	Ampli : 4	2.20328	$14.68 \cdot 10^{-5}$	$14.86 \cdot 10^{-5}$
	Ampli : 6	2.20316	$14.91.25 \cdot 10^{-5}$	$15.1 \cdot 10^{-5}$
	Ampli : 7	2.17828	$12.08 \cdot 10^{-5}$	$12.15 \cdot 10^{-5}$

Table 6.1: Résultats des paramètres de calibration obtenus pour 3 réglages d'amplification et sur deux réalisations. Les résultats pour un réglage à 7 se démarquent clairement des autres valeurs. Le réglage à 6, qui est à entropie la plus faible, obtient toujours les valeurs de paramètres les plus élevés.

Les résultats des paramètres de calibration réalisés à un réglage de 7 se démarquent des autres valeurs de paramètres obtenus. A la vue de la réponse en cavité le réglage à 7 a été écarté des niveaux d'excitation à considérer. Le critère d'entropie est bien en accord avec la variation apparente des résultats. Il reste à définir un seuil de l'entropie au-delà duquel la mesure sort de la zone de tolérance du modèle théorique, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude. La figure 6.7 montre les écarts-types en amplitude et en fréquence, des résonances et antirésonances, apportés par 3 réglages d'amplification à la calibration (réglages à 4, 5 et 6). Les acquisitions des fonctions de transfert sont réalisées à la suite (sans démontage du couvercle) pour les 3 niveaux d'excitation. Leurs paramètres respectifs sont conservés et remplacés au moment de la mesure sur le tube. On peut ainsi établir l'influence directe du niveau d'excitation sur les résultats de la mesure sans avoir à procéder à un démontage/remontage du couvercle.

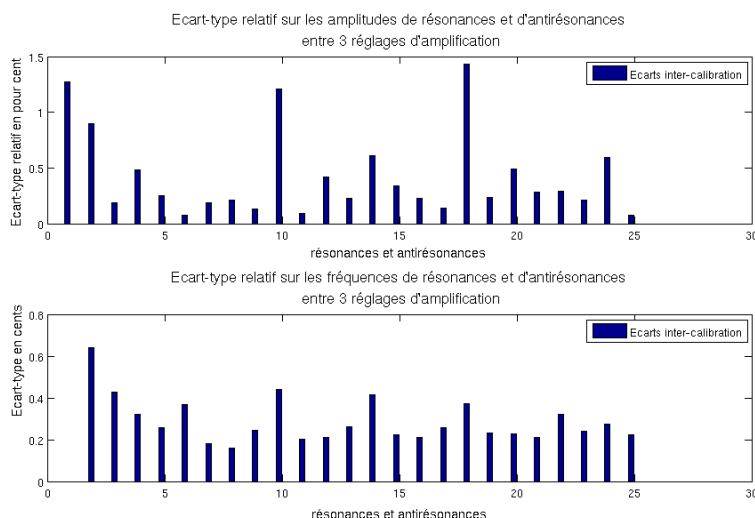


Figure 6.7: *Ecart-type relatif sur les amplitudes et écarts en cents sur les fréquences des résonances (paires) et des antirésonances (impaires) du tube, pour 3 réglages de l'amplification (4, 5 et 6) à la calibration. Ces écarts inter-calibrations sont de l'ordre des écarts intra-calibrations mesurés précédemment. Le choix d'un de ces 3 niveaux n'a donc aucune influence sur la reproductibilité. Un réglage à 5 a donc par la suite été choisi pour la calibration.*

Ces écarts liés directement au niveau d'amplification lors de la calibration partielle du capteur, sont très faibles et de l'ordre des écarts intra-calibration définis dans 6.3. En définitive, il est préférable d'éviter le réglage à 7 pour lequel des phénomènes non linéaires indésirables apparaissent, mais que le réglage soit de 4, 5 ou 6 ne dégrade en rien la qualité des résultats. Un réglage à 5 a donc ensuite été conservé sur l'ensemble des mesures réalisées.

Serrage du couvercle à la calibration

Un niveau d'excitation de l'amplificateur à 5 est un bon compromis entre recherche du meilleur rapport signal sur bruit et saturation des microphones. Malgré cela la figure 6.8 et le tableau de valeurs 6.2 montrent bien la variabilité des fonctions de transfert et des paramètres récoltés, sur diverses calibrations.

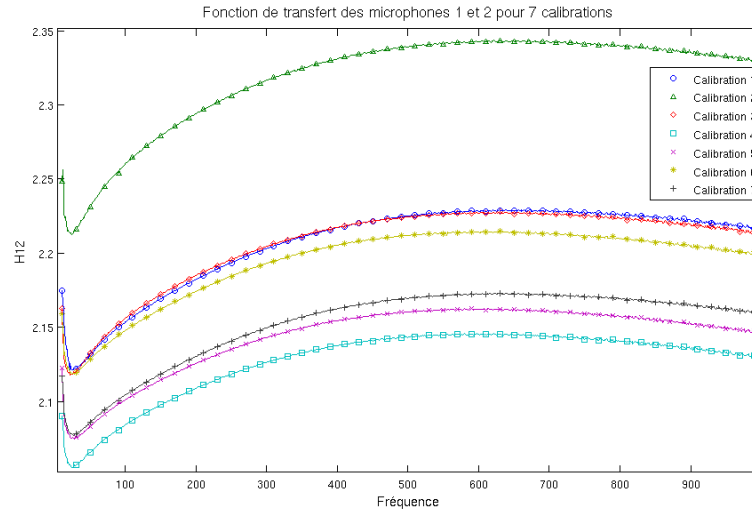


Figure 6.8: *Fonctions de transfert obtenue pour les calibrations réalisées dans le cadre des mesures de la section 6.3. Le tableau 6.2 renseigne sur les paramètres obtenus à partir de ces courbes, et sur leurs date de réalisation. Des calibrations réalisées dans la même journée peuvent être très différentes. Par exemple, les calibrations 1 et 2.*

La sensibilité relative Kr des microphones est obtenue par moyennage de la fonction de transfert entre 400 et 800 Hz, plage de fréquence où elle est supposée stationnaire. Les paramètres τ_1 et τ_2 sont estimés entre 30 et 110 Hz. La figure 6.9 montre les allures des fonctions de transfert obtenues pour différents serrages du couvercle. Bien que la qualité de serrage ne soit pas quantifiée à l'aide d'un tournevis dynamométrique, la figure 6.9 montre l'importance que joue ce paramètre sur les valeurs de calibration et la nécessité de fixer un couple de serrage pour chaque phase de calibration du capteur afin de limiter l'influence de l'opérateur. Le couple de serrage maximum admissible par le filetage M3 en laiton du capteur est de 0.5 N.m, il est donc préférable de ne pas trop dépasser cette valeur (pas plus d'1 N.m) et surtout de conserver la même valeur à chaque phase de calibration partielle. L'acquisition prochaine d'un tournevis dynamométrique permettra de s'écarter de l'influence de ce paramètre et de préserver la longévité des filetages en laiton du capteur d'impédance.

Paramètres de calibration	Kr	τ_1	τ_2
Calibration 1 (O) Jour 1	2.22647	$7.7*10^{-5}$	$7.7*10^{-5}$
Calibration 2 ($\triangle$) Jour 1	2.34041	$34.3*10^{-5}$	$35.0*10^{-5}$
Calibration 3 ($\diamond$) Jour 2	2.22508	$16.6*10^{-5}$	$16.7*10^{-5}$
Calibration 4 ($\square$) Jour 3	2.14348	$19.6*10^{-5}$	$20.3*10^{-5}$
Calibration 5 (x) Jour 4	2.16029	$29.7*10^{-5}$	$30.6*10^{-5}$
Calibration 6 ($\star$) Jour 4	2.21219	$18.8*10^{-5}$	$19.5*10^{-5}$
Calibration 7 (+) Jour 4	2.1705	$18.0*10^{-5}$	$18.6*10^{-5}$

Table 6.2: Paramètres de 7 calibrations réalisées sur 4 journées. Des calibrations réalisées la même journée peuvent donner des paramètres assez différents.

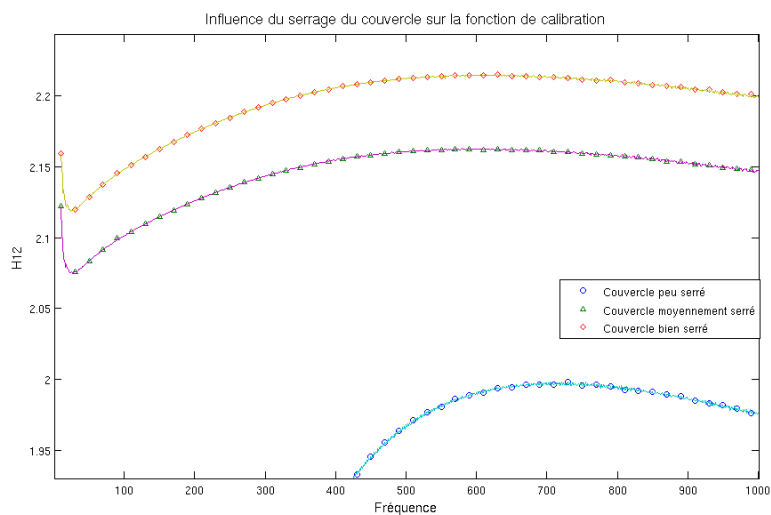


Figure 6.9: Fonctions de transfert des microphones 1 et 2 obtenus lors de la calibration pour 3 types de serrages du couvercle réalisées sur un intervalle de temps faible.

6.4 Résultats de chaque doigté

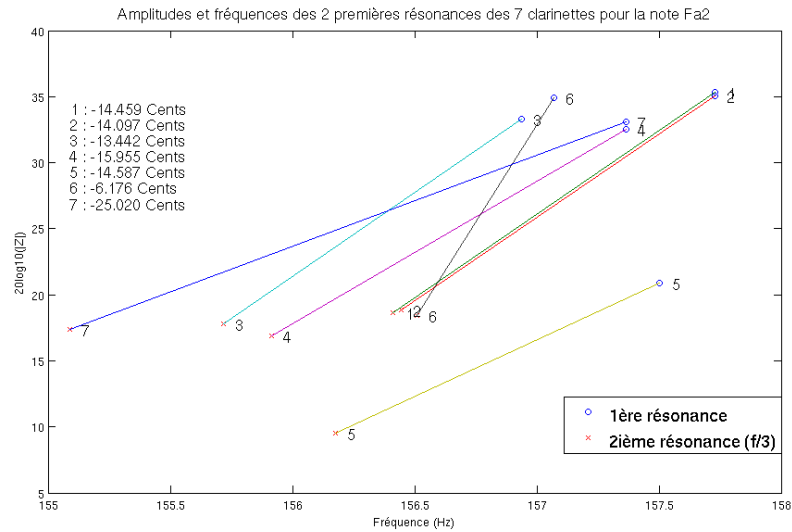


Figure 6.10: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Fa2.

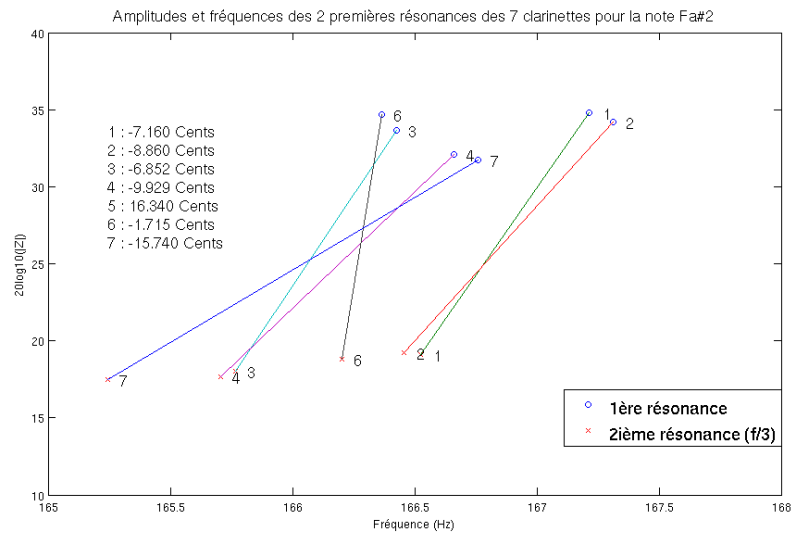


Figure 6.11: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Fa#2.

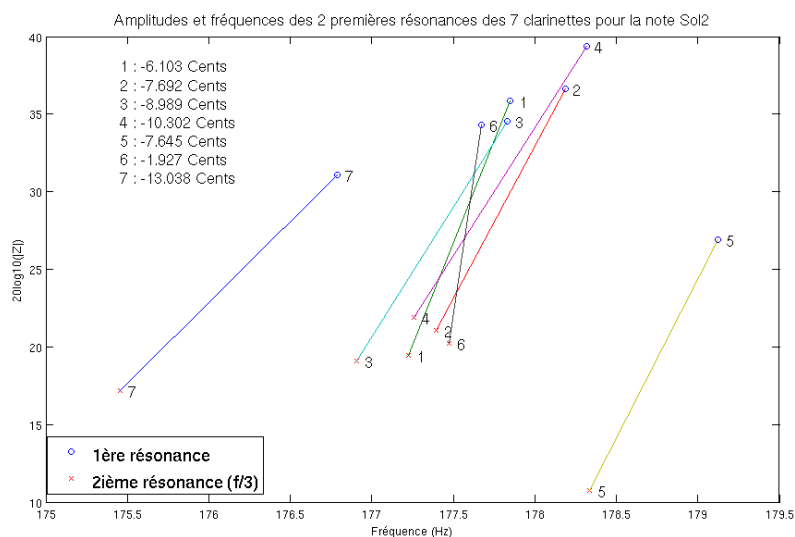


Figure 6.12: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Sol2.

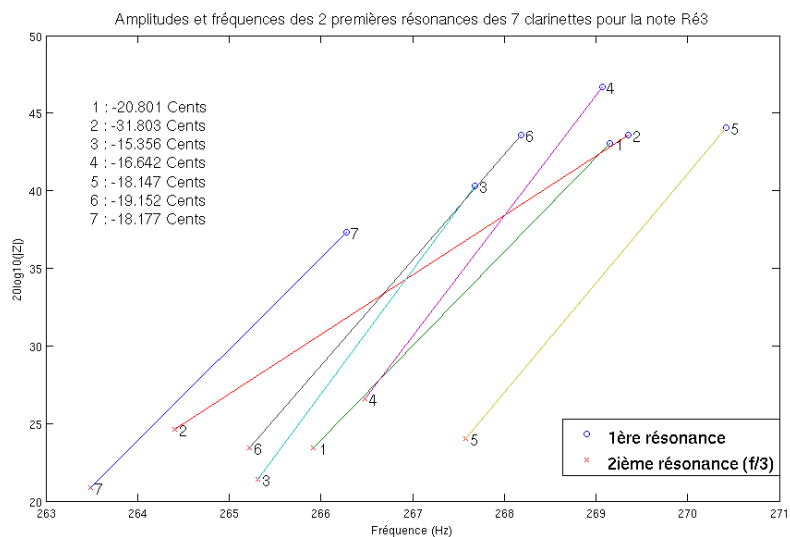


Figure 6.13: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Ré3.

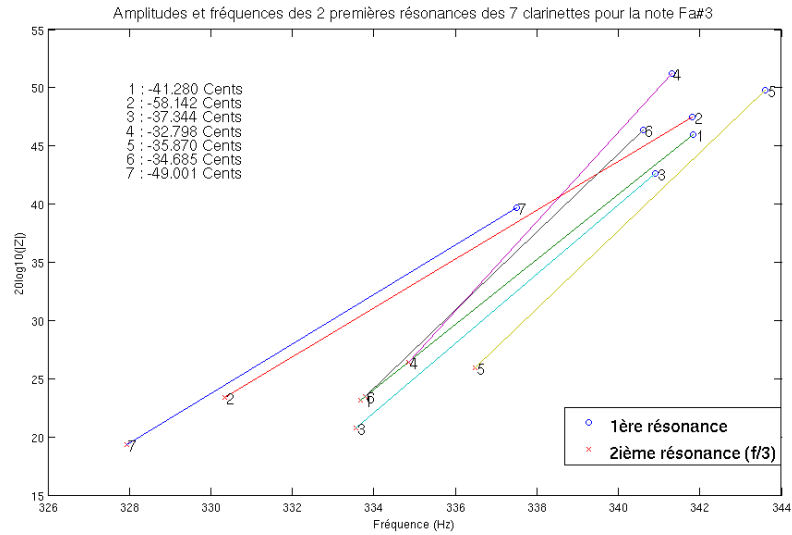


Figure 6.14: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Fa#3.

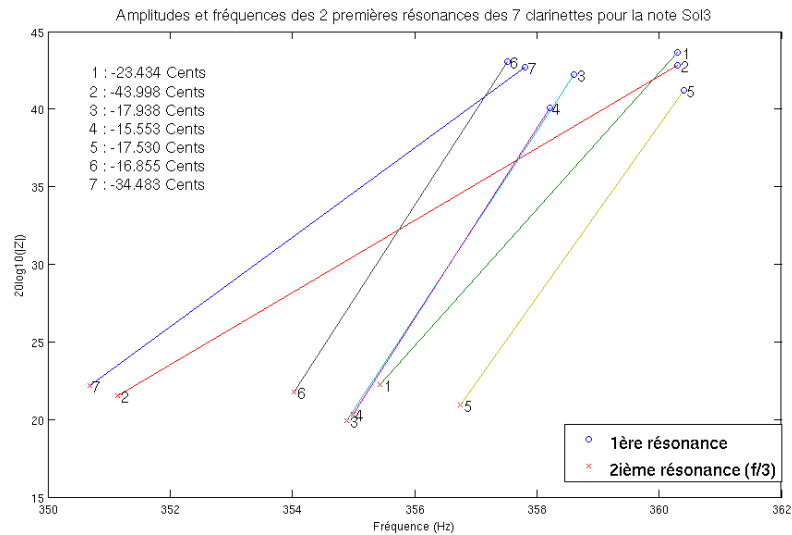


Figure 6.15: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Sol3.

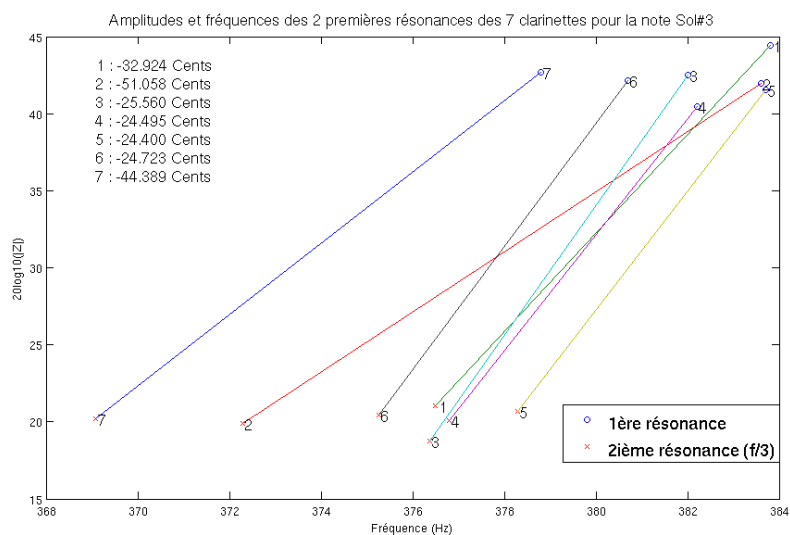


Figure 6.16: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de Sol#3.

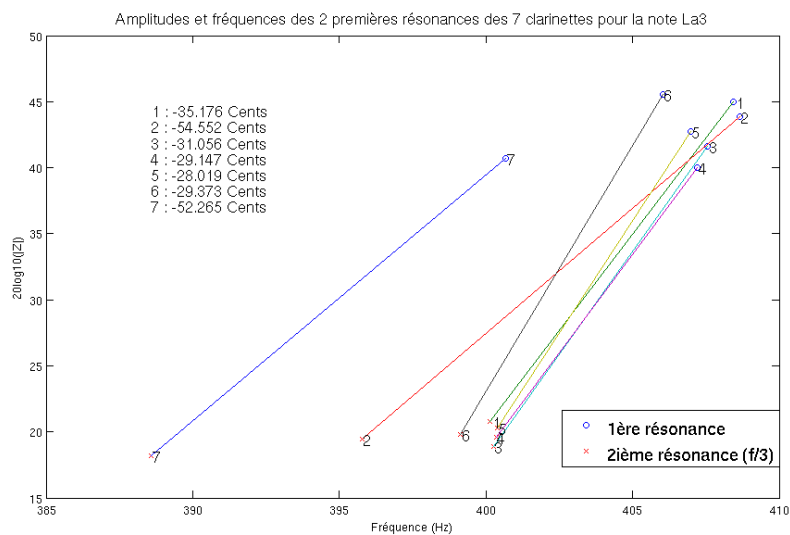


Figure 6.17: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de La3.

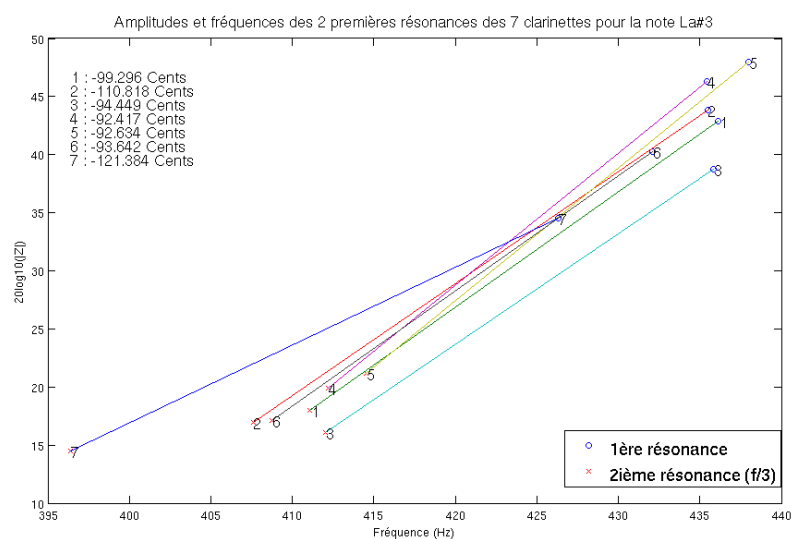


Figure 6.18: Représentation de l'amplitude des premiers pics de résonance des 7 clarinettes et de celles des deuxièmes pics de résonance à des fréquences divisées par 3 pour le doigté de La#3.

Références

- [1] A.H. BENAÏE AND M.I. IBISI. **Survey of impedance methods and a new piezo-disk-driven impedance head for air columns.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, **81** :1152, 1987. [9](#)
- [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. [29](#)
- [3] R. CAUSSÉ, J. KERGMARD, AND X. LURTON. **Input impedance of brass musical instruments - Comparison between experiment and numerical models.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, **75** :241, 1984. [9](#)
- [4] J.P. DALMONT. **Acoustic impedance measurement, part I : A review.** *Journal of sound and vibration*, **243**(3) :427–439, 2001. [9](#)
- [5] J.P. DALMONT. **Acoustic impedance measurement, part II : A new calibration method.** *Journal of sound and vibration*, **243**(3) :441–459, 2001. [9](#)
- [6] J.P. DALMONT, B. GAZENGEL, J. GILBERT, AND J. KERGMARD. **Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments.** *Applied acoustics*, **46**(1) :19–60, 1995. [23](#), [30](#)
- [7] J.P. DALMONT, C.J. NEDERVEEN, AND N. JOLY. **Radiation impedance of tubes with different flanges : Numerical and experimental investigations.** *Journal of sound and vibration*, **244**(3) :505–534, 2001. [11](#)
- [8] V. DEBUT, J. KERGMARD, AND F. LALOË. **Analysis and optimisation of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator.** *Applied Acoustics*, **66**(4) :365–409, 2005. [28](#)
- [9] C. FRITZ, S. FARNER, AND J. KERGMARD. **Some aspects of the harmonic balance method applied to the clarinet.** *Applied acoustics*, **65**(12) :1155–1180, 2004. [24](#), [25](#)
- [10] V. GIBIAT AND F. LALOË. **Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration (TMTC) method.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, **88** :2533, 1990. [9](#)
- [11] J. GILBERT, J. KERGMARD, AND E. NGOYA. **Calculation of the steady-state oscillations of a clarinet using the harmonic balance technique.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, **86** :35, 1989. [29](#)

- [12] J. KERGMARD AND A. CHAIGNE. **Acoustique des instruments de musique**, Belin, 2008. [10](#), [11](#), [20](#), [24](#), [29](#), [30](#)
- [13] J. KERGMARD AND X. MEYNIAL. **Systèmes micro-intervalles pour les instruments de musique à vent avec trous latéraux**. *J. Acoustique*, **1** :255–270, 1988. [28](#)
- [14] J.C. LE ROUX AND E. PORTIER. **Capteur d’impédance, manuel d’utilisation**, 2008. [39](#)
- [15] F. SILVA, P. GUILLEMAIN, J. KERGMARD, B. MALLARONI, AND A.N. NORRIS. **Approximation formulae for the acoustic radiation impedance of a cylindrical pipe**. *Journal of Sound and Vibration*, **322**(1-2) :255–263, 2009. [11](#)
- [16] T.H. WONNACOTT AND R.J. WONNACOTT. **Statistique**, 1990. [41](#)
- [17] W.E. WORMAN. *Self-Sustained Nonlinear Oscillations of Medium Amplitude in Clarinet-Like Systems*. PhD thesis, Case Western Reserve University, 1971. [29](#)