

Etude de la justesse de la clarinette

Dominique Rodrigues
Mémoire de stage de Master ATIAM année 2004-2005

Mars 2005 – juillet 2005
Université Pierre et Marie Curie
Ircam – Acoustique instrumentale

Responsables de stage:
René Caussé
Jean Kergomard



Table des matières

Introduction.....	5
1 Généralités.....	6
1.1 La justesse, définition.....	6
1.2 Seuil différentiel de tonie.....	7
1.3 Fréquences de jeu et fréquences de résonances.....	8
2 Justesse de la clarinette, confrontations expérimentales entre fréquences de jeu et fréquences de résonance.....	9
2.1 Justesse de la clarinette, point de vue des clarinettistes.....	9
2.2 Fréquences de résonance.....	9
2.3 Justesse de la clarinette, mesures avec la bouche artificielle.....	11
2.4 Justesse de la clarinette, influence du musicien.....	12
2.5 Synthèse et observations.....	14
3 Fréquence de jeu et paramètres de contrôle.....	16
3.1 Fréquence de jeu et nuance, point de vue des musiciens.....	16
3.2 Evolution de la fréquence de jeu avec la pression d'alimentation, résultat avec la bouche artificielle et un musicien.....	16
3.3 Rôle de l'anche sur la fréquence de jeu.....	18
3.3.1 Approche théorique.....	18
3.3.2 Estimation de la variation en fréquence due au débit d'anche et à l'amortissement... 19	19
3.4 Évolution de la fréquence avec la pression d'alimentation, effet de l'inharmonicité.....	21
3.5 Synthèse et observations.....	22
4 Fréquence de jeu et évolution temporelle.....	24
4.1 Méthode d'analyse temps-fréquence, passage par zéro.....	24
4.2 Analyse temps-fréquence, le transitoire d'attaque.....	25
4.3 Transition entre deux notes liées.....	26
4.4 Note tenue, analyse temps-fréquence.....	26
4.5 Synthèse, déductions et observations.....	27
Conclusion générale et perspectives.....	29
Annexes.....	31
A. Tablature chromatique de la clarinette.....	32
B. Quelques rappels théoriques.....	33
C. Mesures d'impédance.....	36
D. La bouche artificielle.....	39
E. Courbes de justesse pour différents musiciens et instruments.....	42
F. Rôle de l'anche dans la fréquence de jeu, analyse théorique.....	46
G. Courbes de l'évolution de la fréquence de jeu en fonction du temps.....	49
H. Evolution de la fréquence de jeu pour une note tenue.....	51
I. interview et enregistrement avec quelques clarinettistes.....	52

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Mrs René Caussé et Jean Kergomard, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage, pour l'encadrement et la confiance qu'ils m'ont accordé.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance aux clarinettistes Aude Richard, Joseph Arracic, Michel Arrigon, Guy Deplus et Florent Pujaila pour avoir pris le temps de répondre à mes questions et pour les enregistrements indispensables au bon déroulement de ce stage.

J'adresse enfin un grand merci à André Almeida, Mathias Demoucron, Claudia Fritz et Sylvie Benoit-Stanek pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont apporté, à Gérard Bertrand, et Alain Terrier pour leur conseils techniques, ainsi qu'au reste de l'équipe Acoustique Instrumentale pour leur sympathie et leur bonne humeur.

"Among the winds only the clarinet and horn can be given a favourable prognosis on the basis of their present state. The clarinet is almost as perfect as the violin"

Schoenberg, Style and Idea (selected writings, Univ. Of California Press, 1975, p.325)

Introduction

Selon les clarinettistes, la justesse de leur instrument est le point sensible qui sollicite leur attention. Ils s'agit là d'un problème important en situation d'orchestre, d'enregistrement de disque, les professionnels y sont confrontés tous les jours et y sont très sensibles. Ces questions ont souvent intéressé de nombreux auteurs comme J. Brymer qui, dans la référence [15], parle des principaux problèmes de justesse, avec des observations générales en fonction des notes et de l'évolution de ces problèmes. De façon générale, les clarinettistes sont d'accord pour dire que la clarinette n'est pas un instrument très juste. Malgré des améliorations, ils affirment que certains problèmes persistent, comme par exemple les notes graves jugées trop basses. Si on admet que les fréquences de jeu (FJ) sont données par les fréquences de résonance, des études approfondies effectuées par Vincent Debut [2] montrent que les défauts qui pourraient venir de l'existence même du trou de registre sont très bien compensés d'un point de vue des fréquences de résonance par l'effet des trous latéraux (ouverts et fermés) et par des changements de section introduits depuis longtemps par les facteurs. Néanmoins, le résonateur ne détermine pas à lui seul les fréquences de jeu (FJ), les paramètres d'embouchure jouent aussi un rôle très important.

Ce projet cherche à analyser et à confronter des études expérimentales dans le but de mettre en évidence certains problèmes de justesse et comprendre si possible leurs causes. Ainsi, nous avons eu la possibilité de rencontrer plusieurs clarinettistes dans le but de les enregistrer et de les interviewer. Parmi eux, Aude Richard, Guy Deplus, Florent Pujaila, Alain Damiens, Michel Arrignon et Joseph Arracic. Pour cette étude, deux clarinettes sont utilisées, une clarinette Yamaha CS et une clarinette Buffet-Crampon, cette dernière ayant déjà servi à l'étude [2]. Nous aborderons cette étude selon trois parties.

Après avoir fait un bref rappel sur des généralités, nous mettrons en évidence le rôle des musiciens concernant les fréquences de jeu. Nous essayerons de localiser certains problèmes de justesse, notamment ceux évoqués par les clarinettistes, et de comprendre leurs origines en effectuant des comparaisons avec des données issues de mesures d'impédance, de notes jouées par la bouche artificielle, ou par les instrumentistes cités ci-dessus.

Ensuite, nous nous intéresserons à décrire de manière théorique et expérimentale, un phénomène bien connu des musiciens: la baisse de la fréquence de jeu (FJ) lorsque le clarinettiste joue plus fort. Ce mode de jeu est un exemple de paramètre de contrôle influant sur la FJ, mais bien entendu, il n'est pas le seul. La théorie portera sur deux points, tout d'abord le rôle de l'anche sur ce phénomène puis celui de l'inharmonicité du résonateur.

Enfin, nous analyserons les variations de la FJ en cours de note. Pour cela, un outil d'analyse temps-fréquence a été développé. Des notes courtes et détachées seront analysées et, plus particulièrement, la variation de la FJ pour le transitoire d'attaque. Nous nous intéresserons ensuite aux transitions entre deux notes liées. Enfin nous étudierons l'évolution de la FJ pour une note tenue jouée de façon détachée. De ces analyses, nous espérons mettre en évidence des phénomènes pouvant induire une perception différente de la FJ.

Chapitre 1

1 Généralités

La clarinette en Sib est, parmi la famille des clarinettes, l'instrument le plus joué, et par conséquent, c'est sur cet instrument que la plupart des recherches se sont concentrées.

La clarinette en Sib est un instrument transpositeur, ainsi lorsque l'instrumentiste joue un Do, on entend en fait un Sib. Pour des raisons de simplicité, dans la suite de cette étude, tous les noms de notes seront donnés dans une référence en Sib, donc de clarinettiste. Le lecteur voulant se reporter à une référence en Ut, prendra le soin de transposer les notes un ton en dessous.

Le timbre si particulier de la clarinette s'explique en grande partie par ses caractéristiques physiques. En effet, si l'on considère une description très simple, le résonateur est considéré comme pratiquement cylindrique, ouvert au niveau de la première clé levée et fermé au niveau du bec. De ce fait, les fréquences propres du résonateur sont composées principalement d'harmoniques impaires [5]. Le deuxième registre correspond alors à une fréquence triple de celle du premier, on dit que la clarinette quintoye, contrairement à de nombreux instruments à vent (flûte, saxophone ..) dont le deuxième registre correspond à une fréquence double de celle du premier. Ce deuxième registre s'obtient en ouvrant une clé particulière appelée clé de douzième (douzième = octave + quinte).

Le passage au troisième registre (harmonique 5, fréquence quintuple) est assez difficile pour la clarinette mais néanmoins possible, en utilisant des doigtés particuliers. Ainsi, la tessiture de la clarinette couvre trois octaves et une sixte (Mi2 au Do6 en Sib). Dans le cadre de cette étude, on se limite aux deux premiers registres (Mi2 au Do5), le premier registre allant du Mi2 au La#3 et le deuxième registre du Si3 au Do5. Une tablature chromatique de la clarinette est en annexe A.

D'un point de vue physique, le modèle de la clarinette est décrit par trois équations, deux linéaires et une non-linéaire. Un rappel sur sa description théorique est disponible en annexe B.

1.1 La justesse, définition

Parler de justesse implique indéniablement de poser une référence. Dans notre cas, nous utiliserons naturellement la référence pour laquelle l'instrument a été conçu, c'est à dire la gamme tempérée. Dans ce système, le demi-ton tempéré est la moyenne géométrique des douze demi-tons naturels. Autrement dit, la fréquence de chaque note peut se calculer à partir de la fréquence d'une note référence.

$$f_n = f_0 * 2^{\frac{n}{12}} \quad (1.1)$$

f_n étant la fréquence recherchée, f_0 la fréquence de référence et n le nombre de demi-tons entre les deux fréquences.

Deux notes sont définies comme parfaitement justes lorsque la relation (1.1) est vérifiée. Ainsi on détermine l'écart relatif entre une note f_n et sa référence calculée à partir de f_0 par:

$$\Delta f_r = \frac{f_n - f_0 * 2^{\frac{n}{12}}}{f_0 * 2^{\frac{n}{12}}} \quad (1.2)$$

Au cours de cette étude, les résultats seront donnés en cents, le cent correspondant au centième du demi-ton tempéré $1 \text{ cent} = 5.78 \cdot 10^{-4}$.

$$\Delta f_r \text{ cents} = \frac{\Delta f_r}{5.78 \cdot 10^{-4}} \quad (1.3)$$

Ainsi, nous utiliserons régulièrement au cours de l'étude les équations (1.2) et (1.3) afin de calculer l'écart en terme de justesse pour chaque note de l'instrument par rapport à une fréquence référence qui, pour la clarinette, sera fixée à la fréquence du si3, il s'agit de la note d'accord de l'instrument.

1.2 Seuil différentiel de tonie

En psychoacoustique, la notion de hauteur est communément appelée tonie. Il s'agit de la sensation qui fait dire que le son est grave ou aigu. Dans la suite du projet, on s'intéressera aux sensations de justesse de la clarinette. Il nous est donc indispensable de définir un seuil de perception différentiel des intervalles, c'est-à-dire la plus petite différence de fréquence discernable.

L'oreille est capable de discerner de très petits intervalles en fréquence, mais ses performances dépendent essentiellement de la fréquence comme le montre le graphique suivant.

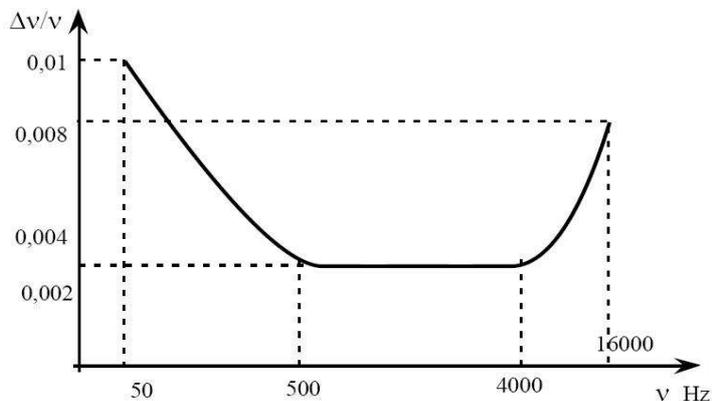


Fig 1.1: Seuil de détection de tonie

Les fréquences de jeu de la clarinette s'étendent de 147 Hz pour la note la plus grave jusqu'à 1000 Hz pour la note la plus aiguë du deuxième registre. Si l'on traduit en cents les valeurs du graphique on obtient environ 14 cents pour la note la plus grave, puis 5 cents entre 500 Hz et 4000 Hz.

Ces performances dépendent bien sûr de chaque individu et peuvent s'améliorer pour des musiciens expérimentés. Ces valeurs sont valables pour des signaux sinusoïdaux. Or les sons de clarinettes sont bien plus complexes. Il est donc probable que ces performances soient différentes.

Quoi qu'il en soit, il ne s'agit pas de donner des valeurs précises, mais plutôt d'avoir une idée de ce seuil de détection. Ces valeurs pourront orienter nos conclusions dans les études de justesse qui vont suivre.

1.3 Fréquences de jeu et fréquences de résonances

Il convient également de préciser deux termes utilisés dans la suite du rapport, les fréquences de jeu (FJ) et les fréquences de résonances.

Les fréquences de résonances également appelées fréquences propres, sont déterminées par les caractéristiques physiques du tuyau, l'impédance d'entrée (cf courbe annexe C). La hauteur des pics de l'impédance d'entrée décroît grosso modo comme la racine carrée de la fréquence, ceci étant principalement dû aux pertes visco-thermiques. Les pics ne sont pas parfaitement harmoniques, comme le montrent les mesures d'impédances effectuées sur les clarinettes. Cette inharmonicité est principalement due aux trous latéraux fermés et ouverts permettant la production des différentes notes, et à la dispersion due aux effets visco-thermiques. D'autres caractéristiques participent à l'inharmonicité, comme les variations de la perce, ou le gradient de température à l'intérieur du tuyau. Vincent Debut a analysé l'effet de chaque paramètre dans le cadre de sa thèse [1], et a montré que chaque effet se compense.

La FJ obtenue lorsque le musicien joue (ou avec la bouche artificielle) diffère des fréquences propres du résonateur. En effet, chaque musicien dispose d'effets, de modes de jeu afin de produire différentes formes d'expressions. Ces modes de jeu ont pour but de faire varier les caractéristiques du son comme le timbre, les nuances mais également la FJ. Les explications physiques à ces effets sont parfois difficiles, néanmoins certaines études ont porté sur ces questions.

On note tout d'abord tous les effets d'embouchure. Les musiciens savent qu'il est possible de faire monter légèrement la hauteur d'une note en pinçant un peu sur l'anche, au détriment d'une certaine « acidité » du son, à défaut d'un contrôle minutieux. On peut également mentionner le rôle du conduit vocal, sujet extrêmement compliqué sur lequel a travaillé Claudia Fritz dans le cadre de sa thèse [3]. La position de la langue ou la forme de la bouche, peut également jouer un rôle pour favoriser certains harmoniques et créer ainsi quelques effets exotiques comme les sons doubles.

La variation de la pression d'alimentation provoque une modification de la FJ, ce phénomène est bien connu des musiciens, il est très souvent gênant. L'article de J. Kergomard, S. Ollivier et J. Gilbert [6] aborde cette question, dans le chapitre 3 on s'attachera à poursuivre l'étude avec des confrontations expérimentales. Les caractéristiques de l'anche sont également à prendre en compte pour déterminer cette FJ, l'effet est difficile à évaluer, néanmoins nous essayerons d'y réfléchir toujours dans ce chapitre.

Tout ceci montre que les liens entre les fréquences de résonance et les FJ ne sont pas immédiats. Dans le chapitre qui suit, nous nous efforcerons de montrer expérimentalement ces différences et de réfléchir aux questions de justesse de la clarinette.

Chapitre 2

2 Justesse de la clarinette, confrontations expérimentales entre fréquences de jeu et fréquences de résonance

La clarinette est un système mécanique complexe, les trous latéraux, les irrégularités de la perce et d'autres paramètres physiques participent aux problèmes de justesse. Bien entendu, les musiciens sont conscients de ces problèmes, ils y sont très sensibles et participent par leur mode de jeu à leurs corrections. Parmi ces problèmes, il en est un que les clarinettes mentionnent plus régulièrement, il s'agit des notes graves jugées basses si l'on se réfère aux interviews effectuées par Vincent Debut dans le cadre de sa thèse [1], ou à la référence [15]. On se propose dans ce chapitre de compléter ces remarques à l'aide de mesures effectuées avec la bouche artificielle et avec des musiciens.

2.1 Justesse de la clarinette, point de vue des clarinettes

Les musiciens s'accordent à dire que la clarinette n'est pas un instrument parfaitement juste. Pour eux, les problèmes de justesse sont localisés surtout sur les notes graves, le mi₂, fa₂, fa₂# et sol₂. Néanmoins, on note que les plaintes reviennent plus souvent sur le fa₂, évoquant notamment le début du Deuxième Concerto de Weber. Par conséquent, les rapports entre douzièmes sont également jugés faux pour les notes en question. Les notes de gorge (ré₃ jusqu'au la₃#) sont également délicates au niveau de la justesse, toutefois les propos sont parfois confus entre justesse et timbre, la frontière entre ces deux notions est parfois mal définie pour l'oreille humaine comme l'a fait remarquer Guy Deplus (cf. Annexe I). Ainsi, pour les clarinettes, les problèmes de justesse reviennent souvent sur les mêmes notes avec une variation plus ou moins grande selon les instruments.

Lorsque l'on parle de corrections, les musiciens ne proposent pas de méthodes totalement efficaces pour l'ensemble des notes. Bien que de nombreuses techniques existent, ils mentionnent le rôle du conduit vocal, l'ouverture de l'anche, la position de la langue ou encore des doigtés spéciaux. Ils font remarquer que parfois, il est impossible de corriger de façon optimale, et ceci est plus particulièrement vrai pour les notes graves.

Ces remarques rejoignent celles faites par Vincent Debut dans sa thèse [1], et il montre dans un article [2] rédigé à la suite, que les problèmes de justesse concernant les notes graves ne peuvent être expliqués avec les caractéristiques du résonateur, c'est à dire ces fréquences de résonance.

2.2 Fréquences de résonance

Les fréquences de résonance sont déterminées par les pics de l'impédance du résonateur. Cette quantité relie la pression dans le tuyau avec le débit d'air (cf annexe B, quelques rappels théoriques). Nous avons utilisé les mesures d'impédance pour la clarinette Buffet-Crampon effectuées par Vincent Debut pendant sa thèse. Néanmoins, les mesures d'impédance d'entrée étant manquantes

pour la clarinette Yamaha CS, nous avons utilisé le nouveau système de mesure d'impédance développé à l'IRCAM par E. Mevellec et R. Mocaer pour les réaliser. Le bec fut également pris en compte à la différence des mesures de Vincent Debut qui remplace le bec par un cylindre de volume équivalent. Les différences entre les deux méthodes sont discutées dans la référence [16]. De cette façon, nous espérons obtenir un maximum de précision concernant l'ensemble du résonateur. Les résultats ainsi qu'un commentaire plus détaillé, concernant le dispositif, les sources d'incertitude et les méthodes d'analyse sont disponibles en annexe C.

A partir des mesures d'impédance, on extrait donc ces fréquences dans le but de vérifier que la clarinette Yamaha CS répond bien aux mêmes conclusions que la Buffet-Crampon dans la référence [2], c'est-à-dire vérifier que les notes graves ne montrent pas de premiers modes bas par rapport au reste de la clarinette.

La méthode d'analyse prend pour référence le système tempéré (chapitre 1). A partir de la fréquence du si3 on calcule la fréquence théorique dans le système tempéré d'une note à étudier. On détermine alors l'écart relatif entre cette fréquence calculée et la fréquence expérimentale de la note en question.

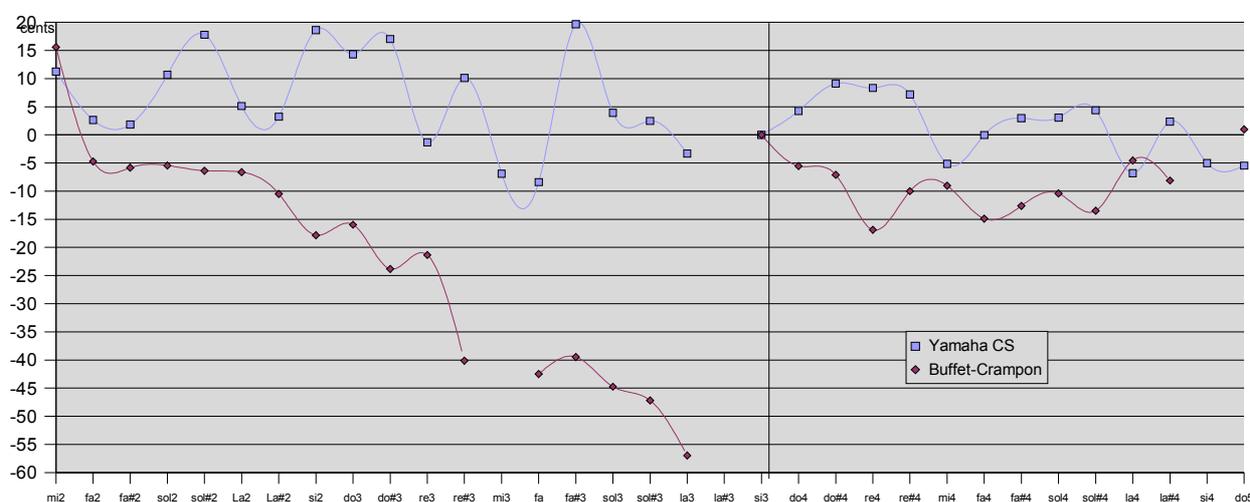


Fig 2.1: Ecart relatif en cents dans le système tempéré des fréquences de résonance de chaque doigté par rapport à la fréquence du si3. Les fréquences en question sont celles des premiers modes de chaque note pour le premier registre, et des deuxièmes modes de chaque note pour le deuxième registre (douzièmes).

Avant tout il convient de donner une précision sur la représentation choisie. Les courbes continues de la figure 2.1 et des figures à venir n'ont aucune signification, seuls les points représentent des valeurs cohérentes. Ces courbes ont juste pour objectif de donner une meilleure visualisation.

En regardant les courbes de la figure 2.1, nous pouvons faire une première remarque générale. Si on considère cette méthode d'analyse, les deux clarinettes sont relativement différentes. En effet, on observe une dispersion des points plus importante pour la Buffet-Crampon, et plus particulièrement, lorsque le résonateur est court pour le premier registre. Ces observations confirment bien les conclusions de Vincent Debut, on ne peut pas dire que les notes graves de la clarinette sont basses si on considère les premiers modes du résonateur. En effet, seule la clarinette Buffet-Crampon présente quelques notes graves basses mais, néanmoins, au-dessus du seuil différentiel de détection de tonie définie dans le chapitre 1.

Il est donc indispensable d'aller plus loin dans le raisonnement et faire l'analyse cette fois sur les

fréquences de jeu. Pour cela, deux solutions s'offrent à nous: l'utilisation de la bouche artificielle ou encore faire jouer les instruments par des musiciens. Pour commencer analysons les résultats issus de la bouche artificielle.

2.3 Justesse de la clarinette, mesures avec la bouche artificielle

On souhaite observer le comportement vis à vis de la FJ pour les deux clarinettes sans l'influence du musicien. On utilise donc la bouche artificielle MIAM (Multi Instrument Artificial Mouth) mise au point à l'IRCAM. Un descriptif détaillé sur son fonctionnement est disponible en annexe D. Pour des raisons pratiques, expliquées en annexe D, les prises de son se font directement à l'intérieur du barillet, on extrait alors les FJ de ces acquisitions.

Dans ce qui suit, on présente de la même façon que pour le paragraphe précédant la justesse de chaque instrument par rapport au si3 joué avec la bouche artificielle sans conduit vocal. Les données sont représentées pour trois nuances, piano, mezzo-forte et forte. Il faut noter que ces nuances sont relatives, les réglages étant plus difficiles pour les faibles niveaux, la nuance piano obtenue avec la bouche artificielle est bien plus forte que celle obtenue avec un musicien. Pour chaque acquisition, la pression d'alimentation est donnée à titre indicatif avec une précision de 0.05 kPa.

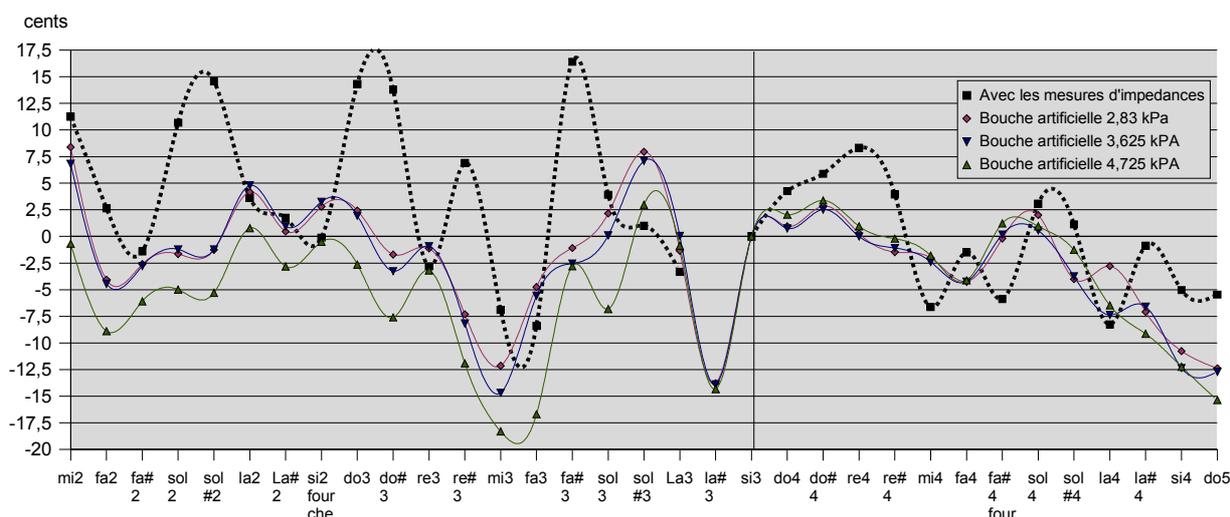


Fig 2.2: Clarinette Yamaha CS:, comparaison entre les données issues des fréquences propres et les données issues de mesures de justesse des fréquences de jeu avec la bouche artificielle.

La figure 2.2 nous apprend davantage à propos des différences entre FJ et les premières fréquences de résonance du résonateur. On observe quelques fluctuations pour le premier registre, pour le deuxième registre les valeurs sont plus cohérentes. L'étude des FJ (issues de la bouche artificielle) montre quelques notes de gorge particulièrement basses comme le mi3, le fa3 ou le la#3. Parmi les notes graves, le fa2 est la note la plus basse, néanmoins on ne mesure que -4 cents pour une pression d'alimentation faible ou moyenne, et -9 cents pour une pression d'alimentation forte. Le seuil de détection de hauteur est d'environ 13 cents pour le grave. Autrement dit, ces observations ne confirment pas les commentaires des musiciens concernant les notes graves. L'étude des FJ à plusieurs niveaux d'intensité confirme un effet connu des musiciens, c'est-à-dire la baisse de la hauteur lorsqu'on augmente la pression d'alimentation pour les notes graves. Nous reviendrons plus en détail sur ce phénomène dans le chapitre 3.

Observons à présent le comportement de la clarinette Buffet-Crampon vis à vis des fréquences de

jeu avec la bouche artificielle.

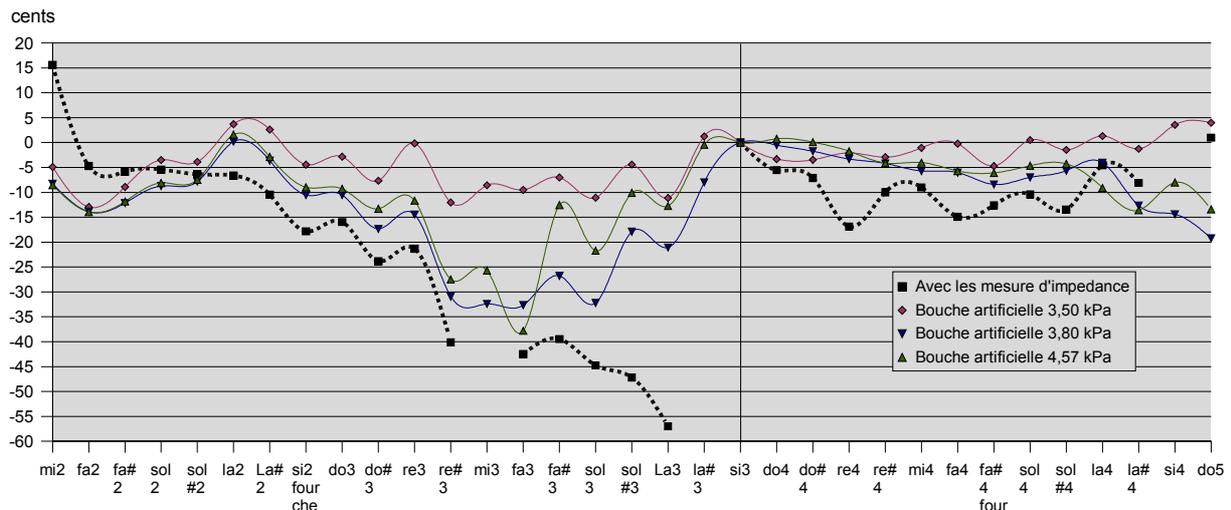


Fig 2.3: Clarinette Buffet-Crampon:., comparaison entre les données issues des fréquences propres et les données issues de mesures de justesse des fréquences de jeu avec la bouche artificielle.

La figure 2.3 révèle un phénomène assez inattendu, en effet on observe un écart très important entre les deux types de données pour les notes de gorge (tuyau court), alors que pour les autres notes, les courbes sont cohérentes entre elles. Ceci nous mène à penser que les valeurs issues des mesures d'impédance ne sont pas correctes. Les incertitudes sont au niveau de la méthode d'analyse, en effet, les mesures de Vincent Debut ont une faible précision, l'interpolation des pics d'impédance par des lorentziennes n'est donc pas adaptée. Malheureusement ceci a été découvert un peu tardivement, les analyses seront refaites dans les jours qui viennent. On peut néanmoins continuer notre analyse sur les FJ.

Concernant les notes graves de la clarinette Buffet-Crampon vis à vis des FJ, les conclusions sont les mêmes que pour la clarinette Yamaha. On mesure un écart maximum de -14 cents pour le fa2 par rapport au si3 quelque soit la nuance. Cet écart est tout juste perceptible si on considère le seuil de détection de tonie fixé, par conséquent on ne peut pas affirmer que les fréquences de jeu de la bouche artificielle sont très basses pour les notes graves.

Les observations faites avec la bouche artificielle ne confirment pas les commentaires des musiciens concernant les notes graves. Il nous est donc indispensable d'analyser les FJ des clarinettes jouées par des musiciens afin de vérifier si le phénomène est introduit par leur mode de jeu.

2.4 Justesse de la clarinette, influence du musicien

Après s'être assuré de la reproductibilité des mesures en terme de justesse pour deux musiciens (cf courbes de reproductibilité de justesse en annexe E), on présente de la même façon la justesse des FJ pour chaque note extraite d'une gamme chromatique. L'analyse est faite au début de chaque son de façon à ne pas prendre en compte les corrections éventuelles des instrumentistes, de même les transitoires des sons ne sont pas pris en compte, nous traiterons cette question dans le chapitre 5. Il faut noter que les musiciens ne connaissaient pas les clarinettes, cependant, chacun a néanmoins disposé de quelques minutes afin de les essayer et bien entendu pour chauffer l'instrument. Ce dernier point fut estimé dans la référence [2]. Les auteurs montrent que pour un gradient de température linéaire dans le résonateur, l'effet sur l'inharmonicité entre les deux premiers modes peut être évalué entre cinq et dix cents sur l'ensemble de la tessiture.

Examinons dans un premier temps la justesse de la clarinette Yamaha CS vis-à-vis des FJ avec deux musiciens.

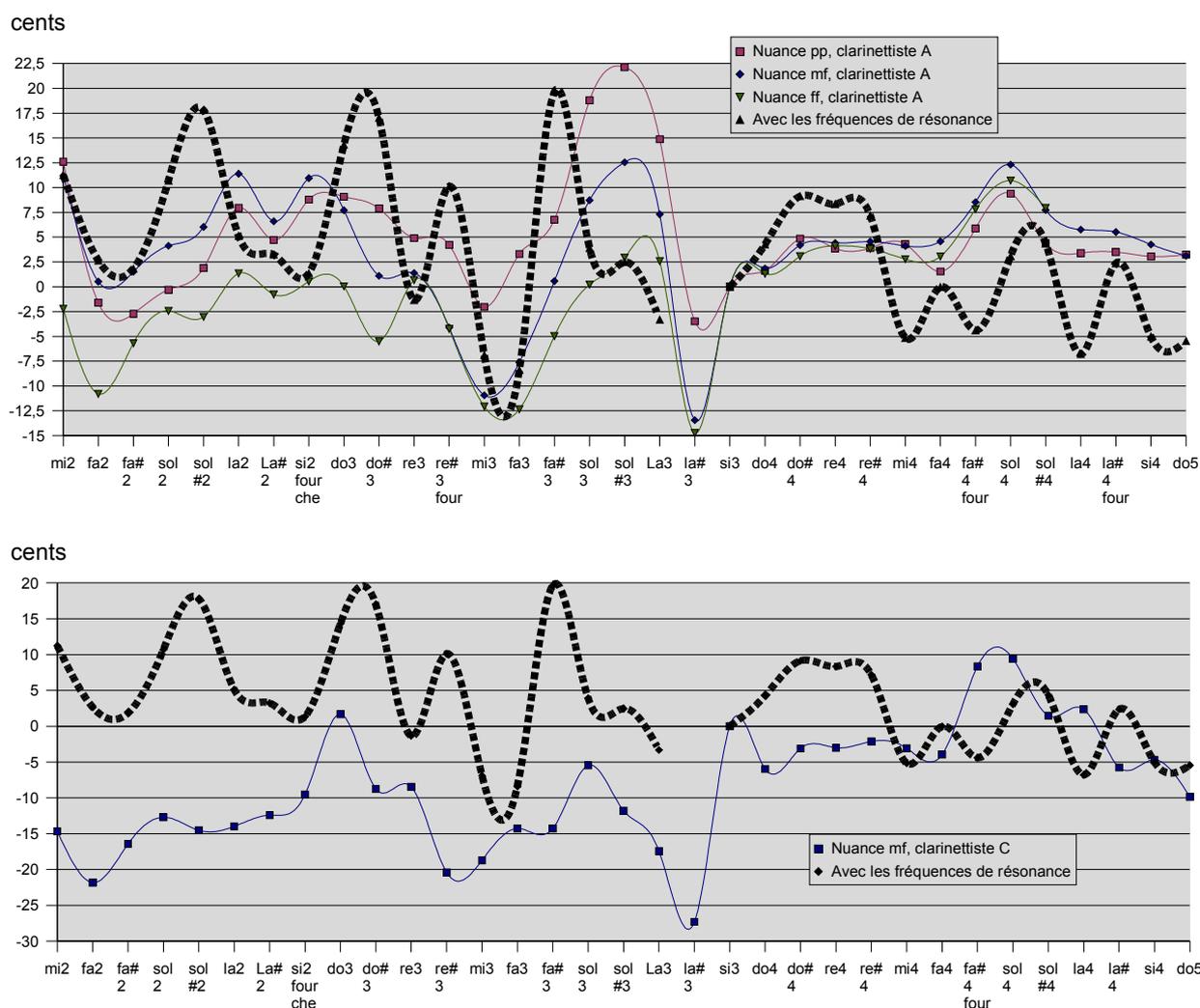


Fig 2.4: Justesse de la clarinette Yamaha CS, comparaison entre les données issues des fréquences propres des mesures d'impédance et les données issues des fréquences de jeu pour les clarinettistes A et C

La figure 2.4 montre deux échantillons représentatifs des courbes de justesse en terme de fréquence de jeu disponibles en annexe E. En analysant ces courbes, on distingue clairement des disparités entre musiciens. On devine néanmoins quelques tendances similaires, mais à échelle différente. Concernant le grave, on discerne deux types de populations, une où les notes graves ne sont pas basses (clarinettiste A et B) et l'autre où au moins une note des graves est basse (clarinettiste C et D), (cf annexe E pour les courbes des clarinettistes B et D). On constate d'ailleurs que la note la plus basse dans le grave est toujours le Fa2, quelque soit le clarinettiste.

Observons à présent le comportement de la clarinette Buffet-Crampon vis à vis des fréquences de jeu pour les mêmes musiciens.

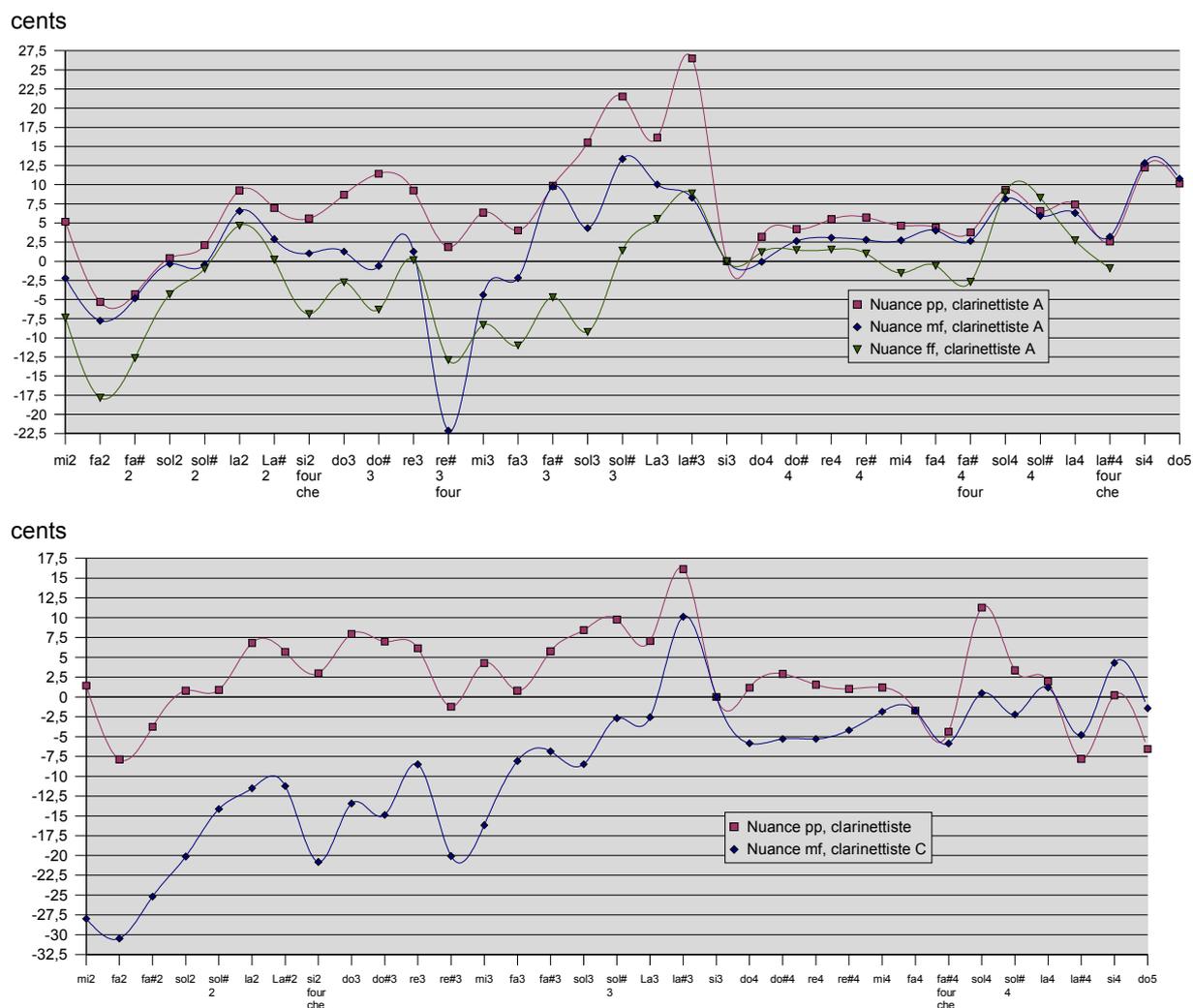


Fig 2.5: Justesse de la clarinette Buffet-Crampon en terme de fréquences de jeu pour les clarinettes A et C

La figure 2.5 montre que pour les notes graves, les observations rejoignent celles faites pour la clarinette Yamaha CS. Globalement les clarinettes C et D (cf annexe D pour le musicien D) ont tendance à jouer les notes graves basses de façon perceptible à partir d'une certaine nuance.

2.5 Synthèse et observations

De ces analyses nous pouvons déduire quelques notions très importantes. La première étant que les fréquences de résonance du résonateur diffèrent des fréquences de jeu suivant les notes, à la fois pour la bouche artificielle et les instrumentistes. Du point de vue de la justesse, on remarque que les fréquences de jeu aboutissent à une meilleure homogénéité. En effet, les écarts entre les notes sont plus faibles comparés aux écarts entre les fréquences de résonance. Ceci est encore plus net lorsque les instruments sont joués par des musiciens. Même si, globalement, les principaux problèmes de justesse se concentrent dans les notes de gorge (mi3-la#3), cette étude montre que les problèmes ne vont pas forcément dans le même sens lorsque l'on compare les instruments. Un point commun semble néanmoins se détacher, le Fa2 est toujours plus bas que ses plus proches voisins, ce qui irait dans le sens des remarques des clarinettes. Néanmoins, l'écart est imperceptible pour les fréquences propres, les fréquences de jeu avec la bouche artificielle et certains musiciens. A part ces quelques points, les clarinettes semblent bel et bien différentes et il n'est pas possible de donner plus de précisions sur d'éventuels comportements similaires. Il faut néanmoins admettre qu'il s'agit là de

deux clarinettes de conceptions réellement différentes, une étant française et très ancienne (Buffet-Crampon) et l'autre japonaise (Yamaha).

Pour en revenir à la question des notes graves, les analyses montrent que la réponse à ce problème n'est pas simple. Sans vouloir remettre en cause les dires des musiciens, il existe une contradiction entre les témoignages et les analyses de justesse. Dans ces conditions, plusieurs questions peuvent être posées: pourquoi seuls certains clarinettes jouent les notes graves basses et, malgré ces observations, pourquoi tous les clarinettes s'en plaignent. Il est évident que la réponse ne pourrait être apportée que par des tests psychoacoustiques complémentaires.

Ces analyses révèlent également un autre effet dont nous avons peu parlé et qui est bien connu des clarinettes. Il s'agit de l'évolution de la fréquence avec la nuance. Les figures 2.2 à 2.4 montrent assez bien un décalage vers le grave de chaque note lorsque l'on joue plus fort, et ceci d'autant plus pour le premier registre. Dans le chapitre qui suit nous essayerons de donner une explication théorique à ce phénomène.

Chapitre 3

3 Fréquence de jeu et paramètres de contrôle

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les FJ diffèrent des fréquences propres du résonateur. Les causes de ces différences sont nombreuses, les paramètres d'embouchure, les caractéristiques de l'anche ou encore l'effet de la résistance acoustique de chaque trou [2] participent à ces variations.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à un effet bien connu des clarinettistes, la baisse de la fréquence de jeu lorsque l'on augmente la nuance. Une étude bibliographique [6], [9], [13] a montré que cet effet peut être lié à deux phénomènes. Le premier étant dû à l'amortissement de l'anche et le second à l'inharmonicité de l'instrument. Dans ce qui suit, nous développons ces deux points dans l'espoir d'obtenir des cohérences entre théorie et expérience. Mais avant tout, faisons une brève synthèse de ce que disent les clarinettistes à propos du sujet.

3.1 Fréquence de jeu et nuance, point de vue des musiciens

Tous les clarinettistes sont d'accord sur le fait que: la justesse de l'instrument est liée à la nuance, la clarinette a tendance à monter quand on joue piano et à descendre quand on joue fort, ceci de façon générale pour toutes les clarinettes. Certains musiciens disent que cet effet est variable selon les notes, et qu'il peut dépendre également de la nature du bec comme le fait remarquer Guy Deplus. D'autre part, il serait imprudent de penser que la pression dans la bouche est le seul paramètre de contrôle de la nuance. En effet, Florent Pujaila fait remarquer que pour un musicien, les variations de nuances s'accompagnent également de modifications au niveau des paramètres d'embouchure comme par exemple, l'ouverture de la pince de l'embouchure.

Néanmoins, pour simplifier l'étude, on ne prend en compte que la pression d'alimentation. Essayons dans un premier temps de quantifier cet effet en utilisant les FJ de la bouche artificielle.

3.2 Evolution de la fréquence de jeu avec la pression d'alimentation, résultat avec la bouche artificielle et un musicien

Un capteur de pression fut adapté sur la bouche artificielle afin d'enregistrer la pression d'alimentation. Nous avons enregistré pour quelques notes le signal de pression dans le résonateur tout en faisant varier la pression d'alimentation.

Pour les comparaisons théoriques à venir, nous devons présenter les résultats en fonction de la pression d'alimentation sans dimension $\gamma = p_m / p_M$. Il nous est donc indispensable de mesurer la pression de placage statistique P_M (cf annexe A). Elle correspond à une pression d'alimentation forte entraînant le placage de l'anche sur la table du bec. Elle est directement proportionnelle à l'ouverture de l'anche H , les mesures ne sont donc valables que pour une configuration donnée.

Bien que l'ouverture H soit maintenue constante pendant les acquisitions, on mesure néanmoins une légère variabilité en fonction de la note jouée. Cette erreur est sûrement introduite par la manipulation de la clarinette lorsque l'on fait les doigtés. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau 3.1.

note	mi2	sol3	si3	sol4
$P_M \pm 0.1 \text{ kPa}$	6,6	6,2	5,7	6

Tableau 3.1: Pression de placage statique pour 4 notes, mesures issues de la bouche artificielle

Dans ce qui suit, on se limite à deux notes du premier registre, le mi2 (tuyau long) et le sol3 (tuyau court).

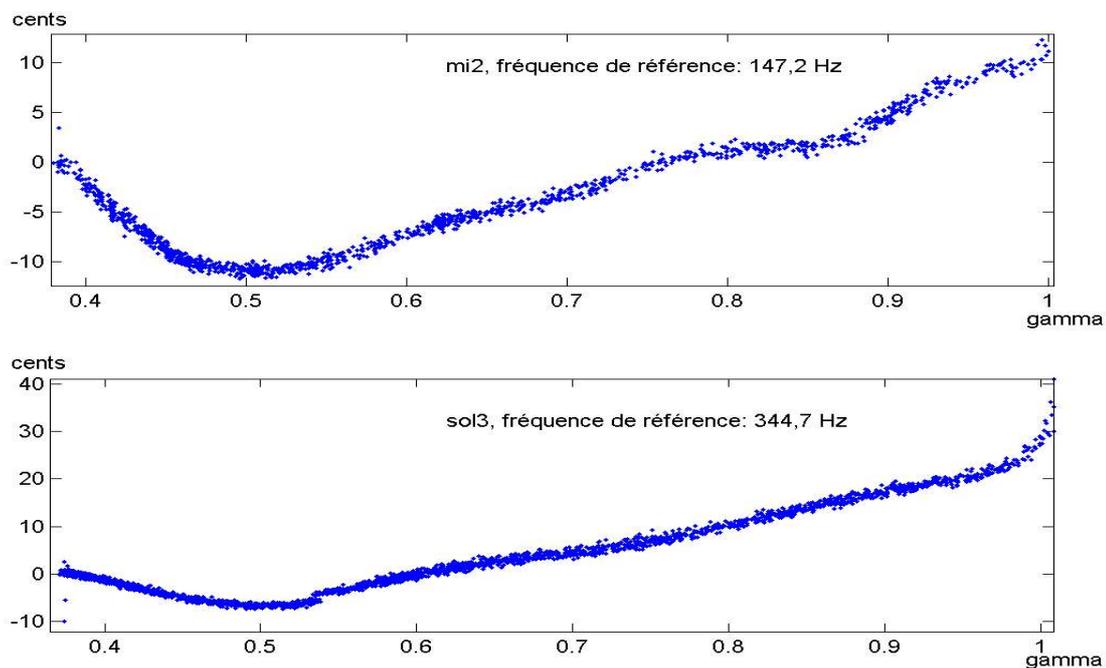


Fig 3.1: Evolution de la fréquence de jeu pour deux notes de la clarinette Yamaha CS jouée avec la bouche artificielle en fonction de la pression d'alimentation sans dimension (cf annexe B), la fréquence de référence est celle de la pression de seuil.

Pour les deux notes étudiées, la figure 3.1 révèle deux zones bien distinctes. La fréquence de jeu diminue pour une pression d'alimentation comprise entre la pression de seuil et $\gamma=0.5$, puis elle augmente jusqu'à la pression de placage statique $\gamma=1$.

Les musiciens interviewés disent que la fréquence de jeu descend à chaque fois que l'on augmente la nuance, autrement dit la deuxième partie des courbes de la figure 3.1 n'est pas observée. Ces commentaires sont confirmés si on observe les figures de l'annexe D, mais pour mieux visualiser cet effet, une acquisition fut effectuée en plaçant un capteur de pression dans la bouche d'un musicien, la sonde était suffisamment fine pour ne pas le gêner. La figure 3.2 montre l'évolution de la fréquence de jeu en fonction de la pression d'alimentation lorsque le musicien passe d'une nuance piano à une nuance fortissimo.

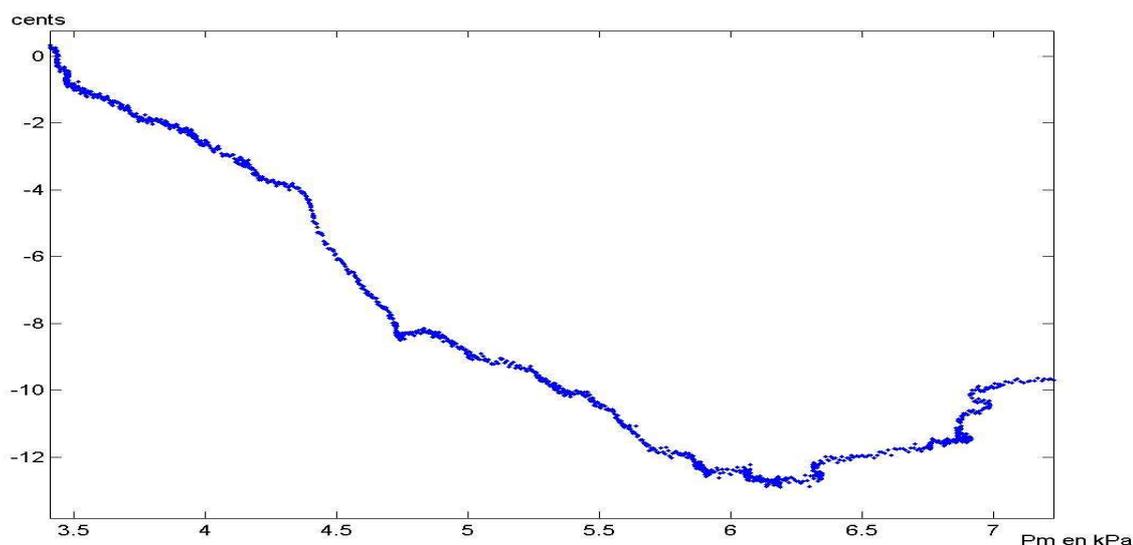


Fig 3.2: Evolution de la fréquence de jeu pour un *mi*2 en fonction de la pression d'alimentation pour le musicien E lorsqu'il passe d'une nuance *pianissimo* à une nuance *fortissimo* (fréquence de référence: 146,1 Hz)

La pression de placage statique n'a pu être mesurée pour des raisons pratiques évidentes, néanmoins en comparant les pressions d'alimentation mises en jeu avec la pression de placage statique du tableau 3.1, il semble évident que le musicien change un ou plusieurs paramètres pendant la phase de crescendo, le plus probable étant l'ouverture de l'anche.

Des études théoriques ont montré que la baisse de la fréquence de jeu pouvait être décrite par deux théories complémentaires. La première étant dû au débit et à l'amortissement de l'anche et la seconde à l'inharmonicité de l'instrument. Dans ce qui suit, nous développons ces deux points dans l'espoir d'obtenir des cohérences entre théorie et expériences.

Analysons dans un premier temps l'effet lié au débit et à l'amortissement de l'anche afin d'en déduire une estimation.

3.3 Rôle de l'anche sur la fréquence de jeu

La caractérisation physique d'une anche de clarinette n'est pas évidente, principalement en raison de la difficulté à reproduire les expériences. En effet, la dispersion des paramètres est souvent très importante entre deux anches de même marque et de même force. Les études sur le rôle de l'anche sont par conséquent peu nombreuses, néanmoins, celles existantes présentent des conclusions très intéressantes. Concentrant notre étude sur le rôle de l'anche vis à vis de la fréquence de jeu, dans un premier temps nous présenterons la théorie existante, puis nous donnerons une estimation de l'effet avec une comparaison entre théorie et nos propres mesures.

3.3.1 Approche théorique

Le rôle de l'anche dans les caractéristiques du son de clarinette fût introduit pour la première fois par Worman [8] afin d'aborder la question de l'amplitude et du spectre des oscillations. Dans la référence [9], Kergomard et Gilbert discutent de ces effets sur la FJ introduits par le débit d'anche et son amortissement. On ne présente ici que leur conclusion afin de se concentrer sur l'estimation de la variation en fréquence selon les caractéristiques de l'anche. Une description détaillée des calculs

figure en annexe F.

En partant des équations classiques qui décrivent le modèle de la clarinette (cf annexe B), les auteurs introduisent le débit d'anche sous forme d'une correction de longueur agissant comme un petit volume ajouté [10], [8]. Ils traitent alors le problème de façon conventionnelle par équilibrage harmonique en faisant l'approximation du premier harmonique. Ils déduisent une équation caractéristique décrivant le fonctionnement du système clarinette + anche. (équation F.7) Ils déduisent de cette équation diverses perturbations pour la variation en fréquence relative à la fréquence $c/4L$. Cette variation est décrite par l'équation (3.1).

$$\frac{\Delta F}{F} = -\frac{\Delta l}{L} - \frac{\zeta q}{3^{1/2} k_r L} \left[1 + \frac{3}{4} (\gamma - \gamma_{th}) \right] \quad (3.1)$$

Avec :

Δl la correction de longueur liée au débit d'anche.

L la longueur du tuyau.

ζ un paramètre d'embouchure (cf annexe A).

q l'inverse du facteur de qualité de l'anche.

$k_r = 2\pi f_r / c$ et f_r la fréquence de résonance de l'anche

γ la pression d'alimentation sans dimension (cf annexe A)

γ_{th} la pression de seuil, c'est à dire la pression minimum nécessaire pour exciter le résonateur.

En raison des hypothèses, l'équation (3.1) est valable pour une pression d'alimentation comprise entre la pression de seuil γ_{th} et $\gamma=0.5$. Elle montre deux termes caractéristiques, le premier est lié au débit d'anche et le second est lié à l'amortissement de l'anche, ce dernier est fonction de la pression d'alimentation.

3.3.2 Estimation de la variation en fréquence due au débit d'anche et à l'amortissement

Le terme lié au débit d'anche est une simple correction de longueur, il est inversement proportionnel à la longueur du résonateur. La correction de longueur Δl fut évaluée dans l'article [10] à partir de mesures de seuils déterminées à l'aide d'une bouche artificielle. Les auteurs montrent que ce paramètre varie très peu en fonction des doigtés, il fut estimé à $\Delta l = 5 \text{ mm}$.

L'estimation du terme lié à l'amortissement de l'anche nécessite l'évaluation de nombreux paramètres. La tâche est rendue difficile à cause de la fluctuation de ces paramètres d'une configuration de jeu à une autre. En effet les termes ζ , q , k_r et γ_{th} dépendent de l'embouchure et de l'anche.

Évaluons tout d'abord le terme ζ (défini en annexe A) caractérisant l'embouchure du musicien.

$$\zeta = \frac{\rho c}{S} w H \sqrt{\frac{2}{\rho p_M}}$$

Avec:

$\rho = 1.29 \text{ kg.m}^{-3}$ la masse volumique de l'air

$c = 343 \text{ m.s}^{-1}$ la célérité du son dans l'air à température ambiante

$S = 177 \text{ mm}^2$ la section à la sortie du bec de clarinette

$w = 12.9 \text{ mm}$ la largeur de l'anche

La longueur H représente l'ouverture de l'anche au repos, elle varie donc en fonction des configurations. Il existe une technique à base de photographie pour mesurer cette ouverture, néanmoins, pour des raisons pratiques, ceci n'a pas été fait, (Bien entendu, nous y reviendrons si une valeur précise s'avère indispensable). Nous utiliserons donc une valeur en accord avec les résultats trouvés dans la bibliographie. Dans [3] Claudia Fritz mesure ce paramètre pour sa configuration entre $0.39 \pm 0.02 \text{ mm}$ et $0.49 \pm 0.02 \text{ mm}$. Schumacher estime ce paramètre dans [11] pouvant varier entre 0.3 mm et 0.4 mm . D'après l'équation (3.1), la variation en fréquence est maximum pour une ouverture H grande. Pour commencer, nous utiliserons donc la valeur $H = 0.5 \text{ mm}$.

Enfin, les pressions de placage statique P_M sont données dans le tableau 3.1.

On considère l'anche de la clarinette comme étant un système masse-ressort, dans ces conditions on définit l'inverse du facteur de qualité avec $q = g_r / (2 \pi f_r)$.

Le facteur d'amortissement de l'anche g_r dépend principalement de la force exercée par lèvre inférieure du musicien alors que la fréquence de résonance de l'anche f_r tient principalement de ses dimensions et de sa nature. Une méthode, proposée par Worman dans [8], permet la détermination de ces deux paramètres. En plaçant un doigt sur l'anche pour simuler la lèvre, on mesure sa réponse en oscillations libres à l'aide d'un capteur très sensible. L'impulsion est donnée en frappant au centre de l'anche avec un crayon muni d'une gomme. Bien que ses résultats soient tout à fait cohérents et acceptés de tous, nous avons refait cette expérience pour deux raisons. Car, contrairement à Worman, nous utilisons une anche synthétique de marque « Légère » dont les paramètres sont inconnus, et une meilleure approximation serait obtenue en effectuant directement les mesures avec non pas le doigt mais une lèvre en latex provenant de la bouche artificielle. Nous avons effectué ces mesures sur différents types d'anches afin d'avoir un critère de comparaison.

	Anche synthétique légère	Anche roseau humide, Vandoren, force 3	Anche roseau sèche, Vandoren, force 3
Fréquence de résonance en Hz	1566	1567	1562
Ecart type de la fréquence de résonance en Hz	65	20	23
Facteur d'amortissement en 1/s	1251	1223	1093
Ecart type du facteur d'amortissement en 1/s	203	289	159

Tableau 3.2: Mesures des fréquences de résonance et facteur d'amortissement pour trois anches différentes, les statistiques sont faites sur 9 mesures.

Analysons les valeurs du tableau 3.2. La fréquence de résonance est relativement précise en terme de dispersion des résultats. Néanmoins pour les anches en roseau, elles sont légèrement en dessous des valeurs présentes dans la bibliographie. En effet dans la référence [12], les auteurs mesurent une fréquence de résonance variant entre 11700 et 1890 Hz pour une anche en roseau humide (la valeur 1700 Hz est associée à une anche de très bonne qualité).

En ce qui concerne le facteur d'amortissement, les différentes acquisitions ont montré de grandes fluctuations, ce qui entraîne un écart type très élevé. Nos valeurs sont très en dessous du facteur

d'amortissement que propose Worman, $g_r = 2906 \text{ s}^{-1}$. Néanmoins, notre expérience, comme celle de Worman, montre une source d'incertitude non négligeable. En effet le facteur d'amortissement dépend directement de la pression exercée par les lèvres sur l'anche, et de la surface de contact. Un dispositif permettant le contrôle précis de ces deux paramètres serait nécessaire pour plus de précision.

Les paramètres nécessaires pour calculer la pression de seuil γ_{th} sont connus (cf annexe E pour plus de précision). Nous ne prenons en compte que le terme dû à l'amortissement de l'anche de l'équation (3.1) dans la mesure où celui du débit d'anche ne dépend pas de la pression.

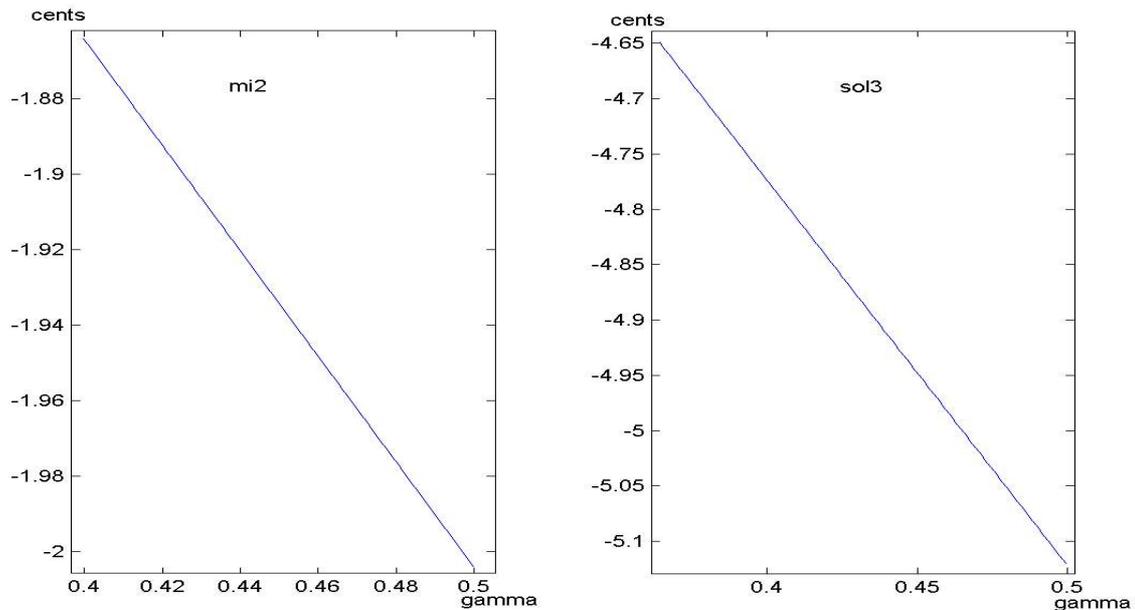


Fig 3.3: Décroissance de la fréquence de jeu en fonction de la pression d'alimentation pour deux notes en considérant l'amortissement de l'anche

La figure 3.3 révèle que la décroissance est très faible pour les deux notes étudiées, en effet la variation est inférieure à un cent. Dans la mesure où il persiste un doute sur notre mesure du facteur d'amortissement, nous avons fait le même calcul avec la valeur que propose Worman. L'écart reste toujours négligeable, on mesure tout juste un cent pour le sol3 et moins d'un cent pour le mi2. L'effet de l'amortissement de l'anche ne peut donc pas expliquer à lui seul la décroissance observée pour la figure 3.3.

3.4 Évolution de la fréquence avec la pression d'alimentation, effet de l'inharmonicité

Dans la référence [13] Kergomard discute du rôle de l'inharmonicité du résonateur sur la fréquence de jeu.

Le raisonnement se base sur la relation de X. Boutillon « reactive power rule » de la référence [14].

$$\Im(Y_1) + 3 \left| \frac{P_3}{P_1} \right|^2 \Im(Y_3) = 0 \quad (3.2)$$

On cherche des solutions entre deux nuances extrêmes. Pour une nuance piano, on est au seuil d'oscillation, c'est-à-dire $P_3=0$, et pour une nuance fortissimo le signal devient plus ou moins carré, dans ces conditions $P_3/P_1=-1/3$.

On définit $\omega_3=3\omega_1(1+\eta)$, et on cherche des solutions de type $\omega=\omega_1(1+\epsilon)$.
A un facteur près, l'impédance d'entrée pour un cylindre a pour expression:

$$Z = \sum \frac{i\omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + i\omega\omega_n}$$

Pour un cylindre parfait, les coefficients modaux sont indépendants de n. Dans notre cas, le cylindre n'est pas parfait mais puisque l'on raisonne par perturbation, on peut admettre qu'ils sont égaux. En faisant l'approximation que, près d'une fréquence de résonance, on ne considère qu'un pic de la série, et pour des perturbations petites, on déduit:

$$\Im(Y_n) = -\frac{\omega_n^2 - \omega^2}{\omega} \quad (3.3)$$

On déduit de cette équation:

$$\Im(Y_1) = -2\omega_1\epsilon \quad \text{et} \quad \Im(Y_3) = 6\omega_1(\eta - \epsilon) \quad (3.4)$$

Pour une nuance piano on a donc $\epsilon=0$ et pour une nuance fortissimo c'est-à-dire pour $P_3/P_1=-1/3$ en remplaçant les équations (3.4) dans l'équation (3.2) on déduit:

$$\epsilon = \frac{\eta}{2} \quad (3.5)$$

Kergomard donne donc le raisonnement suivant:

Si la deuxième résonance est 20 cents trop haute par rapport à la première, la fréquence monte quand on souffle plus fort, et s'accroît d'environ 10 cents quand on joue fortissimo.

Si la deuxième résonance est 20 cents trop basse par rapport à la première, la fréquence descend quand on souffle plus fort, d'environ 10 cents quand on joue fortissimo.

Si on considère ce raisonnement, l'écart de justesse entre pianissimo et fortissimo doit donc suivre les courbes d'écart relatif des fréquences propres du chapitre 2. Cela semble être le cas pour le clarinettiste A et la bouche artificielle avec la clarinette Yamaha.

Le tableau B.1 nous donne l'inharmonicité entre les deux premiers pics de résonance. On mesure pour la clarinette Yamaha -33,5 cents pour le mi2 et -25,4 cents pour le sol3. Dans ce cas, les écarts entre douzièmes sont bas, on devrait donc observer une baisse des fréquences de jeu de environ 16,75 cents pour le mi2 et 12,7 cents pour le sol3. La figure 3.1 montre une décroissance de 11 cents pour le mi2 et 7 cents pour le sol3 avec la bouche artificielle et 12 cents pour le mi2 avec le musicien E. L'erreur n'est pas très importante, ce raisonnement montre que l'inharmonicité peut expliquer en grande partie la décroissance des fréquences de jeu observées.

3.5 Synthèse et observations

Pour les clarinettes, la justesse de l'instrument est liée à la nuance. Leurs commentaires sont justifiés si on considère les figures de l'annexe D. En effet, on observe bien une baisse de la fréquence de jeu lorsque le musicien augmente l'intonation. Globalement, on remarque que cet effet est beaucoup moins important pour le deuxième registre; de ce fait lorsqu'un clarinetiste joue fort, il augmente les écarts entre douzièmes et par conséquent l'instrument devient moins juste.

D'un point de vue théorique, il est clair que cette baisse en fréquence ne peut être expliquée par l'effet de l'amortissement de l'anche, les estimations effectuées restant très inférieures aux écarts constatés avec les musiciens ou avec la bouche artificielle. Pour ce phénomène, le rôle de l'inharmonicité de l'instrument semble jouer un rôle prépondérant au vu des résultats obtenus. En effet, les fréquences propres des clarinettes dans le tableau B.1 montrent que les écarts entre douzièmes sont généralement trop petits, cela est particulièrement vrai pour la clarinette Yamaha. Nous avons montré que cela entraîne une baisse de la fréquence de jeu lorsqu'on augmente l'amplitude du deuxième harmonique, il est fort probable que ce raisonnement soit également vrai pour les harmoniques de rang supérieurs. Dans la démonstration, l'amplitude du deuxième harmonique est contrôlée par la pression d'alimentation, néanmoins les musiciens confirment que le spectre, et par conséquent l'amplitude des harmoniques peut également être contrôlée par le volume buccal ou la position de la langue, il s'agit là d'une technique couramment utilisée pour obtenir des sons doubles en favorisant certains harmoniques de rangs supérieurs. De ce fait, la justesse peut en être affectée, et ceci pourrait être expliqué les différences concernant la justesse entre les musiciens observées dans le chapitre 2. Chaque clarinetiste favorisant ou non certains harmoniques aigus pour des raisons d'esthétique personnelle en matière de timbre, sonorité, expression. La vérification de cette hypothèse pourrait faire l'objet d'une autre étude.

Jusqu'à présent nous avons considéré la justesse de l'instrument sans prendre en compte l'aspect temporel. En effet, on peut se poser des questions sur la stabilité des fréquences de jeu en fonction du temps et plus particulièrement en fonction du mode de jeu. Dans le chapitre qui suit, nous étudions cet aspect à l'aide d'un outil d'analyse temps-fréquence.

Chapitre 4

4 Fréquence de jeu et évolution temporelle

Lors d'une rencontre avec Michel Arrigon (professeur de clarinette au CNSM de Paris), nous avons abordé le problème de l'instabilité de la fréquence de jeu pendant la phase d'attaque. D'après lui, il existe une légère variation de la fréquence de jeu au début de chaque note lorsqu'elles sont jouées selon un mode détaché. Selon lui, cette variation est perceptible pour une oreille expérimentée. Cette remarque est pour nous très intéressante dans le cadre de ce chapitre, car nous nous intéressons de manière générale aux variations de la FJ en cours de note.

Dans cette étude, nous analysons trois types d'expressions dans le but de mettre en évidence des variations sur la FJ. Toutes les analyses furent effectuées pour une nuance mezzo-forte. Selon les résultats, nous pourrions envisager ou non des études perceptives afin de mesurer l'impact concernant la justesse de ces variations sur l'auditeur.

4.1 Méthode d'analyse temps-fréquence, passage par zéro

Les méthodes d'analyses temporelles présentent deux avantages. Tout d'abord, elles permettent une estimation de la période avec un délai minimal, et d'autre part, les calculs sont rendus très simples.

L'estimateur des passages par zéro est le plus élémentaire des détecteurs. Dans la mesure où on connaît à quelques Hz près la fréquence de jeu à analyser, on filtre le signal avec un filtre passe-bande de fréquences de coupures et de largeur de bande adaptées. On détecte alors ses passages par zéro dans un sens bien précis. Néanmoins, une condition est à vérifier. Lorsque le signal présente plusieurs harmoniques (le filtrage n'est pas optimal), on peut observer plus de deux passages par zéro pendant une période. Pour éviter ce problème la condition (4.1) doit être vérifiée [17].

$$RSI = 20 * \log\left(\frac{A(1)}{\sum_{k=2}^K kA(k)}\right) > 0 \quad (4.1)$$

Avec $A(k)$ l'amplitude de l'harmonique k .

Cette technique est donc très simple dans notre cas pour deux raisons. Nous disposons d'une hypothèse forte de départ, car nous connaissons à quelques Hz près la fréquence de jeu à analyser. De plus, pour la clarinette, les harmoniques sont suffisamment espacés pour choisir un filtre passe-bande de pentes bien adaptées. Pour le cas des sons de la clarinette, un filtre avec un rapport de -40 dB suffit dans la plupart des cas à vérifier la relation (4.1).

On détecte alors les passages par zéro entre deux points par interpolation linéaire sur l'intégralité du sons à analyser. Cette méthode permet donc une analyse en temps-fréquence très précise.

Nous pouvons donc nous concentrer sur l'évolution de la fréquence de jeu suivant différents modes de jeu. Analysons dans un premier les transitions entre les notes liées.

4.2 Analyse temps-fréquence, le transitoire d'attaque

On s'intéresse à présent à l'évolution de la fréquence de jeu au cours du déroulement de la note et plus particulièrement au niveau du transitoire d'attaque. Nous analysons donc en temps-fréquence des sons détachés et courts, obtenus avec différents musiciens.

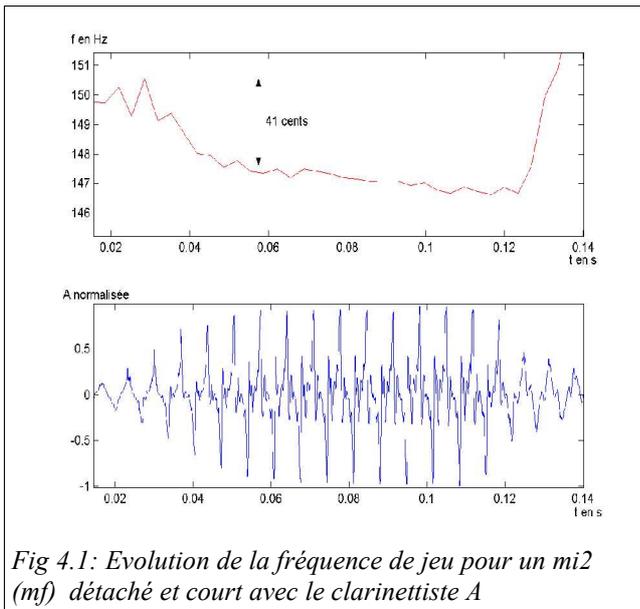


Fig 4.1: Evolution de la fréquence de jeu pour un mi2 (mf) détaché et court avec le clarinettiste A

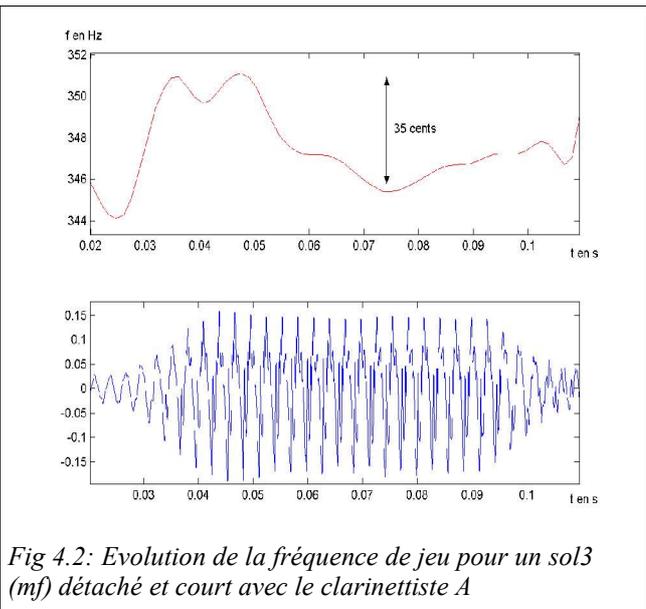


Fig 4.2: Evolution de la fréquence de jeu pour un sol3 (mf) détaché et court avec le clarinettiste A

Les figures 4.1 et 4.2 sont extraites de l'annexe G où sont regroupées plusieurs analyses temps-fréquence pour des sons détachés et courts. Ces courbes nous renseignent davantage sur l'évolution de la FJ pendant la phase d'attaque. De manière générale, on visualise bien une variation de la FJ pendant un très court instant, qui en moyenne est de l'ordre de 4/100 de secondes. La forme de l'évolution semble être variable, parfois on observe une décroissance, une croissance ou encore des oscillations. Les écarts en fréquence mesurés semblent également variables, néanmoins tous sont suffisamment grands pour être perceptibles si on ne prend pas en compte l'aspect temporel.

Fort de ces constatations, il serait intéressant de savoir comment l'auditeur interprète l'évolution de la FJ. Trois solutions sont possibles:

- Tout d'abord l'auditeur discerne bien les différentes phase de l'évolution. D'après Michel Arrignon, cela serait possible pour une oreille expérimentée, et plus particulièrement pour un clarinettiste averti.
- La deuxième solution étant que l'oreille fasse une intégration sur la totalité du son. Dans ce cas, il faudrait déterminer la fréquence perçue, est-ce la moyenne géométrique ou une solution plus complexe?
- Enfin l'auditeur perçoit une phase bien particulière du son indépendamment du reste.

Concernant ces questions, il est évident qu'une étude bibliographique s'avère indispensable pour connaître ce qui a été fait, et compléter par des tests perceptifs si cela s'avèrerait nécessaire.

Observons à présent l'évolution de la fréquence de jeu entre deux notes liées.

4.3 Transition entre deux notes liées

On s'intéresse ici aux transitions entre deux notes liées et plus particulièrement à l'évolution de la fréquence de jeu entre ces notes. On effectue donc des analyses en temps-fréquence avec différents musiciens et également avec la bouche artificielle afin d'obtenir une base de comparaison.

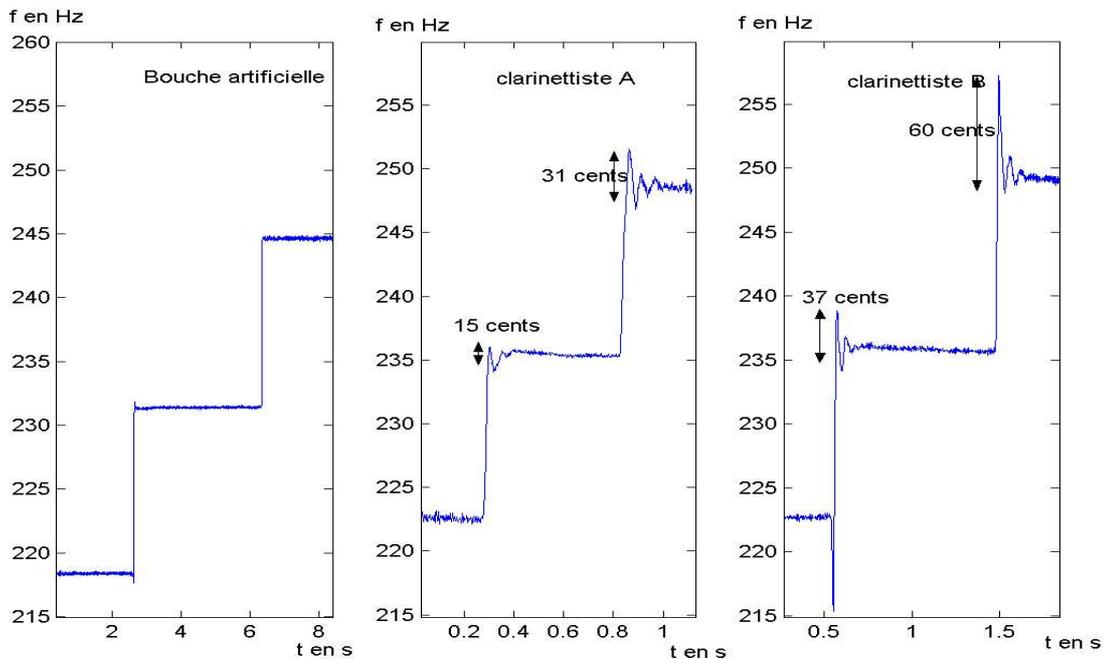


Fig 4.3: Transitions liées entre le si2-do3-do#3, comparaison avec la bouche artificielle et les clarinettistes A et B

Les courbes de la figure 4.3 sont particulièrement intéressantes et montrent parfaitement un exemple de variation en terme de FJ introduit par les musiciens. Contrairement à la bouche artificielle, on observe pour les musiciens des instabilités sur les FJ au niveau de la transition entre deux notes. Sur les analyses effectuées, ces variations ont une durée moyenne de 1/10 de seconde ce qui curieusement est plus long que les instabilités observées pour les transitoires des notes détachées. D'après la figure 4.3, les écarts relatifs mesurés sont également perceptibles si l'on ne considère pas l'aspect temporel, c'est à dire la durée du phénomène. Enfin, les courbes de l'annexe H montrent que cet effet peut être généralisé pour plusieurs clarinettistes et plusieurs notes.

L'impact de ces variations sur l'instrumentiste en terme de perception des hauteurs n'est pas établi, ainsi, les mêmes questions que pour le paragraphe précédent peuvent être posées.

Enfin pour terminer cette étude sur les variations des fréquence de jeu en cours de note, nous nous intéressons à leurs évolutions lorsque le musicien joue des notes tenues.

4.4 Note tenue, analyse temps-fréquence

Nous entendons par notes tenues, des notes dont la durée est de quelques secondes. Nous nous intéressons à l'évolution des FJ sur l'intégralité de la durée, faisant ici aussi la différence entre notes

détachées et liées.

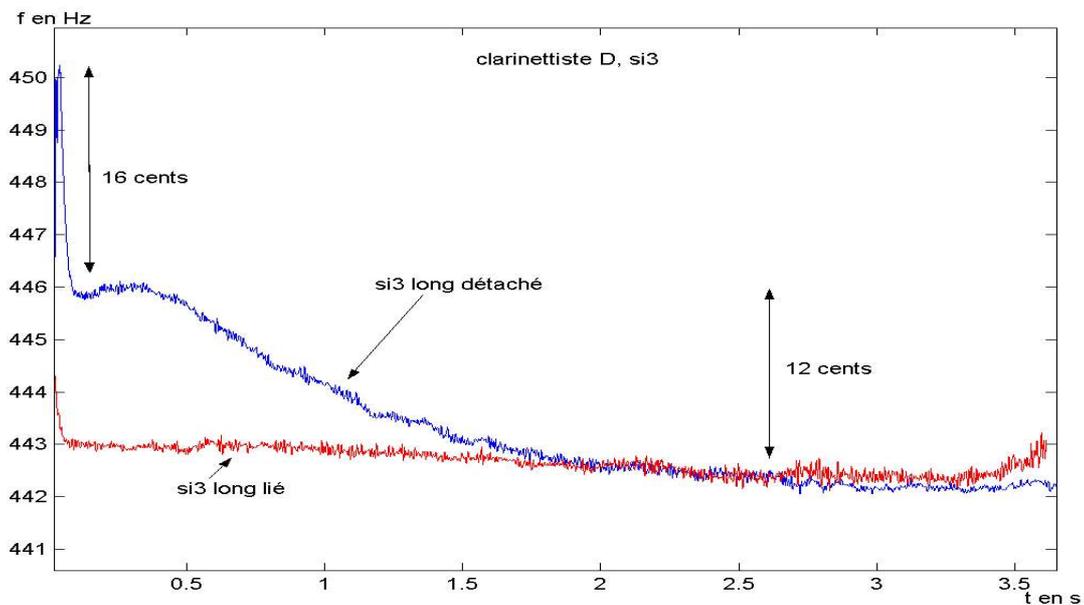


Fig 4.4: Evolution de la fréquence de jeu. En bleu, un si3 long et détaché, en rouge, un si3 long provenant d'un passage de douzième lié (mi2-si3), clarinettiste D.

Les courbes de la figure 4.4 montrent un comportement vis à vis de la FJ qui diffère suivant le mode de jeu. La courbe en bleu représente l'évolution de la FJ pour une note détachée. On peut décomposer cette évolution en trois phases. Tout d'abord, une variation rapide de quelques centièmes de secondes pendant le transitoire de la note, ce point a déjà été étudié dans le paragraphe 4.2. Ensuite une décroissance lente d'une durée de deux secondes environ, et enfin une stabilisation. La courbe en rouge représente la variation de la FJ pour un si3 lié à partir de sa douzième basse, le mi2. On observe au début de la note une variation de quelques centièmes de secondes (paragraphe 4.3), puis la FJ ne semble plus vraiment évoluer.

Les variations en terme de FJ observées pour le mode détaché semblent pouvoir se généraliser pour toutes les notes et tous les musiciens si on observe les analyses regroupées dans l'annexe G. D'après ces analyses, les écarts de FJ mesurés sont tous perceptibles si on considère les seuils de détection de hauteur définis dans le premier chapitre. Or les clarinettistes interviewés ne mentionnent pas ce phénomène et répondent que la FJ reste stable lorsque la question leur est posée. Ces observations posent des questions de perception très intéressantes. Par exemple, pourquoi la décroissance n'est pas détectée, quelle fréquence est perçue par l'auditeur, ou encore à quel point cet effet peut influencer sur la perception de justesse de l'instrument. A notre connaissance il n'existe pas de travaux effectués spécifiquement sur ce phénomène. Des tests psychoacoustiques s'avèrent donc indispensables pour répondre à ces questions.

4.5 Synthèse, déductions et observations

Dans ce chapitre nous avons analysé l'évolution des FJ en cours de note pour les principaux modes d'expressions utilisés par les clarinettistes. Pour les notes courtes et détachées, on observe une variation très rapide de forme aléatoire pendant le transitoire de la note. Concernant les transitions entre deux notes liées, les études révèlent également une instabilité des FJ au début de la note cible. Cette transition étant parfaitement reproductible à la bouche artificielle, une étude comparative avec

deux clarinettistes montre que cette instabilité est introduite par le jeu des musiciens. D'un point de vue technique de jeu, ceci montre que le clarinettiste change au moins un paramètre de contrôle dans le but d'adapter son embouchure à la note en cours de jeu. Cette remarque rejoint un commentaire de Guy Deplus affirmant que, pour chaque note, une configuration adaptée était utilisée. Il mentionne notamment la position de la langue. Enfin, la décroissance lente de la FJ observée pour les notes longues et détachées est assez surprenante dans la mesure où elle n'est pas perçue par un auditeur averti ainsi que les clarinettistes.

Toutes ces observations posent des questions en matière de perception des FJ. Les écarts en fréquence constatés sont tous suffisamment grands pour qu'ils puissent être perceptibles. En réalité, il nous est impossible à l'heure actuelle de comprendre comment sont perçues ces variations par l'auditeur. Des tests psychoacoustiques s'avèrent indispensables pour répondre à ces questions.

Conclusion générale et perspectives

Cette étude avait pour but initial de localiser et de comprendre l'origine de certains problèmes de justesse sur la clarinette. Si l'on considère les témoignages des clarinettistes, il semblerait que les problèmes les plus importants sont localisés sur les notes graves et sur les notes de gorge. Les résultats exposés dans le chapitre 2 nous montrent sur ce sujet plusieurs choses. Tout d'abord, l'analyse des fréquences propres de la clarinette Yamaha CS viennent compléter les conclusions de la référence [2], les fréquences propres du résonateur ne peuvent expliquer pourquoi les notes graves de la clarinette sont toujours perçues comme étant trop basses. Une étude comparative entre les fréquences propres du résonateur, les FJ issues de la bouche artificielle et celles issues des enregistrements avec les musiciens, révèle le rôle des paramètres de contrôle et celui des musiciens en matière de justesse. On remarque que les écarts relatifs en fréquence constatés pour les fréquences propres du résonateur sont diminuées lorsqu'on considère les FJ. Globalement, la clarinette est plus juste pour le registre aigu. Les analyses avec les musiciens montrent que, d'un point de vue physique, il n'est pas possible d'affirmer que les notes graves sont toujours basses, en effet on a constaté que seuls certains musiciens jouent de cette façon. Cela pose d'autres questions en matière de perception de hauteur pour le cas particulier des sons de clarinettes. Les liens entre fréquences de résonance et FJ étant nombreux, les causes de ces variations le sont également.

Nous avons mis en évidence dans le chapitre 3 un exemple de variation des FJ introduit par un paramètre de contrôle. Des études à différents niveaux d'intensité montrent en effet que la FJ varie en fonction de la pression d'alimentation. Pour être plus précis, la FJ décroît lorsque le clarinettiste passe d'une nuance piano à une nuance fortissimo. Cet effet est bien connu des musiciens, pour eux il est parfois gênant. Une étude théorique montre que ce phénomène est probablement dû à l'inharmonicité de l'instrument. Pour que l'évolution se fasse dans le sens de la décroissance, la théorie impose un intervalle trop petit entre les deux premières fréquences de résonance du résonateur. Ceci se généralise probablement aux harmoniques de rangs supérieurs. Cette théorie fonctionne particulièrement bien si on considère la clarinette Yamaha CS, en effet le tableau B.1 révèle des écarts trop petits entre les deux premières fréquences de résonance pour toutes les notes. D'autres paramètres de contrôle peuvent faire varier les FJ, on note par exemple l'effet du conduit vocal [3], le volume buccal, la position de la langue ou encore l'ouverture de l'anche.

D'autre part, les analyses temps fréquence montrent que les principaux modes de jeu utilisés par les musiciens induisent des variations de la FJ. Ces variations sont très souvent de courte durée (quelques centièmes de secondes). Elles s'observent sur les transitoires des notes détachées ou au niveau des transitions entre notes liées. Une variation beaucoup plus longue (2 secondes) est également mise en évidence, il s'agit de la décroissance de la FJ lorsque une note est tenue et détachée. Ces observations posent des questions concernant la perception des FJ en cours de note, en effet, on montre que toutes ces variations sont généralement comprises entre 10 et 20 cents, il est donc probable qu'elles soient perceptibles. Néanmoins, d'autres analyses sont indispensables afin d'estimer les effets pour différentes nuances.

Ce projet constitue donc une exploration des différentes causes pouvant agir sur la sensation de justesse de la clarinette. Parler de justesse fait intervenir plusieurs paramètres. En effet, on ne peut

pas se limiter à l'étude du résonateur, les études ont montré que l'instrumentiste joue un rôle très important. D'ailleurs, le plus souvent, il corrige les défauts pouvant venir du résonateur. D'autre part, ce projet montre que de nombreuses questions ne peuvent être expliquées par la physique, notamment le problème des notes graves jugées trop basses qui n'est toujours pas tout à fait éclairci. Des tests psychoacoustiques s'avèrent indispensables pour continuer cette étude. Enfin, il serait également intéressant d'étendre cette étude à d'autres clarinettes: Selmer, Leblanc et pourquoi pas d'autres types comme la clarinette « allemande ».

Annexes

A. Tablature chromatique de la clarinette

Chalumeau Médium Clairon Aigu Suraigu

B. Quelques rappels théoriques

D'un point de vue physique, le modèle le plus simple de clarinette est décrit par trois équations, deux linéaires et une non-linéaire.

Mouvement de l'anche

L'anche est habituellement une lame de roseau humidifiée dont les propriétés mécaniques sont inhomogènes. Aujourd'hui il en existe en matériau composite. Elle est fixée sur la table du bec à l'aide de la ligature.

La surpression imposée dans la cavité buccale induit la vibration de l'anche. Ce mouvement est assez complexe et a été étudié sous différents aspects par de nombreux auteurs (Fachinetti, Boutillon, Pinard, Laine, Vach, Ducasse ...). Néanmoins, le modèle à un degré de liberté est une excellente approximation, il est le plus souvent utilisé pour des raisons de simplicité [7].

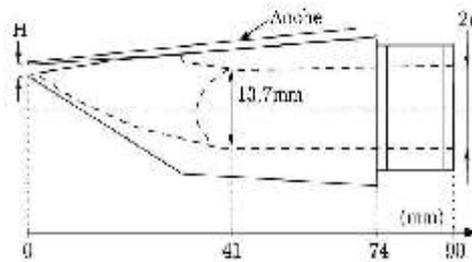


Fig B.1: Bec et anche

Le déplacement de l'anche $y(t)$ vérifie l'équation du second degré suivante:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + g_r \frac{d y(t)}{dt} + \omega_r^2 y(t) = - \frac{p_m - p(t)}{\mu_r} \quad (\text{B.1})$$

Avec g_r l'amortissement dû principalement à la lèvre inférieure de l'instrumentiste, ω_r la pulsation de résonance de l'anche, μ_r la masse linéique, p_m la pression dans la bouche et $p(t)$ la pression dans le bec.

Dans ce modèle, la pression p_m est supposée constante, il s'agit d'un paramètre important de contrôle de jeu. La pression $p(t)$ est quant à elle la grandeur inconnue recherchée.

Ce modèle peut être simplifié en remarquant que les fréquences de jeu et leurs premiers harmoniques sont très inférieurs à la fréquence de résonance de l'anche située aux alentours de 2000 Hz. Les termes d'inertie et d'amortissement se négligent alors devant le terme de raideur. La modélisation se réduit au mouvement d'un simple ressort, l'équation (B.1) devient alors:

$$y(t) = - \frac{1}{\omega_r^2} \frac{p_m - p(t)}{\mu_r} \quad (\text{B.2})$$

Le résonateur

Dans l'hypothèse où la pression acoustique est de faible amplitude face à la pression atmosphérique, le comportement acoustique du résonateur peut être considéré comme linéaire. Il est alors possible de relier la pression $P(\omega)$ au débit $U(\omega)$ avec la relation suivante dans le domaine fréquentiel:

$$P(\omega) = Z(\omega)U(\omega) \quad (\text{B.3})$$

Où $Z(\omega)$ est l'impédance d'entrée du résonateur.

Dans le cadre de cette étude, des mesures d'impédance ont été effectuées, une description détaillée du dispositif est en annexe C.

Comportement du jet d'air entrant dans le bec

Le débit créé de part et d'autre de l'anche est lié à la différence de pression par une relation non-linéaire. Si la différence de pression est très grande, la pression dans le bec étant très négative, l'anche plaque, dans ce cas il n'y a pas de débit. Cette pression est appelé pression de placage statique P_M , avec $P_M = H \omega_r^2 \mu_r$.

Cette caractéristique non-linéaire se calcule en utilisant la relation de Bernoulli en supposant un écoulement quasi-statique. On obtient la vitesse dans le canal:

$$v = \sqrt{\frac{2 |\Delta p|}{\rho}} \text{sign}(\Delta p) \quad (\text{B.4})$$

Avec $\Delta p = p_m - p(t)$

En multipliant par la surface d'ouverture on obtient:

$$u = w(H + y(t)) \sqrt{\frac{2 |\Delta p|}{\rho}} \text{sign}(\Delta p) \quad (\text{B.5})$$

Où u est le débit entrant, w la largeur effective de l'anche, H l'ouverture du canal au repos, $y(t)$ le déplacement vertical de l'anche et ρ la masse volumique de l'air.

Equations sans dimension

Les relation linéaire (B.2) (B.3), et la relation non-linéaire (B.5) permettent le calcul de la pression à l'intérieur du tuyau. On peut utiliser ces équations à l'aide de grandeurs sans dimensions [7]

En remarquant que Δp est toujours positif, les équations (B.2), (B.3) et (B.5) deviennent respectivement:

$$\tilde{y} = \tilde{p} - \gamma \quad (\text{B.6})$$

$$\tilde{u} = \zeta (1 - \gamma + \tilde{p}) \sqrt{\gamma - \tilde{p}} \quad (\text{B.7})$$

$$P(\tilde{\omega})=Z(\tilde{\omega})U(\tilde{\omega}) \quad (\text{B.8})$$

Les pressions sont adimensionnées par la pression de placage statique p_M , l'impédance par l'impédance caractéristique du résonateur $Z_c = \frac{\rho c}{S}$, S étant la section du tuyau, et le débit par $\frac{p_M}{Z_c}$.

Les tildes désignent les grandeurs sans dimensions, dans la suite on utilisera ces grandeurs adimensionnées sans la notation tilde.

$$\tilde{y} = \frac{y}{H}$$

$$\tilde{p} = \frac{p}{p_M} \quad p_M \text{ étant la pression de placage}$$

$$\gamma = \frac{p_m}{p_M} \text{ est le paramètre de contrôle de l'amplitude.}$$

$$\zeta = Z_c w H \sqrt{\frac{2}{\rho p_M}} \text{ est un paramètre caractérisant l'embouchure du musicien dépendant de la}$$

raideur de l'anche, de la position des lèvres, du rapport de section entre l'ouverture du canal anche-bec et le tuyau.

De plus, dans le cas du régime où la pression $p(t)$ ne s'écarte pas trop de la pression nulle, c'est à dire pour une anche non battante, il est pratique d'effectuer un développement limité de l'équation (B.7).

$$u = F_0 + Ap + Bp^2 + Cp^3 \quad (\text{B.9})$$

Avec:

$$A = \zeta \frac{\gamma - \frac{1}{3}}{6 \sqrt{\gamma}} \quad B = -\zeta \frac{3\gamma + 1}{8\gamma^{\frac{3}{2}}} \quad C = -\zeta \frac{\gamma + 1}{16\gamma^{\frac{5}{2}}}$$

Il est alors possible de résoudre ce système à l'aide de méthodes de calcul, la plus connue pour le régime permanent étant la méthode d'équilibrage harmonique utilisée par Gilbert et Kergomard dans le cas de clarinette [6]. Cette méthode consiste à faire évoluer les paramètres à partir d'une solution connue en linéarisant autour de la dernière valeur obtenue. On traite l'équation (B.9) dans le domaine temporel et l'équation (B.8) dans le domaine fréquentiel, en passant alternativement d'un domaine à l'autre par sommation et transformée de Fourier, respectivement.

Bien que plus compliqué, la théorie modale donne également d'excellent résultat avec l'avantage de renseigner sur les mécanismes de production du son pour les régimes transitoires. Cette méthode a été étudié par Vincent Debut dans le cadre de sa thèse [1].

C. Mesures d'impédance

Le dispositif de mesure d'impédance a récemment été élaboré à l'IRCAM par deux étudiants de l'ENSAM et de l'Université Paris VI, E. Mevellec et R. Mocaer. Le système ressemble au dispositif déjà disponible au LAUM, il fonctionne selon le principe du capillaire, il mesure l'amplitude et la phase de l'impédance par balayage fréquentiel. Pour chaque note on obtient des données de ce type.

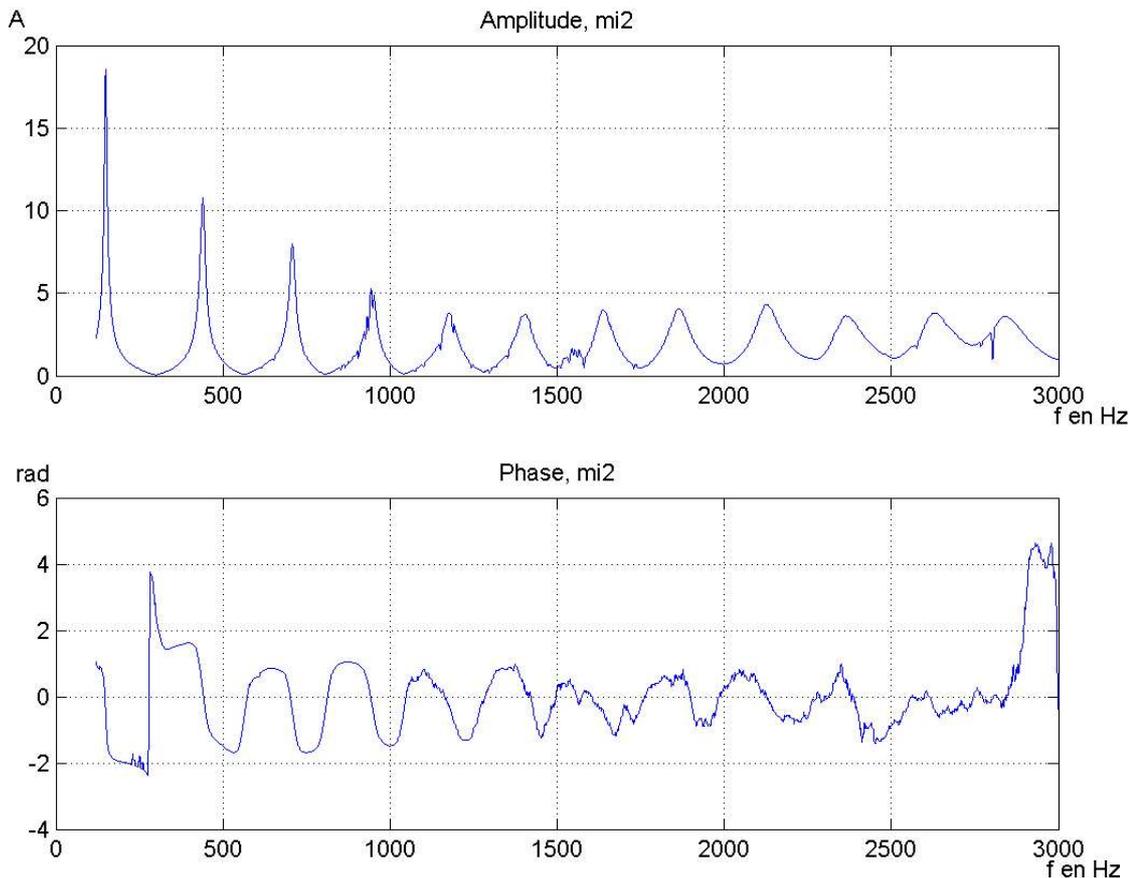


Fig C.1: Amplitude et phase de l'impédance d'entrée d'un m² de la clarinette Yamaha CS

Bien que très concluant, ce dispositif entraîne néanmoins quelques sources d'incertitudes qu'il convient de préciser.

Les incertitudes:

Pour ces mesures on souhaite prendre en compte le bec de la clarinette afin d'obtenir les résultats les plus justes possibles (pour la clarinette Buffet-Crampon, le bec fut remplacé par un tube cylindrique de 77 mm). La principale incertitude est due au fait que la position du bec sur le dispositif n'est pas fixe, elle laisse une marge d'incertitude non nul (quelques millimètres). De plus, les doigtés sont réalisés par un musicien, il est donc possible que certains bruits parasites soient introduits.

Afin d'estimer l'ensemble de cette incertitude, quatre acquisitions sont faites sur deux notes extrêmes de la clarinette. Entre chaque mesure, le dispositif est monté puis démonté, on prend soins

de positionner la clarinette aux extrêmes des positions possibles.

Pour un mi² (le tuyau est le plus long possible, un maximum de doigts sont utilisés), un écart de 9 cents entre les premiers pics des deux acquisitions est mesuré. Pour le sol³ (tuyau court) on mesure un écart de 11,3 cents entre les premiers pics des deux acquisitions. Il semble logique que l'incertitude soit plus importante pour le tuyau court que pour le tuyau long, en effet, en première approximation si l'on considère que la première fréquence de résonance est déterminé par $f=c/4l$ alors l'incertitude relative sur la fréquence est déterminé par $\Delta f/f=\Delta l/l$ avec Δl l'incertitude sur la position et l la longueur du tuyau.

Ainsi on peut estimer une incertitude de 12 cents lorsque les acquisitions sont effectuées indépendamment les une des autres. En réalité, nous avons réalisé toutes les mesures sans toucher à la position de la clarinette, les mesures que l'on obtient sont donc cohérentes entre elles, dans ce cas nous avons estimé sur deux autres acquisitions une incertitude de 1 cents pour les premiers pics.

Les mesures:

Les mesures de la clarinette Buffet Crampon avaient déjà été effectuées par Vincent Debut, dans ces conditions, seul la clarinette Yamaha CS fut mesurée. Le temps de manipulation dépend de la bande en fréquence d'analyse et de la précision voulue. Dans notre cas, la précision était variable, 0.2Hz pour le premier pic, puis 1 Hz pour le reste, le balayage en fréquence allant de 50 Hz avant le premier pic jusqu'à 3000 Hz. Les mesures se sont déroulées sur trois jours, un écart de température de 1,1°C fut observé, les résultats qui suivent prennent en compte cet écart avec $\Delta f/f=1/2*\Delta T/T$. Le dépouillement des données fut réalisé avec la fonction « peaktool » de la toolbox NMR pour Matlab. Cette fonction intègre un algorithme d'interpolation de lorentziennes, ce qui améliore la précision sur la position des pics. (Un doute persiste sur cette méthode, du moins pour la clarinette BC, les mesures étant peu précises. De nouvelles analyses seront faites dans les jours qui suivent).

Les résultats sont regroupés dans le tableau B.1.

Note registre 1	YAMAHA CS		Buffet Crampon (par Vincent Debut)	
	F1	f3/f1 en cents	F1	f3/f1 en cents
mi2	149,13	-33,58	146,29	-34,17
fa2	157,22	-17,01	153,19	-16,77
fa#2	166,49	-16,73	162,19	-12,05
sol2	177,29	-14,07	171,88	-8,48
sol#2	188,6	-9,52	182	-5,72
la2	198,37	-12,88	192,79	-3,21
La#2	209,93	-12,43	203,8	3,97
si2 fourche	222,17	-3,18	215	3,49
si2	224,39	-16,82		
do3	237,15	-9,12	228,03	5,03
do#3	251,64	-17,7	240,48	4,15
re3	263,8	-15,01	255,15	2,41
re#3	281,34	-24,02	267,35	11,95
mi3	295,15	-17,51		
fa3	312,43	-19,21	299,67	13,9
fa#3	336,4	-37,32	318,06	8,67
sol3	353,2	-25,39	335,92	28,47
sol#3	373,89	-36,84	355,38	32
La3	394,8	-40,05	374,32	35,01
la#3				

Note registre 2	F3	F3
si3	444	434,47
do4	471,56	458,83
do#4	501	485,67
re4	530,55	511,63
re#4	561,73	544,23
mi4	590,9	576,92
fa4	627,9	609,14
fa#4 fourche	663,56	
fa#4	666,39	646,22
sol4	706,06	685,52
sol#4	748,6	724,99
la4	788,01	772,1
la#4	839,3	816,32
si4	885,42	
do5	937,83	921,12

Tableau B.1: Fréquences de résonances pour deux clarinettes, BC et Yamaha

D. La bouche artificielle

Les musiciens sont sensibles aux variations de fréquence, amplitude et timbre. Ils sont alors tentés d'adapter par reflexe l'embouchure à ce qu'ils entendent. Dans ces conditions il n'est pas possible d'isoler et de caractériser finement les particularités de l'instrument lorsqu'il est joué par un musicien.

Pour ces raisons, on utilise la bouche artificielle MIAM (Multi Instrument Artificial Mouth) mise au point à l'IRCAM par Claudia Fritz, Christophe Vergez, André Almeida, René Caussé et Alain Terrier. Cette bouche artificielle possède la particularité de disposer d'un conduit vocal adaptable. Cette étude fut l'objet de la thèse de Claudia Fritz [3]. L'influence du conduit vocal sur la fréquence de jeu fut l'objet du stage de DEA ATIAM [4] de Mathias Demoucron, il ne sera pas pris en compte dans cette étude.

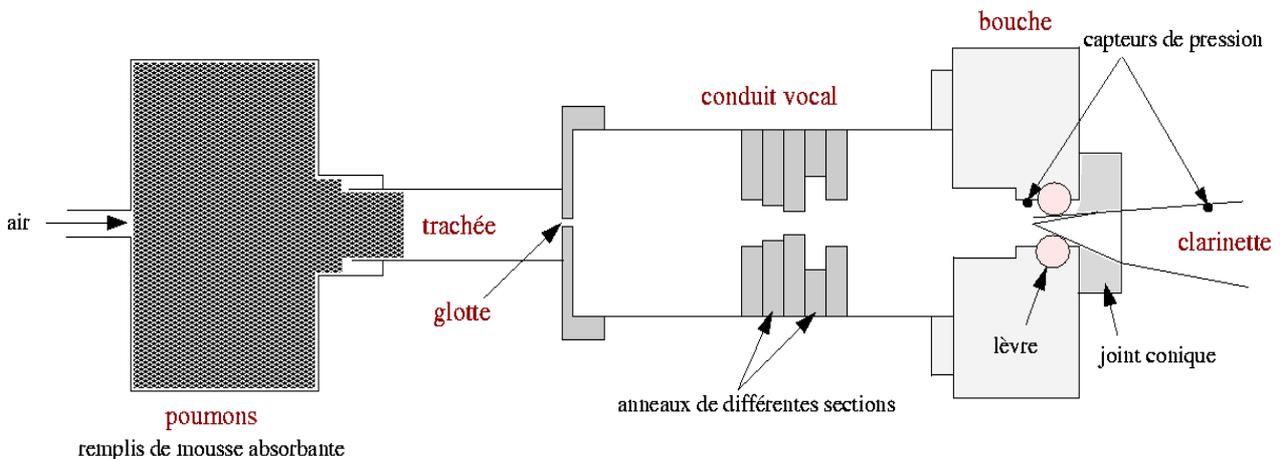


Fig D.1: Principe générale de la bouche artificielle

Un compresseur envoie l'air vers les poumons, remplacés par un volume équivalent. Des tuyaux de divers sections et longueurs remplacent la trachée, la glotte, le conduit vocal et la bouche. Les lèvres sont remplacées par des tubes en latex dont la pression est contrôlée par une colonne d'eau.

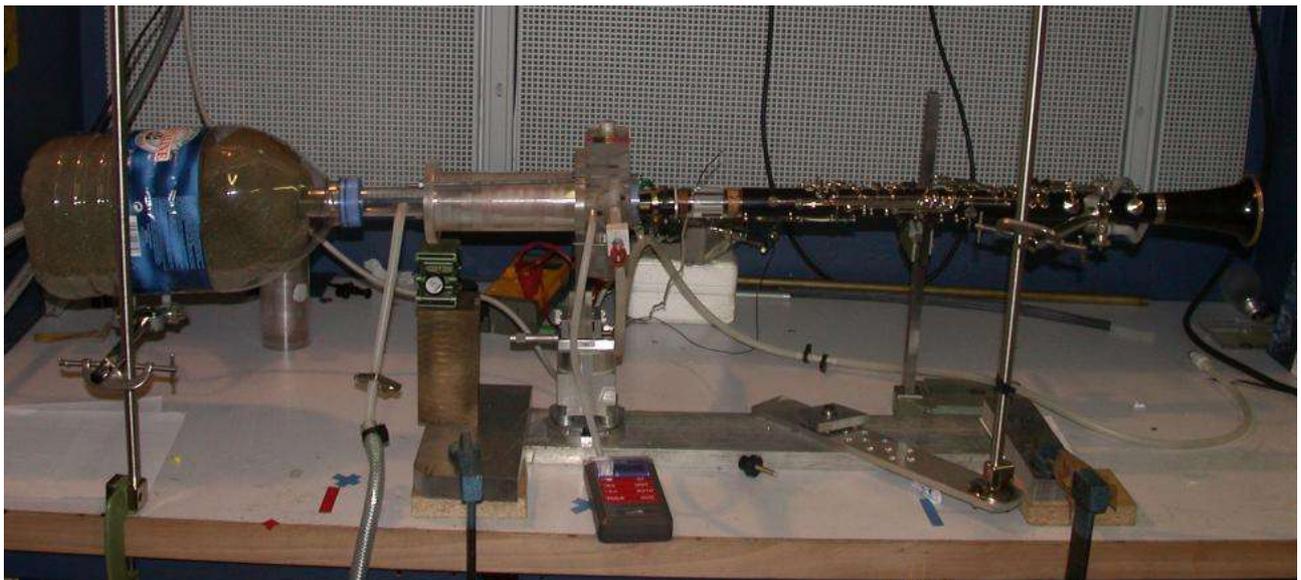


Fig D.2: Photographie de la bouche artificielle en situation de jeu

Une vis permet le contrôle de la pression d'alimentation que l'on peut visualiser à l'aide d'un capteur

de pression. L'ouverture de l'anche est ajustée à l'aide de deux vis de part et d'autre de l'anche contrôlant l'ouverture des dents artificielles.

Quelques précautions à prendre pour les mesures:

La salle dans laquelle est placée la bouche artificielle est très petite (4m*3m*3m), par conséquent une prise de son à l'extérieur du tuyau n'est pas souhaitable, en effet les fréquences graves ne sont pas favorisées, lors des analyses le spectre résultant est alors fortement modifié en amplitude. Bien entendu cela ne change rien à la fréquence fondamentale, cependant le rapport signal sur bruit est très faible, les analyses sont plus difficiles et moins précises.

Les mesures ont été donc effectuées à l'intérieur du tuyau à l'aide d'un barillet en plexiglas usiné par Alain Terrier dans lequel était placé un capteur de pression. Afin d'évaluer les éventuelles différences entre le barillet original et le barillet en plexiglas, des mesures d'impédance d'entrée ont été effectuées sur les clarinettes avec les deux barillots.

Ce test permet donc de vérifier que l'ensemble barillet-capteur n'entraîne pas de différences significatives sur les fréquences de résonance du tuyau. Dans un premier temps, il a permis d'écartier un capteur, qui après comparaison, s'est avéré être défectueux. En effet, les mesures d'impédance ont montré une caractéristique très différente de celle attendue, alors que le capteur donnait des mesures cohérentes. La membrane du capteur était percée, il y avait donc une fuite au niveau du barillet.

Voici les deux premiers pics d'impédance pour un sol3 de la clarinette Buffet-Crampon (aucun doigt n'est utilisé).

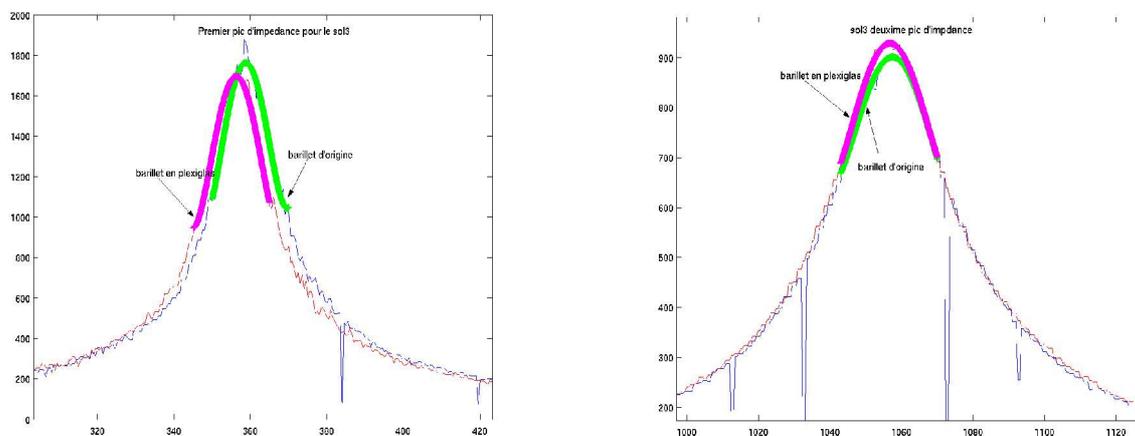


Fig D.3: Comparaison barillet d'origine et barillet en plexiglas par des mesures d'impédance

On mesure un léger décalage en fréquence. Pour le premier pic, la configuration d'origine est plus haute de 11,9 cents par rapport à la configuration avec le barillet en plexiglas. D'autre part on constate que l'inharmonicité entre les deux premiers pics est diminuée pour la configuration plexiglas, en effet on mesure un écart de -19.6 cents alors que la configuration d'origine présente un écart de -39.3 cents.

L'effet se fait moins ressentir pour les notes graves, on mesure pour un mi2 (tuyau le plus long) un écart de 3.1 cents entre les premiers pics des deux configurations, la configuration d'origine étant toujours la plus haute. L'inharmonicité entre les deux premiers pics reste quant à elle quasiment

identique. On mesure -38.8 cents pour la configuration plexiglas et -43.8 cents pour la configuration d'origine.

Ces mesures montrent que le changement de barillet entraîne des légers décalages des fréquences de résonances, néanmoins les écarts mesurés sont du même ordre de grandeur que l'écart introduit par la manipulation du dispositif (12 cents). Par conséquent on ne peut pas réellement savoir d'où vient l'incertitude. Cela revient à ajouter une petite correction de longueur, or ce type de correction est souvent utilisée par les clarinettes pour accorder leur instrument. On accepte donc d'utiliser le dispositif de mesure avec le barillet en plexiglas pour les expériences avec la bouche artificielle.

Reproductibilité des mesures

Bien que la bouche artificielle soit un dispositif stable, il peut exister des légères variations entre deux mesures. En effet, la pression d'alimentation n'est pas toujours stable, des micro-fuites sont parfois constatées malgré un contrôle minutieux.

Pour estimer cette erreur, on réalise deux mesures consécutives d'une gamme chromatique sur les deux premiers registres (mi2-do5). La pression d'alimentation est réglé à 4,60 kPa. Une variation maximum de 0.5 kPa est observée pendant les mesures. Tous les paramètres sont fixés dans la mesure du possible.

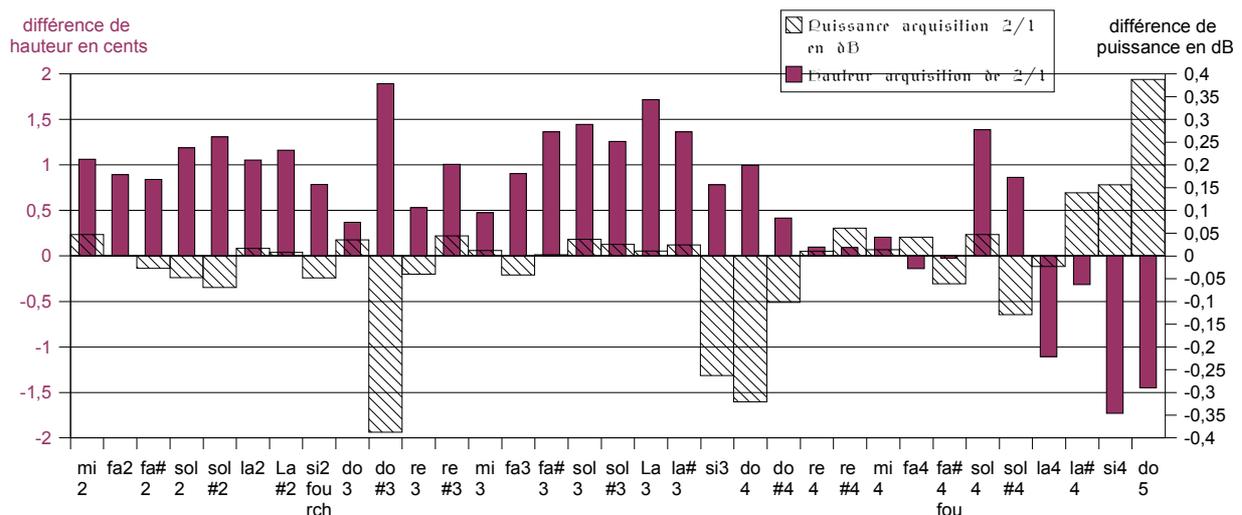


Fig D.4: Reproductibilité des mesures avec la bouche artificielle, différence pour chaque notes en cents entre les FJ de l'acquisition 2 par rapport à l'acquisition 1, et différence de puissance en dB de l'acquisition 2 par rapport à l'acquisition 1.

La figure D.4 montre en bordeaux la différence de hauteur pour chaque notes de l'acquisition 2 par rapport à l'acquisition 1 en cents. On constate un écart pouvant aller jusqu'à 2 cents. D'autre part dans la mesure où il est très difficile de garder le dispositif dans le même état entre deux mesures, on représente avec les barres hachurées la différence de puissance en dB mesurée entre l'acquisition 1 et 2, on s'aperçoit que la puissance peut varier jusqu'à 0,4 dB. Les mesures ne sont donc pas idéalement reproductibles, il est difficile d'obtenir 2 fois la même mesure, néanmoins l'effet sur la fréquence est négligeable car en dessous du seuil de détection de hauteur défini dans le chapitre 1.

E. Courbes de justesse pour différents musiciens et instruments

Reproductibilité des mesures:

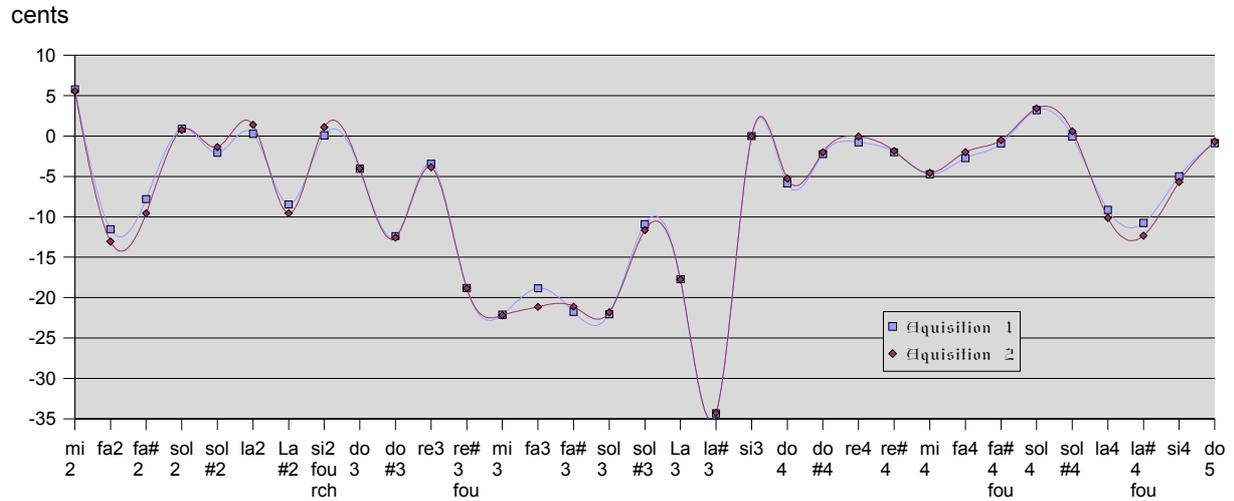


Fig E.1: Reproductibilité en terme de fréquence de jeu pour le clarinettiste A (clarinette Yamaha)

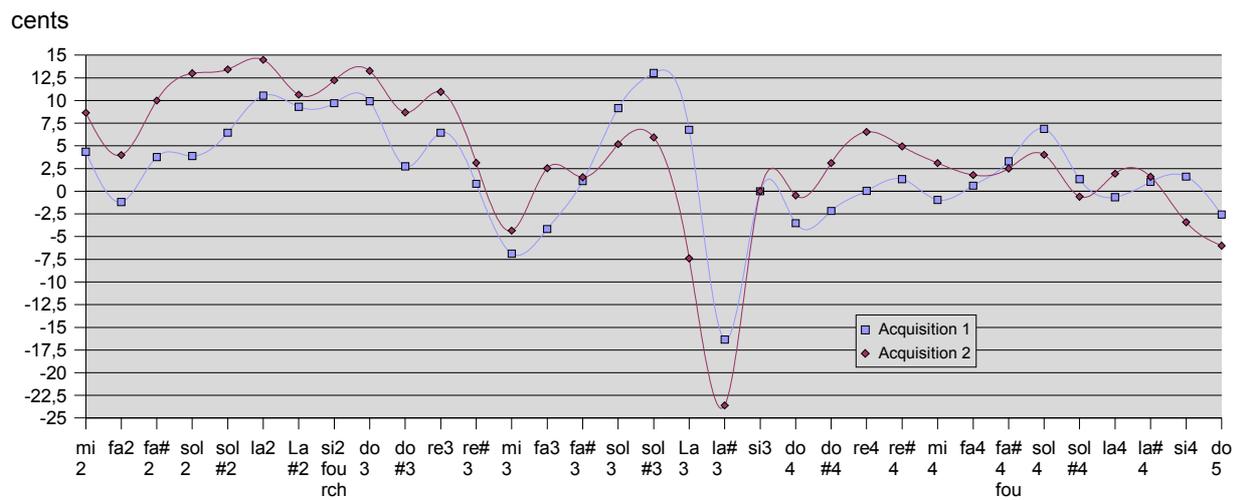


Fig E.2: Reproductibilité en terme de fréquence de jeu pour le clarinettiste B (clarinette Yamaha)

Clarinette Yamaha, justesse de chaque note/si3 en terme de fréquence de jeu

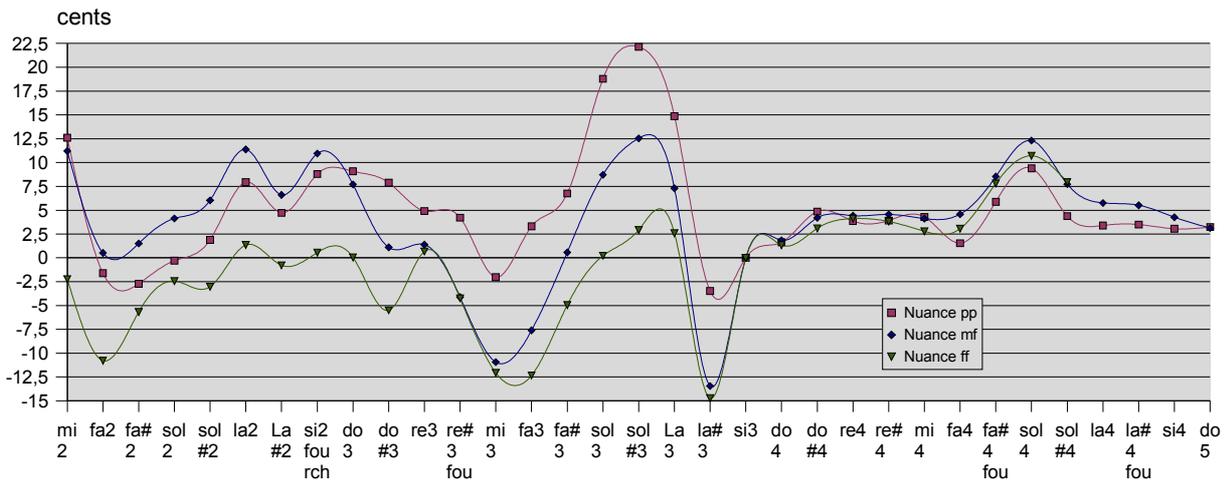


Fig E.3: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste A

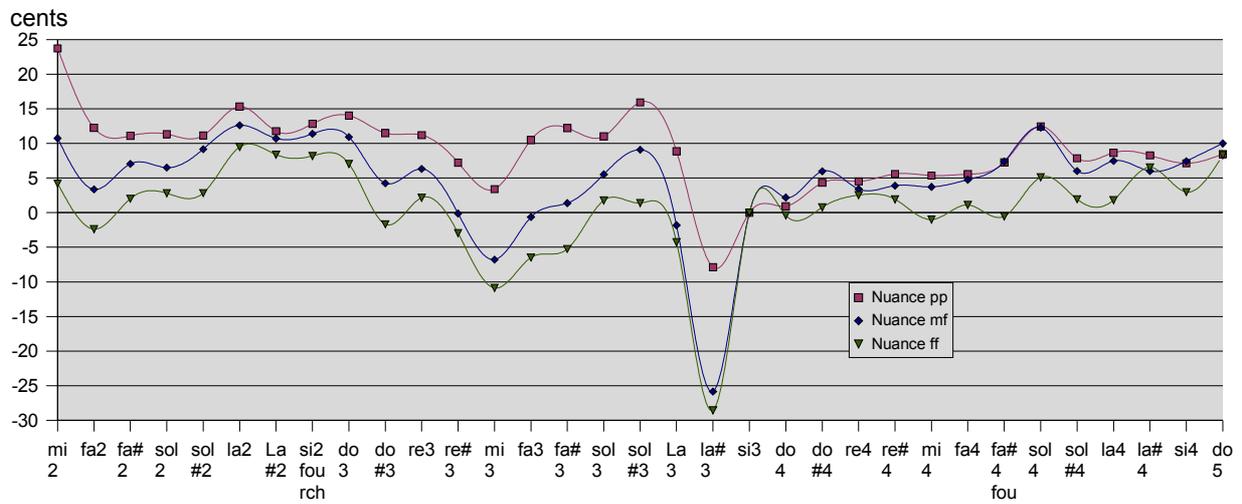


Fig E.4 Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste B

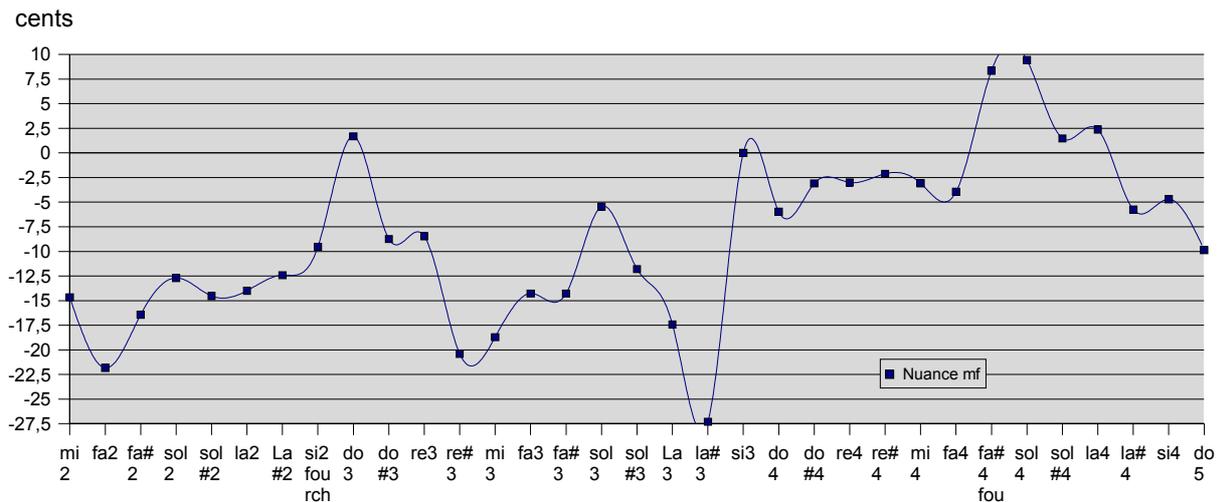


Fig E.5 Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste C

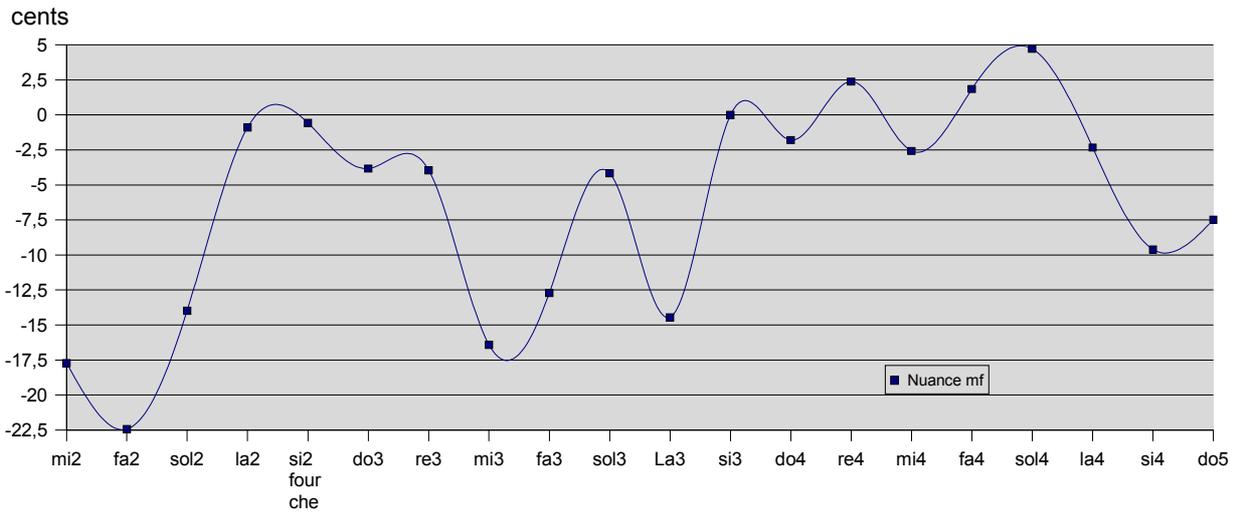


Fig E.6: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste D

Clarinette Buffet-Crampon, justesse de chaque note par rapport au si3

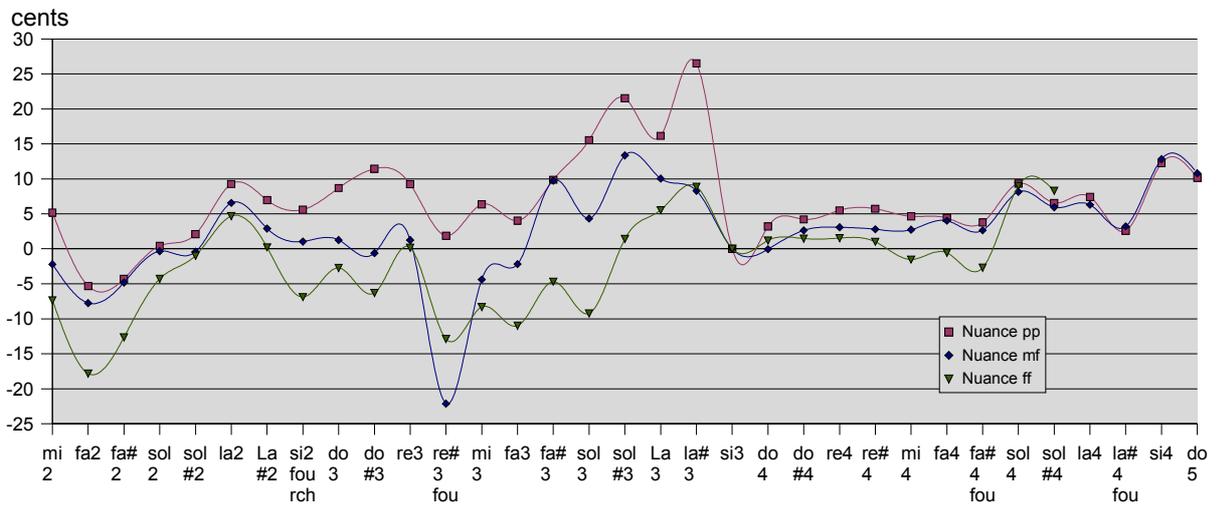


Fig E.7: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste A

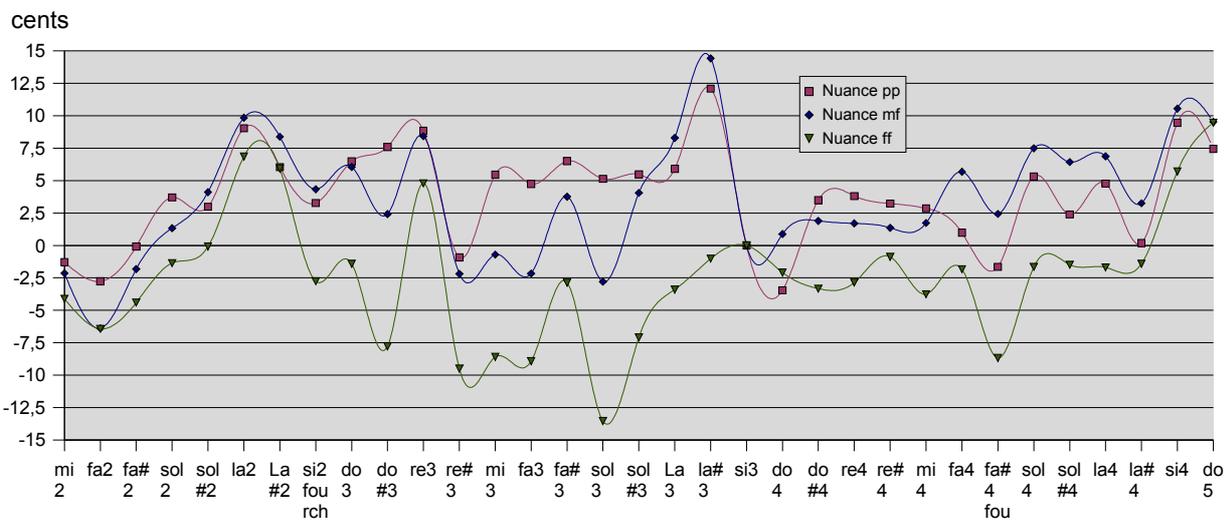


Fig E.8: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste B

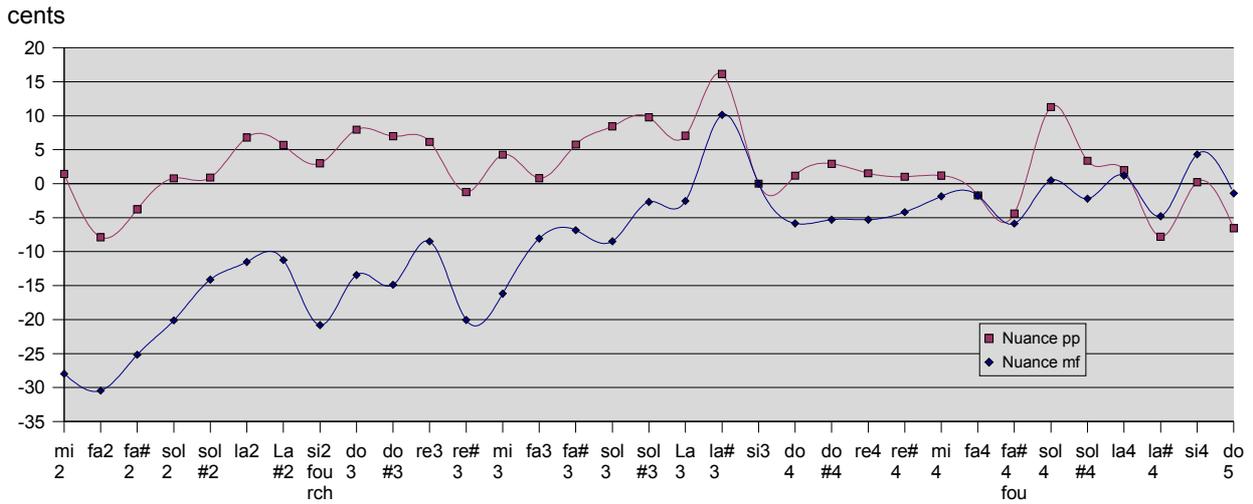


Fig E.9: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste C

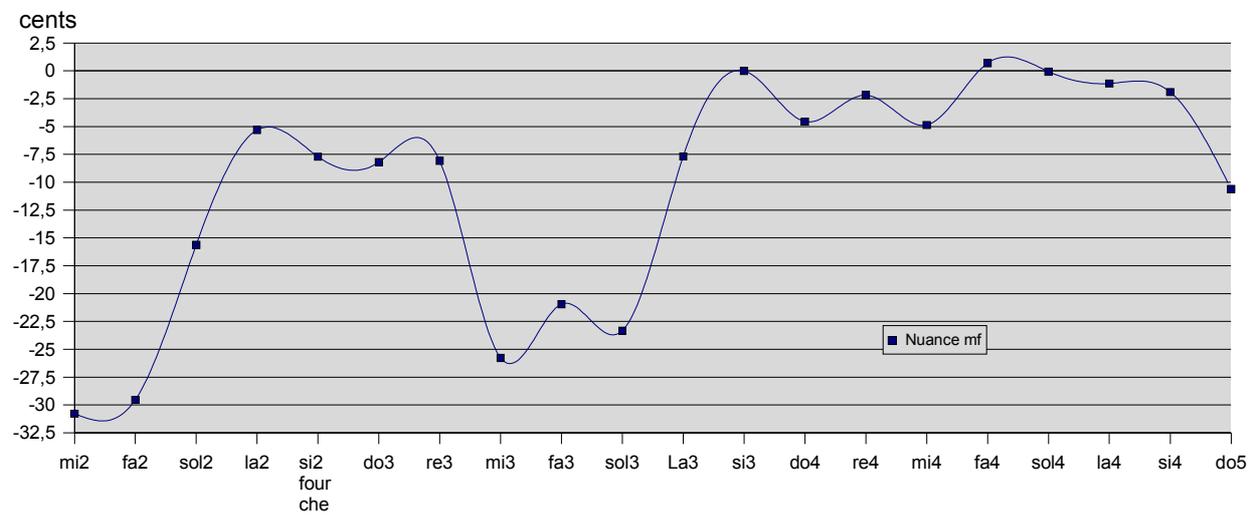


Fig E.10: Justesse de la clarinette Yamaha CS en terme de fréquence de jeu, clarinettiste D

F. Rôle de l'anche dans la fréquence de jeu, analyse théorique

Dans la référence [9], Jean Kergomard et Joël Gilbert discutent des effets sur la fréquence de jeu introduits par le débit d'anche et son amortissement. Dans ce qui suit, je présente quelques étapes de leur démarche afin de comprendre le phénomène.

L'équation (B.1) est légèrement modifiée afin de simplifier les calculs.

$$\frac{1}{\omega_r^2} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{q}{\omega_r} \frac{dx(t)}{dt} + x = p \quad (\text{F.1})$$

Avec $x = \gamma - y$, γ étant la pression d'alimentation sans dimension et y le déplacement verticale de l'anche. ω_r est la pulsation de résonance de l'anche, q l'inverse du facteur de qualité de l'anche, et p la pression à l'intérieur du bec.

En régime périodique on a:

$$X(\alpha) = D(\alpha)P(\alpha) \quad \text{Avec} \quad D(\alpha) = (1 + j\alpha q - \alpha^2)^{-1} \quad (\text{F.2})$$

$D(\alpha)$ étant la lorentzienne.

Lorsque l'on prend en compte le débit d'anche, l'équation (B.8) est modifiée, de nombreux auteurs comme Nederveen ou Worman [8] ont montrés que le débit U entrant dans le tuyau pouvait alors s'écrire dans le domaine fréquentiel:

$$U(\alpha) = [Y(\alpha) + jk_r \Delta l \alpha D(\alpha)]P(\alpha) \quad (\text{F.3})$$

α étant la fréquence sans dimensions $\alpha = f/f_r$, et f_r la fréquence de résonance de l'anche.

$U(\alpha)$ Le débit sans dimension

$Y(\alpha)$ l'admittance d'entrée du résonateur sans dimension

$k_r = 2\pi f_r / c$

Δl la correction de longueur due au débit d'anche

$P(\alpha)$ la pression sans dimension

On retrouve la forme de l'équation (B.8) avec le terme $jk_r \Delta l \alpha D(\alpha)$ en plus. Ce terme correspond au débit de l'anche.

Dans le domaine temporel, l'équation (F.2) s'écrit:

$$u(t) = \zeta (1 - \gamma + x) \sqrt{\gamma - p} \quad (\text{F.4})$$

Dans la mesure ou la pression p ne s'écarte pas trop de la pression nulle, c'est à dire pour un régime anche non battante, on peut effectuer un développement limité au troisième ordre de cette équation.

$$(\gamma - p)^{\frac{1}{2}} = \gamma^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{p}{\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \simeq 1 - \frac{p}{2\gamma} + \frac{p^2}{8\gamma} - \frac{p^3}{16\gamma^3}$$

On injecte l'expression ci-dessus dans l'équation (F.3), on obtient ainsi la partie antisymétrique du débit.

$$u_a(t) = \zeta \gamma^{1/2} \left[x - \frac{1-\gamma}{2\gamma} p - \frac{xp^2}{8\gamma^2} - (1-\gamma) \frac{p^3}{16\gamma^3} \right] \quad (F.5)$$

A l'aide de la méthode de l'équilibrage harmonique, on combine les équations (F.2), (F.3) et (F.5) afin de trouver une expression permettant de calculer la fréquence et l'amplitude pour une pression d'alimentation γ connue.

Le signal de pression en régime permanent peut s'écrire sous la forme:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} P_n e^{jn\omega_1 t + \phi_n}$$

De même $x(t)$ peut s'écrire

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} X_n e^{jn\omega_1 t + \psi_n}$$

On souhaite passer l'équation (F.5) dans le domaine fréquentiel. Dans ce qui suit on fait l'approximation du premier harmonique, on ne conserve donc que le premier harmonique d'amplitude en pression P_1 .

Le terme en $x(t)$ devient avec l'équation (F.2) $X(\alpha) = D(\alpha)P(\alpha)$

Le terme en $p(t)$ devient $P(\alpha)$.

Le terme en $x(t)p(t)^2$ s'écrit:

$$p(t)^2 \approx [P_2^\wedge e^{-j2\omega_1 t} + P_1^\wedge e^{-j\omega_1 t} + P_1 e^{j\omega_1 t} + P_2 e^{j2\omega_1 t}]^2$$

$$x(t) \approx [X_1^\wedge e^{-j\omega_1 t} + X_1 e^{j\omega_1 t}]$$

Le signe * représente le complexe conjugué.

En multipliant ces deux équations avec $P_1^\wedge = P_1$, $X_1^\wedge = X_1$ (La phase du premier harmonique est nul) et en ne conservant que le premier harmonique d'amplitude P_1 et de pulsation ω_1 on obtient:

$$x(t)p(t)^2 \approx X_1^\wedge P_1^2 e^{j\omega_1 t} + 2X_1 P_1 P_1^\wedge e^{j\omega_1 t}$$

Que l'on combine avec l'équation () $X(\alpha) = D(\alpha)P(\alpha)$

$$x(t)p(t)^2 \approx D(\alpha)^\wedge P_1^3 e^{j\omega_1 t} + 2D(\alpha)_1 P_1^3 e^{j\omega_1 t}$$

Le terme en $p(t)^3$ s'écrit:

$$p(t)^3 \approx [P_3^\wedge e^{-j3\omega_1 t} + P_2^\wedge e^{-j2\omega_1 t} + P_1^\wedge e^{-j\omega_1 t} + P_1 e^{j\omega_1 t} + P_2 e^{j2\omega_1 t} + P_3 e^{j3\omega_1 t}]^3$$

On ne conserve que les termes en P_1 , ω_1 et $P_1^\wedge = P_1$

$$p(t)^3 \approx 3P_1^3 e^{j\omega_1 t}$$

On déduit alors la partie antisymétrique du débit:

$$u_a(t) = \left[\zeta \gamma^{1/2} \left[D(\alpha) - \frac{1-\gamma}{2\gamma} \right] - \zeta \frac{P_1^2}{8\gamma^{3/2}} \left[2D(\alpha) + D(\alpha)^\wedge + \frac{3}{2} \frac{1-\gamma}{\gamma} \right] \right] P_1 e^{j\omega_1 t} \quad (F.6)$$

Finalement par équilibrage harmonique avec les équations (F.3) et (F.6) on obtient:

$$Y(\alpha) + jk_r \Delta l \alpha D(\alpha) - \zeta \gamma^{1/2} [D(\alpha) - \frac{1-\gamma}{2\gamma}] = -\zeta \frac{P_1^2}{8 \gamma^{3/2}} [2D(\alpha) + D(\alpha)^2 + \frac{3}{2} \frac{1-\gamma}{\gamma}] \quad (F.7)$$

Si on est pas trop près de la résonance d'anche, c'est à dire $\alpha \ll 1$, ce qui est toujours le cas dans un mode de jeu normal, on déduit l'expression suivante en prenant la partie imaginaire de l'équation précédente (F.7):

$$\Im(Y) + \frac{\alpha}{(1-\alpha^2)^2} [k_r \Delta l (1-\alpha^2) + \zeta q \gamma^{1/2} (1 - \frac{P_1^2}{8 \gamma^2})] \quad (F.8)$$

En ignorant les effets visco-thermiques sur la dispersion l'admittance d'entrée vaut:

$$Y(\alpha) = -j \cot(\alpha k_r L - j \chi(\alpha))$$

Avec $\chi(\alpha) = 3.04 \frac{l_v^{1/2}}{(k_r S)^{1/2}} \alpha^{1/2} k_r L$ et $l_v \approx 4.10^{-8} m$

On déduit alors de l'équation (F.8) la variation en fréquence relative à $c/4l$ avec:

$$P_1^2 = (\gamma - \gamma_{th}) \frac{8 \gamma^2}{\gamma + 1}$$

$$\gamma_{th} = \frac{1-\alpha^2}{3-\alpha^2} + \frac{2}{3^{3/2}} \frac{\chi}{\zeta} \quad \text{la pression de seuil}$$

$$\frac{\Delta F}{F} = -\frac{\Delta l}{L} - \frac{\zeta q}{3^{1/2} k_r L} [1 + \frac{3}{4} (\gamma - \gamma_{th})] \quad (F.9)$$

On observe donc deux termes, le premier est du au débit d'anche, il est fixe pour une pression donnée, le second est dû à l'amortissement de l'anche, il varie en fonction de la pression d'alimentation.

G. Courbes de l'évolution de la fréquence de jeu en fonction du temps

Ces courbes font référence au chapitre 4

Clarinette Buffet-Crampon, clarinettiste A:

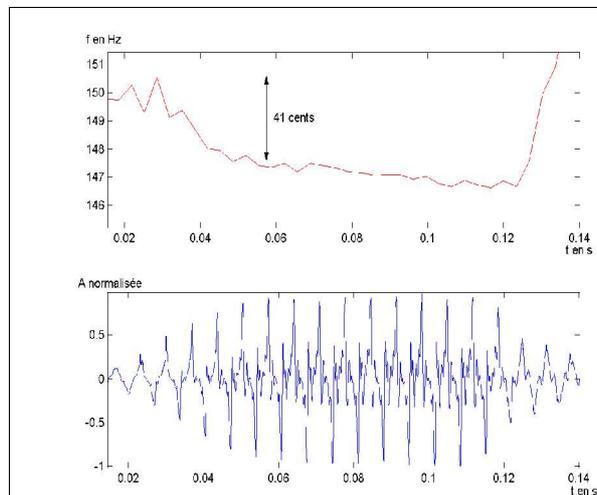


Fig F.1: Evolution de la fréquence de jeu d'un mi2 court et détaché, joué par le clarinettiste A

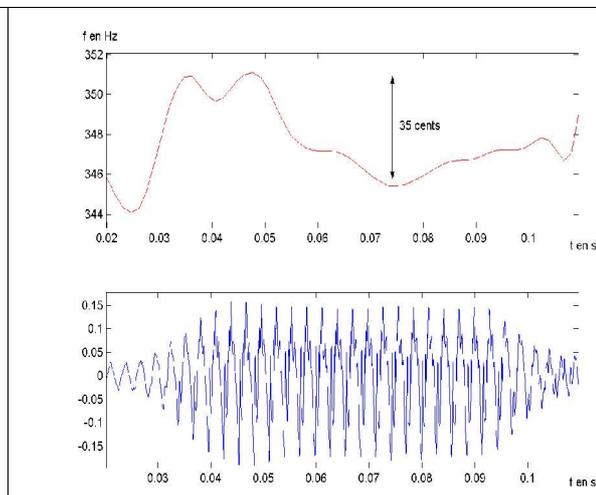


Fig F.2: Evolution de la fréquence de jeu d'un sol3 court et détaché, joué par le clarinettiste A

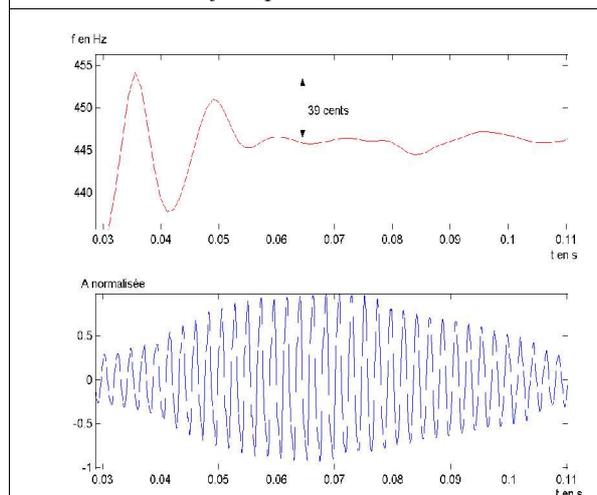


Fig F.3: Evolution de la fréquence de jeu d'un si3 court et détaché, joué par le clarinettiste A

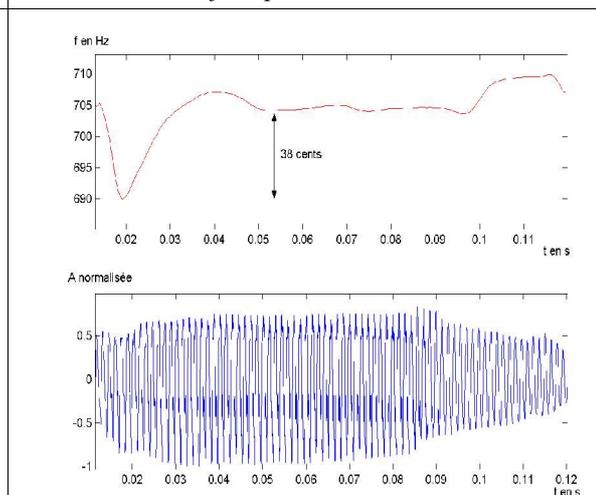


Fig F.4: Evolution de la fréquence de jeu d'un sol4 court et détaché, joué par le clarinettiste A

Clarinete Buffet-Crampon, clarinettiste E:

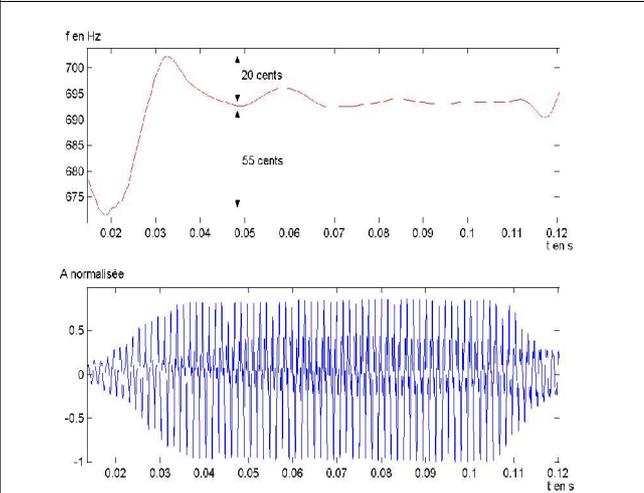
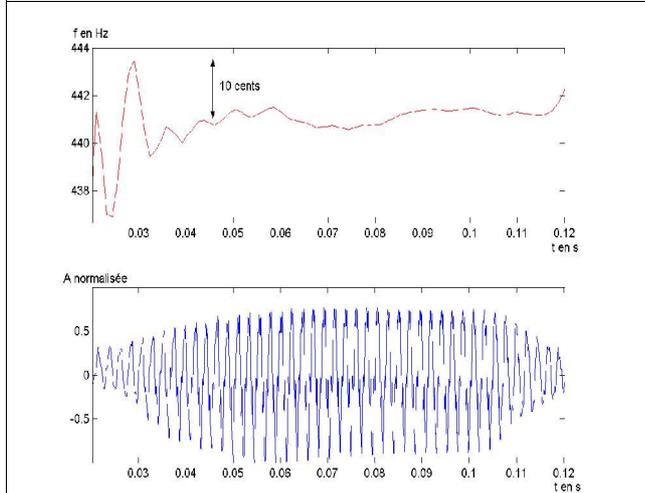
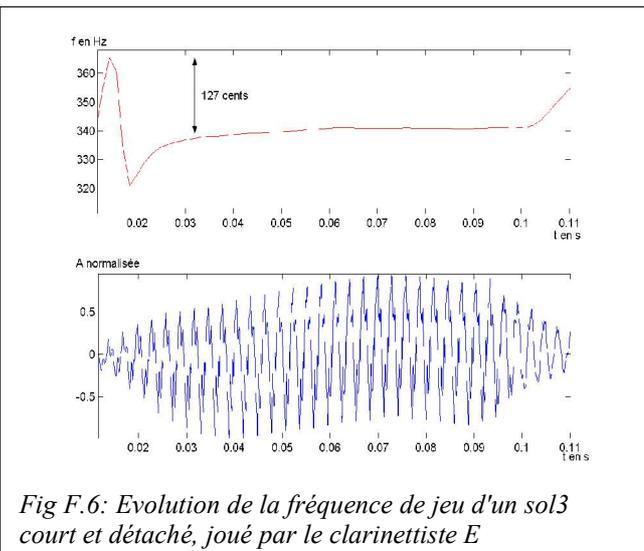
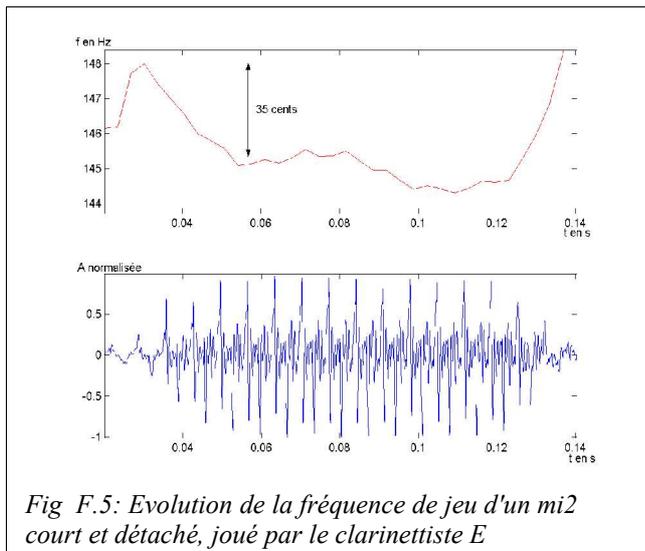


Fig F.5: Evolution de la fréquence de jeu d'un mi2 court et détaché, joué par le clarinettiste E

Fig F.6: Evolution de la fréquence de jeu d'un sol3 court et détaché, joué par le clarinettiste E

Fig F.7: Evolution de la fréquence de jeu d'un si3 court et détaché, joué par le clarinettiste E

Fig F.8: Evolution de la fréquence de jeu d'un sol4 court et détaché, joué par le clarinettiste E

H. Evolution de la fréquence de jeu pour une note tenue

Ces courbes font référence au chapitre 4

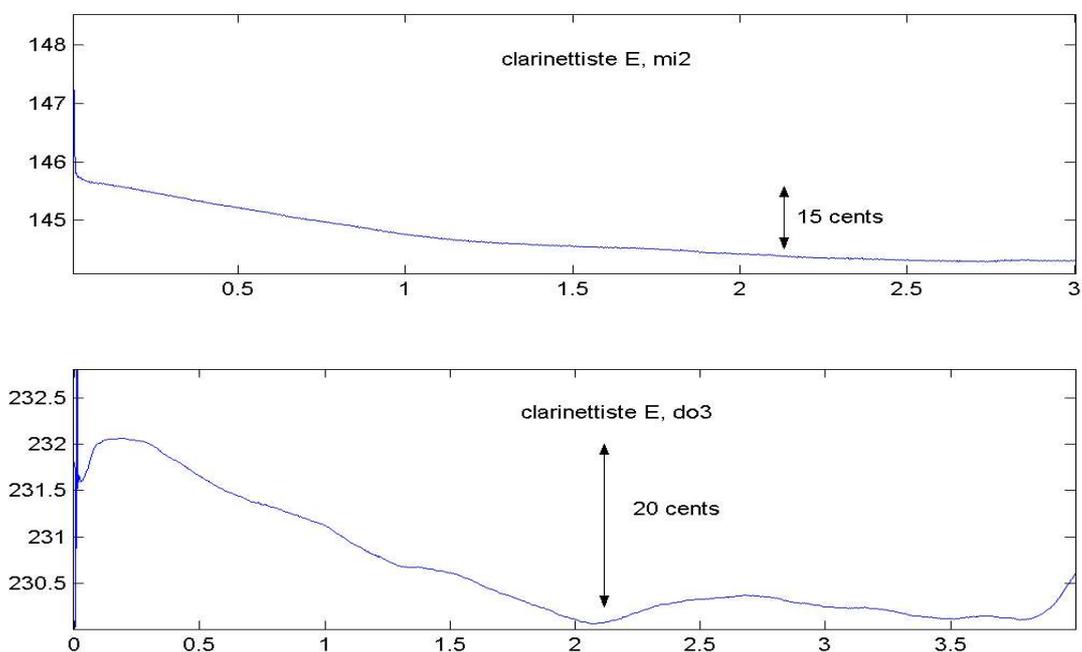
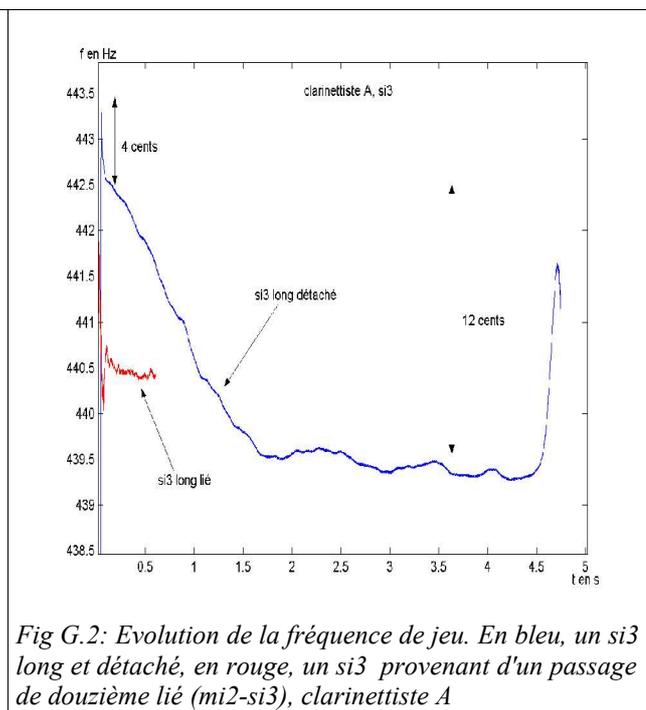
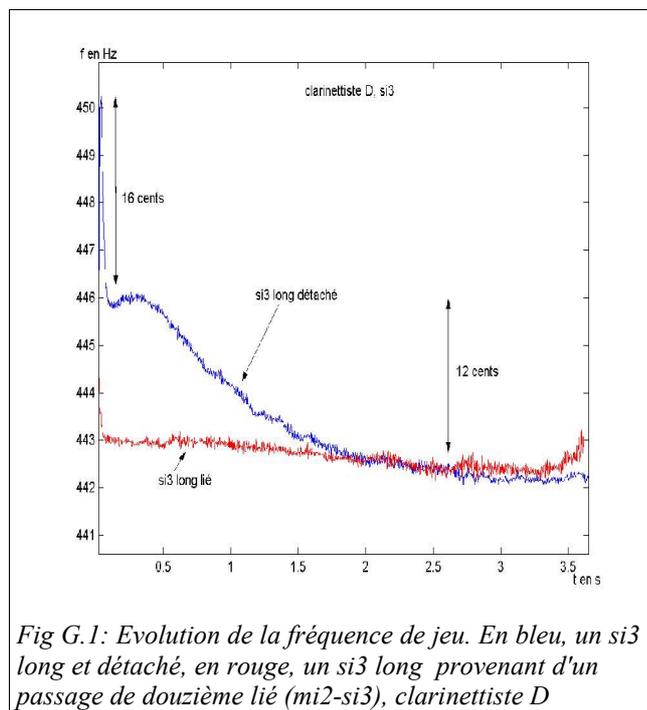


Fig G.3: Evolution de la fréquence de jeu pour un do3 et un m2 long et détaché, clarinettiste D

I. interview et enregistrement avec quelques clarinettes

Protocole des enregistrements:

Ces enregistrements ont été effectués pour les deux clarinettes de l'étude.

Une gamme chromatique rapide et détachée sur les deux premiers registres à une nuance mf.

Une gamme chromatique liée sur les deux premiers registres à trois nuances, pp, mf et ff.

Tous les passages de douzièmes liés et détachés à une nuance mf.

Quelques notes longues détachées (mi₂, do₃, sol₃, si₃, sol₄, do₅) à une nuance mf.

A nouveau, une gamme chromatique détachée sur les deux premiers registres à une nuance mf.

Protocole des interviews:

Les interviews ont duré en moyenne une trentaine de minutes. Voici les questions posées aux clarinettes.

Que pensez vous en générale de la justesse de la clarinette.

Utilisez vous des techniques de corrections, si oui pouvez vous en dire plus.

D'un point de vu justesse, que pensez vous des notes graves de la clarinette?

Est-ce que la justesse dépend de la nuance ? Si oui comment?

Y a-t-il des variations de hauteur sur les notes longues et détachées?

Voici le compte rendu des interviews.

Interview de Michel Arrignon

Pour Michel Arrignon, plusieurs facteurs sont importants pour la clarinette : la justesse, la facilité d'émission et le timbre mais pour jouer avec les autres, c'est l'intonation qui prime. -*Par définition un instrument n'est pas juste. Ainsi la clarinette baisse dans les graves, surtout les deux ou trois notes extrêmes (mi₂, fa₂, fa₂#). En facture, on a fait des progrès et aujourd'hui on pourrait rendre justes ces notes très facilement. Ces notes ont tendance à être basses dans le grave et si on se cantonne au registre *chalumeau*, on pourrait arriver à des notes justes en jouant sur la position et les dimensions des trous. Le problème vient du registre clairon. En ouvrant la clé de douzième les notes deviennent fausses. Il mentionne alors un des derniers modèles de Buffet-Crampon (Michel Arrignon est essayeur chez B.C) pour lequel on corrige l'avant-dernière note avec une troisième clé (Modèle Tosca). Cela permet de monter le *fa*. Il illustre cette correction par un passage du Concerto de Mozart pour lequel on rencontre un problème de justesse si l'on n'utilise pas cette clé. Concernant l'effet de la nuance sur la justesse, il mentionne que la clarinette baisse lorsque l'on joue plus fort, contrairement à la flûte. Cet effet est plus sensible dans le grave, même si on l'entend dans les autres registres et surtout pour un débutant. La correction se fait au niveau de l'embouchure, de la *pince* (terme que M.A n'aime pas utiliser). Cela a pour effet de maintenir la hauteur de la note : cela empêche de jouer trop fort. "En serrant l'anche, vous faites remonter la note au détriment du son si vous exagérez". Il y a donc un équilibre à trouver. Existe-t-il une différence de justesse entre les notes détachées et liées ? Pour lui c'est assez complexe. Au moment de l'attaque, l'altération monte puis redescend immédiatement. En jouant plus fort, on monte de la même manière, mais on descend beaucoup plus bas. Cet effet est très rapide et il l'entend parfaitement. Par contre, quelqu'un qui n'est pas habitué aura de la difficulté à le repérer même s'il sent qu'il se passe quelque chose. Enfin, concernant les notes longues et détachées, pour lui, il n'y a aucune modification de la hauteur.

Interview d'Alain Damiens

(cette interview n'a pas suivi le protocole car elle s'est faite au début du projet. Néanmoins il nous a paru important de l'ajouter).

Alain Damiens met l'accent sur la perception de la hauteur des sons, "On peut être trop haut et penser qu'on est trop bas" ... "l'instrument est peut-être juste et j'entends mal". D'autre part, il fait remarquer l'importance du contexte "suivant ce qu'on joue, on l'organise d'une autre façon" ainsi que l'incertitude due à la présence des autres instruments "il est possible que l'on joue juste et que les autres instruments ne le soient pas". Quoi qu'il en soit les musiciens sont toujours sensibles à corriger leur perception de l'intonation. A la question de l'évolution de la hauteur avec le temps, Alain Damiens répond que "l'intonation change sur la longueur si on ne change pas la musculature. C'est l'oreille qui fait changer, si l'on tient longtemps, la note change. Il y a une adaptation de l'embouchure" (il joue un mi grave) ... "je sais pas si le son est juste mais plus je continue plus je m'adapte". Il fait remarquer que le niveau sonore change la hauteur des sons : "ça change complètement si on joue piano ou fort", et que l'accord se fait en fonction du contexte. Sur les deux clarinettes, Alain Damiens ne perçoit pas de réelles différences de justesse. "Il y a des choses tout à fait justes" mais il fait remarquer que "l'oreille est peut-être habituée à entendre". La Yamaha lui semble plus agréable à jouer, néanmoins une douzième lui semble trop courte, "il y a quelque chose qui manque sur sol-ré, j'ai envie de tirer l'intervalle". En ce qui concerne les notes graves, pour Alain Damiens "il n'y a rien de gênant". Alain Damiens propose d'essayer sa clarinette (Buffet-Crampon RC Green-line) avec son bec (Vandoren B45). Il fait remarquer qu'il préfère jouer avec le pavillon légèrement tiré pour la justesse des notes graves lorsqu'il joue piano, "cela m'évite de rectifier avec l'embouchure à un niveau impossible".

Interview de Florent Pujaila

D'une manière générale, Florent Pujaila est d'accord sur le fait que la clarinette n'est pas un instrument juste. Etant donné les problèmes rencontrés, les instruments actuels proposés se rapprochent selon lui d'un compromis entre le grave et l'aiguë. Il met l'accent sur les problèmes de justesse entre douzièmes : « le gros problème est le compromis entre les notes graves et leurs douzièmes » et insiste sur le fait qu'il est difficile de corriger les graves sans altérer les douzièmes : « si on ajuste les graves, on fait monter les douzièmes ». Pour Florent Pujaila, le problème de justesse des notes graves est commun à toutes les clarinettes « globalement les graves sont extrêmement bas, les sol, fa et mi ». Il parle du modèle Tosca de Buffet-Crampon qui essaye de limiter le problème de justesse du fa₂ à l'aide d'un trou supplémentaire. Il mentionne également les notes de gorge (*tuyau court, sib₃, la₃*), il est possible de les corriger avec des doigtés supplémentaires. Néanmoins il est souvent indispensable de rajouter de nombreux doigts. Pour simplifier ces corrections, Florent Pujaila utilise un barillet un peu plus long (entre 66 et 66,5 mm), néanmoins il explique que ce changement a le défaut de faire descendre quelques notes, « ça fait plonger le mi₃, fa₃, dans l'aiguë aussi, le si₄ et do₅ commencent à être un peu triste, bas, et c'est un peu mon souci, [...], sourire quand je joue ces notes là ». Florent Pujaila utilise des techniques d'embouchure pour corriger certaines notes : "On ouvre un peu la gorge pour faire baisser, quand on se sent bas, on peut pincer un tout petit peu ». Il n'aime pas vraiment modifier la pression car le son s'en ressent et est déformé, il privilégie le conduit vocal pour descendre « en pensant plus bas, c'est-à-dire en ouvrant un peu comme un chanteur pour baisser la note, ouvrir un peu plus son palet pour descendre la note ». Pour faire monter une note, il explique que l'on peut pincer un peu, mais cette technique modifie le son et ne va pas toujours dans le sens du son qu'il recherche. Pour lui, le placement de la bouche modifie l'intonation, l'embouchure, la gorge, tout ce qui peut servir à chanter est important. « Il est indispensable de penser la note que l'on joue, ..., il y a un fort pourcentage de justesse qui est lié au résonateur (il montre la gorge et la bouche) ». Pour Florent

Pujuila, il est clair que la justesse est liée également à la nuance. « La clarinette a tendance à monter quand on joue piano, et à baisser quand on joue fort ». Ceci est pour lui une généralité. De plus, il parle du rôle de l'oreille humaine « lorsqu'on débute la note, on sait très bien que le son va se durcir, donc pour l'améliorer on ouvre, on laisse l'anche vibrer, et ça fait baisser ... c'est humain le fait de vouloir entendre ce son là ». Pour Florent Pujuila, la hauteur d'une note tenue ne varie à paramètres constants.

Interview de Guy Deplus

Pour commencer, Guy Deplus insiste bien sur les différences probables entre mesures de justesse et perception de justesse. Par exemple sur les caractéristiques de l'oreille « un instrument qui serait [...] parfaitement juste pour les appareils (accordeurs) ne le serait pas pour l'oreille », ou encore sur les différences entre timbre et hauteur « parfois, c'est une question de timbre, une note plus neutre paraît plus basse [...] plus un son est riche en harmonique plus il paraît haut. ». Ainsi, Guy Deplus garde toujours en tête la particularité de l'oreille humaine, conscient que justesse n'est pas forcément lié à la hauteur du fondamentale. Pour Guy Deplus, la clarinette n'est pas un instrument très juste. Les problèmes se font surtout ressentir dans les rapports entre douzièmes. Il reconnaît que les fabricants ont beaucoup évolué, que ce soit au niveau de la justesse mais aussi sur le timbre, et bien que certains problèmes persistent, les clarinettes d'aujourd'hui sont pour lui beaucoup plus homogènes. Ainsi, il explique que ce problème est principalement dû au fait qu'il n'existe qu'un trou de registre pour toutes les notes : « l'idéal serait d'avoir uniquement des fondamentales justes est ensuite un trou de douzième pour chaque note ». Il mentionne le travail de René Hagmann, luthier à Genève, qui propose un deuxième trou de registre pour obtenir un sib3 (note de gorge) de meilleure qualité et corriger certains problèmes de justesse. Guy Deplus met l'accent sur l'évolution des problèmes de justesse des notes graves. Ainsi, au début de sa carrière, le passage la2-mi4 (12ème) montrait de forts problèmes de justesse très perceptibles et ennuyeux, les problèmes ont été déplacés de façon à obtenir une clarinette beaucoup plus homogène, moins gênants pour les gammes chromatiques. De cette façon, pour Guy Deplus, les clarinettes d'aujourd'hui présentent des mi2 trop bas, mais le problème est encore plus accentué sur les fa2. Ces notes posent parfois des difficultés sans aucune possibilité de correction, par exemple le début du Deuxième Concerto de Weber pour clarinette dans lequel le passage fa5-fa2 est particulièrement faux, le fa2 étant extrêmement bas. Pour Guy Deplus, il existe des techniques de corrections. Néanmoins, il explique que chaque note présente des particularités, les corrections sont limitées et ne sont pas les mêmes pour chacune. Ainsi, quelques fois, des corrections digitales sont possibles, notamment pour les notes de gorge (tuyau court) afin de les faire baisser. Le conduit vocal joue aussi un rôle très important, l'ouverture de la gorge, les changements de volume de la cavité bucale à l'aide de la langue conduisent à des variations de hauteur. Selon la configuration, il est possible de faire descendre ou monter une note de quelques cents. Guy Deplus souligne qu'il est très difficile d'expliquer ces phénomènes car, étant variables, les musiciens ne pensent pas à les mesurer, et au fil des années, de l'expérience, les clarinettes intègrent ces techniques, les corrections deviennent instinctives. Guy Deplus fait remarquer que toutes ces recettes induisent également un changement du timbre, et que parfois, cela suffit à donner l'impression d'une variation de hauteur : « ça change la qualité de son, le timbre, et même si la justesse n'est pas scientifiquement touchée, ça paraît à l'oreille ». Pour Guy Deplus, la justesse de l'instrument est indéniablement liée à la nuance. Ainsi il explique que la hauteur baisse lorsque l'on joue fort et inversement pour une nuance piano, cela sur toutes les notes. Cependant, ces variations ne sont pas réparties de la même façon suivant les notes. Il explique que ce phénomène est plus prononcé pour la main gauche par exemple sur un mi3 où quelquefois une correction est indispensable. Pour lui, le bec joue également, en donnant l'exemple du Vandoren B40 (il s'agit d'un bec ouvert de la gamme Vandoren H=1.195 mm) : « Avec un bec B40 qui a de la retenue [...] c'est ce qui donne cette sonorité velouté, mais il a un défaut lorsqu'on joue piano dans la

main gauche, il fait monter plus que les autres becs ». Enfin, concernant ces phénomènes, Guy Deplus fait remarquer que parfois le clarinettiste ne s'en rend pas compte, il faut une oreille externe pour l'entendre. Lorsque l'on parle de l'évolution de la hauteur d'une note tenue en fonction du temps, Guy Deplus fait le commentaire suivant : « On ne le sent pas, mais l'appareil l'indique [...] ça baisse, c'est plus haut à l'attaque ».

Interview d'Aude Richard

Aude Richard joue Buffet-Crampon, elle fait remarquer que ces observations sont surtout valables pour cette marque car elle la connaît très bien. Pour elle, la clarinette n'est pas un instrument très juste. Globalement les clarinettes ont un diapason plutôt haut pour deux raisons : satisfaire les élèves qui ont tendance à jouer bas et pour des raisons commerciales (satisfaire par exemple le marché japonais). Aude Richard mentionne l'effet du timbre sur la perception de hauteur « parfois, le timbre peut donner l'impression d'être haut ou inversement ». Selon elle, il existe des problèmes de justesse entre douzièmes sur les notes graves et les notes de gorge. Par conséquent elle explique que le grave est bas (mi₂, fa₂). Plusieurs techniques sont utilisées pour corriger certaines imperfections, elle explique qu'en ouvrant le conduit vocal, on peut faire descendre une note si elle est trop haute. La position de la langue peut également jouer un rôle. Néanmoins, Aude Richard explique que ces techniques sont limitées, et qu'on ne peut pas faire varier énormément. Des techniques de doigtés sont possibles seulement pour certaines notes, par exemple, pour les notes de gorge, lorsqu'elles sont trop hautes, on peut les faire descendre en rajoutant des doigts de la main droite. Concernant la hauteur des notes et la nuance, Aude Richard fait le commentaire suivant « Plus on joue piano, plus c'est haut, et plus on joue fort, plus c'est bas ». cela pourrait être dû à la façon de jouer, pour garder une qualité de son. Enfin lorsqu'on joue une note détachée et longue, Aude Richard explique qu'il existe une variation très rapide tout au début de la note, puis la fréquence reste stable.

Bibliographie

- [1] Vincent Debut, Deux études d'un instrument de musique de type clarinette: Analyse des fréquences propres du résonateur et calcul des auto-oscillations par décomposition modale, *université de la Méditerranée Aix-Marseille II*, 2004.
- [2] Vincent Debut, Jean Kergomard, Franck Laloe, Analysis and optimisation of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator, 2004.
- [3] Claudia Fritz, La clarinette et le clarinettiste: Influence du conduit vocal sur la production du son, *université Paris VI et University of New South Wales*, 2004.
- [4] Mathias Demoucron, Influence du conduit vocal du clarinettiste sur la fréquence de jeu, *université Paris VI, Ircam*, 2004.
- [5] Laloe S. et F., La clarinette (Les instruments de l'orchestre, bibliothèque: Pour la science, diffusion BELIN).
- [6] J. Kergomard, S. Olivier, J. Gilbert, Calculation of the spectrum of self-sustained oscillators using a variable truncation method: Application to Cylindrical reed instruments, *Acta Acustica*, (86) 685-703, 2000.
- [7] Jean Kergomard, Mechanics of Musical Instruments, Lecture notes CISM, 1995.
- [8] Walter Elliott Worman, Self-sustained nonlinear oscillations of medium amplitude in clarinet-like systems, *Case western reserve university*, 1971.
- [9] J. Kergomard, J. Gilbert, Analyse de quelques aspects du rôle de l'anche d'un instrument à vent cylindrique, *Vème Congrès français d'Acoustique*, 294-297, septembre 2000.
- [10] J.P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert, J. Kergomard, Some aspects of tuning an clean intonation in reed instruments, *Applied acoustics*, 19-60, 1995.
- [11] R.T. Schumacher, Self-Sustained Oscillations of the Clarinet: An Integral Equation Approach, *Acustica*, vol(40), 1978
- [12] F. Pinard, B. Laine, H. Vach, Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography, *J. Acoust. Soc. Am*, 113(3), Mars 2003
- [13] Jean Kergomard, Effet de l'inharmonicité sur la fréquence de jeu, 2005.
- [14] X. Boutillon, V. Gibiat, Evaluation of the acoustical stiffness of saxophone reeds under playing conditions by using the reactive power approach, *J. Acoust. Soc. Am*, 100, 1178-1189, 1996
- [15] Jack Brymer, La clarinette, collection Yehudi Menuhin.
- [16] Facchinetti, Boutillon, Constantinescu, Numerical and experimental modal analysis of the reed and pipe of a clarinet, *J. Acoust. Soc. Am*, 113(5), 2874-2883, 2003
- [17] Jean Laroche, Traitement des Signaux Audio-Fréquences, Février 1995