

# CFA/VISHNO 2016

## Concevoir et réaliser une flûte de transition

C. Vauthrin<sup>a</sup>, P. De La Cuadra<sup>a</sup> et R. Flûtes<sup>b</sup>

<sup>a</sup>chaire GEACMUS, Paris Sorbonne, 2, rue Francis Croisset, 75018 Paris, France

<sup>b</sup>Flûtes Roosen, 35 rue Simart, 75018 Paris, France  
vauthrin@lam.jussieu.fr



LE MANS

A la demande de professionnels du jeu de la flûte auprès d'un facteur, le but de cette étude est de concevoir une flûte se situant historiquement entre les flûtes d'époques baroque et classique, les premiers modèles des flûtes dites Boehm. L'objectif du travail mené conjointement avec un facteur est de fournir aux musiciens un instrument neuf, avec les caractéristiques musicales des instruments d'époque et quelques modifications quant à la facilité de jeu de certains doigtés. Les flûtes d'époque sont étudiées géométriquement, puis acoustiquement à partir de modèle et de mesure d'admittance. Les résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus sur une flûte moderne, dans l'objectif de comprendre comment la flûte a évolué, mais aussi dans l'objectif d'identifier les caractéristiques propres à ces instruments.

## 1 Introduction

### 1.1 Bref historique de la flûte baroque à la flûte moderne

La flûte traversière commence à se développer en tant qu'instrument pour musique instrumentale à partir de 1400. Jusqu'au XVIII<sup>ième</sup> siècle, les flûtes sont de forme cylindrique et sans clé. Principalement fabriquées en bois, certains écrits montrent l'existence d'instruments en « ébène, verre, et cristal, et même en cire », [8]. A la fin du XVIII<sup>ième</sup> siècle, la flûte arrive au bout de ses capacités musicales.

C'est avec Jacques Hotteterre le Romain (ca. 1680-ca.1761) que la flûte baroque change. La première clé est ajoutée aux alentours de 1660 afin d'ajouter le  $re\sharp$  grave. Afin d'adoucir le son de la flûte, Hotteterre change également la perce de la flûte et la rend inversement conique avec une tête cylindrique. Au cours du XVIII<sup>ième</sup> siècle, diverses clés sont rajoutées afin de faciliter les multiples doigtés de fourche et d'améliorer la justesse de jeu, [8].

Le XIX<sup>ième</sup> siècle est caractérisé par pléthore de brevets, chacun cherchant à proposer la meilleure version de la flûte. Divers facteurs proposent des systèmes de clé, tous avec l'intention de simplifier le doigté de la flûte tout en améliorant sa justesse mais également le volume sonore et la brillance du timbre de la flûte. Sans l'arrivée de Boehm (1794-1881) dans le monde de la flûte, celle-ci était en danger d'être abandonnée par les compositeurs, n'étant pas compatible avec les avancées considérables de l'orchestre. Le système de cléage Boehm permet au musicien d'accéder à des trous de jeu plus éloignés et d'un diamètre plus élevé. Ceci laisse donc la liberté au facteur de réajuster la position et la taille des trous afin de trouver la meilleure justesse et le meilleur son possible. Le génie de Boehm est dans la mise en œuvre de ces systèmes parallèles afin de créer un nouveau cléage beaucoup plus pratique et fiable. La première flûte dite Boehm fut construite en 1831. Cette flûte inaugura les clés à anneaux à double articulation, ce qui permettait à l'index de la main droite de couvrir deux trous et de produire un Fa au lieu d'un Fa $\sharp$ . La flûte Boehm devient beaucoup plus visible en France dès 1838, ceci grâce à une nouvelle version française, établie par Buffet, Crampon et Dorus. Les principales modifications furent un nouvel agencement des tiges et l'ajout de certaines clés pour faciliter les trilles, [8]. Boehm conçut une nouvelle flûte en 1847. Celle-ci, construite en métal pour des raisons de timbre, présentait une perce cylindrique avec une tête légèrement conique. Boehm élargit également l'embouchure et créa une légère dépression là où la

lèvre repose sur l'embouchure afin que le jet d'air arrive plus directement dans la flûte, [8].

La facilité technique pourvue par le mécanisme Boehm ainsi que son acoustique, proposant une plus grande justesse et une diversité de timbre, assura l'avenir de la flûte. Les compositeurs s'y intéressèrent davantage et commencèrent à composer des pièces intéressantes musicalement au delà des pièces virtuoses du XIX<sup>ième</sup> siècle, composées principalement pour montrer la dextérité du musicien sans se préoccuper du timbre de l'instrument.

### 1.2 Contexte de l'étude

Ce travail fait suite à la demande de professionnels du jeu de la flûte auprès d'un facteur, dans le but de concevoir une flûte à cléage à anneaux type Boehm, de perce cylindro-conique, semblable aux flûtes inaugurées dans les années 1830, que l'on appellera dans la suite du document flûte de transition. L'objectif de l'étude est premièrement d'étudier des flûtes de l'époque de facteurs principalement français, la flûte présentée dans ce papier étant une flûte de Thibouville-Lamy. On entend par étudier : relevés de géométries, mesures d'impédance, comparaison des mesures avec des modèles d'impédance et enfin resituer ces analyses dans un contexte historique/musicologique. Ces différentes mesures seront également comparées à celles effectuées sur une flûte moderne Sankyo. Dans un second temps, une discussion sera menée avec les musiciens pour identifier leurs attentes quant au nouvel instrument, mais également afin d'identifier les caractéristiques de jeu qui leur plaisent ou déplaisent sur les instruments d'époque (difficulté d'émission de certains doigtés, justesse de certaines notes, ...). Ces discussions pourront être enrichies par des tests en jeu des instruments ou des prototypes, avec musicien, dans le but d'étudier leur jouabilité. Enfin, le dernier point est de travailler à la conception de l'instrument avec le facteur. Ces travaux répondent à différentes problématiques sur l'ergonomie de la flûte réalisée, le cléage, ...

Ce papier présente le début de cette étude, c'est-à-dire les premiers objectifs. Nous présentons les caractéristiques géométriques, de cléage et de doigté de la flûte Thibouville-Lamy. Dans un second temps, nous étudierons conjointement les mesures et les modèles d'admittance de cette flûte et, troisièmement, nous les comparerons à ceux d'une flûte moderne. .

## 2 Caractéristiques de la flûte dite "de transition"

### 2.1 Nombre de trous, doigtés et clétage

La flûte du XIX<sup>ième</sup> siècle étudiée dans ce papier est une flûte du facteur Thibouville-Lamy, la date de sa fabrication n'est pas exactement connue. Cette flûte conserve la perce cylindro-conique de la flûte à une clé, mais a maintenant 16 trous. La gamme par demi-tons chromatiques est alors jouée par ouvertures successives des trous et non plus par doigtés de fourches. L'instrument est donc muni d'un clétage adapté de type Boehm à anneaux et à tiges, ce dernier nécessite de nouveaux doigtés. Ces doigtés sont semblables à ceux joués actuellement sur la flûte cylindrique moderne.

### 2.2 Géométrie, flûtes de transition/moderne

Dans le but de comparer la géométrie de la flûte de transition à celle d'une flûte moderne du XIX<sup>ième</sup> siècle, nous relevons les cotes de chacune des flûtes à l'aide d'un trusquin pour les relevés de perce et d'un pied à coulisse pour les diamètres des trous, hauteurs de cheminées, ...

### 2.3 Perce

Nous représentons en figure 1 les relevés de diamètres de perce de chacun des instruments. A partir de la figure

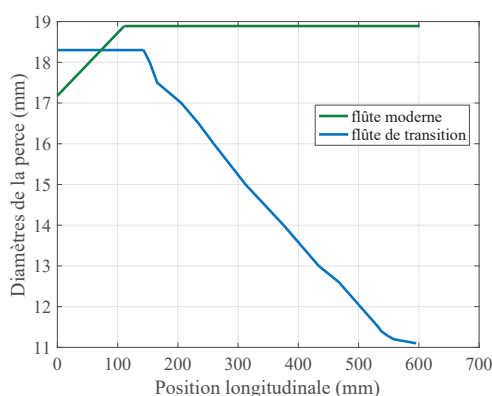


FIGURE 1 – Relevés de la perce pour les flûtes moderne et de transition.

1, nous pouvons remarquer des différences importantes entre les perces de ces deux instruments. En effet, la perce de la tête de la flûte moderne est conique divergente, alors que celle de la flûte de transition est cylindrique. Toutefois, les valeurs des diamètres de la perce sont assez proches entre 17 et 19 mm. La perce du corps de la flûte moderne est entièrement cylindrique, de diamètre 18,9mm, alors que la perce du corps de la flûte de transition est conique convergente entre 18,2 et 11mm, le cône se rétrécissant de façon irrégulière, jusqu'à 60% de sa valeur initiale. La perce de la patte de la flûte est par ailleurs assez stable, autour de 11mm. Les différences de perce entre ces deux instruments sont majeures, et représentatives de l'évolution de la flûte au XIX<sup>ième</sup> siècle, passage de la flûte baroque à la flûte moderne.

### 2.4 Position et diamètre des trous

Nous représentons en figure 2 les relevés de diamètres et positions des trous de note. A partir de la figure 2,

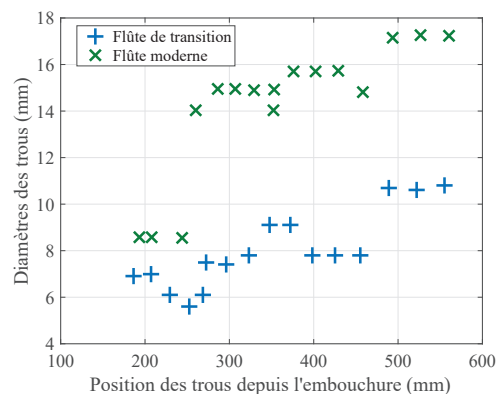


FIGURE 2 – Relevés des diamètres et positions des trous de note pour les flûtes moderne et de transition.

nous pouvons noter que les diamètres des trous de note de la flûte moderne sont bien plus grands (entre 8 et 17mm) que ceux de la flûte de transition (entre 5 et 11mm).

Pour la flûte moderne, les trois premiers trous sont plus réduits, les deux premiers servant aux clés de cadence et le troisième est un trou à deux fonctions : trou de note des Do dièse 4 et 5 mais aussi trou de registre facilitant l'émission de la 3<sup>ième</sup> octave de l'instrument. Pour la flûte de transition, nous notons que les Do 4 et 5 sont joués par l'ouverture de deux trous successifs (indissociables du point de vue du clétage, troisième et quatrième trous en partant de la gauche) alors qu'un seul trou est ouvert lors du jeu de ces notes avec la flûte moderne. La justification de l'utilisation de ces deux trous plutôt qu'un n'est pas clairement identifiée, mais peut être correspondent-ils à un compromis de justesse, de timbre.

Toutefois, pour ces deux flûtes, nous observons une augmentation de la taille des trous avec leur position. Les positions des trous entre les deux flûtes varient entre 0 et 8 mm, les trous de la flûte moderne étant plus gros, ils sont toujours un peu plus bas que ceux de la flûte moderne.

### 2.5 Dimensions de l'embouchure, des hauteurs de cheminées

Pour la flûte de transition, l'embouchure ressemble à un ovale élargi de dimensions 10.1 x 11.9 mm, alors que l'embouchure de la flûte moderne est plus proche du rectangle de dimensions 12.5 x 10.0. Un autre paramètre géométrique très dissemblable entre ces deux flûtes est la hauteur de cheminée des trous. Dans une flûte moderne l'épaisseur du métal est fine, de l'ordre du mm, les cheminées de trous sont étirées entre 1 et 3-4 mm environ. Par contre, pour la flûte de transition, l'épaisseur du bois est plus imposante, les hauteurs de cheminée fluctuent entre 3 et 6 mm, selon le clétage disposé : un anneau ou une clé pleine. De plus, dans le cas de la flûte de transition on observe de sous-coupage sous les trous, ceci est difficilement mesurable, mais a

certainement une influence sur les fréquences de jeu de l'instrument.

### 3 Étude de l'admittance

Dans un second temps, l'objectif de notre étude est d'obtenir des informations sur les fréquences de résonance de l'instrument et sa facilité de jeu. C'est pourquoi nous étudions l'admittance, c'est à dire le rapport du débit acoustique sur la pression acoustique en fonction de la fréquence. Tout d'abord nous présentons comment effectuer un modèle d'admittance de la flûte à l'embouchure, ce modèle nous servira ensuite à valider nos mesures. Enfin, nous comparons les résultats obtenus sur la flûte de transition et la flûte moderne.

#### 3.1 Modélisation de l'admittance

La flûte peut se décomposer comme le schéma indicatif en figure 3. Trois impédances sont alors à

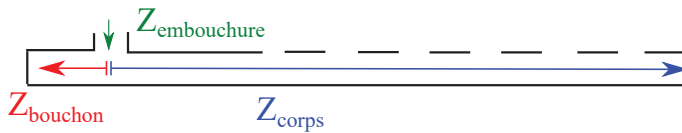


FIGURE 3 – Schéma de la flûte, description des impédances étudiées

différencier, celle du corps et de la tête notée  $Z_{corps}$ , celle correspondant au tronçon entre l'embouchure et le bouchon notée  $Z_{bouchon}$  et celle correspondant à l'embouchure notée  $Z_{embouchure}$ . Afin d'obtenir l'impédance (ou l'admittance) de la flûte entière, au-dessus du trou d'embouchure, il convient alors d'effectuer le calcul suivant :

$$Z_{flute} = Z_{embouchure} + \frac{Z_{embouchure} \cdot Z_{corps}}{Z_{embouchure} + Z_{corps}} \quad (1)$$

L'impédance totale de la flûte correspond à l'addition de l'impédance de l'embouchure mise en série avec la combinaison des impédances du corps et du bouchon en parallèle.

La flûte traversière étant un instrument ouvert-ouvert à l'embouchure et à son extrémité, il convient donc d'étudier l'admittance  $Y_{flute}$ , qui est l'inverse de l'impédance  $Z_{flute}$ .

**Modèle acoustique d'un tube cylindrique :** La théorie des ondes planes décrite par Pierce, [7], permet d'exprimer la matrice de transfert d'un tube cylindrique, dans le cas où la propagation est décrite en utilisant le formalisme de lignes de transmission, comme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma L & Z_c j \sinh \Gamma L \\ Z_c^{-1} j \sinh \Gamma L & \cosh \Gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

où  $\Gamma$  est la constante de propagation,  $L$  la longueur du cylindre et  $Z_c$  l'impédance caractéristique. Cette matrice de transfert permet de relier la pression  $P$  et le débit acoustique  $U$  à chaque extrémité du cylindre.

Pour des tuyaux larges (avec des valeurs du nombre de

Stokes,  $r_v = \frac{\rho d v}{\mu L c}$  où  $d$  est la longueur caractéristique de la particule,  $v$  la vitesse du fluide,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide et  $Lc$  la longueur caractéristique; supérieures à 10), la constante de propagation  $\Gamma$  est :

$$\Gamma = \alpha + j \frac{\omega}{v_\phi} \quad (3)$$

où  $\alpha = \frac{\omega}{c_0} \left[ \frac{\alpha_1}{r_v} + \frac{\alpha_2}{r_v^2} \right]$ ,  $\alpha_1 = 1.044$  et  $\alpha_2 = 1.08$ ,  $v_\phi = c_0 \cdot \frac{1}{1 + \alpha_1 / r_v}$ . En prenant en compte les effets visco-thermiques, l'impédance caractéristique peut alors s'écrire :

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{S} \left[ 1 + \frac{\bar{\alpha}_1 (1 - j)}{r_v} - \frac{\bar{\alpha}_2 j}{r_v^2} \right] \quad (4)$$

où  $\bar{\alpha}_1 = 0.37$  et  $\bar{\alpha}_2 = 1.147$ , pour l'air.  $S$  étant la section du cylindre.

**Modèle acoustique d'un tube cône :** De la même façon que pour le tronçon cylindrique, en suivant [3], nous exprimons la matrice de transfert pour un tronçon cône, voir figure 4, reliant la pression  $P$  et

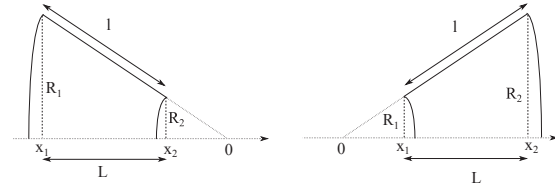


FIGURE 4 – Indicateurs géométriques utilisés pour le modèle acoustique de tronçons de cônes convergent ou divergent, figure tirée de [3].

le débit acoustique  $U$  à chacune des extrémités de ce tronçon :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

où  $A = \frac{R_2}{R_1} \cos \Gamma L - \frac{\sin \Gamma L}{\Gamma x_1}$ ;  $B = j \frac{\rho_\nu c_0}{\pi R_1 R_2} \sin \Gamma L$ ,  $C = \frac{\pi R_1 R_2}{\rho_\nu c_0} \left[ j \sin \Gamma L \left[ 1 + \frac{1}{\Gamma^2 x_1 x_2} \right] + \frac{\cos \Gamma L}{j \Gamma} \left( \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) \right]$ ;  $D = \frac{R_1}{R_2} \cos \Gamma L + \frac{\sin \Gamma L}{\Gamma x_2}$ .

De plus, dans ce cas où les effets visco-thermiques sont pris en compte,  $\rho_\nu = \rho_0 \left( 1 + \frac{2\sqrt{-j}}{R} \sqrt{\frac{P}{\omega}} \right)$ . Dans cette dernière équation, ainsi que dans la définition de  $\Gamma$ , à défaut d'un modèle exact susceptible d'intégrer les variations de section, la valeur de  $R$  considérée correspond au rayon moyen  $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ .

**Modèle des trous :** Les trous modifient le champ acoustique à l'intérieur de la perce, l'ouverture ou la fermeture de ceux-ci modifiant les fréquences de résonance de l'instrument et permettent au musicien de jouer différentes notes. La composition d'un trou inséré entre deux segments cylindriques peut être décrit par des matrices de transfert comme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = T_{cyl} T_{hole} T_{cyl} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

où  $T_{hole}$  correspond à la matrice de transfert du trou et  $T_{cyl}$  celles des cylindres. La matrice de transfert d'un trou peut être approximée par une jonction en T, comme

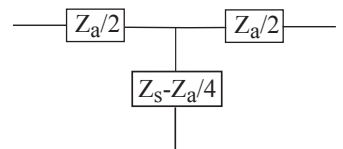


FIGURE 5 – Schéma électrique équivalent à une jonction en T pour un trou, dans une analogie électroacoustique pression-tension et courant-débit.

montré en figure 5 La matrice de transfert correspondant à ce schéma de jonction en T peut être exprimée par :

$$T_{hole} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\overline{Z_a}}{2\overline{Z_s}} & \overline{Z_a}(1 + \frac{\overline{Z_a}}{4\overline{Z_s}}) \\ 1/\overline{Z_s} & 1 + \frac{\overline{Z_a}}{2\overline{Z_s}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

où  $\overline{Z_s}$  et  $\overline{Z_a}$  sont les impédances adimensionnées définies respectivement par  $\overline{Z_s} = Z_s/Z_0$  et  $\overline{Z_a} = Z_a/Z_0$  avec  $Z_0 = \rho_0 c_0/S$ . Les expressions des impédances  $Z_a$  et  $Z_s$  dépendent alors selon le trou est fermé ou ouvert, ceci est défini dans [4].

**Rayonnement à l'extrémité passive :** L'impédance de rayonnement à l'extrémité passive de l'instrument est approximée et décrite comme celle d'un tuyau épais en basses fréquences :

$$Z_r = \frac{\rho_0 c_0}{S} \frac{1+R}{1-R} \quad (8)$$

avec  $R$  décrit dans [3], dépendant du rayon interne et externe du tuyau.  $S$  étant la surface interne du tuyau.

A partir de ces informations nous pouvons calculer les impédances voulues en multipliant entre elles les matrices de transfert correspondantes à chaque tronçon ou trou. Ainsi nous pouvons obtenir l'admittance d'entrée de la flûte à l'embouchure  $Y_{flute}$  et déterminer les fréquences de résonance de l'instrument pour chaque note, lorsque sa partie imaginaire passe à zéro.

### 3.2 Mesures d'impédance sur les flûtes

L'admittance d'entrée de la flûte peut également être obtenue via la mesure d'impédance d'entrée à l'embouchure de la flûte. Les mesures d'impédance sont réalisées avec le capteur d'impédance développé au LAUM/CTTM, [5, 6]. Pour se faire, un adaptateur est nécessaire entre la sortie du capteur et l'embouchure de la flûte, voir figure 6. L'impédance mesurée par le capteur est alors celle du capteur en série avec celle de la flûte. Si on veut comparer les mesures d'impédance au modèle, il convient alors de ramener l'impédance mesurée au niveau de l'embouchure de la flûte. La géométrie du capteur est comme suit, schéma 6. Nous pouvons utiliser le formalisme décrit précédemment pour décrire chaque tronçon cylindrique de l'adaptateur, et décrire également les effets de masse apportés par les discontinuités de sections entre deux cylindres. Les travaux de Kergomard, [2] apportent les outils nécessaires. Sous forme de matrice de transfert,

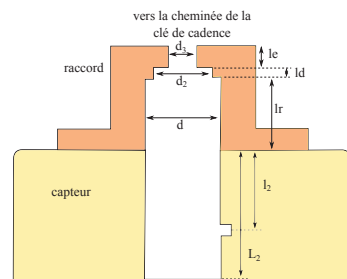


FIGURE 6 – Schéma de la géométrie de l'adaptateur entre l'embouchure de la flûte et le capteur d'impédance.

une discontinuité de section peut alors se résumer sous la forme :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ Z_c U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & j\omega M_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ Z_c U_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

où  $M_d$  est la masse acoustique correspondante à la discontinuité, [2].

Comme précédemment, l'adaptateur est modélisé en multipliant entre elles chacune des matrices de transfert correspondantes aux différents éléments (tronçons cylindriques et discontinuités), nous obtenons alors la matrice globale de l'adaptateur  $\begin{pmatrix} AB \\ CD \end{pmatrix}$ .

Nous pouvons alors déduire l'impédance de la flûte au niveau de l'embouchure  $Z_{mes-flute}$  à partir de l'impédance mesurée au niveau du capteur  $Z_{mes-capteur}$  et de la matrice de transfert de l'adaptateur :

$$Z_{mes-flute} = \frac{B - D \cdot Z_{mes-capteur}}{C \cdot Z_{mes-capteur} - A} \quad (10)$$

L'admittance mesurée de la flûte à l'embouchure est alors  $Y_{mes-flute} = 1/Z_{mes-flute}$ .

### 3.3 Comparaison modélisation/mesures

Le modèle d'admittance de la flûte nous permet dans le premier temps de cette étude de valider la correspondance modèle/mesure, et de vérifier que l'expression de l'impédance ramenée est correcte. A terme, le modèle, une fois affiné nous permettra de comparer plus rapidement que par la mesure plusieurs flûtes de transition, mais aussi de modéliser les premiers prototypes.

Nous représentons pour le doigté du Sol 3, les admittances de la flûte de transition modélisée et mesurée, au niveau de l'embouchure, en figure 7. A partir de la figure 7, nous pouvons remarquer que les admittances modélisées et mesurées de la flûte de transition sont très proches. Nous pouvons toutefois noter une légère différence d'amplitude des pics, les pics mesurés étant un peu plus atténués que ceux modélisés. On ne représente ici que les admittances correspondantes au doigté de sol 3, à titre d'exemple, cependant pour les autres doigtés, nous observons des résultats similaires.

Nous comparons à présent les fréquences de résonance, obtenues à partir du passage à zéro de

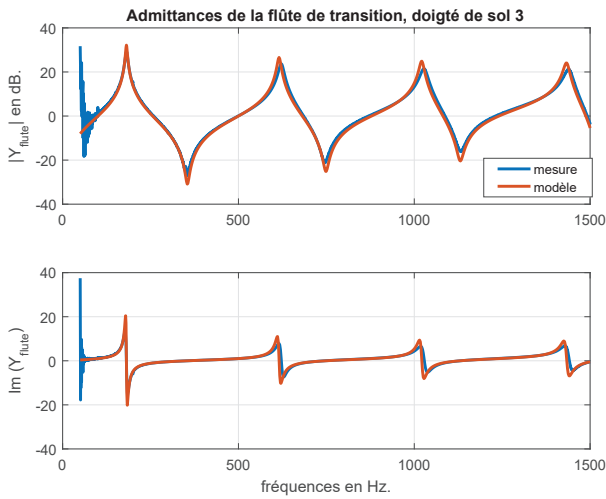


FIGURE 7 – Impédances mesurée et modélisée de la flûte de transition, doigté de sol3. En haut : module de l’admittance, en bas : partie imaginaire de l’admittance.

la partie imaginaire, de notre modèle de flûte de transition et les mesures. Nous représentons pour les deux premiers registres, les écarts en cents entre les fréquences de résonance et les valeurs de fréquences des notes visées pour un diapason à 438 Hz, pour chacun des doigtés, en figure 8. A partir de la figure 8, d’une

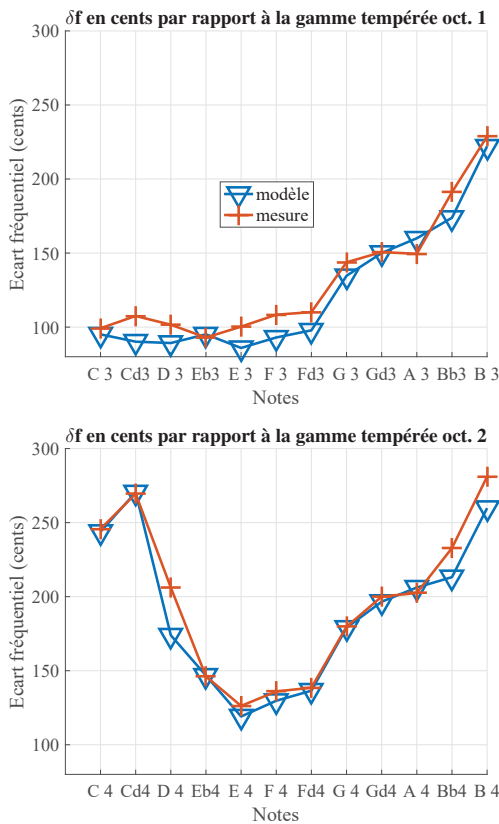


FIGURE 8 – Ecarts en cents entre les fréquences des modèles et mesures de flûte et la gamme tempérée. Haut : octave 1, bas : octave 2.

part nous remarquons que les écarts fréquentiels entre modèle et mesure sont relativement faibles, globalement inférieurs à 10 cents. Les écarts les plus importants sont

sur les notes graves de l’instrument, peut-être à cause du sous-coupage qui n’est pas pris en compte dans la modélisation, ou une mauvaise mesure des hauteurs de cheminées. Ces résultats nous permettent dans ce premier temps de valider notre modèle d’admittance, et celui d’impédance mesurée ramenée.

D’autre part, nous remarquons un profil d’écarts fréquentiels stable, puis croissant à partir du Fad3 sur la première octave jusqu’au Cd4 de la deuxième octave. Ces écarts laissent penser que le musicien va être amené à les compenser en rapprochant de plus en plus ses lèvres du biseau tout en montant la gamme, [9]. A partir du Cd4 le profil est chahuté, décroît de 270 cents à 120 cents jusqu’au E4, ce qui est rapide ; le musicien est alors sans doute amené à changer de stratégie de jeu, et doit reculer ses lèvres du biseau. Puis, à l’image du profil de la première octave, le profil d’écarts fréquentiels croît de E4 jusqu’à B4, passant de 120 cents à 270 cents, le musicien est sans doute amené encore une fois à rapprocher ses lèvres.

#### 4 Comparaison des mesures d’impédances sur flûte de transition et flûte moderne

Dans l’objectif d’étudier l’influence des différences géométriques entre les deux flûtes : de transition et moderne, nous représentons tout d’abord les écarts fréquentiels entre les fréquences de résonance de la première octave et celles de la gamme tempérée, pour la première octave, en figure 9. Nous observons alors sur la

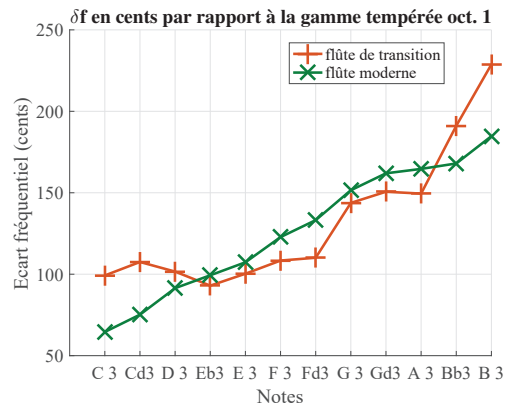


FIGURE 9 – Ecarts fréquentiels entre les fréquences de résonance de la première octave et celles de la gamme tempérée, pour les flûtes moderne et de transition.

figure 9 que les écarts fréquentiels à la gamme tempérée sont bien plus réguliers pour la flûte moderne, ces derniers croissent régulièrement sur toute la première octave ; tandis que ceux de la flûte de transition sont plus faibles dans les notes graves et aigües de la gamme pour la flûte moderne. Les deux profils sont donc sensiblement différents.

Ensuite nous représentons le diagramme d’inharmonicité entre les deux premières octaves pour

chacune des flûtes en figure 10. L'inharmonicité (en cents) est définie par Debut, [1], comme la différence relative entre la fréquence de résonance  $f_n$  et  $n$  fois la première fréquence de résonance  $f_1$  :

$$IH = \frac{f_n - nf_1}{nf_1} \quad (11)$$

$$IH(\text{cents}) = \frac{IH}{5.78 \cdot 10^{-4}} \quad (12)$$

L'inharmonicité est calculée à partir des fréquences de résonance déduites des mesures d'admittance. A

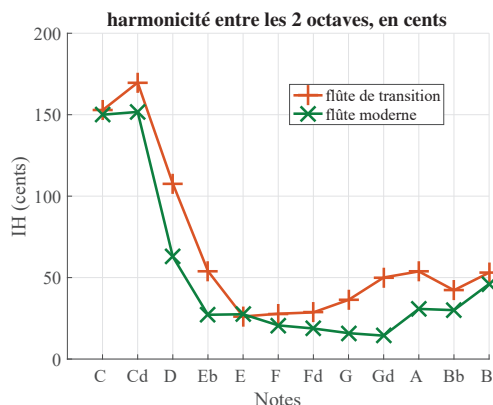


FIGURE 10 – Harmonicité entre les deux premières octaves des flûtes moderne et de transition.

partir de la figure 10, nous remarquons que globalement l'inharmonicité de la flûte moderne est plus faible que celle de la flûte de transition, surtout entre Eb et B; où l'inharmonicité est inférieure à 30 cents. Le musicien peut alors effectuer des sauts d'octaves, en bougeant moins la position de ses lèvres que pour la flûte de transition. En revanche, pour les notes C et Cd, nous ne remarquons pas de différence flagrante entre l'inharmonicité des deux flûtes, pour les deux flûtes les valeurs restent élevées, le musicien a sans doute besoin de corriger cette inharmonicité en rapprochant ses lèvres du biseau de manière prononcée pour jouer l'octave supérieure correctement. Enfin, l'inharmonicité des notes D et Eb, est bien plus réduite pour la flûte moderne.

## 5 Conclusion et perspectives

Ce premier travail permet donc de mettre en évidence les évolutions géométriques de la flûte traversière entre le XIX<sup>ième</sup> et le XX<sup>ième</sup> siècle, le changement de perce, l'augmentation de la taille des trous.

Ces différents éléments ont ensuite pu être modélisés grâce aux théories de l'acoustique linéaire, et être mis en relation avec des mesures d'admittance. Nous avons pu mettre en évidence que le modèle était assez proche de la mesure d'admittance, quelques différences sur la détermination des fréquences de résonance du bas registre de la flûte montrent que certains éléments géométriques n'ont toutefois pas pu être correctement modélisés (sous-coupage, hauteur de cheminées).

Enfin, la comparaison des mesures d'admittance entre la flûte de transition et la flûte moderne montre que

les écarts fréquentiels entre les fréquences de résonance et la gamme tempérée sont plus régulièrement espacés pour la flûte moderne. Nous avons également pu montrer que la flûte moderne avait une inharmonicité globalement plus faible entre les deux premiers registres que la flûte de transition. Cependant une inharmonicité relativement importante persiste sur le début de la deuxième octave, le musicien doit sans doute développer des stratégies à l'embouchure particulières pour palier cet effet.

Ce travail sera poursuivi en comparant plusieurs modèles de flûte de transition de facteurs différents, du point de vue de leur géométrie, des mesures et modèles d'admittance. Les techniques de jeu développées par les musiciens sur ces flûtes pourront également être analysées en jeu et par l'interview des flûtistes. Ce travail permettra alors d'identifier les caractéristiques propres à chaque flûte, et de proposer une géométrie, un modèle, un prototype de flûte correspondant aux attentes de la demande des musiciens.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les facteurs J.Y. Roosen et N. Stradler pour leur aide, leurs discussions fructueuses, et également les musiciens d'avoir accepté de prêter les instruments nécessaires à cette étude.

## Références

- [1] V. Debut, J. Kergomard, F. Laloë : Analysis and optimisation of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator. *Applied Acoustics* **66** (2005) 365–409.
- [2] J. Kergomard, A. Garcia : Simple discontinuities in acoustic waveguides at low frequencies : critical analysis and formulae *Journal of Sound and Vibration* **114**, **3** (1987) 465–479.
- [3] A. Chaigne, J. Kergomard. : Acoustique des instruments de musique. *Collection Echelles. Belin* (2008).
- [4] A. Lefebvre : Computational Acoustic Methods for the Design of Woodwind Instruments. *Thesis, McGill University* (2010).
- [5] J. C. Leroux, J. P. Dalmont : A new impedance sensor for wind instruments *Journal of Acoustical Society of America* **123**, **5** (2008) 3014–3014.
- [6] J. C. Leroux, M. Pachebat, J. P. Dalmont : A new impedance sensor for industrial applications *Acoustics 2012* (2012).
- [7] A.D. Pierce : Acoustics : An introduction to its physical principles and applications *Journal of Acoustical Society of America* (1989)
- [8] N. Toff : The development of the modern flute. *New York : University of Illinois Press* (1979)
- [9] C. Vauthrin : Acoustique et respiration dans le jeu musical des instruments à vent : application aux flûtes *Rapport de thèse, UPMC* (2015) .