



PARAMÈTRES DE FACTURE ET DE CONTRÔLE DANS LES FAMILLES DE FLûTES

Rapport de stage de Master 2



François Blanc

Encadrement :

Benoît Fabre *Professeur, LAM, UPMC*

Nicolas Montgermont *Doctorant, LAM UPMC*

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Benoît Fabre et Nicolas Montgermont pour leur disponibilité et leur encadrement actif, ainsi que tous les chercheurs et doctorants du Laboratoire d'Acoustique Musicale, qui contribuent à l'ambiance conviviale de ce laboratoire.

Je remercie également Jean-Luc Boudreau, de nous avoir préparé des flûtes selon nos critères, et de nous les avoir fournies dans les temps. Merci également à Lambert Colson de s'être prêté au jeu des expériences, et de partager sa passion pour la flûte à bec.

Merci au stagiaires du LAM, d'atiam bien sur, Arnaud, Henry et Sylvain, mais aussi d'ailleurs, Coraline, Hadjira, Hélène, Grégory... Adrien tient une place particulière puisqu'il a du me supporter dans son bureau pendant la totalité de mon stage. Travailler à ses côtés m'a apporté beaucoup de choses¹, dont certaines se mangent !

Merci à tous !

¹Quelques une des figures de ce rapport sont également dûes à ses talents de dessinateur sous traitement de texte ...

Table des matières

1	Introduction	4
2	Généralités sur les flûtes	7
2.1	Un peu d'histoire	7
2.2	Fonctionnement des flûtes	7
2.2.1	Mécanisme de production du son	7
2.2.2	Le jet	8
2.2.3	Le résonateur	11
2.2.4	Modèle à une dimension	13
2.3	Géométrie	13
2.3.1	Le système excitateur	13
2.3.2	Le résonateur	14
2.4	Différentes familles de flûtes	15
3	Mesures sur des flûtes à bec	18
3.1	Dimensions des flûtes	18
3.2	Mesure de la relation pression dans la bouche, débit dans le bec	19
3.2.1	Dispositif expérimental	20
3.2.2	Résultats expérimentaux	24
3.3	Bifurcation des flûtes à bec	25
3.3.1	Protocole de mesure	26
3.3.2	Résultats de mesures	26
3.4	Mesures sur un flûtiste	31
3.4.1	Dispositif expérimental et protocole	31
3.5	Résultats obtenus	33
3.5.1	Période adimensionnée	33
3.5.2	Relation entre pression dans la bouche et timbre	34
3.5.3	Timbre d'une famille	36
3.5.4	Pression d'alimentation sur le deuxième régime	41
3.5.5	Le voile du palais	41

4	Mesures sur des flûtes traversières	44
4.1	Dimensions des flûtes	44
4.2	Mesures sur un flûtiste	45
4.2.1	Dispositif expérimental	45
4.2.2	Pression d'alimentation	45
4.2.3	Distance au biseau	47
4.2.4	Période adimensionnée	48
4.2.5	Timbre des flûtes traversières	49
5	Conclusion	51
5.1	Flûtes à bec	51
5.2	Flûtes traversières	52
5.3	Perspectives	52

Chapitre 1

Introduction

Dans le vocabulaire musical, on classe généralement les instruments en *familles*, dont les membres partagent certaines propriétés. Or ce mot peut prendre plusieurs significations, selon la généralité des propriétés communes. On définit ainsi la famille des bois, des cuivres, elles mêmes divisibles en familles. Ainsi *la* famille *des* flûtes appartient à la famille des bois, et la spécificité de ses membres tient dans le mécanisme d'excitation.

Cette famille regroupe donc des instruments très différents. On y trouve les tuyaux d'orgues, les flûtes à bec ou traversières, les ocarinas, les shakuachis, les kénas, les neys ...dont les formes mais surtout les techniques de jeu varient énormément.

Le sujet d'étude de ce stage porte sur les paramètres de facture et de contrôle dans *les* familles *de* flûtes. Les différences entre les membres de deux familles de flûtes différentes résident précisément dans les techniques de jeu utilisées pour les faire chanter.

Le terme famille, dans le sens où nous l'entendons ici, désigne un groupe d'instruments dont les techniques de jeu sont proches, ayant un timbre homogène, et dont le but est de couvrir une large tessiture.

Ainsi, la famille des cordes frottées a vu le nombre de ses membres diminuer à mesure que les techniques de facture et de jeu permettaient d'augmenter la tessiture individuelle de chaque instrument.

Les flûtes à bec et les flûtes traversières constituent donc deux familles *de* flûte, et appartiennent à *la* famille *des* flûtes.

Les instruments de la famille des flûtes sont communs à presque toutes les cultures. Les racines de cette immense famille se perdent dans la préhistoire, où elles étaient taillées dans des os [1]. Ainsi, les flûtes d'aujourd'hui sont issues d'un savoir faire acquis empiriquement par les facteurs, et résultent de compromis entre différents paramètres pouvant parfois être antagonistes : par exemple, comment fabriquer un instrument qui rayonne beaucoup, sans mettre en péril l'auto-oscillation ?

L'ensemble des flûtes couvre une grande variété d'instruments, aux fonctionnements bien différents. Certains tuyaux d'orgue, par exemple, sont des instruments à embouchure de flûte. Chacun est destiné à jouer une note unique, entièrement déterminée par la facture.



FIG. 1.1 – Fenêtre des cinq membres d’une famille de flûte à bec, de la basse à la soprano. Malgré les grandes différences de tessitures, les distances de la lumière au biseau ne changent pas beaucoup

Au fil des temps, des règles très précises sont apparues concernant la facture des tuyaux d’orgue, résultant d’un long processus d’amélioration de la facture.

En revanche, fabriquer un instrument permettant de jouer plusieurs notes demande un compromis, pour avoir un timbre homogène et un accord juste, ce qui complique la tâche des facteurs.

De plus, une famille de flûtes comprend des membres de tessitures très différentes : la tessiture d’une flûte basse est située deux octaves au dessous de la tessiture d’une flûte soprano. La fréquence de jeu de l’instrument étant déterminée essentiellement par la longueur du résonateur, il doit y avoir un rapport quatre entre les longueurs des deux instruments.

Cependant, il ne peut pas en être de même pour les autres dimensions caractéristiques de l’instrument (longueur du bec, surface de l’ouverture figure 1.1), au risque d’avoir besoin d’un flûtiste ayant également un volume quadruple pour en jouer !

D’autre part, malgré les grandes différences de tessiture entre deux flûtes de la même famille, le timbre doit être homogène : une flûte basse a un son *grave*, mais pas *sourd*. L’oreille étant peu sensible aux basses fréquences, il faut équilibrer les spectres des sons produits à des hauteurs différentes, et par des flûtes différentes.

Il n’existe donc pas de règle simple de passage d’une flûte à l’autre dans la facture, et cela implique également une adaptation de la part du flûtiste, lorsqu’il change d’instrument, puisqu’un flûtiste doit être capable de s’adapter à plusieurs instruments d’une même famille, contrairement aux instrumentistes de cordes frottées, spécialisés dans un seul instrument.

Il a de plus été observé, dans le cas de la flûte à bec, que le flûtiste joue un rôle non négligeable dans le comportement physique de l’instrument [2]. Ainsi les seuils de changement de régime peuvent grandement varier, que la mesure soit effectuée à la bouche artificielle, ou avec un flûtiste. Il apparaît alors qu’il est de plus en plus difficile d’étudier l’instrument sans instrumentiste.

De même, un flûtiste professionnel est capable de refléter une *intention musicale* dans une variation très fine des paramètres de contrôle. Il est évident qu’un flûtiste ne jouera pas un concerto comme une gamme.

Le but de ce stage est de comprendre comment sont structurées les familles de flûtes, et comment un flûtiste est amené à adapter sa technique de jeu aux différents membres d'une même famille. Pour ce faire, nous avons effectué des mesures dont les analyses sont basées sur les connaissances sur le fonctionnement physique et le comportement hydrodynamique du jet.

Cette étude trouve ses applications dans différents domaines :

- La pédagogie : il s'agit de déterminer des jeux de paramètres de contrôle produisant une technique de jeu précise, afin de faciliter l'apprentissage et la transmission du savoir sur l'instrument
- L'aide à la facture : il faut déterminer des paramètres de facture optimaux, pour réaliser une flûte répondant à certains critères.
- La synthèse sonore : l'étude des paramètres de facture permettraient de créer des instruments à partir de paramètres de haut niveau, tandis que les paramètres de contrôle permettraient de contrôler lesdits instruments de manière naturelle (même si l'instrument n'est pas réalisable physiquement).

Ce stage s'inscrit en partie dans le projet Consonnes, regroupant le LMA, l'IRCAM et l'ENST, et financé par l'Agence Nationale de la Recherche, dont l'un des axes d'études porte sur les familles d'instrument auto oscillants.

Nous verrons dans un premier temps quelques généralités sur le fonctionnement physique des instruments de la famille des flûtes, puis les études qui ont été menées sur les flûtes à bec ainsi que sur les flûtes traversières.

Chapitre 2

Généralités sur les flûtes

2.1 Un peu d'histoire

La famille des flûtes est l'une des plus anciennes familles d'instruments de musique. On trouve des spécimens partout dans le monde, certains datant de l'ère préhistorique : les plus anciens sont en os et datent du paléolithique (entre 25000 et 12000 ans avant notre ère) [3],[1].

La flûte à bec était très utilisée parmi les jongleurs et les ménestrels au XIIème siècle, avant de gagner les musiciens de la cour et de la bourgeoisie. L'époque des plus grands facteurs se situe entre la fin du XVIIème et la moitié du XVIIIème siècles, avec les familles Hotteterre à la Couture Boussey et Stanesbys à Londres. Vers 1750, la flûte à bec est supplantée par la flûte traversière, avant d'être réhabilitée dans les années 1920, où elle devient très présente dans le répertoire contemporain.

Dans la première moitié du XVIIIème siècle, Gordon et Boehm apportent des modifications à la flûte traversière, aujourd'hui standardisées. Les trous sont déplacés et leurs dimensions sont modifiées, afin d'améliorer la justesse de l'instrument. Un système de clétage permet au musicien de jouer malgré la distance entre les trous et le diamètre du tuyau. Grâce à ce système, la flûte est plus juste et plus puissante. De plus le clétage simplifie les doigtés et fait de la flûte l'instrument virtuose que nous connaissons.

2.2 Fonctionnement des flûtes

2.2.1 Mécanisme de production du son

Le son des flûtes résulte de l'interaction complexe entre un jet et un biseau, couplée à un résonateur. Claire Ségoufin [3] donne une description du mécanisme de production du son :

- Le musicien produit un jet en créant une surpression provoquant un écoulement dans un canal (bec ou lèvres du musicien).
- Le jet atteint le biseau après un temps dépendant de sa vitesse et de la distance entre la sortie du canal (lumière) et du biseau. L'interaction entre le jet et le biseau

produit un champ acoustique dipolaire, excitant le résonateur.

- Le champ acoustique dans le résonateur perturbe le jet en retour, entretenant ainsi l'oscillation.

On peut représenter ce fonctionnement par un système bouclé, tel que représenté figure 2.1.

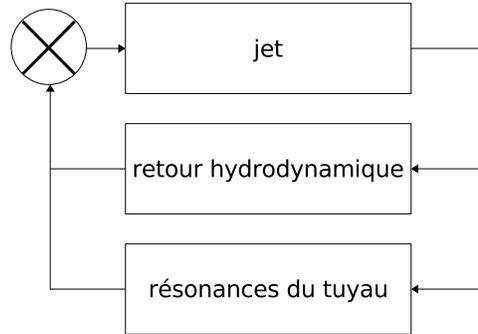


FIG. 2.1 – Système bouclé représentant le fonctionnement d'une flûte.

Nous allons à présent détailler chacun des phénomènes intervenant dans la boucle.

2.2.2 Le jet

Cette partie reprend les idées développées dans la thèse de Claire Ségoufin [3].

Le jet est issu de la séparation de l'écoulement à la lumière du canal, sous l'action de la viscosité. Par nature, un jet est instable¹, et a tendance à amplifier toute perturbation. Dans le cas des flûtes, le jet est perturbé par le champ acoustique issu du résonateur, et on suppose cette perturbation localisée au point de formation du jet : elle se développe alors le long du jet avant d'atteindre le biseau. La figure 2.2 montre le comportement du jet dans une flûte.

Un modèle simple Rayleigh a proposé un modèle linéaire d'interface entre deux écoulements plans parallèles infinis, le long de l'axe x (figure 2.3), sous la forme de somme de perturbations harmoniques exponentiellement croissantes. La fonction de courant de la perturbation est de la forme :

$$\psi(X, Y, T) = \text{Re}(\phi(Y)e^{j(\alpha X - \omega T)}) \quad (2.1)$$

où ϕ est l'amplitude complexe, α représente le nombre d'onde spatial, ω la pulsation temporelle de la perturbation, X , Y et T sont les grandeurs réelles x , y et t adimensionnées par des grandeurs caractéristiques du problème.

On peut considérer un jet comme étant constitué de deux interfaces. Les perturbations peuvent alors être symétriques par rapport à la ligne moyenne du jet, auquel cas le jet

¹On peut penser à la fumée d'une cigarette pour s'en convaincre

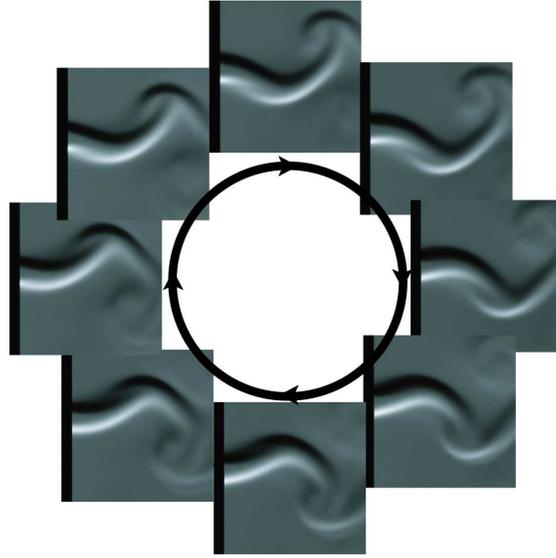


FIG. 2.2 – Le coeur de l'instrument. Un jet est issu du canal et perturbé par le champ acoustique présent dans le tuyau. La perturbation est amplifiée et convectée jusqu'au biseau

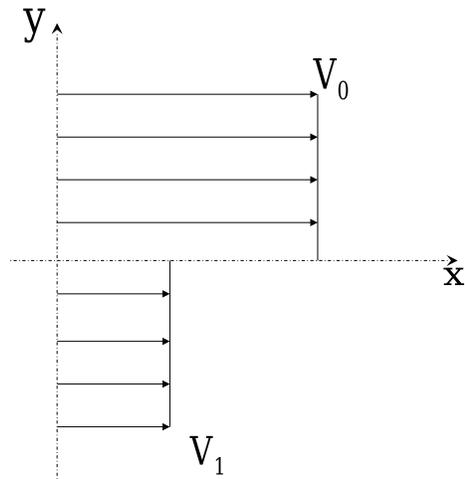


FIG. 2.3 – Interface infinie considérée par Rayleigh entre deux fluides se déplaçant à des vitesses différentes V_0 et V_1 , définition des axes

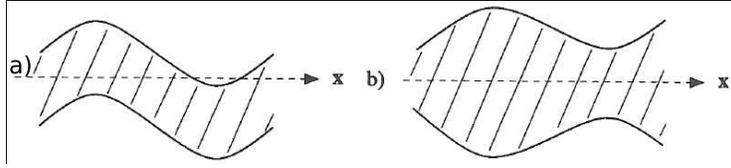


FIG. 2.4 – Modes sinueux (a) et varicose (b) du jet par rapport à l'axe $y=0$

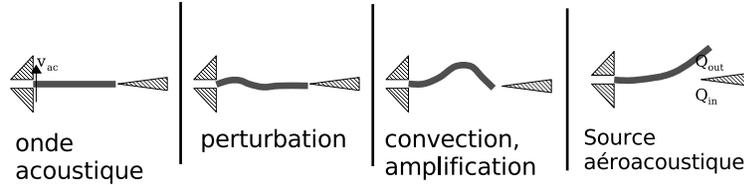


FIG. 2.5 – Convection des perturbations le long du jet. Une surpression perturbe le jet à la lumière. au biseau, cette perturbation crée une dépression

est *varicose*, ou antisymétriques, auquel cas le jet est *sinueux*. La figure 2.4 représente ces deux cas de figure. En considérant la cause de la perturbation du jet dans le cas des flûtes, on s'attend à un jet sinueux [4].

Il est important de noter que le modèle de Rayleigh est linéaire, ce qui suppose de faibles déplacements transversaux. Or dans les flûtes, le déplacement transversal du jet peut atteindre plusieurs fois son épaisseur, ce qui pose de sérieuses limitations sur le modèle.

Les perturbations sont convectées le long du jet à une certaine vitesse U_c valant entre 30% et 50% de la vitesse centrale du jet, U_j , et arrivent donc au biseau avec un certain retard, dépendant de la distance W entre la lumière et le biseau. Pour quantifier ce retard, on utilise la vitesse du jet : $\tau = W/U_j$. En pratique, on considérera θ , l'inverse du nombre de Strouhal, adimensionnant ce retard avec la période de jeu [5] [6].

$$\theta = St_W^{-1} = \frac{U_j}{fW} \quad (2.2)$$

Un optimum pour θ Les perturbations dues à la vitesse acoustique dans le tuyau sont convectées et amplifiées le long du jet jusqu'à atteindre le biseau. La figure 2.5 représente la convection d'une perturbation due à la vitesse acoustique transversale. Au final, cette perturbation crée une source aéroacoustique au niveau du biseau, qui entretient l'oscillation acoustique dans le tuyau. On peut montrer que la durée de convection des perturbations jusqu'au biseau soit égale à la moitié de la période d'oscillation, pour avoir une relation de phase optimale [7].

Or les perturbations sont convectées à une vitesse comprise entre 30% et 50% de la vitesse centrale du jet [4], u_j . On obtient donc un nombre de Strouhal *optimal*, en termes

de phase, de $\frac{fW}{u_j} \approx 0.25$, soit $4 < \theta < 7$. En pratique, il est possible de faire fonctionner les flûtes à des valeurs de $7 < \theta < 17$, ce qui a pour effet d'augmenter les amplitudes relatives des harmoniques. Au delà de $\theta = 17$, le risque de bifurcation vers un régime supérieur est grand [6].

Le paramètre θ apparaît donc comme un indicateur du fonctionnement des flûtes. Sur le premier régime, pour de faibles valeurs de ce paramètre, on s'approche du seuil d'oscillation. Pour de grandes valeurs de ce paramètre, le timbre s'enrichit et on se rapproche du seuil de changement de régime.

Une source acoustique Au niveau du biseau, l'oscillation du jet peut être représentée par un dipôle acoustique, lui-même étant modélisé par un saut de pression dans le cadre d'un modèle à une dimension ([5], [8]). On note que l'interaction entre le jet et le biseau donne également lieu à un retour hydrodynamique, responsable d'un *son de biseau*. Ainsi, un système jet-biseau peut se mettre en auto-oscillation sans résonateur, avec une fréquence proportionnelle à la vitesse du jet. Verge a montré dans le cas de la flûte à bec que la rétroaction hydrodynamique, en régime stationnaire, est négligeable devant le champ acoustique issu du résonateur.

2.2.3 Le résonateur

Dans cette partie, nous ne nous intéressons qu'aux résonateurs de type tuyau. Le résonateur est considéré passif et linéaire, et présente des résonances imposant la fréquence de jeu. Pour des flûtes à bec ou traversières, sur lesquelles s'est concentrée notre étude, les conditions aux limites sont de type "ouvert-ouvert".

Les fréquences de résonance sont essentiellement déterminées par la longueur du tuyau, selon les conditions aux limites. Dans le cas *ouvert-ouvert*, en considérant en première approximation qu'il y a réflexion totale aux extrémités, on a $f_n = \frac{nc}{2L}$, où c est la vitesse de propagation du son dans l'air, et L est la longueur du résonateur.

En pratique, divers mécanismes apportent une correction à la longueur *acoustique* du tuyau. nous les détaillons ci-après.

Le rayonnement Aux extrémités du tuyau, la pression acoustique n'est pas rigoureusement nulle, puisque l'instrument émet du son. Il existe en effet une impédance de rayonnement qui peut être approximée aux basses fréquences (krj|1) par :

$$Z_{ray} = \frac{p}{v\rho c} = \frac{1}{4}k^2r^2 + j\zeta kr \quad (2.3)$$

où $0.6 < \zeta < 0.8$ dépend du caractère *écranté* de l'extrémité, r est le rayon du résonateur, et k est le nombre d'onde. Cette impédance est complexe, ce qui induit un déphasage lors de la réflexion de l'onde à l'extrémité, qui s'interprète comme une *correction de longueur* δ_{ray} . Ainsi, la longueur acoustique du résonateur est nécessairement plus grande que la longueur totale.

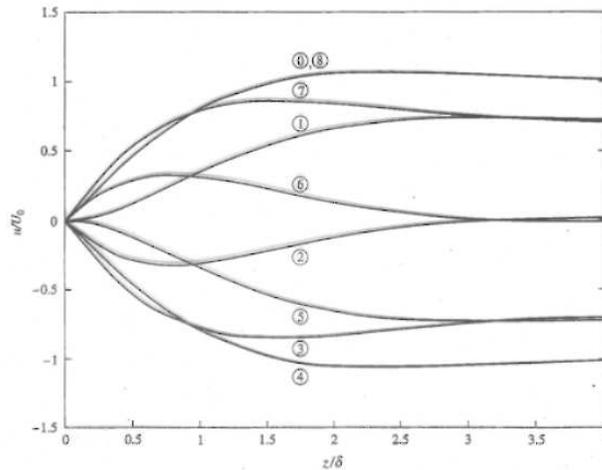


Figure 8.8.1 Profiles of the normalized particle speed $\text{Re}(u(z))/U_0$ in a viscous fluid in the vicinity of a wall for one cycle of the primary sound field at $x = 0$. The speed far from the wall is $U_0 \cos \omega t$ and that at the wall vanishes. Curve ① $\omega t = 0$, ① $\pi/4$, ② $\pi/2$, ③ $3\pi/4$, ④ π , ⑤ $5\pi/4$, ⑥ $3\pi/2$, ⑦ $7\pi/4$, ⑧ 2π .

FIG. 2.6 – La viscosité de l’air impose un amortissement et un déphasage de la vitesse près des parois

On note qu’à l’extrémité active (*i.e.* l’extrémité du tuyau où se produit l’excitation), le tuyau présente une constriction. Cette constriction implique également une correction de longueur, qu’il faut ajouter à l’impédance de rayonnement.

Les pertes visco-thermiques La propagation dans le tuyau implique des pertes : en effet, près des parois, le fluide est soumis à des frottements visqueux (figure 2.6), et échange également de la chaleur avec cette dernière. Ces phénomènes s’interprètent respectivement comme une correction de masse et de compressibilité de l’air [9], ayant pour effet de modifier la relation de dispersion de la propagation. Il en résulte un déplacement des résonances du tuyau. Ces pertes viscothermiques étant de plus dépendantes de la fréquence de l’onde, les pics d’admittance ne sont pas déplacés de la même façon, ce qui induit une certaine inharmonicité dans le résonateur.

L’inharmonicité induite par les pertes visco-thermiques, ainsi que par la présence de cheminées latérales liées aux trous, peut être partiellement compensée par des corrections de forme. Ainsi, les flûtes à bec de l’époque baroque présentent une légère conicité du corps, et les flûtes traversières modernes une légère conicité de l’embouchure.

Ces pertes dépendent également du rayon du résonateur. En effet, plus le rayon est grand, plus l’épaisseur du fluide proche des parois² est petite devant l’épaisseur du fluide loin des parois, et donc moins l’effet de ces pertes visco-thermiques se fait sentir.

Ceci nous amène à un constat : pour diminuer les pertes visco-thermiques, il faut

²appelée *couche limite*

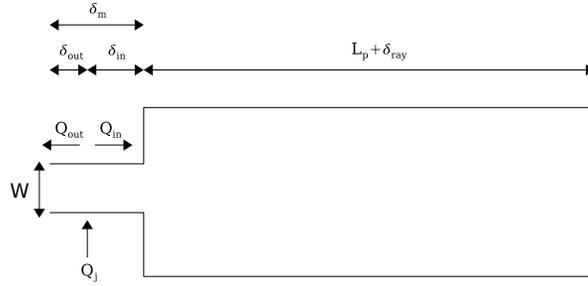


FIG. 2.7 – Modèle à une dimension d’une flûte à bec

augmenter le rayon du résonateur, mais nous avons vu que cela augmente les pertes dues au rayonnement, pouvant rendre la mise en auto-oscillations difficile. Le dimensionnement du rayon du résonateur résulte donc d’un compromis entre les besoins d’avoir un résonateur très harmonique, et d’emmagasiner de l’énergie afin que la flûte soit jouable.

2.2.4 Modèle à une dimension

En basses fréquences, les ondes se propageant dans le résonateur peuvent être considérées planes. On peut alors employer, pour la flûte à bec³, un modèle à une dimension, représenté sur la figure 2.7 [5]. la lumière est alors représentée par un petit tuyau, les longueurs δ_{in} et δ_{out} étant des corrections de longueur dues à la masse d’air au niveau du biseau. Le canal est une source de débit Q_j , et l’interaction entre le jet et le biseau une source dipolaire (Q_{in} et Q_{out}). La longueur du résonateur tient compte de la correction apportée par le rayonnement.

Ce modèle est limité aux fréquences inférieures à la fréquence de résonance du premier mode non planaire. Pour un tuyau cylindrique, la fréquence de coupure est $f_c = f_{1,1} = \frac{1.84c}{2a}$, où a est le rayon du tuyau, c est la vitesse de propagation de l’onde. Cette fréquence de coupure est de l’ordre de la dizaine de kilohertz pour une flûte traversière en ut.

2.3 Géométrie

2.3.1 Le système excitateur

Le point commun entre tous les instruments à embouchure de flûte réside dans le mécanisme d’excitation. Les flûtes sont les seuls instruments à vent où l’excitation est de nature fluide. En effet, dans les autres instruments à vent, l’excitation est toujours induite par la vibration d’une pièce solide, que ce soit une anche (simple ou double) ou directement les lèvres du musicien, pour les instruments à embouchure de cuivre.

Quelque soit la flûte considérée, la géométrie de l’extrémité active suit le même schéma, résumé sur la figure 2.8. On note W la distance entre la sortie du canal et le biseau. Cette distance est fondamentale, puisque c’est la distance que doit parcourir le jet avant

³Pour la flûte traversière, il faut rajouter un volume correspondant au bouchon

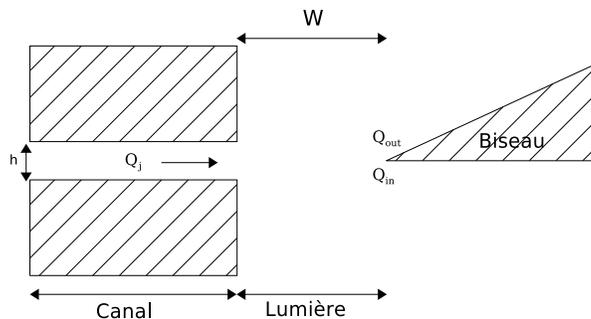


FIG. 2.8 – Principale grandeurs caractéristiques de l’excitateur d’un instrument à embouchure de flûte. W est la distance entre le canal et l’embouchure, et h la hauteur du canal

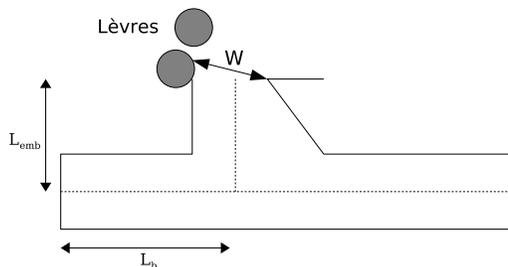


FIG. 2.9 – Représentation schématique de l’embouchure d’une flûte traversière. W est la distance entre le biseau et les lèvres du flûtiste

d’atteindre le biseau. Elle joue directement sur les valeurs que peut atteindre θ . Dans les flûtes à bec et les tuyaux d’orgues, cette distance est fixée par le facteur. Dans les flûtes traversières, le canal est formé par les lèvres du musicien : W , la direction du jet et la surface de sortie du canal sont donc des paramètres de contrôle.

2.3.2 Le résonateur

La géométrie du résonateur et la position du système excitateur varient d’un type de flûte à l’autre. Dans les flûtes à bec, l’excitateur est à l’extrémité du résonateur, et le biseau est dans l’axe du résonateur, comme représenté sur la figure 2.10. Les flûtes à bec ne possédant en général pas de clés, la position des trous est guidée par les distances accessibles par les mains d’un flûtiste. Il en résulte que les dimensions des trous et de la perce sont très irrégulières, afin d’avoir un accord juste.

Dans les flûtes traversières, le résonateur est plus complexe [8]. L’embouchure est modélisée par un petit cylindre de longueur L_{emb} et de section S_{emb} . Elle débouche sur un tuyau fermé d’un côté et ouvert. Le côté ouvert, de longueur L_p et de section S_p , est appelé le tuyau principal. Le côté fermé, appelé bouchon, est un tronc de cône que l’on ramène

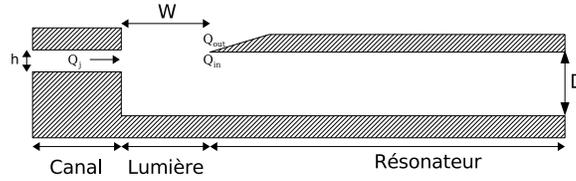


FIG. 2.10 – Représentation schématique d’une flûte à bec

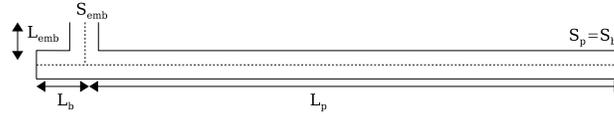


FIG. 2.11 – Représentation schématique du résonateur d’une flûte traversière. L’embouchure est modélisée par un cylindre de longueur L_{emb} et de section S_{emb} . L’embouchure débouche sur le résonateur (à droite), et le bouchon (à gauche)

à un cylindre de section constante $S_b = S_p$ et de longueur L_b . La figure 2.11 schématise le résonateur d’une flûte traversière. On note également que le biseau n’est pas dans l’axe du résonateur dans le cas d’une flûte traversière, comme représenté sur la figure 2.9.

2.4 Différentes familles de flûtes

Les flûtes sont également parmi les familles d’instruments de musique les plus variées. La facture a beaucoup évolué, mais de manière différente pour les instruments “savants” et les instruments populaires [3].

Raymond Meylan [10] en dénombre six types différents, représentés sur la figure 2.12 :

- Les flûtes droites et de pan, sans trous où l’on joue sur le jet d’air pour sélectionner une note à jouer, les résonances du tuyau étant accordées de façon presque harmonique [11],
- Les flûtes *obliques*, où la bouche du flûtiste vient refermer le résonateur,
- Les flûtes à encoche, où le biseau est taillé dans le fond du tube,
- Les flûtes traversières, où l’axe du biseau est tangent au tuyau,
- Les flûtes à bec, possédant un canal *guidant* le jet vers le biseau,
- Les sifflets et les ocarinas, où le résonateur n’est plus un tuyau, mais un petit volume.

Certains paramètres peuvent être déterminés par la facture où laissés au contrôle du flûtiste, selon le type d’instrument considéré. Par exemple, dans la flûte à bec, la géométrie du canal et la distance entre la lumière et le biseau sont fixés par le facteur, tandis que dans la flûte traversière, le flûtiste contrôle ces paramètres.

On peut ainsi considérer les familles de flûtes sous l’angle du contrôle, et proposer une

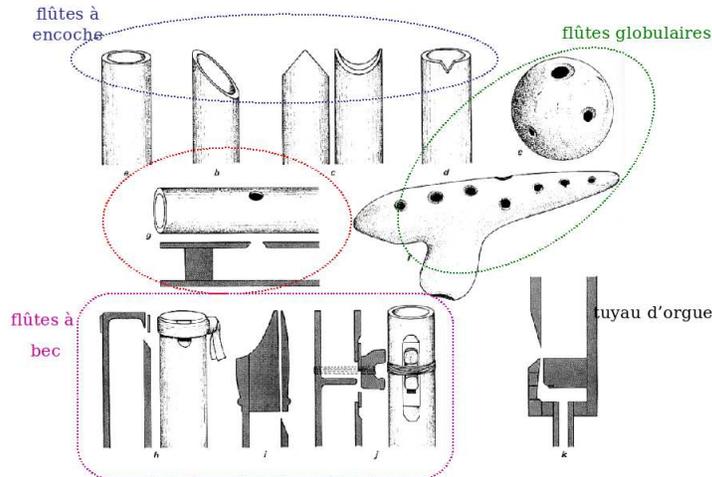


FIG. 2.12 – Différentes géométries d'instruments à embouchure de flûte

classification selon la quantité de contrôle laissé au musicien ou au facteur. On a alors :

- Les tuyaux d'orgue, ne produisant qu'une unique note, et où tous les paramètres sont déterminés par le facteur, le musicien gardant le rôle de l'organisation musicale des sons,
- Les flûtes à bec, où le facteur détermine la géométrie de l'excitateur, le musicien pouvant changer la longueur du résonateur, et contrôler le système en amont (pression et géométrie dans la bouche),
- Les flûtes traversières, où le musicien contrôle la distance entre la lumière et le biseau et l'angle d'incidence du jet,
- Les flûtes de type shakuachi, où le musicien contrôle les conditions aux limites du côté de l'embouchure active.

La figure 2.13 montre différentes flûtes selon les nombres de paramètres laissés au facteur ou au musicien. De gauche à droite, l'influence du facteur sur le son résultant est de plus en plus faible, tandis que le degré d'influence du musicien diminue.

L'apprentissage nécessaire pour savoir jouer l'un de ces instruments dépend évidemment du nombre de paramètres de contrôle laissés au flûtiste, lui permettant plus de possibilités d'expression, et également de développer un son personnel, indépendant de la flûte.



FIG. 2.13 – Classification des flûtes selon le degré de contrôle du son laissé au facteur (vers la gauche) ou au musicien (vers la droite). On trouve de gauche à droite : Un orgue, une flûte à bec, une flûte raversière, et un shakuachi japonais

Chapitre 3

Mesures sur des flûtes à bec

Afin d'étudier les paramètres de facture et de contrôle sur les flûtes à bec, une famille (sopranino, soprano, alto, ténor et basse) a été réalisée par Jean-Luc Boudreau.

La flûte basse a une particularité : le flûtiste ne souffle pas directement dans le canal, mais dans un tuyau débouchant sur une cavité, appelée *ped*. Cette cavité joue le rôle d'une bouche : une surpression statique y règne, provoquant un écoulement dans le canal.

La figure 3.1 représente les tessitures des cinq flûtes étudiées.

3.1 Dimensions des flûtes

Dans les flûtes à bec, la géométrie de l'excitateur est fixée par le facteur. Nous avons donc tout d'abord mesuré les dimensions de la pièce d'embouchure pour chacune des flûtes. Ces mesures sont résumées dans le tableau 3.1.

Malgré les grandes différences de tessiture (et de longueur) entre les flûtes, les dimensions des embouchures ne varient pas énormément. En particulier, la distance entre le canal et le biseau (W) varie d'un facteur 2 entre les flûtes sopranino et basse, qui ont une différence de tessiture de deux octaves (soit un rapport de fréquence de quatre).

Flûte	Distance de la lumière au biseau (mm)	Largeur du biseau (mm)	Surface de la lumière (mm^2)	Diamètre du tuyau (mm)	Longueur du canal (mm)
Sopranino	3	7	8	10.5	35.72
Soprano	3.5	9	10	12.5	45.26
Alto	4	12	12	17	57.71
Ténor	5	14	12	23	71.74
Basse	6	19	44	32	61.94

TAB. 3.1 – Principales dimensions de la pièce d'embouchure de chaque flûte

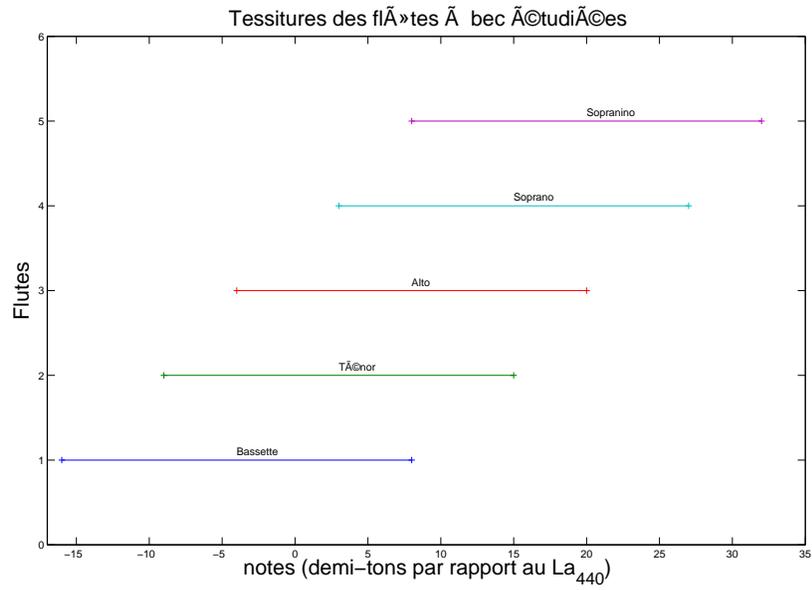


FIG. 3.1 – Tessitures des cinq flûtes à bec étudiées



FIG. 3.2 – Famille de flûtes réalisée à Jean-Luc Boudreau

3.2 Mesure de la relation pression dans la bouche, débit dans le bec

Le modèle couramment employé pour remonter à la vitesse du jet à partir de la pression dans la bouche du musicien est celui de Bernoulli. Ce modèle implique que les couches

limites ne se développent pas suffisamment dans le canal pour prendre en compte les pertes. Cependant les flûtes à bec, aux dires des flûtistes et des facteurs, présentent une certaine *résistance*¹ au souffle. Nous avons donc cherché à comprendre cette notion de résistance en mesurant des caractéristiques de becs, reliant le débit statique à la surpression dans la bouche.

3.2.1 Dispositif expérimental

La figure 3.3 montre un schéma du dispositif expérimental. Une bombone d'air comprimé alimente la bouche artificielle : l'idée est d'avoir une longueur de tuyau suffisante en amont de la bouche pour laisser les couches limites se développer, jusqu'à atteindre un profil de vitesse de Poiseuille dans le tuyau. On peut alors facilement calculer le débit à partir de la différence de pression entre deux points du tuyau. En effet, le profile de vitesse pour un écoulement de Poiseuille dans un conduit cylindrique de rayon R orienté selon l'axe z est donnée par :

$$v_p(r) = \frac{R^2}{4\rho\nu} \frac{dP}{dz} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3.1)$$

Où r est la distance à l'axe de symétrie du tuyau, ρ et ν sont respectivement la masse volumique et la viscosité cinématique du fluide s'écoulant dans le tuyau.

D'où le débit :

$$Q_p = 2\pi \int_0^R v_p(r)rdr = \frac{\pi R^3}{3\rho\nu} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (3.2)$$

Où ΔP est la différence de pression mesurée en des points du tuyau distants de ΔL .

Distance de développement de la couche limite

Passage du profil en trapèze au profil de Poiseuille Tant que les couches limites, ne se sont pas rejointes, elles encadrent un coeur de vitesse uniforme. Lord Rayleigh [12] [3] propose un modèle de profil de vitesse en trapèze, où la vitesse varie linéairement dans les couches limites avec la position transversale. Ce modèle de profil de vitesse ne pouvant pas atteindre un profil de Poiseuille, on impose un changement de description lorsque la vitesse centrale du profil trapézoïdal atteint la vitesse centrale du profil de Poiseuille de même débit (figure 3.4).

On peut alors estimer l'épaisseur de couche limite à partir de laquelle on considère avoir un profil de Poiseuille :

Soit δ l'épaisseur de la couche limite. Le profil de vitesse trapézoïdal est de la forme (R est le rayon du tube) :

$$u_{tra}(r) = \begin{cases} \frac{u_0}{\delta}(R - r) & \text{si } r > R - \delta \\ u_0 & \text{si } r < R - \delta \end{cases} \quad (3.3)$$

¹selon les termes de Jean-Luc Boudreau

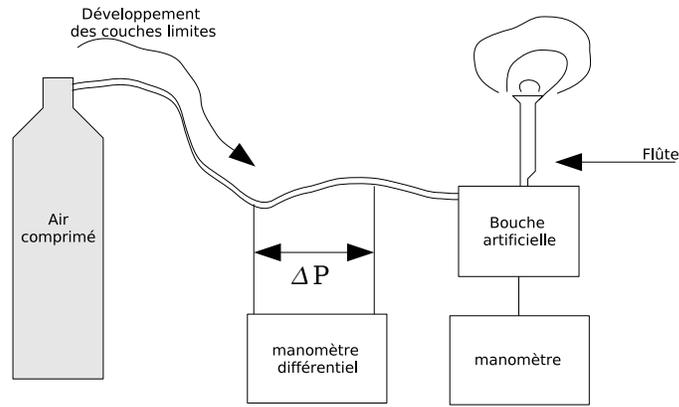


FIG. 3.3 – Schéma du dispositif expérimental permettant de mesurer la caractéristique Pression-Débit d'un bec de flûte

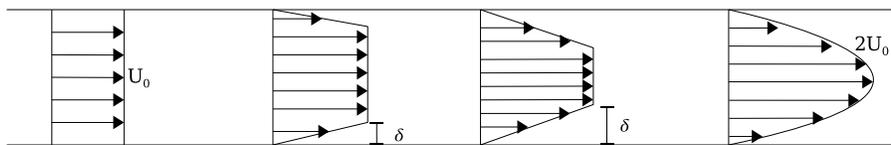


FIG. 3.4 – Passage d'un profil de vitesse en trapèze à un profil de vitesse de Poiseuille. Lorsque la vitesse centrale du trapèze est égale à la vitesse centrale du Poiseuille de même débit, on change de description

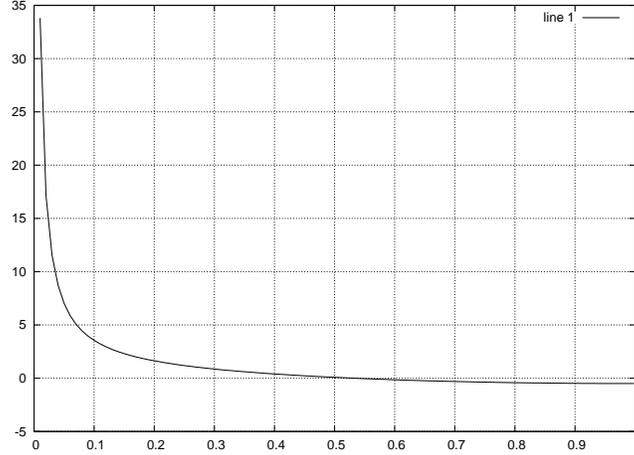


FIG. 3.5 – Graphe représentant Δ en fonction de l'épaisseur de couche limite. On voit que $\Delta = 0$ pour $\delta \approx 0.5$

Pour calculer le débit d'un tel profil, il suffit d'intégrer sur la section du tube cylindrique. Tous calculs faits, on obtient :

$$Q_{tra} = \pi u_0 (R - \delta)^2 \left[1 + \frac{R}{\delta} - \frac{2(R - \delta)}{3\delta} \right] \quad (3.4)$$

En considérant que le fluide entre dans le tuyau avec une vitesse constante u_0 , et que le débit total se conserve, on a $Q_{tra} = \pi R^2 u_0$, ce qui nous donne une relation entre la vitesse au centre du trapèze, et la vitesse d'entrée, en fonction de l'épaisseur de la couche limite :

$$u_{tra}(\delta) = \frac{u_0 R^2}{(R - \delta)^2 \left(1 + \frac{R}{\delta} - \frac{2(R - \delta)}{3\delta} \right)} \quad (3.5)$$

Or la vitesse centrale du profil de Poiseuille de même débit est de $2u_0$. On peut alors calculer l'épaisseur de couche limite pour lequel on passe du profil trapézoïdal en profil de Poiseuille en écrivant $\Delta(\delta) = u_{tra}(\delta) - 2u_0 = 0$, soit :

$$\Delta(\delta) = (R - \delta)^2 \left(1 + \frac{R}{\delta} - \frac{2(R - \delta)}{3\delta} \right) - \frac{R^2}{2} = 0 \quad (3.6)$$

La figure 3.5 représente l'évolution de Δ . On atteint un profil de Poiseuille lorsque la courbe croise l'axe des abscisses, ce qui se produit autour de $\delta \approx 0.5R$. Pour ne pas sous estimer la longueur d'entrée, on prend comme condition $\delta = R$, ce qui correspond, dans le modèle en trapèze, à la rencontre des couches limites.

D'après Tritton [13], dans un écoulement laminaire, l'épaisseur des couches limites est donnée par $d = \frac{30L}{Re}$, où Re est le nombre de Reynolds, défini par $Re = \frac{2u_0 R}{\nu}$, où R est

une dimension caractéristique (ici, le rayon du tube), u_0 une vitesse caractéristique, et ν la viscosité cinématique de l'écoulement. La longueur L recherchée correspond finalement à $d=R$, ce qui donne :

$$L = \frac{dRe}{30} = \frac{2u_0R^2}{30\nu} \quad (3.7)$$

On cherche donc à estimer la longueur au bout de laquelle l'épaisseur des couches limites est égale au rayon du tuyau. Il faut alors une estimation de la vitesse de l'écoulement u_0 . On peut estimer cette vitesse grâce à la relation de Bernoulli. En se basant sur des mesures effectuées sur un flûtiste [2], on remarque que la pression de jeu ne dépasse pas 2000 Pa. C'est cette pression que nous allons utiliser pour calculer une vitesse maximale. La loi de Bernoulli nous donne $u_{jmax} \approx 55.5$.

De plus, la conservation du débit nous donne une relation entre la vitesse du jet et la vitesse centrale dans le tuyau d'alimentation :

$$u_0 = \frac{S_c}{\pi R^2} u_j \quad (3.8)$$

où S_c est la section du canal d'entrée de la flûte, d'environ $2 \times 10^{-5} m^2$ pour une flûte alto.

Et donc :

$$L = \frac{2u_j S_c}{30\nu\pi}$$

Une application numérique nous donne $L \approx 1.57m$. Nous choisissons de prendre une longueur de 3m.

Au delà de cette longueur, il suffit de mesurer la différence de pression entre deux points dont on connaît la distance pour mesurer le débit du tube, d'après l'équation (3.2).

Pertes de charge Ayant une longueur de tuyau limitée et un manomètre différentiel d'une certaine précision, nous avons comme contrainte de mesurer une perte de charge supérieure à 10Pa sur une longueur inférieure à 1m.

En utilisant l'équation 3.1, avec la condition donnée par l'équation 3.8, on obtient une condition sur le rayon du tuyau à utiliser :

$$R^4 = \frac{\Delta L}{\Delta P} \frac{4\rho\nu S_c}{\pi} u_j$$

Tous calculs faits, on obtient un rayon inférieur à 7.2mm. Le tuyau utilisé a un rayon d'environ 1.5mm.

Mesure de la pression dans la bouche Un volume en aval figure une bouche, et est également muni d'un manomètre. On a ainsi une mesure du débit traversant le canal en fonction de la pression qui règne dans la bouche du musicien. La caractéristique mesurée ainsi se ramène à une droite, ce qui laisse supposer que le profil de vitesse à l'intérieur du

canal est plutôt du type Poiseuille. La figure 3.6 représente des régressions linéaires des mesures de débit en fonction de la pression d'alimentation.

On estime que le profil de vitesse à la lumière est rectangulaire : en effet, la section du canal n'est pas constante, et en particulier diminue lorsqu'on s'approche de la lumière, et Claire Ségoufin [3] a montré par simulation numérique que la convergence finale du canal a pour effet de concentrer le jet, réduisant l'épaisseur des couches limites. On peut alors considérer que la section de sortie correspond à la section de l'écoulement comprenant des couches limites d'épaisseur fine, négligeable devant l'épaisseur du canal. Il suffit alors de diviser le débit mesuré par cette section pour se ramener à la vitesse du jet.

3.2.2 Résultats expérimentaux

Le dispositif a permis de mesurer systématiquement les caractéristiques des becs : ce sont des droites, passant par l'origine (le débit est nul lorsqu'on n'applique pas de surpression dans la bouche).

De même, comme on pouvait s'y attendre, à pression constante, le débit est plus élevé dans une flûte à tessiture plus grave, la section du canal d'entrée étant plus grande. Néanmoins, la flûte basse présente un débit plus faible que la flûte ténor, pour la même pression d'alimentation. Cela peut être interprété en considérant les longueurs des canaux des flûtes à bec. En effet, le canal de la flûte basse est moins long que celui de la flûte ténor.

Cependant, cette mesure de caractéristiques pose un problème. En effet, afin de valider les résultats de mesures, nous avons comparé les caractéristiques pression/débit de deux flûtes soprano. Le bec de l'une des deux flûtes a été sectionné afin de ne pas avoir de résistance, et ainsi mesurer un débit donné par la relation de Bernoulli. La figure 3.7 montre la comparaison des deux flûtes.

Contre toute attente, les deux mesures se superposent. De plus, la caractéristique de la flûte sans bec est une droite, et non pas une fonction de la forme racine carrée, ce qui correspondrait au modèle de Bernoulli.

Cette mesure reviendrait à dire que malgré l'absence de bec, la flûte présente une résistance au souffle, ce qui n'a pas de sens. Le protocole n'est donc pas valide, et l'une des causes possible du problème serait le calcul de la longueur d'entrée. En effet, on trouve également dans la littérature ([14] [15]), pour le calcul de la longueur d'entrée, la relation suivante :

$$\frac{L}{R} = 0.26Re$$

Ce qui nous donne alors une longueur d'entrée de l'ordre de la quinzaine de mètres ! Dans la suite de ce rapport, les vitesses de jet sont donc calculées à partir de la pression, avec la relation de Bernoulli.

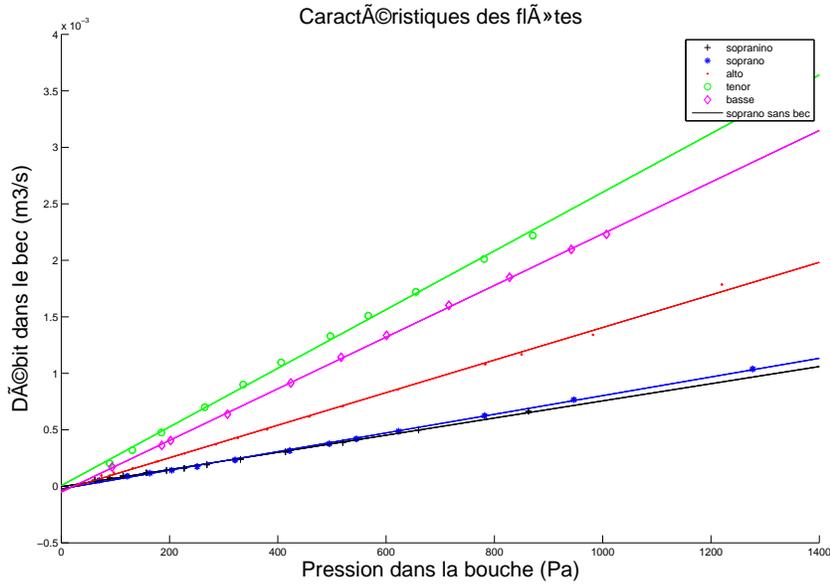


FIG. 3.6 – Caractéristiques pression-débit mesurées, pour les cinq flûtes

3.3 Bifurcation des flûtes à bec

Dans une flûte à bec, le flûtiste ne contrôle quasiment que la pression d'alimentation. Cette dernière conditionne grandement le comportement de l'instrument : en dessous d'un certain seuil, la flûte n'ocille pas. De plus, l'instrument peut fonctionner sur plusieurs régimes, selon les plages de pression d'alimentation.

Ces changements de régimes sont déterminants dans le jeu d'une flûte, car les trois premiers sont en général exploités par les flûtistes. Il faut pouvoir jouer fort sur le premier régime sans risquer de *sauter* sur le second régime, mais le deuxième régime (et même le troisième) doit être accessible pour des pressions suffisamment faibles pour être exercées par un flûtiste.

La stabilité de chaque régime est assurée, autour de la pression de saut, par la présence d'un hystérésis : il existe une gamme de pression d'alimentation pour laquelle plusieurs régimes coexistent. Il faut que cette gamme soit suffisamment grande pour que le flûtiste puisse jouir d'une certaine liberté de pressions de jeu, mais il doit pouvoir également changer facilement de régime.

Au seuil d'oscillation, la fréquence de jeu d'une flûte varie très rapidement en fonction de la pression d'alimentation. Nous avons essayé de quantifier cette déviation par des mesures.

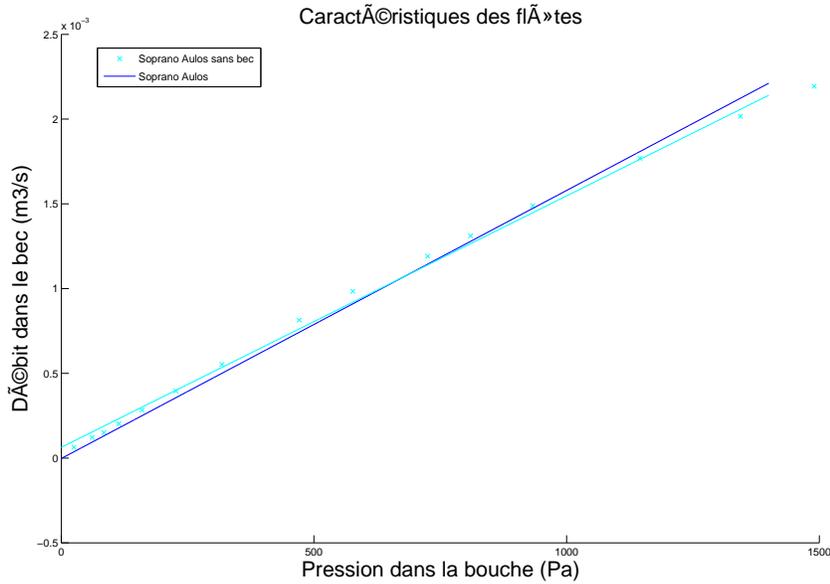


FIG. 3.7 – Caractéristiques pression-débit mesurées, pour deux flûtes à bec, dont le bec de l’une d’elle a été coupé. Les deux mesures sont très proches, ce qui met en cause la validité du protocole

3.3.1 Protocole de mesure

A l’instar des mesures de caractéristiques, les flûtes sont jouées à la bouche artificielle. On effectue une montée en pression, puis une descente. Les pressions dans la bouche, dans la flûte et rayonnée sont enregistrées à l’aide d’une carte d’acquisition. Les fréquences sont ensuite calculées à partir du signal de pression dans la flûte.

Pour que les flûtes soient sur le même régime de fonctionnement quelle que soit la fréquence de jeu, le doigté a été conservé d’une flûte à l’autre (quatre trous bouchés).

La figure 3.8 montre le résultat d’une acquisition sur la flûte soprano. Le premier graphe montre l’évolution temporelle de la pression dans la bouche, contrôlée à la main, le deuxième représente l’évolution temporelle de la pression interne à la flûte, le troisième le résultat des estimations de la fréquence fondamentale.

On remarque qu’au delà d’une certaine pression d’alimentation, la fréquence d’oscillation double : la flûte change de régime. Il faut *a priori* que cette pression de changement de régime soit la plus élevée possible pour *laisser de la place* au flûtiste, c’est à dire pour qu’il puisse nuancer son jeu sans *sauter* d’un régime à l’autre.

3.3.2 Résultats de mesures

Seuils d’oscillation Les montées en pression ayant été effectuées *à la main*, il n’est pas pertinent de comparer les flûtes en comparant les évolutions temporelles. On réorganise

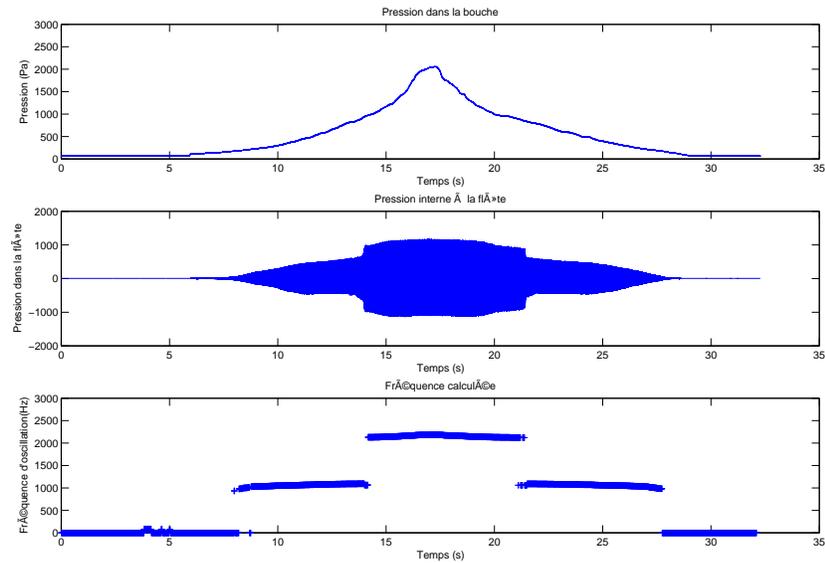


FIG. 3.8 – Mesure temporelle de la pression dans la flûte en fonction de la pression d’alimentation, pour mesurer la déviation en fréquence

alors les mesures en représentant la fréquence de jeu en fonction de la pression d’alimentation. La figure 3.9 montre le résultat de la mesure pour quatre des flûtes (il manque la flûte basse).

On s’attache tout d’abord aux seuils d’oscillation. Quelle que soit la flûte considérée, le seuil d’oscillation est aux alentours de 100 Pa. On peut supposer qu’il s’agit d’un choix de la part du facteur, de façon à ce que le jeu soit quasiment le même quelle que soit la flûte. Ce phénomène est à mettre en relation avec la *résistance* des becs.

En effet, si la surface de la lumière de la flûte ténor est trois fois plus grande que celle de la soprano, la pression pour faire chanter les instruments n’est pas dans un rapport trois. Cette dernière remarque amène à constater que le débit à fournir à la flûte ténor sera plus élevé que pour la flûte soprano. Il est donc *a priori* plus difficile de tenir une note longue sur une flûte à la tessiture grave plutôt qu’aigüe.

Différents seuils de changement de régime selon les flûtes Les observations se basent encore sur la figure 3.9. Les quatre flûtes ne changent pas de régime pour la même pression d’alimentation. Cependant, il ne semble y avoir aucune corrélation entre la tessiture de la flûte et la pression de changement de régime.

Par ailleurs, on remarque que les changements de régime se produisent, pour les flûtes alto et soprano, à des pressions d’alimentation de l’ordre de 2000 Pa, ce qui est très grand. En situation de jeu, les doigtés utilisés pour jouer sur le second régime sont différents de ceux utilisés sur le premier régime. De plus, le passage d’un régime à l’autre est facilité par

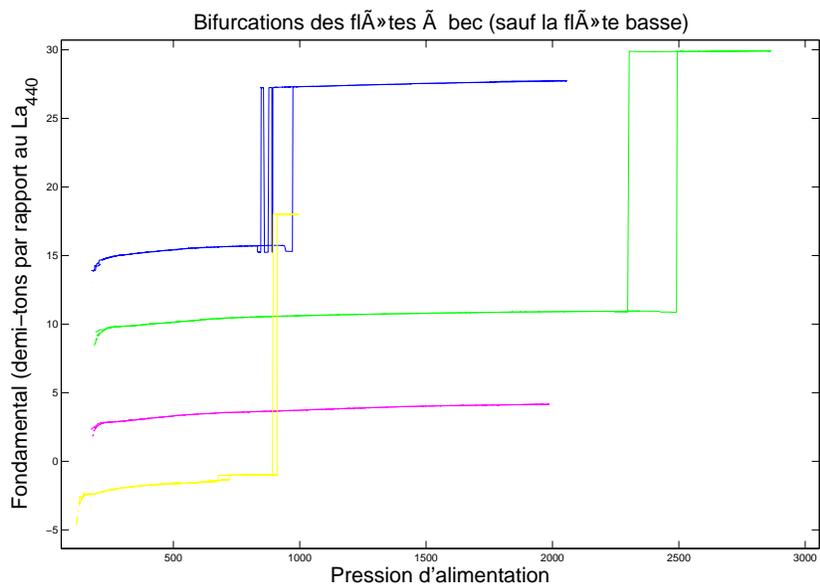


FIG. 3.9 – Fréquence d’oscillation en fonction de la pression, pour quatre flûtes. Malgré le fait que les seuils d’oscillation soient identiques, les pressions de bifurcation ne sont pas les mêmes selon la flûte considérée

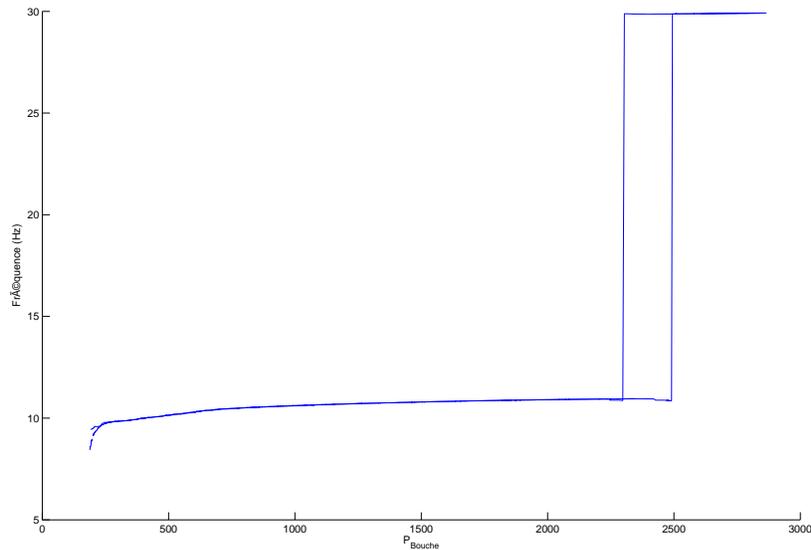


FIG. 3.10 – Il y a un phénomène d’hystérésis autour de la pression de changement de régime

la présence d’un trou de registre, ce qui rend possible le jeu sur le second régime à des pressions beaucoup plus basses que celles nécessaires à un changement de régime sur le même doigté. Il faut cependant interpréter les mesures à la bouche artificielle avec prudence. En effet, Johan Gäbriels [2] a comparé les pressions de saut de registre d’une flûte à bec, et constaté qu’un flûtiste pouvait jouer sur le premier registre à des pressions d’alimentation très supérieures à celle mesurée. Ceci tend à montrer l’importance du *système amont* dans le contrôle d’une flûte à bec [3].

Si l’on étudie de plus près la fréquence de jeu au niveau de la pression de changement de régime, on remarque une zone de pression où les deux fréquences coexistent. Il s’agit en fait d’un phénomène d’hystérésis, les mesures comprenant la montée et la descente de pression.

Comparaison d’une flûte d’usine et d’une flûte de facteur Pour compléter l’étude au seuil d’oscillation, il nous a semblé intéressant de comparer la flûte alto avec une flûte alto d’usine modifiée de la même façon, dans le cadre d’une étude précédente [2]. La figure 3.11 représente les deux mesures. Le premier constat est que les seuils d’oscillations sont comparables pour les deux flûtes.

En revanche, la pression de changement de régime de la flûte d’usine est très inférieure à celle de la flûte de facteur. Cela montre *a priori* le fait que la flûte de facture est de meilleure qualité, puisqu’elle permet au musicien de nuancer son jeu sur le premier régime

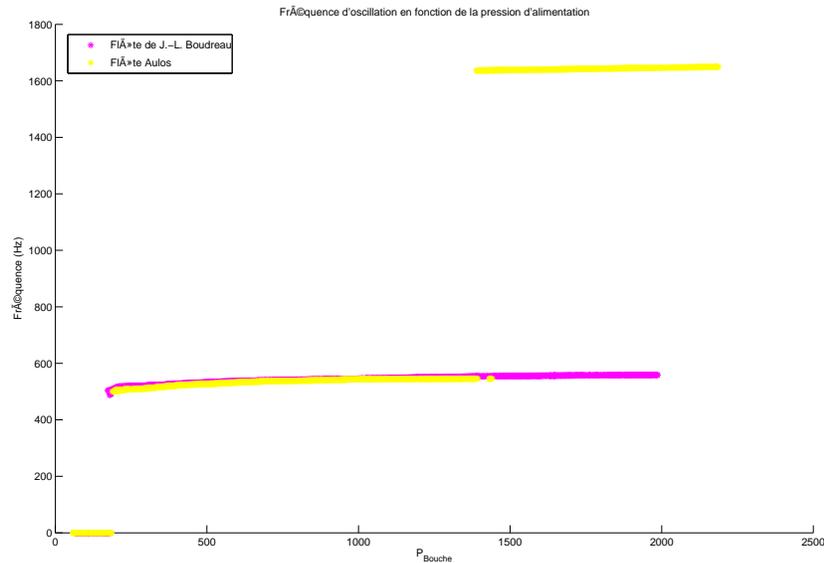


FIG. 3.11 – Comparaison des seuils d’oscillation et de changement de régime de deux flûtes, l’une de facteur, l’autre d’usine

sans prendre le risque de sauter sur le deuxième régime. Il faudrait mesurer les seuils de changement de régime sur tous les doigtés du premier régime, pour pouvoir confirmer cette hypothèse, les seuils de changement de régime pouvant différer grandement d’un doigté à l’autre.

De plus, on remarque des différences entre les deux flûtes, sur les allures des premiers régimes. Au seuil d’oscillation, pour la flûte de facture, la pente de l’évolution de la fréquence en fonction de la pression est très raide, puis est relativement faible sur le reste du premier régime. Un flûtiste évitera autant que possible de jouer dans la première partie de cette courbe, puisque le contrôle de la fréquence de jeu est très réduit. Dans la flûte d’usine, cette zone n’existe pas : la variation de fréquence dans la partie *jouable* est plus grande.

Le reste du premier régime présente une évolution de la fréquence de jeu homogène sur le reste de la gamme de pression. En comparaison, dans la flûte d’usine, l’évolution de la fréquence en fonction de la pression est beaucoup moins homogène. Ceci implique qu’en situation de jeu, un flûtiste contrôlera plus facilement la justesse de la flûte de facture, en variant sa pression d’alimentation, puisque la relation entre la pression et la fréquence est *simple*, tandis qu’avec la flûte d’usine, selon la gamme de pression dans laquelle on se place, une même différence de pression n’aura pas les mêmes conséquences sur la fréquence de jeu, ce qui complique le contrôle de la justesse.

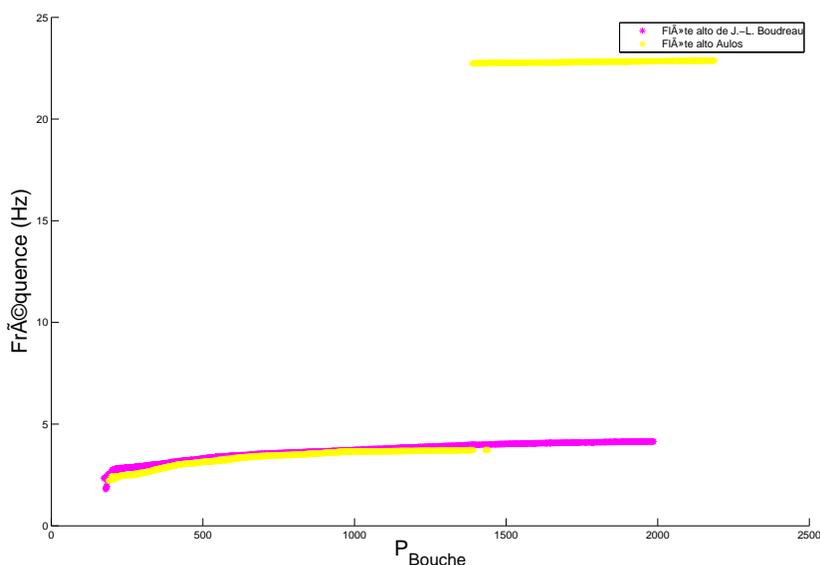


FIG. 3.12 – Comparaison des premiers régimes des flûtes altos de facture et d’usine

3.4 Mesures sur un flûtiste

Pour mesurer les paramètres de contrôle sur les cinq flûtes, nous avons invité un flûtiste d’un bon niveau² à se prêter à des mesures en jouant un protocole identique sur chaque flûte.

Afin de pouvoir mesurer en jeu certaines grandeurs, nous avons demandé à Jean-Luc Boudreau d’effectuer quelques modifications sur les flûtes :

- Nous lui avons demandé de percer un deuxième canal fin à côté du canal d’entrée de la flûte, pour y insérer un capteur de pression, mesurant la pression régnant dans la bouche du musicien
- dans le tuyau, près de l’extrémité active, nous lui avons demandé de percer un trou, de façon à pouvoir loger un microphone mesurant la pression dans la flûte

3.4.1 Dispositif expérimental et protocole

Dispositif expérimental Le dispositif expérimental consiste à faire jouer le flûtiste sur chaque flûte selon un protocole préétabli, tout en mesurant la pression qui règne dans sa bouche³, ainsi que dans la flûte. La figure 3.13 montre schématiquement le principe de mesure des pressions dans la bouche et à l’intérieur de la flûte.

Lors de l’expérience, ces deux mesures de pression sont complétées par une mesure

²Lambert Colson, diplômé du CNR de la Courneuve, actuellement au conservatoire de Bruxelles

³Dans le cas de la flûte basse, la pression dans la bouche mesurée, est en fait la pression dans le pied !

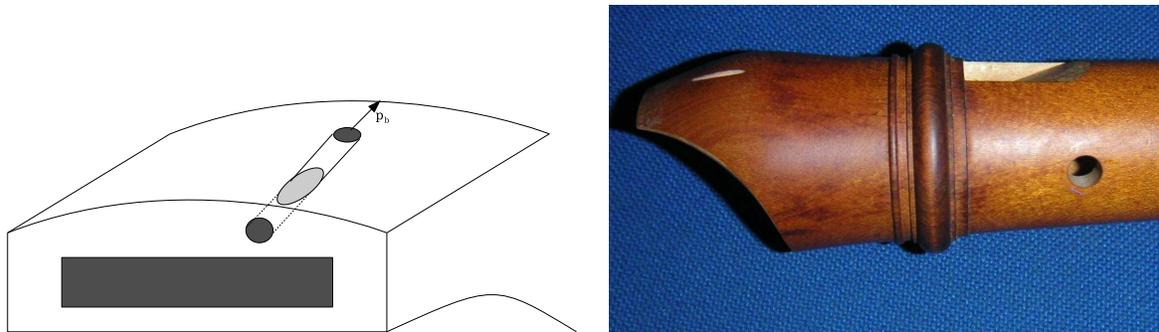


FIG. 3.13 – Dispositif expérimental permettant de mesurer la pression dans la bouche du musicien et dans la flûte

de la pression extérieure, réalisée à l'aide d'un couple de microphones situé à environ un mètre de la flûte. L'ensemble de ces pressions étant enregistré sur un ordinateur à l'aide d'une carte d'acquisition, à une fréquence d'échantillonnage de 25 kHz pour chaque voie, pour pouvoir ensuite exploiter les mesures.

Protocole de mesure Un ensemble de tâches ont été déterminées en collaboration avec le flûtiste, dans le but d'avoir un échantillon des différentes techniques de jeu utilisées dans la flûte à bec. Le flûtiste doit jouer, sur chaque flûte :

- Une gamme chromatique ascendante détachée sur toute la tessiture de la flûte,
- une gamme diatonique ascendante liée puis détachée, sur deux octaves,
- une gamme diatonique descendante liée puis détachée, sur deux octaves,
- des octaves ascendantes, détachées puis liées,
- des octaves descendantes, détachées puis liées,
- un jeu *crescendo* puis *decrescendo* sur fa do si bemol et mi⁴, ces quatre notes étant situées sur des régimes de fonctionnement différents de l'instrument,
- un thème musical très simple,
- le thème des *Folies d'Espagne*, de Martin Marais,
- des harmoniques détachées sur un certain doigté,
- des arpèges, liées puis détachées,
- des attaques en *T* et en *K*,
- la même tâche, plus vite,
- des *coups de langue* : attaques en *D* et *G*,
- utilisation du voile du palais pour changer le timbre de la flûte,
- un thème de Barsanti en Do majeur,
- un extrait d'un concerto pour flûte à bec en Do mineur de Vivaldi,
- un extrait d'une sonate en Mi mineur de Bach (pour flûte traversière),
- un extrait d'une sonate en do majeur de Telemann.

⁴Le doigté était conservé : les notes sont données à titre indicatif, sur une flûte en do

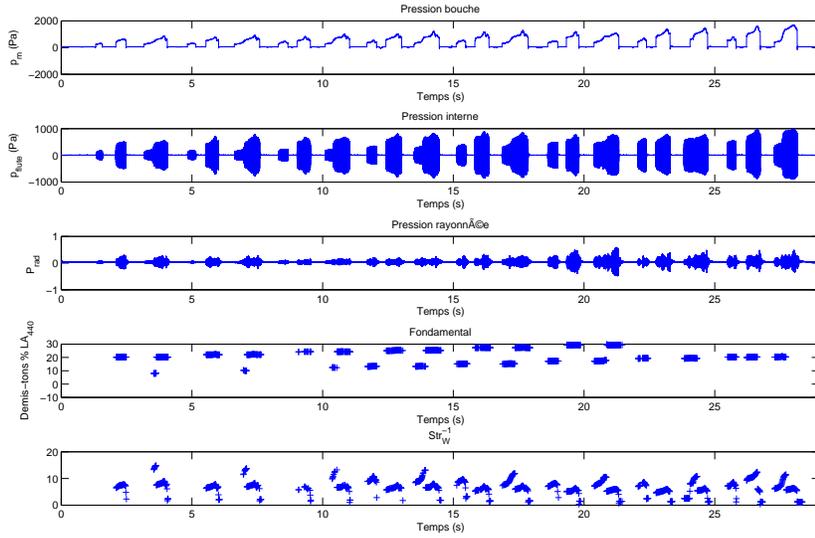


FIG. 3.14 – Résultat de l’acquisition temporelle, sur une série d’octaves ascendantes avec la flûte alto d’usine. Les calculs des fréquences de jeu et de l’inverse du nombre de Strouhal sont également représentés

3.5 Résultats obtenus

3.5.1 Période adimensionnée

Un algorithme de détection de fréquence calcule enfin le fondamental à partir de la pression interne rayonnée par la flûte, pour chaque mesure. La figure 3.14 montre le résultat de l’acquisition, du calcul des fréquences et de l’inverse du nombre de Strouhal, θ , que nous nommerons période adimensionnée. La tâche mesurée consiste à jouer une série d’octaves ascendantes, sur la flûte soprano. Chaque octave est d’abord jouée détachée, puis liée. On remarque les discontinuités de θ aux changements de notes, sur le jeu lié, dûes aux brusques changement de fréquence (variant d’un facteur 2), alors que la vitesse est continue.

Hormis ces variations d’un facteur 2, malgré le grand ambitus sur lequel la mesure est effectuée (2 octaves), θ reste compris entre 15 et 20 tout au long de la mesure. La figure 3.15 montre l’évolution de θ en fonction de la note jouée sur les cinq flûtes.

La flûte basse mise à part, quelque soit la flûte, les valeurs des périodes adimensionnées θ se regroupent sur un même faisceau. Ceci montre une certaine régularité chez le flûtiste : nous avons vu que $\theta = \frac{u_j}{fW}$. Or, W est fixé par la facture, et f varie faiblement autour de la fréquence de résonance du régime donné. U_j est le seul paramètre contrôlé directement par le musicien, mais aussi celui qui est susceptible de varier le plus. Il semble ici que le flûtiste règle sa pression de jeu, quelque soit la flûte sur laquelle il joue, de sorte d’obtenir un certain son, reflété par le nombre de strouhal.

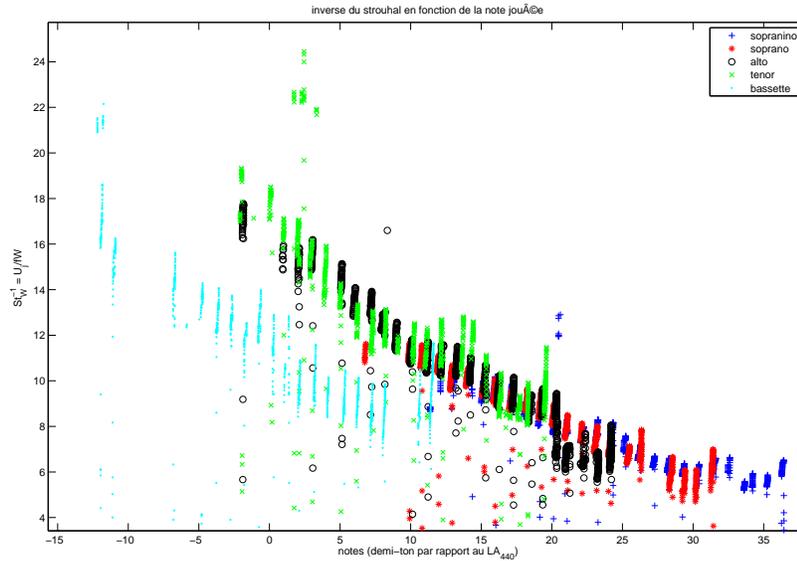


FIG. 3.15 – Période adimensionnée θ en fonction de la note jouée, pour toutes les flûtes de facteur

La différence de la flûte basse provient peut être de la présence du *bocal* : le flûtiste contrôle la pression qui règne dans sa bouche, celle-ci étant différente *a priori* de celle dans le bocal. Cependant, le comportement de θ en fonction de la note est le même.

3.5.2 Relation entre pression dans la bouche et timbre

Dans le protocole de mesure, nous demandons au flûtiste de jouer quelques notes développées, c'est à dire crescendo puis decrescendo. Nous nous sommes alors intéressé au lien entre la pression d'alimentation et le poids relatif des différents harmoniques de la pression dans la flûte. Pour se faire, se basant sur la fréquence instantanée détectée f_0 , nous cherchons les amplitudes des pics fréquentiels autour de f_0 , $2f_0$ et $3f_0$, mesurés sur le spectre de la pression interne à la flûte. La figure 3.16 montre l'évolution de ces amplitudes en fonction de la pression pour la flûte ténor.

Lorsqu'on augmente la pression d'alimentation, le poids relatif du deuxième harmonique augmente, tandis que l'amplitude du premier harmonique tend à baisser : le timbre s'enrichit.

Nous avons vu précédemment que dans le bas de la tessiture d'une flûte, θ est plus grand que dans le haut de la tessiture de l'instrument (figure 3.15). Or θ augmente lorsque la pression augmente (on utilise la relation de bernoulli pour relier la vitesse du jet à la pression d'alimentation). Il semblerait donc que le flûtiste équilibre le timbre de l'instrument, en enrichissant les notes graves en hautes fréquences. La figure 3.17 montre le poids

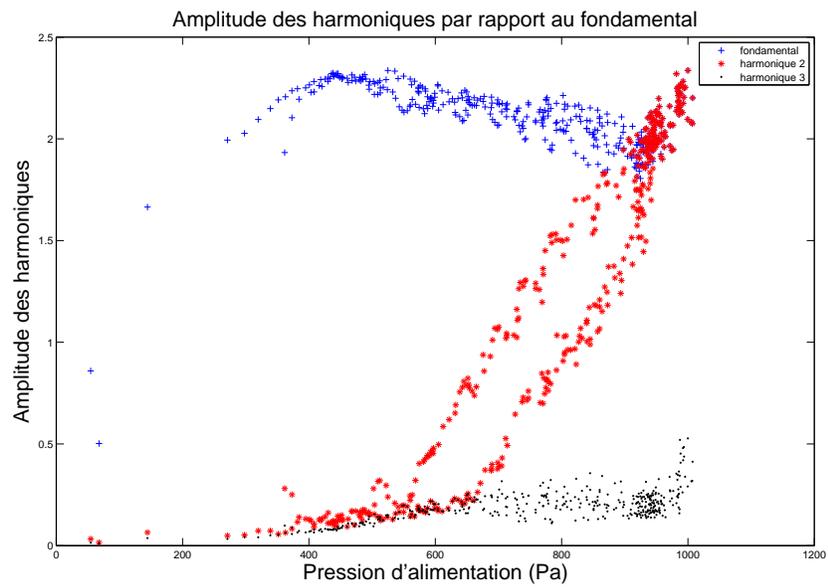


FIG. 3.16 – Évolution des amplitudes des trois premiers harmoniques en fonction de la pression de jeu sur un do joué à la flûte ténor. Quand le flûtiste augmente la pression dans sa bouche, le poids relatif du deuxième harmonique augmente

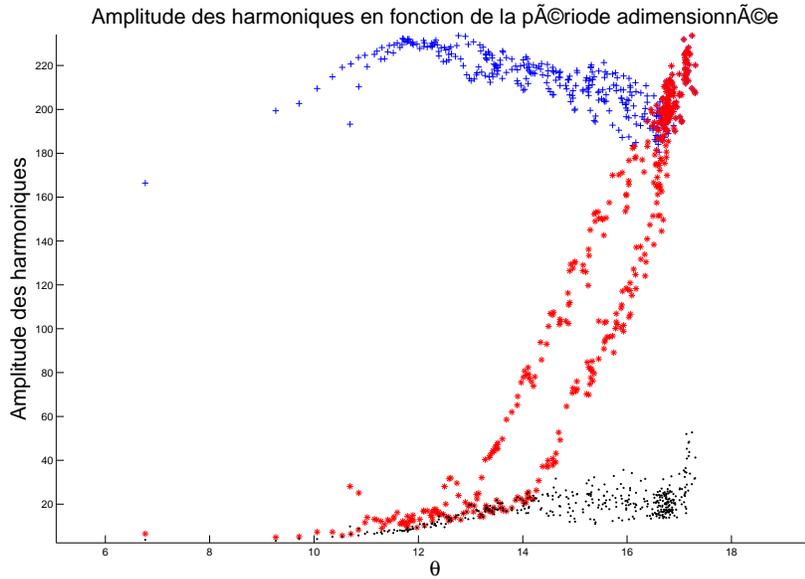


FIG. 3.17 – Amplitudes relatives des trois premiers harmoniques de la pression interne d’une flûte, en fonction de la période adimensionnée θ . Pour des valeurs de θ supérieures à 13, le spectre s’enrichit très rapidement en harmonique 2

relatif des harmoniques pour une note jouée (développée) en fonction de θ , sur la même mesure que précédemment.

3.5.3 Timbre d’une famille

La relation entre la période adimensionnée θ et le timbre nous amène à nous poser la question du timbre d’une famille. En effet, nous avons vu lors de mesures à la bouche artificielle que les pressions de seuil d’oscillation étaient similaires entre les flûtes de la famille pour un même doigté. On peut donc s’attendre à ce que les pressions de jeu pour un doigté donné soient équivalentes d’une flûte à l’autre. Or la vitesse centrale du jet dépend directement de la pression d’alimentation.

D’autre part nous avons également remarqué que la distance de la lumière au biseau varie peu d’une flûte à l’autre. Il en résulte que le temps de parcours du jet avant d’atteindre le biseau varie très peu d’une flûte à l’autre pour le même doigté, sous l’hypothèse que les pressions d’alimentation sont équivalentes.

Si la vitesse du jet et la distance au biseau varient peu, la période adimensionnée est essentiellement guidée par la fréquence de jeu ($\theta = \frac{U_j}{W_f}$). Cette période adimensionnée est donc *a priori* plus grande pour les flûtes de basses tessitures, ce qui laisse présager un timbre relativement plus riche en hautes fréquences.

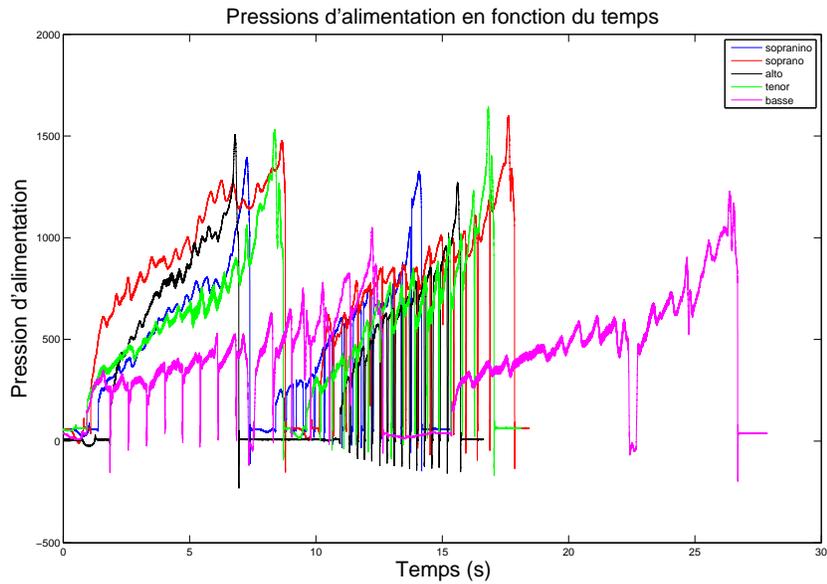


FIG. 3.18 – Pressions d'alimentation mesurées pour une gamme sur les cinq flûtes. La flûte basse mise à part, Les pressions d'alimentation sont à peu près équivalentes pour un doigté donné

Pression d'alimentation La deuxième tâche du protocole consiste à jouer une gamme, d'abord liée, puis détachée⁵. L'intérêt de cette tâche réside dans le caractère quasi automatique du jeu, le flûtiste n'interprétant pas musicalement. La figure 3.18 représente les pressions d'alimentation mesurées pour les cinq flûtes.

Les temps de jeu ne sont pas les mêmes d'une flûte à l'autre. On peut cependant comparer les pressions de jeu pour un doigté donné. La flûte basse mise à part, ces dernières sont à peu près équivalentes. La flûte soprano se démarque un peu des autres également dans le bas de la tessiture, mais pour les doigtés du second régime, les pressions sont comparables.

On remarque également, sur les gammes liées pour les flûtes basse et ténor, qu'il y a un changement de pente, pour les pressions. Ce changement a lieu après la respiration, dans la mesure sur la flûte basse, et en toute fin de mesure sur la flûte ténor. Cette double pente pourrait être interprétée en termes d'un changement de comportement de l'écoulement, comme par exemple le déclenchement de la turbulence sur le jet avant d'atteindre le biseau. Cette hypothèse devrait être vérifiée, au travers d'une estimation du nombre de Reynolds, par exemple.

⁵l'ordre a été inversé lors de la mesure avec la flûte basse

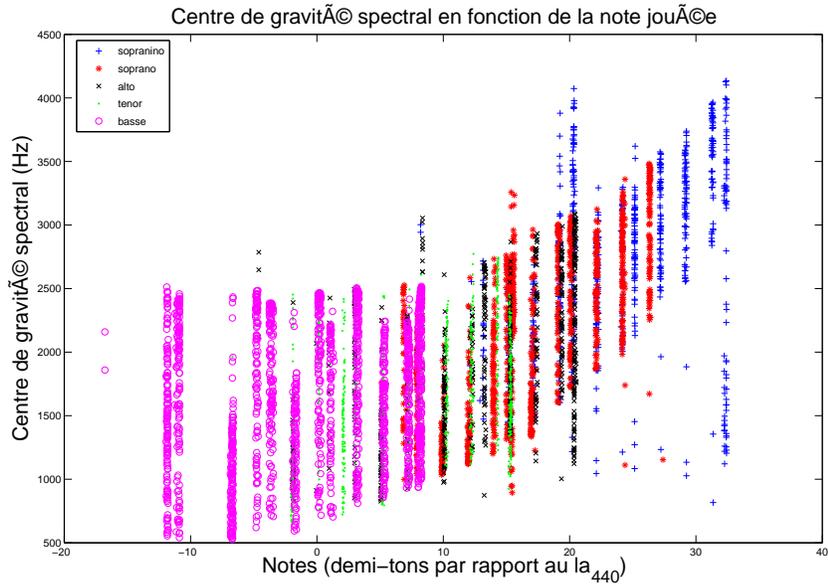


FIG. 3.19 – Centre de gravité spectral calculé sur les cinq flûtes, en fonction de la note jouée.

Centre de gravité spectral Nous avons calculé le centre de gravité spectral (CGS) de la pression interne sur chaque mesure. La figure 3.19 montre le résultat de ce calcul.

Le CGS augmente globalement avec la fréquence. Cependant, alors que la note jouée varie d'environ quatre octaves (on a un rapport 13 entre la note jouée la plus grave de la basse et la plus aiguë de la soprano), le cgs ne varie que de 1500 Hz à 3500 Hz, soit un peu plus d'une octave.

Il est de plus remarquable de constater que les centroïdes s'organisent en faisceau, et que pour une même note jouée par deux flûtes différentes, les CGS se confondent. Il existe néanmoins une certaine dispersion du centroïde pour chaque note : l'algorithme de détection du centroïde est tributaire de la détection de fréquence, elle même soumise à une condition sur l'énergie du signal. Le seuil de détection ayant été réglé relativement bas, les fréquences sont détectées en régime transitoire. La dispersion du centroïde est d'autant plus grande, que ce dernier varie lors des transitoires.

Si l'on trace les CGS divisés par la fréquence fondamentale mesurée (figure 3.20), il devient clair que plus la flûte est basse, plus le rayonnement est favorisé en hautes fréquences.

CGS et période adimensionnée De même que nous avons relié les amplitudes relatives des trois premiers harmoniques de la pression dans la flûte avec la période adimensionnée, nous pouvons relier le CGS avec cette dernière. La figure 3.21 représente le calcul du en fonction de la période adimensionnée.

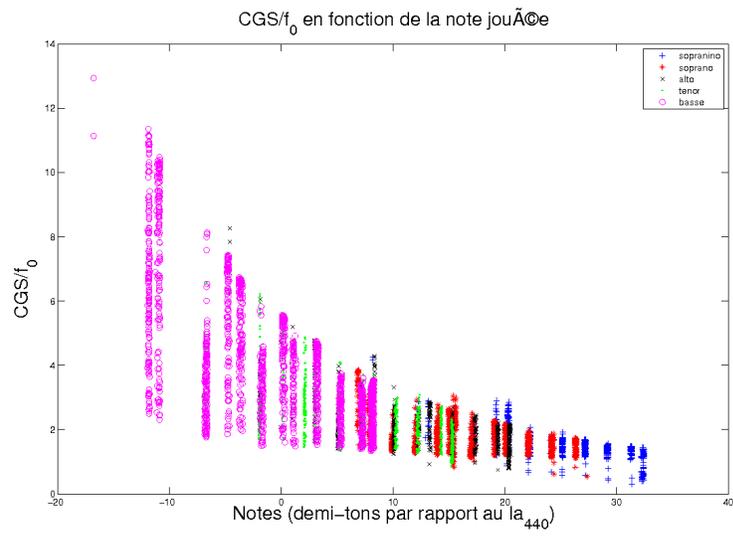


FIG. 3.20 – CGS calculés pour chaque flûte, divisés par le fondamental détecté

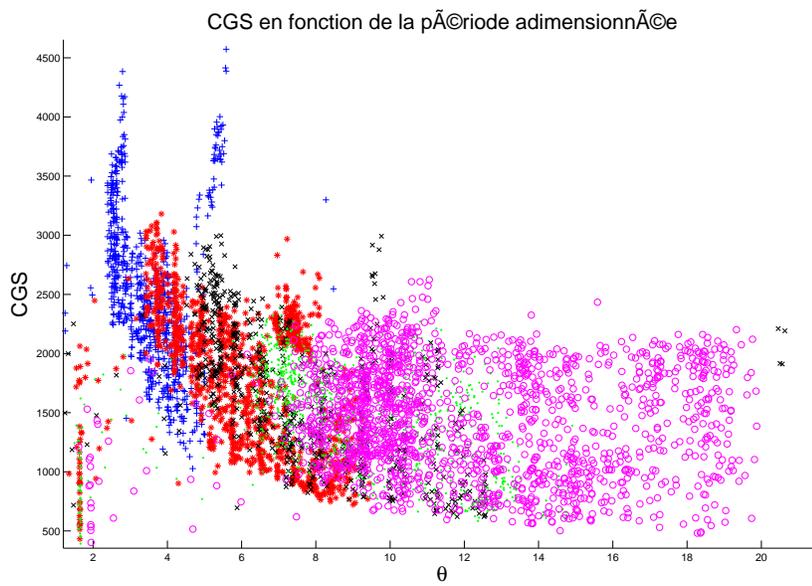


FIG. 3.21 – CGS en fonction de la période adimensionnée θ

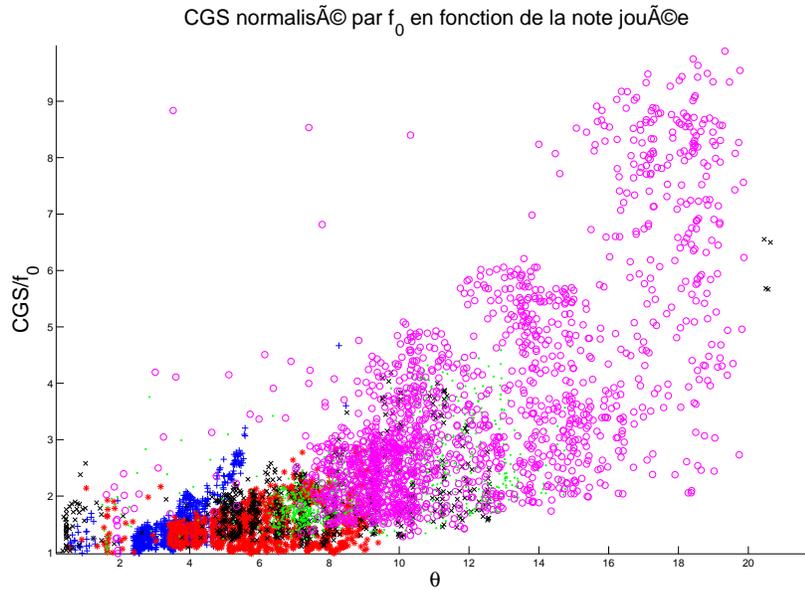


FIG. 3.22 – CGS normalisé par la fréquence de jeu, en fonction de la période adimensionnée

Cette dernière figure nous montre que pour des périodes adimensionnées grandes ($\theta > 12$), le centre de gravité spectral est à peu près constant (autour de 1500 Hz). On constate également que chaque flûte est jouée selon une plage de périodes adimensionnée. On trouve, en θ décroissant, la flûte basse, la flûte ténor, l’alto, la soprano et la soprano. Cette observation explique en partie l’homogénéité de timbre au sein de la famille, puisque le centroïde joue un rôle important dans la perception de la brillance.

Pour les flûtes soprano et soprano, à faibles périodes adimensionnées, le centre de gravité spectral augmente. Ceci s’explique en remarquant qu’une fréquence de jeu de 1500 Hz est facilement accessible à ces instruments. Il est donc normal que le centroïde augmente lorsque ces flûtes jouent autour de ces fréquences. On représente sur la figure 3.22 le centre de gravité spectral normalisé par la fréquence fondamentale de jeu en fonction de la période adimensionnée.

Cette figure semble confirmer l’affirmation précédente. En effet, pour de faibles périodes adimensionnées, le centroïde normalisé tend vers 1. Cela revient à dire que le centre de gravité spectral est à la fréquence de jeu. En d’autres termes, pour des notes aigües, le son de la soprano semble tendre vers une sinusoïde.

On constate de plus que pour les flûtes graves, le centroïde est relativement plus élevé, par rapport à la fréquence de jeu. La période adimensionnée, θ , semble donc être un bon descripteur du *mode de jeu* de l’instrument.

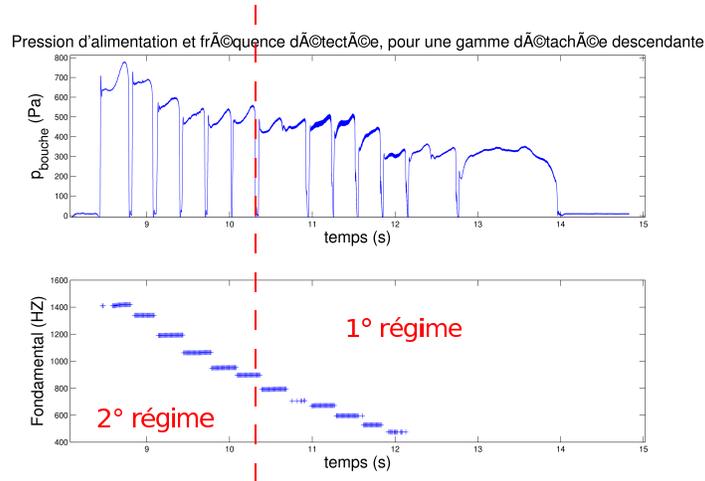


FIG. 3.23 – Pression dans la bouche du flûtiste lors d’une gamme descendante détachée sur la flûte alto : sur le deuxième régime, on observe l’apparition d’un pic de pression très bref

3.5.4 Pression d’alimentation sur le deuxième régime

La troisième tâche du protocole consiste à jouer une gamme descendante liée, puis détachée, sur les deux premières octaves. En considérant la pression d’alimentation, on remarque que pour les premières notes de la gamme (octave supérieure) un pic prononcé apparaît au début des notes, puis la pression reproduit le même schéma quelle que soit la note jouée : elle augmente progressivement au cours d’une note.

Nous avons remarqué la présence d’un hystérésis lors des mesures à la bouche artificielle (figure 3.10). Il semblerait qu’elle soit exploitée par les flûtistes. En effet, le pic est en général suivi d’une baisse de pression. Une explication possible est que le musicien s’assure de se placer sur le second régime de l’instrument par ce *coup de langue*, puis joue ensuite la note voulue en se servant de l’*inertie* offerte par le phénomène d’hystérésis.

3.5.5 Le voile du palais

La géométrie des flûtes à bec étant fixée par le facteur, et en particulier les longueurs W et h , on est facilement amené à penser que les seuls contrôles du flûtiste sur l’instrument sont sur la pression d’alimentation et la longueur du résonateur.

Nous avons demandé au flûtiste si il pouvait changer le timbre d’une note, en gardant l’amplitude de jeu constante. Le principe, pour le flûtiste, consiste à changer l’orientation du voile du palais. La figure 3.24 montre le spectrogramme de la pression dans la bouche du flûtiste. On remarque que le changement d’orientation du palais transforme la distribution de bruit, puisqu’il disparaît pendant une plage.

Au passage, on peut noter que la pression dans la bouche contient des composantes de fréquences non nulle, qui proviennent vraisemblablement d’un couplage entre la flûte et

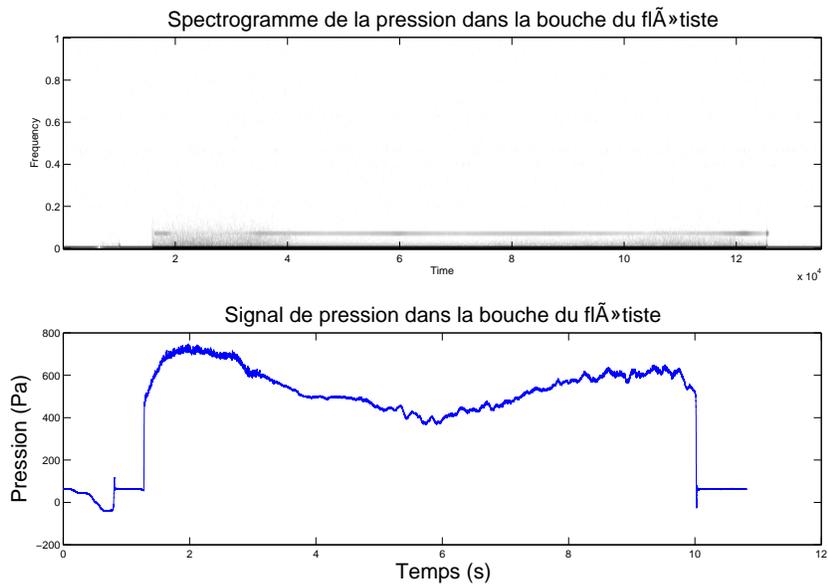


FIG. 3.24 – Spectrogramme de la pression dans la bouche du flûtiste, lorsqu’il change l’orientation du voile de son palais, et mesure de pression associée

la bouche du flûtiste [3] [2].

Cette transformation est visible également sur le son rayonné (figure 3.25), et d’autant plus que le rayonnement d’une flûte agit comme un filtrage passe-haut. De plus, le bruit de souffle est une composante très importante dans la perception du son des flûtes. C’est pourquoi ce changement de timbre a de grandes conséquences sur la perception.

La figure 3.26 montre le spectrogramme de la pression dans la flûte, ainsi que l’amplitude en fonction du temps de cette dernière. Il est remarquable que l’amplitude de pression varie très peu par rapport à la variation de timbre qui en découle.

Il semblerait que cette technique soit utilisée en ensemble, pour faire *rentrer* discrètement une note dans un accord (en réduisant le bruit), puis en *gonflant*⁶ le son en réinjectant du bruit dans le haut du spectre.

⁶Les termes en italiques ont été prononcés lors d’une discussion avec Lambert Colson

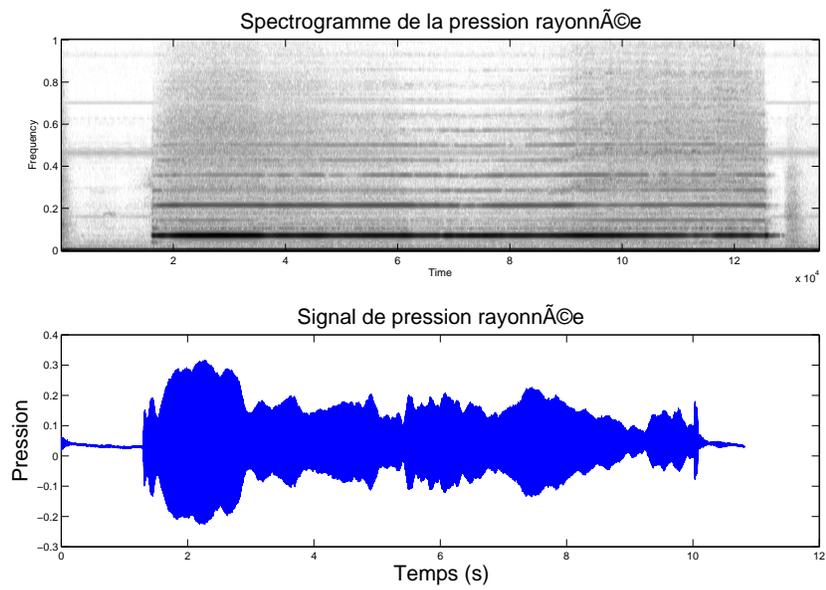


FIG. 3.25 – Spectrogramme de la pression rayonn e lors du changement d’orientation du voile du palais du flûtiste, et mesure de pression associ e

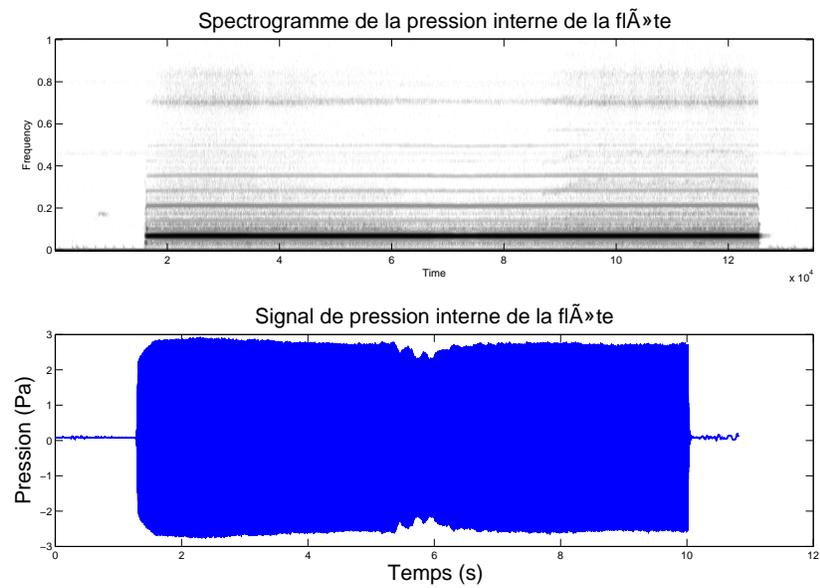


FIG. 3.26 – Spectrogramme de la pression interne de la flûte, lors du changement d’orientation du voile du palais du flûtiste, et mesure de pression associ e

Chapitre 4

Mesures sur des flûtes traversières

Dans les flûtes traversières, la géométrie n'est pas fixée, contrairement aux flûtes à bec. Nous avons vu que la longueur du jet W est un paramètre déterminant dans les instruments à embouchure de flûte. Or, dans les flûtes traversières, cette distance est contrôlée par le flûtiste ainsi que la surface du canal formé par ses lèvres (contrôlant le débit).

Il n'est donc pas pertinent de faire des mesures sans flûtiste, à la bouche artificielle, pour mesurer des changements de régimes, puisque ces changements dépendent de la géométrie du système excitateur. L'utilisation du paramètre θ prend ici tout son sens, puisqu'il permet de s'affranchir de la géométrie du système.

Comme pour les flûtes à bec, nous avons étudié une famille de cinq flûtes traversières. Les flûtes basse et en sol ont été fabriquées par le facteur Jean-Yves Roosen. La flûte en Mib est de marque Jack Leff. La flûte piccolo et la flûte en ut sont des flûtes d'étude de la marque Yamaha.

4.1 Dimensions des flûtes

Nous avons tout d'abord mesuré leurs dimensions au niveau de la pièce d'embouchure, résumées dans le tableau 4.1. La longueur et la largeur de l'embouchure correspondent aux dimensions transverses du petit tuyau d'embouchure, appelé chambre d'embouchure. La hauteur du col correspond à L_{emb} et le diamètre du tuyau correspond au diamètre au bout de la pièce d'embouchure.

On remarque alors que la flûte en ut se démarque des autres flûtes, en particulier pour les dimensions de l'embouchure (longueur, largeur, hauteur du col). En effet, un même paramètre suit une évolution monotone lorsqu'on passe d'une flûte à l'autre, sauf lorsqu'il s'agit de la flûte en ut (figure 4.1).

Il est à noter que la flûte en ut est la plus utilisée des flûtes traversières. Il s'agit de la flûte standard, et bénéficie à ce titre certainement de plus d'attention dans la facture. Les flûtistes apprennent en général à jouer sur cette flûte, et adaptent leurs techniques de jeu sur les autres flûtes, ce qui confère à la flûte en ut un caractère spécial.

Plusieurs interprétations de cette différence sont possibles. On peut penser que l'attention apportée à la facture de la flûte en ut a amené les facteurs à trouver un jeu de

Flûte	Longueur de l'embouchure (mm)	Largeur de l'embouchure (mm)	Diamètre du tuyau (mm)	Hauteur du col (mm)
Flûte Basse	11.43	13.86	27.98	6.11
Flûte en Sol	11.11	13.35	22.55	5.56
Flûte en ut	10.1	11.9	19	5.0
Flûte en Mib	10.24	12.24	15.63	3.24
Flûte piccolo	8.40	10	10.89	2

TAB. 4.1 – Principales dimensions sur la pièce d'embouchure, relevées sur cinq flûtes

paramètres facilitant le jeu dessus. Cependant une autre explication possible est qu'étant donné que la flûte en ut est la plus utilisée, les flûtistes attendent plus de liberté de jeu sur cette dernière. Les facteurs auraient été ainsi amenés à modifier la facture pour augmenter le contrôle, éventuellement au détriment de la facilité de jeu. Les flûtistes sont d'ailleurs souvent déconcertés par la facilité de jouer sur d'autres flûtes que celle en ut.

4.2 Mesures sur un flûtiste

Des mesures ont également été effectuées avec un flûtiste. Comme pour la flûte à bec, un protocole a été préétabli comprenant des gammes, octaves, nuances et de la musique[16]. Nous avons vu que contrairement à la flûte à bec, la distance entre la sortie du canal et le biseau, mais aussi la surface de la sortie du canal sont, dans la flûte traversière, contrôlées par le flûtiste. Il faut donc modifier le dispositif expérimental pour mesurer ces grandeurs au cours de l'expérience.

4.2.1 Dispositif expérimental

On place alors une caméra en face de la flûte (qui est alors fixée), filmant les lèvres du flûtiste, de face, au cours du jeu. De plus, par un système de miroir, on filme également les lèvres de profil, ce qui permet de mesurer la distance W . Comme pour les flûtes à bec, on mesure également les pressions dans la flûte, dans la bouche du musicien, et rayonnée. La figure 4.2 montre un schéma du dispositif expérimental, et la figure 4.3 montre une image prise par la caméra, ainsi que le résultat des algorithmes de calcul de la surface et de la distance entre les lèvres et le biseau.

Ce dispositif a préalablement été utilisé pour des mesures sur une quinzaine de flûtistes. Ces mesures ont montré une très forte homogénéité des valeurs de la période adimensionnée θ entre les flûtistes, de provenances internationales [6].

4.2.2 Pression d'alimentation

Nous avons fait jouer au flûtiste une gamme chromatique sur toute la tessiture de chaque flûte. Quelle que soit la flûte jouée, les pressions en fonction des notes se super-

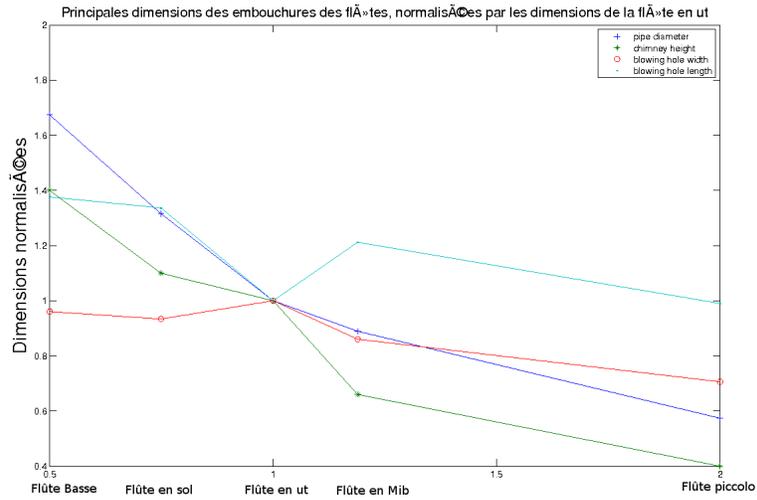


FIG. 4.1 – Dimensions des paramètres des embouchures pour les différentes flûtes, normalisées par rapport aux dimensions de la flûte en ut. On remarque que la flûte en ut ne suit pas les mêmes règles de dimensionnement

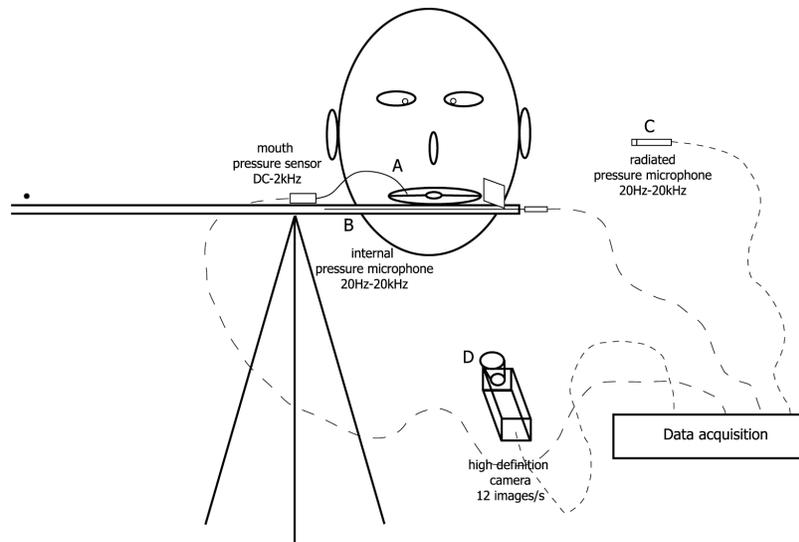


FIG. 4.2 – Dispositif expérimental utilisé lors des mesures avec un flûtiste

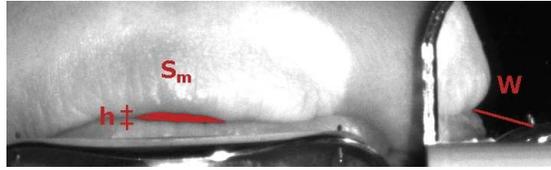


FIG. 4.3 – Exemple d’image prise par la caméra. Les résultats des algorithmes de calcul de distance et d’ouverture sont représentés

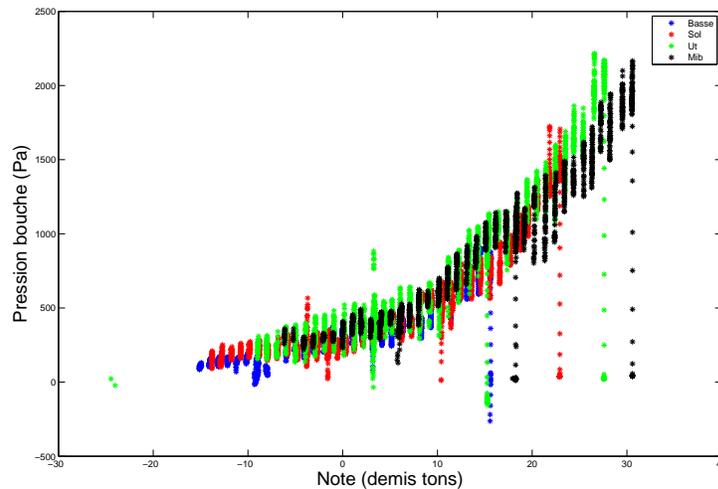


FIG. 4.4 – Pression de jeu en fonction de la note jouée pour quatre flûtes traversières. Il existe une corrélation forte entre la note jouée et la fréquence de jeu, indépendamment de la flûte considérée

posent. La pression de jeu dépend donc de hauteur de la note plus que de l’instrument sur lequel on joue.

Il est à noter que les mesures ont été effectuées sur un seul flûtiste, mais à des moments très différents, certaines mesures étant distantes de quelques semaines. Cette relation entre la note jouée et la pression d’alimentation est donc le fruit de l’apprentissage de la flûte, et tient de l’habitude, plus que de l’adaptation. La figure 4.4 montre la superposition des mesures.

4.2.3 Distance au biseau

A priori, la distance entre les lèvres et le biseau doit diminuer avec la note jouée, puisque le jet doit atteindre le biseau plus rapidement, lorsqu’on joue des notes aiguës, de sorte à rester proche du retard de phase optimal. La figure 4.5 montre les mesures de la

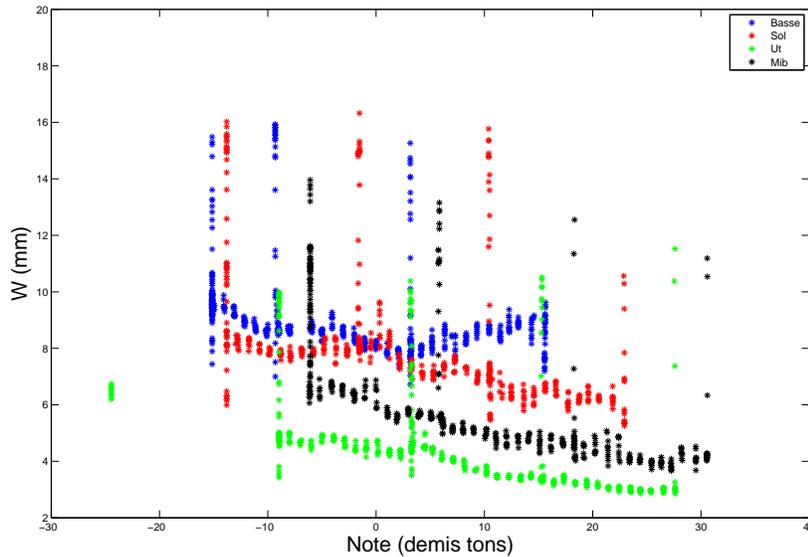


FIG. 4.5 – Distance W entre les lèvres et le biseau. Cette distance diminue avec la note jouée

distance entre les lèvres du musicien et le biseau, W , en fonction de la note jouée.

La flûte piccolo n'apparaît pas dans cette mesure, ainsi que dans celles qui en découlent, en particulier la période adimensionnée.

Quelle que soit la flûte considérée, W diminue bien lorsque la hauteur de la note jouée augmente sur une échelle chromatique. De plus, comme on peut s'y attendre, cette distance diminue globalement avec la tessiture de la flûte. Cependant, ceci n'est pas vrai pour la flûte en ut, nettement en dessous des autres flûtes. Nous avons vu dans la partie précédente que la flûte en ut n'était pas dimensionnée de la même façon que les autres flûtes, ceci se répercute sur la façon de jouer de l'instrumentiste. La flûte en ut est celle pour laquelle les lèvres sont les plus proches du biseau pendant le jeu.

4.2.4 Période adimensionnée

Comme nous avons vu que la pression d'alimentation, et donc la vitesse du jet, dépend de la note plutôt que de la flûte, cette différence de dimensions de l'embouchure, et donc de W n'est pas sans conséquences sur θ . Le calcul de θ pour chaque flûte en fonction de la note jouée est représenté figure 4.6.

Les valeurs obtenues pour des flûtes différentes se superposent en fonction du doigté : il suffit de déplacer les points correspondant à la flûte en Mib de sept demi-tons vers le grave pour remarquer qu'ils se superposent aux points de la flûte en Sol. La détection de fréquence n'ayant pas calculé les fréquences des notes les plus graves de la flûte basse, on

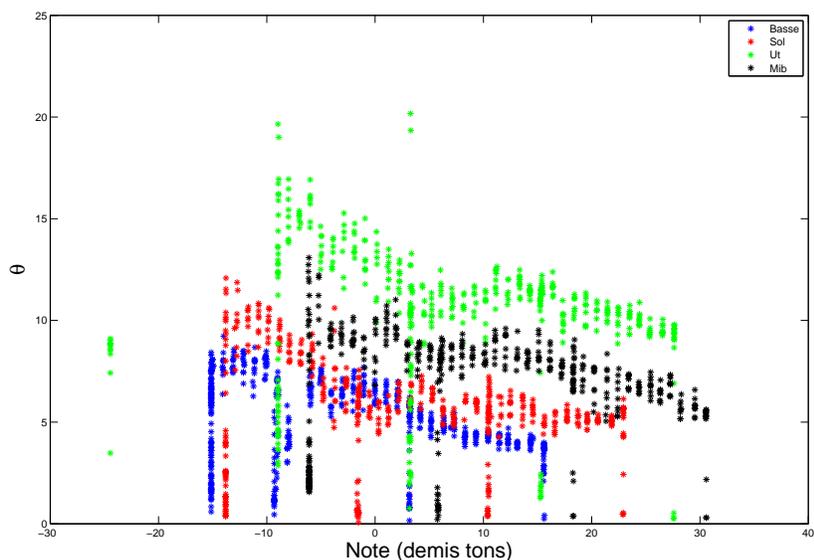


FIG. 4.6 – θ en fonction de la note jouée, pour toutes les flûtes. Les points se superposent à doigté constant, sauf pour la flûte en ut

ne peut que supposer que cela est également vrai pour cette flûte.

Une fois de plus, la flûte en ut se démarque, et les valeurs du paramètre θ sont bien plus élevées que pour les autres flûtes. Il semblerait *in fine* que les différences de dimensionnement permettent au flûtiste d’avoir un son plus facilement riche avec une flûte en ut. On peut cependant se poser la question des raisons de ces différences dans la facture des flûtes, et de l’effet que cela produirait sur le confort de jeu, si l’on dimensionnait l’embouchure d’une flûte en ut de sorte à ce qu’elle s’inscrive dans la continuité des paramètres de facture en fonction de la flûte.

4.2.5 Timbre des flûtes traversières

À l’instar des mesures effectuées sur les flûtes à bec, nous nous sommes intéressés au timbre des différentes flûtes en fonction de la note jouée. La figure 4.7 représente le calcul du centre de gravité spectral normalisé par la fréquence de jeu pour chaque note des flûtes basse, en Sol, en Mib et en Ut. La tâche exécutée est une gamme chromatique ascendante.

Ici, les centroïdes ont été moyennés sur chaque note, pour plus de lisibilité. Cependant, de même que pour les mesures sur les flûtes à bec, le centroïde varie lors des transitoires. Les moyennes sont donc également perturbées par ces variations. Une façon de corriger le problème serait d’augmenter le seuil de détection. On discerne cependant une tendance, comme dans le cas de la flûte à bec, à enrichir le son pour les notes graves.

Il est important de noter que le facteur joue un rôle beaucoup moins important dans

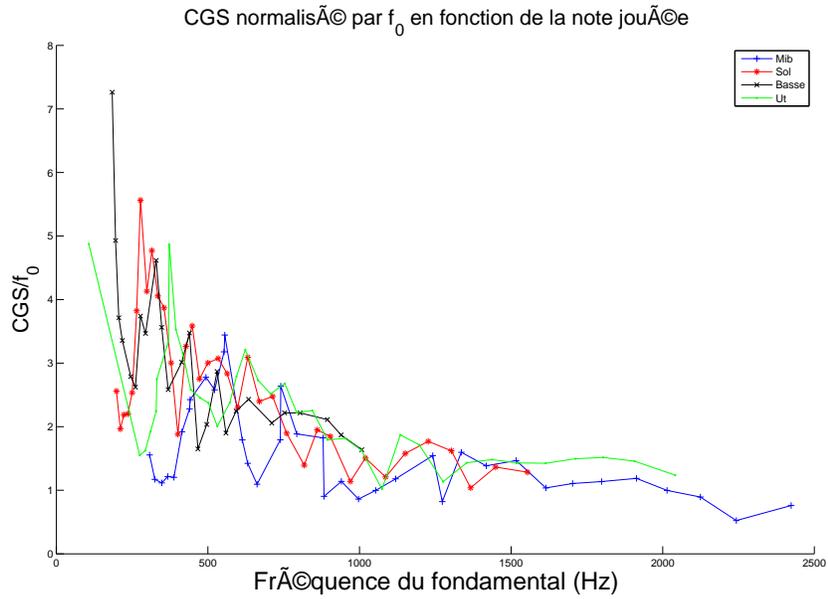


FIG. 4.7 – Centres de gravité spectraux calculés pour chaque note d’une gamme chromatique, sur les flûtes basse, en Sol et en Mib. Les CGS ont été moyennés sur chaque note

le son des flûtes traversières, par rapport au flûtiste, que dans le cas des flûtes à bec. Il pourrait donc être intéressant de comparer les timbrages des différentes flûtes, avec plusieurs flûtistes.

Chapitre 5

Conclusion

Ce stage portait sur l'étude des paramètres de facture et de contrôle dans les familles de flûtes. Pour cela, nous avons considéré deux familles. L'une étant représentative de l'influence de la facture dans le son résultant (les flûtes à bec), l'autre de l'influence du flûtiste dans le son résultant (les flûtes traversières).

5.1 Flûtes à bec

Flûtes seules Des mesures sur les flûtes seules ont d'abord été effectuées. Il ressort que les flûtes sont dimensionnées de telle sorte que pour un même doigté, il faut fournir une pression identique pour faire chanter la flûte, quelle que soit la flûte. Nous avons également soulevé le fait que les grandeurs caractéristiques de la pièce d'embouchure varient peu par rapport aux différences de tessitures de la famille, en particulier pour la distance entre la lumière et le biseau W .

Flûtes avec flûtiste Un flûtiste est ensuite venu jouer sur les flûtes selon un protocole établi. Nous avons pu observer la façon d'appréhender les différentes flûtes. Les mesures ont montré qu'en situation de jeu, la pression d'alimentation varie peu d'une flûte à l'autre, sur un doigté donné.

Ceci nous a amené vers des considérations sur le timbre, et son lien avec la période adimensionnée, θ .

Cette étude sur les flûtes à bec a conduit à la mise en lumière de deux paramètres importants du point de vue de la facture instrumentale. D'une part, les instruments doivent être jouables dans la même gamme de pression de contrôle, pour pouvoir changer d'instrument sans avoir de phase d'adaptation. D'autre part, le timbre doit être homogène sur toute la tessiture, et sur toutes les flûtes.

Pour satisfaire ce dernier point, il ressort que W joue un rôle clé, puisqu'elle détermine au final la richesse en hautes fréquences du son émit par l'instrument.

5.2 Flûtes traversières

Flûtes seules De même qu’avec les flûtes à bec, nous avons d’abord mesuré les grandeurs caractéristiques des pièces d’embouchures. Il est alors apparu que la flûte en ut, la flûte la plus jouée des flûtes traversières, et sur laquelle se fait l’apprentissage, ne suit pas les mêmes dimensionnements que les autres flûtes traversières.

Il y a deux hypothèses pour expliquer cette différence. La première est que la flûte en ut est dimensionnée pour faciliter l’apprentissage. La deuxième est qu’elle est dimensionnée pour offrir plus de liberté de jeu au flûtiste.

Flûtes avec flûtiste L’étude a également été prolongée par des mesures en situation de jeu. Il sort des mesures de pression que le flûtiste utilise son savoir faire sur la flûte en ut pour jouer. Contrairement aux flûtes à bec, la pression d’alimentation n’est pas déterminée par le doigté, mais par la hauteur de la note jouée.

En contrepartie, la géométrie du système excitateur, en particulier W n’est pas fixée. Des mesures montrent que cette distance diminue lorsque la fréquence de jeu augmente.

Il en sort que, comme avec la flûte à bec, le timbre est homogène sur toute la tessiture, et sur toutes les flûtes. Mais ici, la période adimensionnée θ est entièrement déterminée par le flûtiste.

5.3 Perspectives

Il ressort donc de cette étude que les flûtes à bec et traversières présentent des stratégies complètement différentes pour la pression de jeu. Les flûtes traversières sont dimensionnées de telle sorte que changer de flûte ne requiert pas d’adaptation de la part du flûtiste quant à la pression de jeu pour un doigté donné. En revanche, dans les flûtes traversières, la pression est constante pour une note donnée, quelque soit la flûte considérée.

D’autre part, la période adimensionnée θ semble jouer un rôle important dans la qualité sonore. D’après les mesures, θ augmente pour les notes basses, pour les flûtes traversières comme pour les flûtes à bec. Cependant, les moyens pour faire varier la période adimensionnée ne sont pas les mêmes dans les deux familles.

En effet, dans les flûtes à bec, la longueur de parcours du jet W est fixée par la facture. C’est donc la pression de jeu seule, pour une note donnée, qui permet de moduler θ .

Dans les flûtes traversières, la longueur de parcours du jet n’est pas fixée. Il semblerait donc que θ soit contrôlé par le flûtiste par le biais de cette distance.

Nous avons également essayé de relier la pression de jeu au débit dans les flûtes à bec. En effet, plus la tessiture d’une flûte est grave, plus le débit requis pour jouer est grand. Ceci peut se mesurer avec les surfaces des canaux des flûtes à bec, mais est difficile à quantifier avec les flûtes traversières.

Par ailleurs nous avons remarqué que la flûte en ut se démarque des autres flûtes par ses paramètres de facture. Un moyen pour comprendre les raisons de ces différences de

dimensions serait de mesurer des flûtistes en situation de jeu sur une flûte en ut dont les dimensions de l'embouchure seraient dans le prolongement des dimensionnements des autres flûtes de la famille.

Cette problématique de famille peut également être extrapolée à d'autres instruments. Retrouve-t-on ce souci d'homogénéité du timbre dans les autres familles d'instruments, et y a-t-il, dans les familles de clarinettes ou de saxophones par exemple, un instrument qui se démarque des autres par ses dimensions ?

Table des figures

1.1	Fenêtre des cinq membres d'une famille de flûte à bec, de la basse à la soprano. Malgré les grandes différences de tessitures, les distances de la lumière au biseau ne changent pas beaucoup	5
2.1	Système bouclé représentant le fonctionnement d'une flute.	8
2.2	Le coeur de l'instrument. Un jet est issu du canal et perturbé par le champ acoustique présent dans le tuyau. La perturbation est amplifiée et convectée jusqu'au biseau	9
2.3	Interface infinie considérée par Rayleigh entre deux fluides se déplaçant à des vitesses différentes V_0 et V_1 , définition des axes	9
2.4	Modes sinueux (a) et varicose (b) du jet par rapport à l'axe $y=0$	10
2.5	Convection des perturbations le long du jet. Une surpression perturbe le jet à la lumière. au biseau, cette perturbation crée une dépression	10
2.6	La viscosité de l'air impose un amortissement et un déphasage de la vitesse près des parois	12
2.7	Modèle à une dimension d'une flûte à bec	13
2.8	Principales grandeurs caractéristiques de l'excitateur d'un instrument à embouchure de flûte. W est la distance entre le canal et l'embouchure, et h la hauteur du canal	14
2.9	Représentation schématique de l'embouchure d'une flûte traversière. W est la distance entre le biseau et les lèvres du flûtiste	14
2.10	Représentation schématique d'une flûte à bec	15
2.11	Représentation schématique du résonateur d'une flûte traversière. L'embouchure est modélisée par un cylindre de longueur L_{emb} et de section S_{emb} . L'embouchure débouche sur le résonateur (à droite), et le bouchon (à gauche)	15
2.12	Différentes géométries d'instruments à embouchure de flûte	16
2.13	Classification des flûtes selon le degré de contrôle du son laissé au facteur (vers la gauche) ou au musicien (vers la droite). On trouve de gauche à droite : Un orgue, une flûte à bec, une flûte raversière, et un shakuachi japonais	17
3.1	Tessitures des cinq flûtes à bec étudiées	19
3.2	Famille de flûtes réalisée à Jean-Luc Boudreau	19

3.3	Schéma du dispositif expérimental permettant de mesurer la caractéristique Pression-Débit d'un bec de flûte	21
3.4	Passage d'un profil de vitesse en trapèze à un profil de vitesse de Poiseuille. Lorsque la vitesse centrale du trapèze est égale à la vitesse centrale du Poiseuille de même débit, on change de description	21
3.5	Graphe représentant Δ en fonction de l'épaisseur de couche limite. On voit que $\Delta = 0$ pour $\delta \approx 0.5$	22
3.6	Caractéristiques pression-débit mesurées, pour les cinq flûtes	25
3.7	Caractéristiques pression-débit mesurées, pour deux flûtes à bec, dont le bec de l'une d'elle a été coupé. Les deux mesures sont très proches, ce qui met en cause la validité du protocole	26
3.8	Mesure temporelle de la pression dans la flûte en fonction de la pression d'alimentation, pour mesurer la déviation en fréquence	27
3.9	Fréquence d'oscillation en fonction de la pression, pour quatre flûtes. Malgré le fait que les seuils d'oscillation soient identiques, les pressions de bifurcation ne sont pas les mêmes selon la flûte considérée	28
3.10	Il y a un phénomène d'hystérésis autour de la pression de changement de régime	29
3.11	Comparaison des seuils d'oscillation et de changement de régime de deux flûtes, l'une de facteur, l'autre d'usine	30
3.12	Comparaison des premiers régimes des flûtes altos de facture et d'usine	31
3.13	Dispositif expérimental permettant de mesurer la pression dans la bouche du musicien et dans la flûte	32
3.14	Résultat de l'acquisition temporelle, sur une série d'octaves ascendantes avec la flûte alto d'usine. Les calculs des fréquences de jeu et de l'inverse du nombre de Strouhal sont également représentés	33
3.15	Période adimensionnée θ en fonction de la note jouée, pour toutes les flûtes de facteur	34
3.16	Évolution des amplitudes des trois premiers harmoniques en fonction de la pression de jeu sur un do joué à la flûte ténor. Quand le flûtiste augmente la pression dans sa bouche, le poids relatif du deuxième harmonique augmente	35
3.17	Amplitudes relatives des trois premiers harmoniques de la pression interne d'une flûte, en fonction de la période adimensionnée θ . Pour des valeurs de θ supérieures à 13, le spectre s'enrichit très rapidement en harmonique 2	36
3.18	Pressions d'alimentation mesurées pour une gamme sur les cinq flûtes. La flûte basse mise à part, Les pressions d'alimentation sont à peu près équivalentes pour un doigté donné	37
3.19	Centre de gravité spectral calculé sur les cinq flûtes, en fonction de la note jouée.	38
3.20	CGS calculés pour chaque flûte, divisés par le fondamental détecté	39
3.21	CGS en fonction de la période adimensionnée θ	39
3.22	CGS normalisé par la fréquence de jeu, en fonction de la période adimensionnée	40

3.23	Pression dans la bouche du flûtiste lors d'une gamme descendante détachée sur la flûte alto : sur le deuxième régime, on observe l'apparition d'un pic de pression très bref	41
3.24	Spectrogramme de la pression dans la bouche du flûtiste, lorsqu'il change l'orientation du voile de son palais, et mesure de pression associée	42
3.25	Spectrogramme de la pression rayonnée lors du changement d'orientation du voile du palais du flûtiste, et mesure de pression associée	43
3.26	Spectrogramme de la pression interne de la flûte, lors du changement d'orientation du voile du palais du flûtiste, et mesure de pression associée	43
4.1	Dimensions des paramètres des embouchures pour les différentes flûtes, normalisées par rapport aux dimensions de la flûte en ut. On remarque que la flûte en ut ne suit pas les mêmes règles de dimensionnement	46
4.2	Dispositif expérimental utilisé lors des mesures avec un flûtiste	46
4.3	Exemple d'image prise par la caméra. Les résultats des algorithmes de calcul de distance et d'ouverture sont représentés	47
4.4	Pression de jeu en fonction de la note jouée pour quatre flûtes traversières. Il existe une corrélation forte entre la note jouée et la fréquence de jeu, indépendamment de la flûte considérée	47
4.5	Distance W entre les lèvres et le biseau. Cette distance diminue avec la note jouée	48
4.6	θ en fonction de la note jouée, pour toutes les flûtes. Les points se superposent à doigté constant, sauf pour la flûte en ut	49
4.7	Centres de gravité spectraux calculés pour chaque note d'une gamme chromatique, sur les flûtes basse, en Sol et en Mib. Les CGS ont été moyennés sur chaque note	50

Bibliographie

- [1] FABRE (B.), « Les bois », dans *JPPIM*, 2000.
- [2] GÄBRIELS (J.), « Acoustical analysis of recorder playing and making ». Rapport de DÉA, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
- [3] SÉGOUFIN (C.), *Production du son par interaction écoulement/résonateur*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [4] DE LA CUADRA (P.), *The sound of air jets : Physics, modeling and simulation in flute-like instruments*. Thèse de doctorat, University of Stanford, 2005.
- [5] VERGE (M.-P.), *Aeroacoustics of confined jets with applications to the physical modeling of recorder-like instruments*. Thèse de doctorat, Technische Universiteit Eindhoven, 1995.
- [6] MONTGERMONT (N.), FABRE (B.) et DE LA CUADRA (P.), « étude des paramètres de jeu dans la flûte traversière », dans *CFA*, 2006.
- [7] COLTMAN (J. W.), « Sounding mechanism of the flute and organ pipe », *Journal of Acoustical Society of America*, n° 44, 1968, p. 983–992.
- [8] MONTGERMONT (N.), « Synthèse sonore de flûte traversière par modèles physiques ». Rapport de DÉA, ESEO, 2004.
- [9] VALETTE (C.). « Oscillateurs mécaniques simples, ondes et vibrations, mécanique des vibrations », 2000. Notes de cours du DEA atiam.
- [10] MEYLAN (R.), *La flûte*. Payot Lausanne, 1974.
- [11] LEIPP (E.), *Acoustique et musique*. Masson, Paris, 1980.
- [12] LORD RAYLEIGH, *The theory of sound*. Dover, reprint (1945), 1894.
- [13] TRITTON (D. J.), *Physical Fluid Dynamics*. Oxford university press, oxford, 1988.
- [14] KUETHE (A. M.) et CHOW (C.-Y.), *Basas of Aerodynamic Design*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1998.
- [15] GOLDSTEIN (S.), *Modern Developments in Fluid Dynamics*. Clarendon Press, Oxford, 1938.
- [16] http://www.lam.jussieu.fr/Membres/Montgermont/Protocole_traversiere.pdf.
- [17] FLETCHER (N. H.) et ROSSING (T. D.), *The physics of musical instruments*. Springer-Verlag, New York, 1998.

- [18] KINSLER (L. E.), FREY (A. R.), COPPENS (A. B.) et SANDERS (J. V.), *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [19] SCHLICHTING (H.) et GERSTEN (K.), *Boundary layer theory*. Springer, New York, 1999.
- [20] BRUNEAU (M.), *Introduction aux théories de l'acoustique*. Université du Maine, Le Mans, 1983.
- [21] WOLFE (J.), SMITH (J.), TANN (J.) et FLETCHER (N. H.), « Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes », *Journal of sound and vibration*, n° 243, 2001, p. 124–144.
- [22] VERGE (M. P.), FABRE (B.), MAHU (W. E. A.) *et al.*, « Jet formation and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe », *Journal of Acoustical Society of America*, n° 95, 1994, p. 1119–1132.
- [23] VERGE (M. P.), FABRE (B.), HIRSCHBERG (A.) et WIJNANDS (A. P. J.), « Sound production in recorderlike instruments. i. dimensionless amplitude of the internal acoustic field », *Journal of Acoustical Society of America*, n° 101, 1997, p. 2914–2924.
- [24] VAN ZON (J.), HIRSCHBERG (A.), GILBERT (J.) et WIJNANDS (A. P. J.), « Flow through the reed channel of a single reed music instrument », dans *Premier congrès français d'acoustique*, p. 821–824, 1990.
- [25] DE LA CUADRA (P.), FABRE (B.), MONTGERMONT (N.) et DE RYCK (L.), « Analysis of flute control parameters : a comparison between a novice and an experienced flautist », dans *Forum Acusticum*, 2005.