



# Organettissimo

*Klara Demarle  
Nathan Semenoff  
El-Hamid Ghout  
Nicolas Berlemont*

*Elèves de première générale du lycée Van der Meersch, Roubaix*

*Encadrés par  
Sophie Gronlier, enseignante de physique-chimie*

*Suivis par  
Pierre Chainais, enseignant-chercheur à l'école Centrale de Lille*



## I. Résumé

Nous avons abordé la musique par les sciences, mais aussi l'inverse : étudier les sciences par la musique dans une démarche de projet. Nous qui ne jouons d'aucun instrument, nous voulions être en mesure de jouer une mélodie, en particulier le thème d'Harry Potter.



Figure 1: partition de "Hedwige theme" de Harry Potter

Il nous a semblé qu'un piano était plus facile à aborder car nous pouvons voir où nous posons nos doigts, même ajouter des autocollants sur les touches indiquant la note jouée. Nous voyons nos mains se déplacer des notes aiguës aux graves. Le piano peut donc s'apprendre en autonomie. Mais un piano est coûteux et difficilement transportable. De plus sa conception est complexe.

La flûte à bec est plus simple et est moins coûteuse, mais son doigté nécessite un apprentissage par un professionnel.

L'instrument qui allie la physique de la flûte et l'approche du jeu du piano est l'orgue.

Le projet que nous présentons est l'étude et la création d'un mini-orgue dont nous proposons de créer un prototype par impression 3D.

## II. Introduction

Notre projet concerne l'élaboration d'un instrument de musique. Pour des raisons de facilité de transport, de coût et de facilité d'apprentissage, notre choix s'est porté sur un orgue mobile créé à partir d'une imprimante 3D, dans le but d'interpréter une mélodie choisie, à savoir le thème d'Harry Potter.

Au moyen âge il existait déjà un instrument, cousin d'un orgue miniaturisé, appelé Organetto.

Le projet que nous présentons est l'étude et la création d'un mini-orgue dont nous proposons de créer un prototype par impression 3D. Etant plus petit encore, nous l'appellerons Organettissimo.



Figure 2 : Exemple d'un organetto

### III. Conception d'un tuyau d'orgue

#### A. Une première piste

Nous avons trouvé une idée d'élaboration de l'orgue sur internet sur le site instructable, dont voici le modèle.



Figure 3 : <https://www.instructables.com/id/Four-Whistles-Version-2/>

Nous avons imprimé une partie de ce modèle :



Figure 4 : Impression d'éléments du modèle choisi

Le problème est que le modèle trouvé n'est pas modifiable (format .stl), ne permettant pas de l'adapter à nos besoins. Nous avons donc dû refaire les modèles 3D des tuyaux d'organettissimo pour pouvoir avoir les notes dont nous avons besoin pour jouer la mélodie du film Harry Potter.

#### B. Modélisation 3D

Il nous a fallu établir des schémas industriels à partir des modèles imprimés. A l'aide d'un pied à coulisse et d'un tuyau d'organettissimo imprimé, nous avons mesuré l'épaisseur des parois du tuyau, les dimensions l'embouchure, de la bouche et de la lumière.

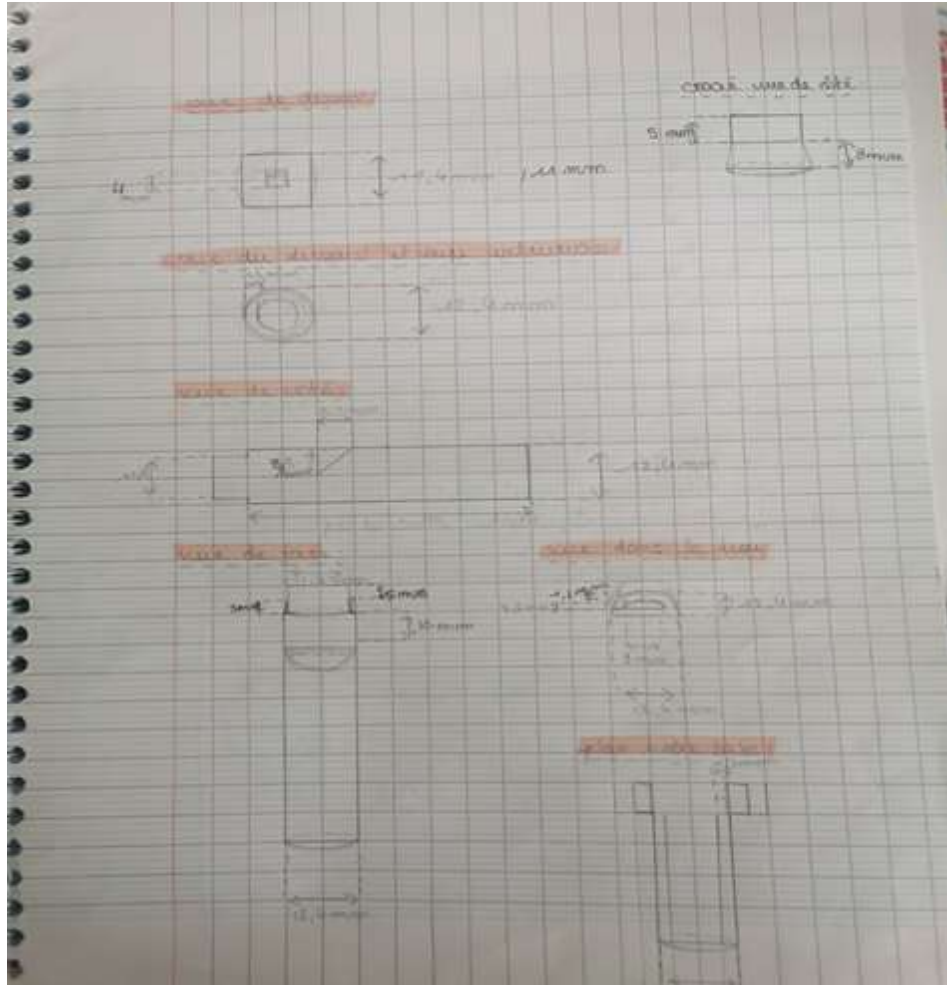


Figure 5 : schémas du modèle de tuyau d'organettissimo avec les mesures prises sur le modèle internet

Nous sommes passés à l'étape suivante en modélisant les tuyaux d'organettissimo. Pour ce faire nous avons utilisé l'application freecad\*. Le design commence par la base de la flûte et étape par étape, nous modélisons les différentes parties jusqu'à la fermeture.

\* <https://www.freecadweb.org/?lang=fr>

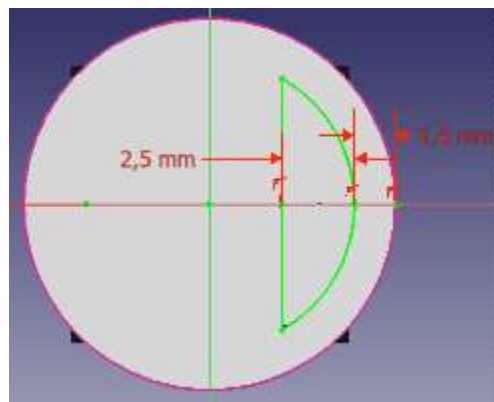


Figure 6 : exemple du design sur mesure de l'embouchure

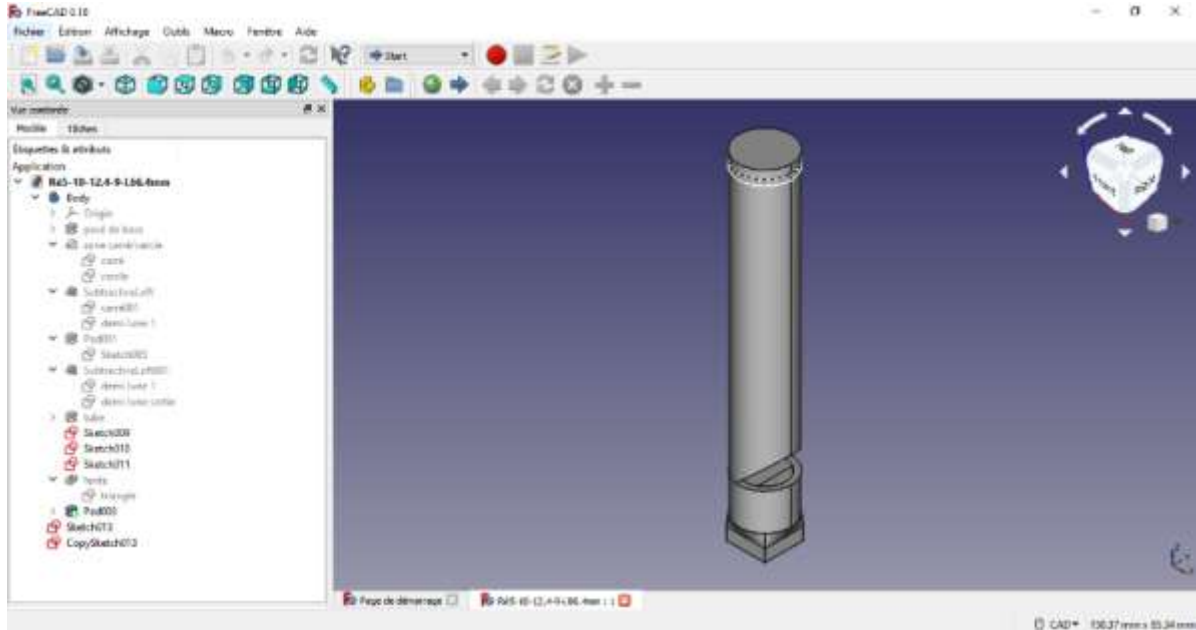


Figure 7 : Modèle 3D final du tuyau reproduit d'après le modèle

## IV. Considérations théoriques

### A. Résonance dans un tuyau d'orgue

Le son est produit par le jet d'air expulsé par la lumière qui oscille alternativement au-dessus et au-dessous de la lèvres supérieure. Le système résonateur est la colonne d'air délimitée par le tube de l'instrument.

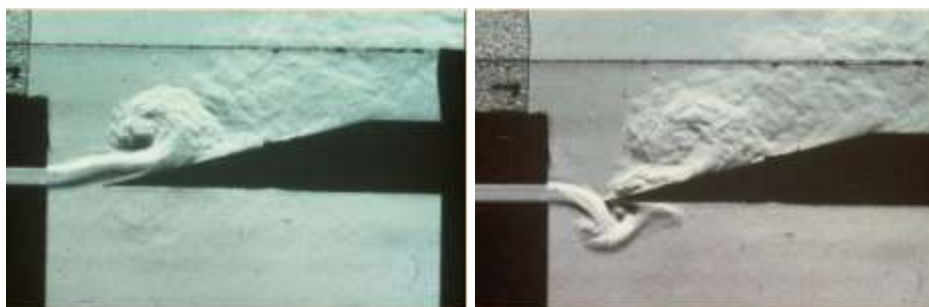


Figure 8 : écoulement de jet d'air à l'embouchure en régime permanent

Photos : Université d'Eindhoven, Pays Bas

Un bon instrument doit permettre de réaliser vite, fort et bien des sons musicaux différents et que ces derniers soient entendus.

Dans le cas d'un tuyau sonore, l'obtention de la résonance d'une note dépend de :

- la position de la lumière par rapport à la lèvres supérieure
- la hauteur de bouche ou longueur de fenêtre
- la forme de la lumière
- la vitesse du jet d'air en sortie de lumière
- la longueur du tuyau

## B. Analyse spectrale d'un son musical

Les trois grandeurs caractéristiques d'un son musical sont : son intensité, sa hauteur et son timbre.

Le son d'un instrument de musique est caractérisé par son timbre (forme de l'onde) et sa hauteur (fréquence de la note).

En réalité, Les sons musicaux sont des sons complexes, ils sont composés de plusieurs sons purs de fréquences et d'amplitudes différentes.

Tout signal périodique peut se décomposer en une somme de sinusoïdes, d'après le théorème de Fourier.

Ainsi, un son musical est la résultante de la superposition de plusieurs vibrations : la vibration fondamentale de fréquence  $f_1$ , sur laquelle s'ajoutent des vibrations harmoniques dont les fréquences sont des multiples de la première. La fréquence fondamentale est celle qui définit la note de musique.

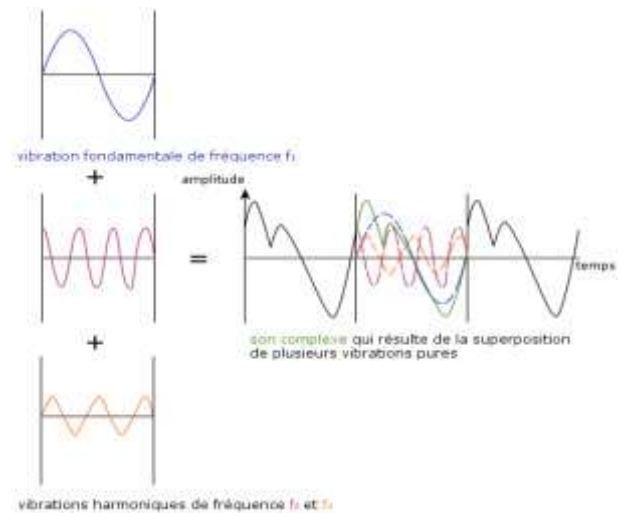


Figure 9 : Un son complexe contient plusieurs sons purs

## C. Influence de la longueur du système résonateur

L'air contenu dans une colonne d'air et qui a subi une excitation peut être assimilé à un mouvement de particules de part et d'autre d'une position d'équilibre. Les particules vont osciller autour de leur position de repos et générer une onde acoustique.

Lorsqu'une colonne d'air d'un tuyau sonore entre en vibration, elle est le siège d'un phénomène d'ondes stationnaires. Pour interpréter le phénomène, il faut appliquer le principe de superposition d'ondes incidentes et réfléchies dans un milieu à une dimension et il faut tenir compte de conditions aux limites : seules certaines vibrations forcées sont alors amplifiées par un phénomène de résonance.

Par convention un tuyau rigide qui est ouvert aux deux extrémités est appelé tuyau «ouvert» ; tandis qu'un tuyau rigide qui est ouvert à une seule extrémité et qui a une surface rigide à l'autre extrémité est désigné sous le nom de tuyau «fermé».

L'onde se propageant voit subitement, en fin de tuyau, son univers changer. Dans tous les cas une onde va se réfléchir.

**Si le tuyau est ouvert**, le monde extérieur impose une surpression nulle et l'onde de compression (+) aller se réfléchit en créant une onde de dépression (-) retour avec changement de signe pour revenir à l'ouverture initiale.

Arrivée à l'ouverture initiale, elle va donc encore se réfléchir avec changement de signe et redeviendra onde +. Après seulement deux trajets, le cycle est donc complet

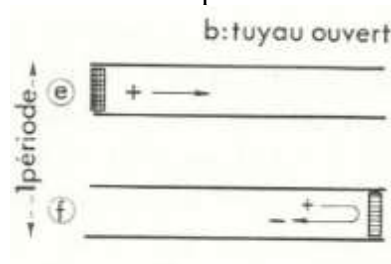


Figure 10 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau ouvert



Entre (e) et (f), l'onde a donc accompli une période  $T$ , valant la distance parcourue (deux fois la longueur  $L$  du tuyau) divisée par la célérité de l'onde ( $c$ , la vitesse du son), donc :

$$T = \frac{2L}{c}$$

La fréquence fondamentale caractéristique du tuyau ouvert vaut donc :

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

Il s'agit là de la fréquence fondamentale, pour tenir compte des harmoniques, on remplace la relation par :

$$f_n = n \times \frac{c}{2L}$$

Pour  $n = 1$  on retrouve le résultat précédent. En revanche cette équation révèle l'existence d'harmoniques qui vont participer au timbre de l'instrument. Le calcul détaillé est en annexe 1.

**Si le tuyau est fermé** (cas du bourdon de l'orgue), l'onde de compression (notée +), engendrée, se propage vers le fond où elle se réfléchit sans changement de signe (signe +) pour retourner vers l'ouverture ; là elle rencontre une ouverture et est donc réfléchiée avec changement de signe (dépression, signe -) et retourne à nouveau vers le fond. Là, elle est réfléchiée une fois de plus sans changement de signe (elle reste -) et revient vers l'ouverture où elle va changer de signe à nouveau et redevenir +. Après avoir parcouru quatre fois la longueur du tube, elle recommencera donc le même cycle, qui se répèterait indéfiniment si les frottements n'amortissaient pas graduellement l'onde.

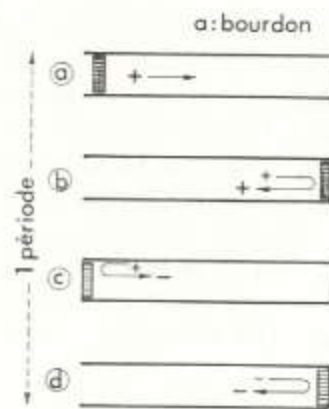


Figure 11 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau fermé

Entre (a) et (d), l'onde a donc accompli une période  $T$ , valant la distance parcourue (quatre fois la longueur  $L$  du tuyau) divisée par la célérité de l'onde ( $c$ , la vitesse du son), donc :

$$T = \frac{4 \times L}{c}$$

La fréquence  $f$  caractéristique du tuyau fermé vaut donc

$$f_1 = \frac{c}{4 \times L}$$

Par analogie à l'étude précédente, les harmoniques vérifient :

$$f_{n'} = n' \times \frac{c}{4 \times L}$$

Soit  $\lambda = \frac{4 \times L}{n'}$  avec  $n'$  qui est un entier impair, afin de satisfaire aux conditions aux limites comme sur les représentations suivantes :

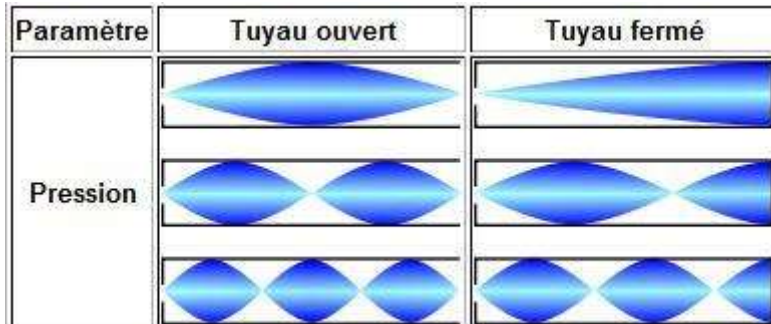


Figure 12 : ondes stationnaires dans un tuyau ouvert ou fermé. La première onde est la fondamentale, les suivantes sont les harmoniques (wikipédia)

Dans tous les cas, La fréquence du mode fondamental  $f_1$  (pour  $n = 1$  ou  $n' = 1$ ) dépend de la longueur  $L$  du tube et de la vitesse de propagation  $c$  du son. Plus le tube est court, plus la fréquence est élevée.

Les harmoniques en musique sont aux octaves supérieure, l'harmonique théorique la plus basse correspond à la même note. Si par exemple on joue un  $la_3$ , la première harmonique sera le  $la_4$  (fréquence double) dans le cas du tuyau ouvert et  $mi_5$  (fréquence triple) dans le cas du tuyau fermé.

Fréquences des notes (en hertz) dans la gamme tempérée

Note/octave	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
do ou si $\sharp$	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01	8 372,02	16 744,04
do $\sharp$ ou réb	17,33	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92	8 869,84	17 739,68
ré	18,36	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64	9 397,28	18 794,56
ré $\sharp$ ou mi $\flat$	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03	9 956,06	19 912,12
mi ou fa $\flat$	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04	10 548,08	21 096,16
fa ou mi $\sharp$	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65	11 175,30	22 350,60
fa $\sharp$ ou sol $\flat$	23,13	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91	11 839,82	23 679,64
sol	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93	12 543,86	25 087,72
sol $\sharp$ ou la $\flat$	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88	13 289,76	26 579,52
la	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00	14 080,00	28 160,00
la $\sharp$ ou si $\flat$	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62	14 917,24	29 834,48
si ou do $\flat$	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13	15 804,26	31 608,52

Figure 13 : fréquences des notes de musique de la gamme tempérée

D'après les relations précédentes, pour obtenir un  $la$  à l'octave 5 de fréquence  $f_l = 1760$  Hz il faudrait une longueur de tube de  $L = \frac{c}{2 \times f_1} = 9,7$  cm si le tuyau est ouvert, sinon  $L = \frac{c}{4 \times f_1} = 4,8$  cm si le tuyau est fermé.

Expérimentalement, nous n'entendons pas de son produit avec nos premières impressions de tuyaux ouverts mais nous entendons un son lorsqu'ils sont fermés avec un bouchon. Nous allons donc n'étudier que le cas d'un tuyau est fermé.

En pratique, dès que l'on excite un tuyau en soufflant à l'une de ses extrémités par un procédé quelconque, il se produit des phénomènes très compliqués et l'expérience montre que les mesures et les calculs ne concordent pas tout à fait. D'autre part, le diamètre du tuyau intervient et ceci a conduit certains physiciens et facteurs d'instruments à chercher des formules de correction qui font intervenir cette variable.



Par exemple, la règle empirique donnée par Cavallé-Coll pour les dimensions des tuyaux d'orgue où la bouche est formée par un aplatissement prenant le quart environ de la circonférence :

$$L' = L - \frac{5}{3}D = \frac{c}{2 \times f_1} - \frac{5}{3}D$$

$L$  est la longueur théorique du tuyau et  $L'$  est la longueur effective, appelée également longueur acoustique et  $D$  est le diamètre du tuyau.

En fait, toutes les formules proposées sont très empiriques et ne sont valables que pour les cas particuliers. Ce qu'il faut retenir est que la longueur à choisir pour obtenir une note risque d'être inférieure à sa prévision théorique. Ainsi il est préférable de déterminer les longueurs de tuyaux d'organettissimo à choisir en passant par une courbe d'étalonnage.

### C. Influence du système excitateur

La majorité des mécanismes régissant le fonctionnement de l'instrument se passe dans la lumière de l'instrument. Dans le cas d'une géométrie rectangulaire de largeur  $H$  et d'épaisseur  $h$ , On peut se limiter à une représentation à deux dimensions ci-dessous :

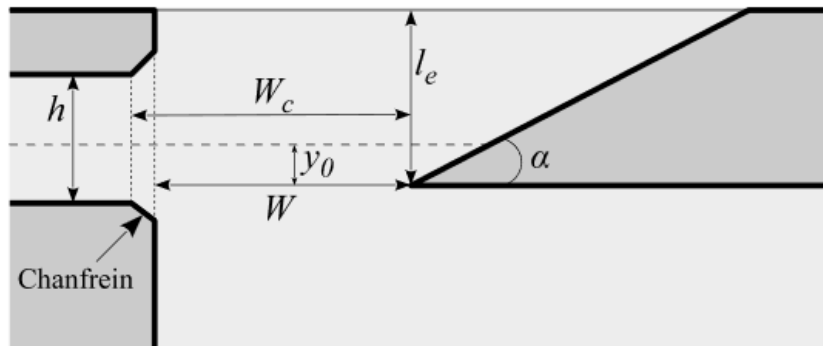


Figure 14 : Schéma de la fenêtre d'une flûte  
Schéma issu de la thèse de Augustin Ernoult

A la sortie de la lumière, il y a parfois des chanfreins sur les tuyaux d'orgue ou les flûtes, généralement à 45 degrés environ.

La hauteur de bouche ou longueur de la fenêtre, c'est à dire la distance entre la sortie de la lumière et la pointe du biseau est noté  $W$ . Lorsque les chanfreins sont pris en compte, il faut considérer une longueur supérieure notée  $W_c$ .

Le biseau est caractérisé par son angle  $\alpha$  et son décalage  $y_0$  par rapport à l'axe du canal.

Enfin la hauteur des parois de part et d'autre de la fenêtre est notée  $l_e$  à partir de la pointe du biseau. Ces parois seront appelées les « oreilles » qui est l'appellation utilisée par les facteurs d'orgues lorsqu'elles sont ajoutées sur les tuyaux d'orgues métalliques.

Le jet issu de la lumière est perturbé par l'onde acoustique de fréquence  $f$  issue du résonateur et suppose cette perturbation localisée au point de formation du jet : elle se développe alors le long du jet avant d'atteindre le biseau à une vitesse  $U_c$ .

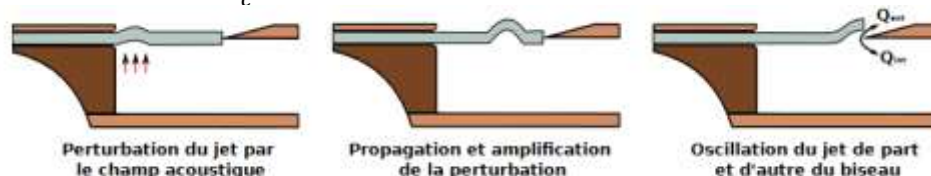


Figure 15 : Perturbation du jet d'air issu de la lumière par la surpression de l'onde acoustique  
Schéma issu de la thèse de Rémi Blandin

Le nombre de Strouhal  $St$  est un nombre adimensionnel permettant de quantifier le temps de parcours du jet à la lèvresupérieure  $\tau = \frac{W}{U_j}$  par rapport à la période d'oscillation dans l'instrument,  $T = \frac{1}{f}$  :

$$St = \frac{\tau}{T} = \frac{fW}{U_j}$$

C. Ségoufin a introduit  $\theta = \frac{1}{St} = \frac{U_j}{fW}$  comme indicateur du fonctionnement des flûtes. Un optimum pour  $\theta$  est situé dans l'encadrement :

$$7 \leq \theta \leq 14$$

Pour des valeurs supérieures à 14, traduisant pour des flûtes -entre autres – un souffle plus important, le système passe à un régime supérieur où l'on excite une harmonique, l'augmentation de la fréquence résultante rebascule le facteur  $\theta$  dans l'encadrement.

Ce qu'il faut retenir est que, pour un débit donné, il y a une longueur de fenêtre  $W$  optimum pour obtenir la note  $f$ .

## V. Dispositif expérimental

Imprimer un tuyau d'orgue est relativement long, de l'ordre de l'heure et plus selon la longueur. Aussi, nous préférons, pour gagner du temps, n'imprimer que les embouts de tuyau d'orgues que nous prolongerons de tubes en PVC. Nous avons trouvé à Leroy-Merlin des tuyaux en PVC de diamètre intérieur de 10 mm. Ce sont donc ces tuyaux que nous utiliserons.

Afin de pouvoir comparer le son produit par nos différents embouts, il faut maintenir un jet d'air constant entre les différentes expériences. Nous utiliserons pour cela un ventilateur pour imprimante 3D surmonté d'un embout, que nous avons imprimé, permettant l'insertion des différents tuyaux d'organettissimo. Ce ventilateur est alimenté à l'aide d'une alimentation électrique stabilisée réglable. Nous enregistrerons le son produit par les différents tuyaux en utilisant un micro branché à un ordinateur et en utilisant le logiciel audacity.



*Figure 16 : Dispositif expérimental*

Nous avons laissé la fréquence d'échantillonnage par défaut (44100 Hz) car celle-ci convenait à notre étude puisqu'elle respecte le critère de Shannon pour les fréquences sonores étudiées. Nous enregistrons le bruit du ventilateur seul afin de soustraire sa contribution aux enregistrements obtenus lorsque le tuyau d'organettissimo est installé.

Pour chaque signal, le spectre de fourier est analysé, avec une fenêtre de hamming car c'est la fenêtre qui donnerait la fréquence la plus juste, d'après ce que nous avons lu sur internet.

Un exemple de spectre obtenu est en annexe 2.

## VI. Etude du système exciteur

### A. Epaisseur de la lumière

Le design initial de la lumière était une demi-lune. Nous avons modifié ce design par un croissant de lune en affinant son épaisseur centrale, afin d'identifier quelle forme de lumière permet l'obtention d'un son suffisamment audible et stable. Changer l'épaisseur de la lumière influe sur les dimensions de la nappe du jet qui va pouvoir interagir avec le biseau mais également change sa vitesse.

Nous noterons donc  $v_s$  la vitesse moyenne du jet issu du souffleur et  $v_j$  la vitesse moyenne du jet en sortie de lumière. D'après la conservation du débit volumique :

$$v_s \times S_{carré} = v_j \times S_{lumière}$$

$$v_j = v_s \times \frac{S_{carré}}{S_{lumière}}$$

N'ayant pas d'anémomètre pour mesurer  $v_s$ , comparerons uniquement l'accroissement théorique de vitesse en sortie de lumière  $\frac{S_{carré}}{S_{lumière}}$  dont le calcul est en annexe 3.

CONDITIONS EXPERIMENTALES :

- longueur de tube: 11 cm
- longueur de fenêtre : W=6.5 mm
- décalage  $y_0 = +0,75$  mm
- tension du souffleur : 11,8 V

Modèle				
Epaisseur maximale de la lumière $h$ (mm)	2,5	2,0	1,5	1,0
Analyse spectrale	$f_1 = 724 \text{ Hz}$ (-32,9 dB) $f_3 = 2231 \text{ Hz}$ (-38,0 dB) $f_5 = 3733 \text{ Hz}$ (-67,4 dB) $f_7 = 5240 \text{ Hz}$ (-64,9 dB)	$f_1 = 729 \text{ Hz}$ (-29,2 dB) $f_3 = 2193 \text{ Hz}$ (-53,0 dB) $f_5 = 3736 \text{ Hz}$ (-66,3 dB) $f_7 = 4543 \text{ Hz}$ (-63,6 dB)	$f_1 = 735 \text{ Hz}$ (-28,2 dB) $f_3 = 2184 \text{ Hz}$ (-46,9 dB) $f_5 = 3679 \text{ Hz}$ (-67,7 dB) $f_7 = 5243 \text{ Hz}$ (-64,7 dB)	$f_1 = 732 \text{ Hz}$ (-31,6 dB) $f_3 = 2222 \text{ Hz}$ (-59,2 dB) $f_5 = 3727 \text{ Hz}$ (-65,8 dB) $f_7 = 5244 \text{ Hz}$ (-65,4 dB)
$\frac{S_{carré}}{S_{lumière}}$	1,62816458	2,0065317	2,62806239	3,85278588

Dans le timbre des tuyaux d'organettissimo, on constate la présence de la 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique, conformément à la loi  $f' = n' \times f$  avec  $n'$  impair et  $f$  la fréquence fondamentale.

On remarque qu'au début la fréquence de la fondamentale augmente légèrement, jusqu'à 10 Hz, et de façon linéaire avec la vitesse du jet. Ceci ne change pas réellement la note jouée à cette hauteur. Il y a un décrochage ensuite, lorsque l'épaisseur de la lumière de sortie n'est plus que de 1 mm.

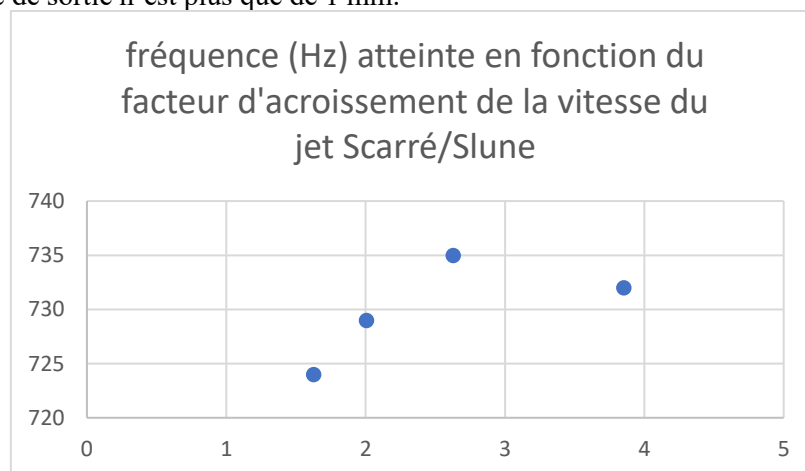


Figure 17 : Evolution de la fréquence en fonction du facteur d'accroissement de la vitesse du jet  $\frac{S_{carré}}{S_{lumière}}$ .

Si on regarde le niveau sonore atteint en fonction de l'épaisseur de la lumière  $h$  choisie pour le modèle, il y a un maximum est atteint pour  $h=1,5$  mm. Nous choisirons donc cette épaisseur pour la poursuite de notre étude.

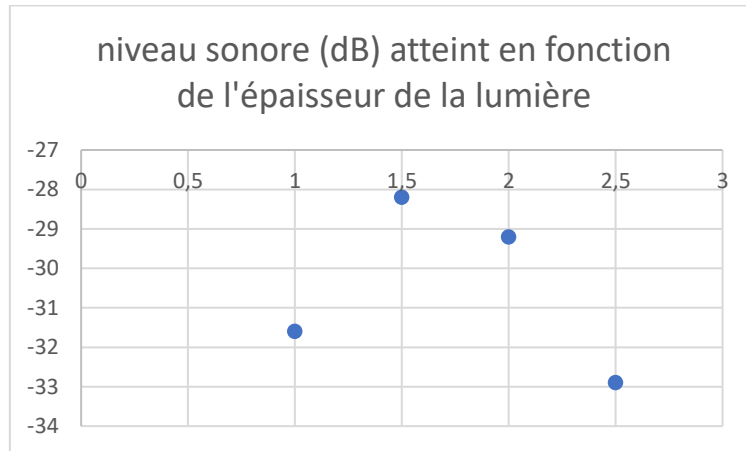


Figure 18 : niveau sonore en fonction de l'épaisseur de la lumière

## B. Position de la lumière

CONDITIONS EXPERIMENTALES :

- longueur de tube: 10 cm
- longueur de fenêtre :  $W=6.5$  mm
- épaisseur max de la lumière : 1,5 mm
- tension du souffleur : 11,8V

Modèle				
Décalage par rapport à l'axe du canal $y_0$	+1,15 mm	+0,75 mm	+0,35 mm	0 mm
Analyse spectrale	$f_1 = 795 \text{ Hz} (-9,0 \text{ dB})$ $f_3 = 2382 \text{ Hz} (-27,1 \text{ dB})$ $f_5 = 4094 \text{ Hz} (-47,1 \text{ dB})$ $f_7 = 5760 \text{ Hz} (-47,7 \text{ dB})$	$f_1 = 796 \text{ Hz} (-5,2 \text{ dB})$ $f_3 = 2396 \text{ Hz} (-5,2 \text{ dB})$ $f_5 = 4106 \text{ Hz} (-45,0 \text{ dB})$ $f_7 = 5750 \text{ Hz} (-44,1 \text{ dB})$	$f_1 = 792 \text{ Hz} (-7,2 \text{ dB})$ $f_3 = 2382 \text{ Hz} (-33,2 \text{ dB})$ $f_5 = 4088 \text{ Hz} (-44,1 \text{ dB})$ $f_7 = 5722 \text{ Hz} (-45,3 \text{ dB})$	$f_1 = 789 \text{ Hz} (-11,1 \text{ dB})$ $f_3 = 2454 \text{ Hz} (-35,7 \text{ dB})$ $f_5 = 4118 \text{ Hz} (-46,6 \text{ dB})$ $f_7 = 5161 \text{ Hz} (-46,3 \text{ dB})$

Nous observons encore la présence de la 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique.

La note obtenue est sensiblement la même dans tous les cas, car il y a des incertitudes de mesures. Nous choisissons le modèle qui permet d'obtenir un niveau sonore le plus élevé avec le moins de souffle.

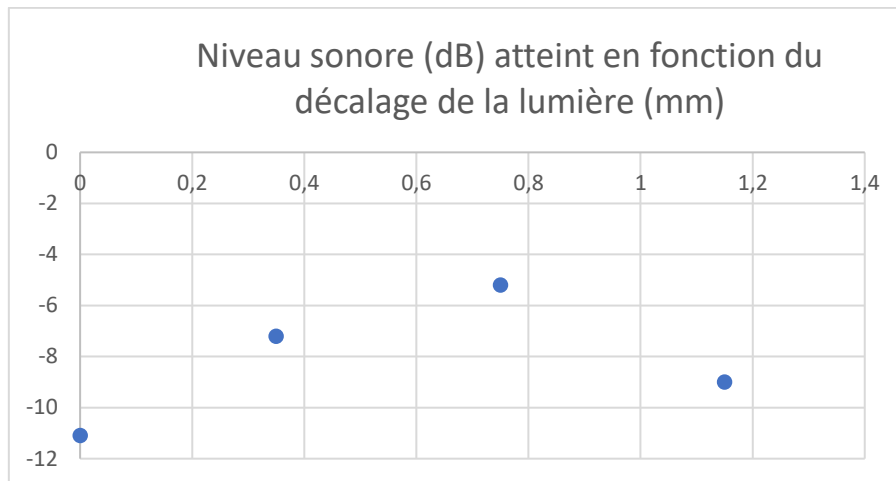


Figure 19 : évolution du niveau sonore du fondamental en fonction du décalage de la lumière par rapport à la lèvres supérieure

D'après nos mesures, il s'agit du modèle où le tranchant de la lèvre supérieure est à l'aplomb du bord extérieur de la lumière, c'est-à-dire le modèle avec le décalage  $y_0 = +0,75$  mm.

## VII. Etude du résonateur

### A. Evolution du couple longueur de fenêtre W – longueur du tuyau

Puisque la fréquence de la note jouée dépend

- de la longueur du tuyau (loi corrigé de Cavaillé-Col)
- de la hauteur de bouche (loi de Ségoufin) pour un même débit

On en déduit qu'il peut y avoir une influence mutuelle entre la longueur de fenêtre W et la longueur du tuyau L : que pour une longueur donnée une certaine longueur de bouche serait la plus adaptée pour obtenir un son le plus sonore possible. Nous avons donc enregistré le son produit par différentes longueurs de tuyaux pour une longueur de fenêtre donnée, puis nous avons réitéré l'expérience avec d'autres longueurs de fenêtre.

CONDITIONS EXPERIMENTALES :

- épaisseur max de la lumière : 1,5 mm
- tension du souffleur : 12,0 V

Nous avons coupé plusieurs sections de tuyau et avons mesuré leur longueur (L, cm) à l'aide d'une règle. Nous avons relevé la fréquence de la note correspondante jouée (f, Hz) en traçant le spectre de Fourier du son enregistré. Nous nous sommes focalisés sur la plage principale où nous entendions du son. Avec plus de temps, nous aurions pu faire toutes les mesures du tableau et continuer avec des longueurs de tuyau plus importantes.

On constate l'existence dans nos données d'une « diagonale du bruit » qui sépare l'excitation à l'octave supérieure (surlignée en bleu).

En effet, pour une hauteur de bouche W donnée, on remarque que la fréquence augmente lorsque le tuyau se raccourcit. Par conséquent  $\theta = \frac{U_j}{fW}$  augmente. Au bout d'un moment, pour rester dans l'encadrement  $7 < \theta < 14$ , la fréquence f va laisser place à l'octave supérieure  $f' = 2 \times f$ .

L(cm) W (mm)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0
2,5	Bruit	1844 Hz -84,7 dB	1649 Hz -19,9 dB	1535 Hz -25,5 dB	1390 Hz -39,2 dB	Bruit			
3,0	Bruit	1997 Hz -37,5 dB	1869 Hz -24,1 dB	1702 Hz -25,6 dB	1593 Hz -12,2 dB	1429 Hz -12,7 dB	1310 Hz -13,3 dB	1250 Hz -9,9 dB	1075 Hz -22,5 dB
3,5	Bruit	Bruit	Bruit	1701 Hz -17,5 dB	1579 Hz -18,5 dB	1427 Hz -10,6 dB	1314 Hz -8,9 dB	1258 Hz -9,1 dB	1084 Hz -3,8 dB
4	Bruit	Bruit	Bruit	1657 Hz -21,8 dB	1555 Hz -16,4 dB	1401 Hz -14,2 dB	1303 Hz -14,0 dB	1229 Hz -12,9 dB	1074 Hz -18,2 dB
4,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1527 Hz -26,0 dB	1420 Hz -14,6 dB	1319 Hz -12,1 dB	1262 Hz -8,7 dB	1091 Hz -1,5 dB
5,5	2777 Hz -18,1 dB	2504 Hz -16,3 dB	2263 Hz -18,6 dB	Bruit	Bruit	Bruit	1233 Hz -25,8 dB	1204 Hz -20,7 dB	1087 Hz -7,3 dB
6,5	Bruit	Bruit	2253 Hz -12,0 dB	2007 Hz -18,3 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1046 Hz -17,6 dB
7,5	Bruit	Bruit	Bruit	1974 Hz -17,7 dB	1833 Hz -21,7 dB	1640 Hz -16,6 dB	Bruit	Bruit	bruit
8,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1809 Hz -27,3 dB	1639 Hz -17,5 dB	1516 Hz -19,3 dB	1434 Hz -21,0 dB	Bruit

L(cm) W (mm)	8,4	9,0	10,0	11,0	11,8	12,0	13,1	14,0	14,8
2,5									
3,0	Bruit	Bruit							
3,5	935 Hz -8,8 dB	876 Hz -16,3 dB	Bruit						
4,0	924 Hz -18,4 dB	879 Hz -17,1 dB	797 Hz -20,0 dB						
4,5	948 Hz -8,0 dB	881 Hz -6,2 dB	803 Hz -16,2 dB	742 Hz -9,4 dB	699 Hz -16,0 dB	691 Hz -21,0 dB	Bruit	bruit	
5,5	950 Hz -8,7 dB	883 Hz -5,4 dB	806 Hz -13,2 dB	742 Hz -6,0 dB	699 Hz -6,7 dB	696 Hz -9,0 dB	633 Hz -13,0 dB	592 Hz -12,8 dB	570 Hz -14,8 dB
6,5	936 Hz -16,8 dB	883 Hz -10,8 dB	807 Hz -8,9 dB	743 Hz -5,9 dB	700 Hz -7,5 dB	693 Hz -7,9 dB	633 Hz -13,4 dB	595 Hz -11,4 dB	569 Hz -13,1 dB
7,5	868 Hz -34,6 dB	845 Hz -27,0 dB	793 Hz -21,3 dB	737 Hz -9,7 dB	696 Hz -10,2 dB	690 Hz -8,7 dB	630 Hz -12,7 dB	593 Hz -12,3 dB	568 Hz -11,0 dB
8,5	Bruit	Bruit	737 Hz -29,4 dB	710 Hz -19,5 dB	683 Hz -15,5 dB	672 Hz -16,5 dB	628 Hz -13,1 dB	589 Hz -13,3 dB	565 Hz -16,8 dB

L(cm) W (mm)	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0
2,5						
3,5						
4,5						
5,5						
6,5	527 Hz -11,7 db	bruit				
7,5	526 Hz -11,6 dB	489 Hz -15,3 dB				
8,5	526 Hz -12,4 dB	489 Hz -12,1 dB	462 Hz -23,5 dB	451 Hz -21,3 dB	429 Hz -27,4 dB	408 Hz -33,4 dB



En revanche, la lecture verticale du tableau est moins évidente. Il faut souligner que d'une ligne à l'autre, le système excitateur en entier était changé pour le suivant et n'a probablement pas été instantané dans les mêmes conditions, de même la position et l'orientation du micro a changé.

On remarque que, dans tous les cas, la résonance commence lorsque  $L \approx L_{min} = 10 \times W$ , ce qui confirme le lien longueur de fenêtre et longueur de tuyau. De même, la longueur minimale de résonance pour l'octave supérieure commence à  $L_{min}/2$ . D'autres mesures auraient permis de voir l'existence de la résonance à l'octave inférieure pour  $L_{min} \times 2$ .

A vitesse de jet fixé, chaque longueur de fenêtre  $W$  semble avoir un point de fonctionnement optimal pour une fréquence imposée par la longueur du tuyau, c'est-à-dire avec un niveau sonore plus appréciable. Nous traçons donc le niveau sonore atteint par chaque fondamentale pour une longueur de fenêtre donnée  $W$  et modélisons avec une parabole en ne tenant pas compte de l'excitation à l'octave supérieure. Les points expérimentaux et courbes modélisées sont à l'annexe 4.

La parabole a pour équation

$$NS = a + b \times f + c \times f^2$$

Où  $NS$  est le niveau sonore.

Le maximum est atteint lorsque la dérivée est nulle :

$$0 = b + 2 \times c \times f_{max}$$

$$f_{max} = \frac{-b}{2 \times c}$$

Nous obtenons les informations suivantes :

w (mm)	a (dB)	b (dB.s)	c (dB.s <sup>2</sup> )	$f_{max}$ (Hz)
2,5	-293	0,273	-0,000065	2100
3,5	-136	0,221	-0,0000931	1186,89581
4,5	-107	0,193	-0,0000915	1054,64481
5,5	-87,7	0,192	-0,000113	849,557522
6,5	-99,1	0,255	-0,000177	720,338983
7,5	-165	0,499	-0,000399	625,313283
8,5	-211	0,687	-0,000593	579,25801

Figure 20 : paramètres de la modélisation pour chaque longueur de fenêtre  $W$

On se rend compte que plus  $W$  augmente, plus la fréquence  $f_{max}$  augmente.

Si on trace  $W$  en fonction de  $\frac{1}{f_{max}}$  les données paraissent alignées. L'équation de la droite est alors

$$W = \frac{4,72 \times 10^3}{f_{max}}$$

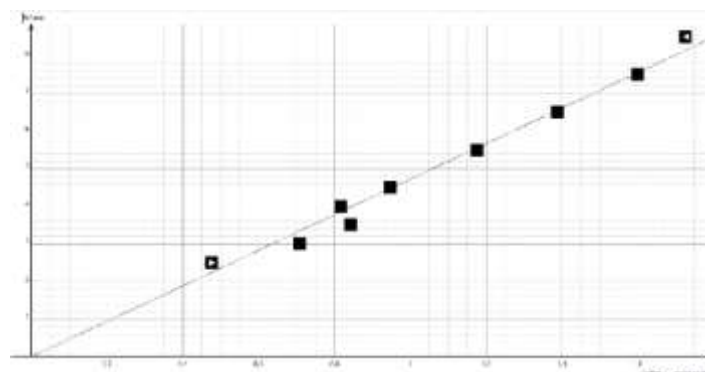


Figure 21 : évolution de la fréquence  $f_{max}$  correspondant au niveau sonore maximal atteint en fonction de la longueur de fenêtre  $W$ .

Avec  $U_j$  maintenu constant grâce au souffleur et en se restreignant à une octave, nous venons de montrer que l'optimum de  $\theta_{max} = \frac{U_j}{f_{max}W}$  est une constante.

$$\theta_{max} = \frac{U_j}{4,72 \times 10^3}$$

Cette droite s'applique pour les fréquences maximales de nos mesures, soit entre 579,0 Hz et 2100 Hz.

Nous n'avons trouvé aucune ressource faisant mention de cette étude, aussi notre présent dossier est envoyé à l'Institut Collegium Musicæ afin d'obtenir leur avis sur notre expérience.

Nous avons tracé, pour chaque longueur de fenêtre  $W$ , tracer  $L$  en fonction de  $\frac{1}{f}$  et ajusté avec un modèle linéaire :

$$L = \frac{k}{f} + \Delta L$$

Les mesures et leurs modélisations se trouvent en annexe 5. On en déduit la vitesse du son dans la flûte par :

$$c = 4 \times k$$

W (mm)	k (cm/s)	$\Delta L$ (cm)	c (m/s)
2,5	8,63E+03	-1,68	3,45E+02
3,5	9,01E+03	-1,27	3,60E+02
4,5	9,32E+03	-1,54	3,73E+02
5,5	9,31E+03	-1,56	3,72E+02
6,5	9,38E+03	-1,69	3,75E+02
7,5	9,22E+03	-1,58	3,69E+02
8,5	9,27E+03	-1,74	3,71E+02

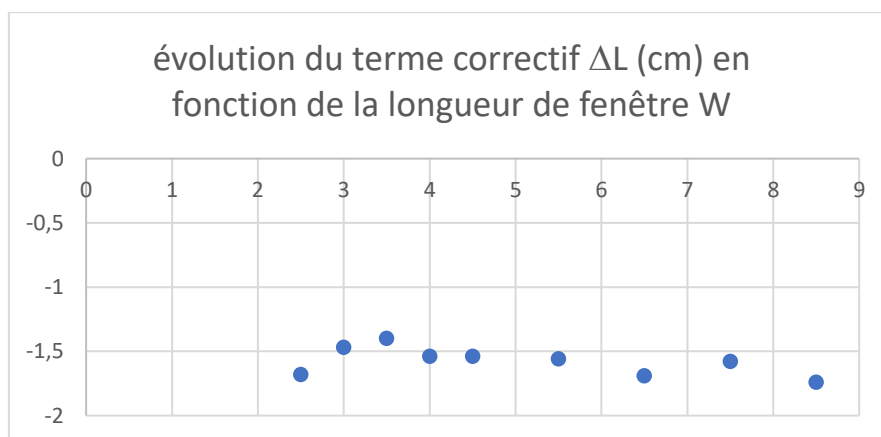


Figure 22 : évolution du correctif de la longueur de tuyau en fonction de la longueur de fenêtre

On remarque que le terme correctif est constant, il ne dépend pas de la longueur de fenêtre  $W$  et vaut :

$$\Delta L = -1,58 \pm 0,11 \text{ cm}$$

Sachant que le diamètre intérieur du tuyau est de 1,0 cm, nous retrouvons donc le terme correctif de Cavallé-Coll :

$$\Delta L = -\frac{5}{3} \times D = -\frac{5}{3} \times 1,0 = -1,66 \text{ cm}$$

De même, la vitesse du son reste constant. Les déviations par rapport à la moyenne sont importantes là où la

longueur de fenêtre  $W$  est petite car la modélisation se fait que sur très peu de points : seulement 4 pour  $W=2,5$  mm !

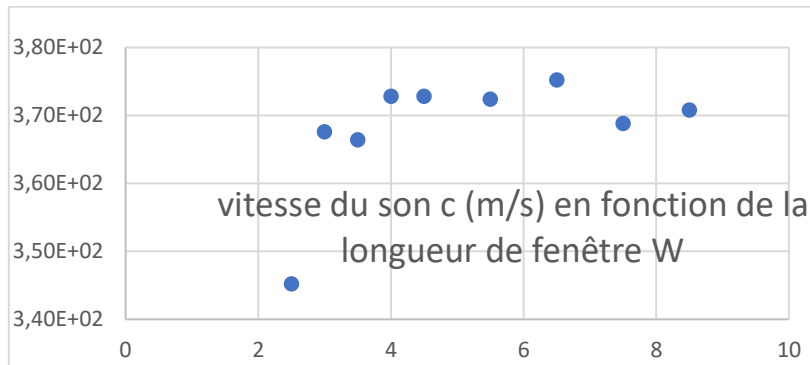


Figure 23: évolution de la vitesse du son dans les tuyaux en fonction de la longueur de fenêtre  $W$ .

En ne tenant pas compte de la première mesure qui est la plus discutable, nous obtenons comme vitesse à considérer :

$$c = 371 \pm 3 \text{ m/s}$$

### B. Cas du tuyau conique

On a choisi une longueur de fenêtre de 4,0 mm. Et une longueur de tuyau de 6,0 mm qui correspond approximativement à la longueur optimale selon notre étude.

En conservant le même système excitateur, nous avons créé un tuyau conique dont le diamètre de sorti est de 28 mm (soit plus du double).

Avec le souffleur alimenté en 12,0 V, nous obtenons le spectre suivant pour le tuyau droit :

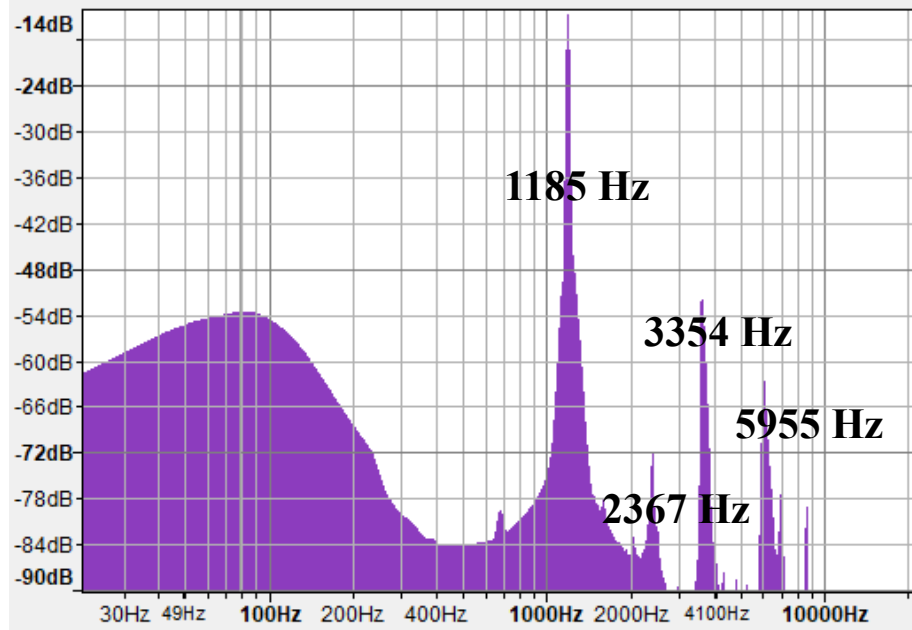


Figure 23: spectre du tuyau droit

Le tuyau cône ne résonnait pas avec cette vitesse de jet. Nous avons réduit l'alimentation du souffleur à 8,0 V pour obtenir un son. A ce stade, on conclue que l'inverse du nombre de Strouhal  $\theta$  et l'encadrement

$7 \leq \theta = \frac{U_j}{f_{max}W} \leq 14$  ne s'applique que pour des tuyaux droit. L'encadrement n'est pas le même pour le tuyau conique puisque seul  $U_j$  a dû être modifié pour entendre un son.

Nous obtenons le spectre suivant :

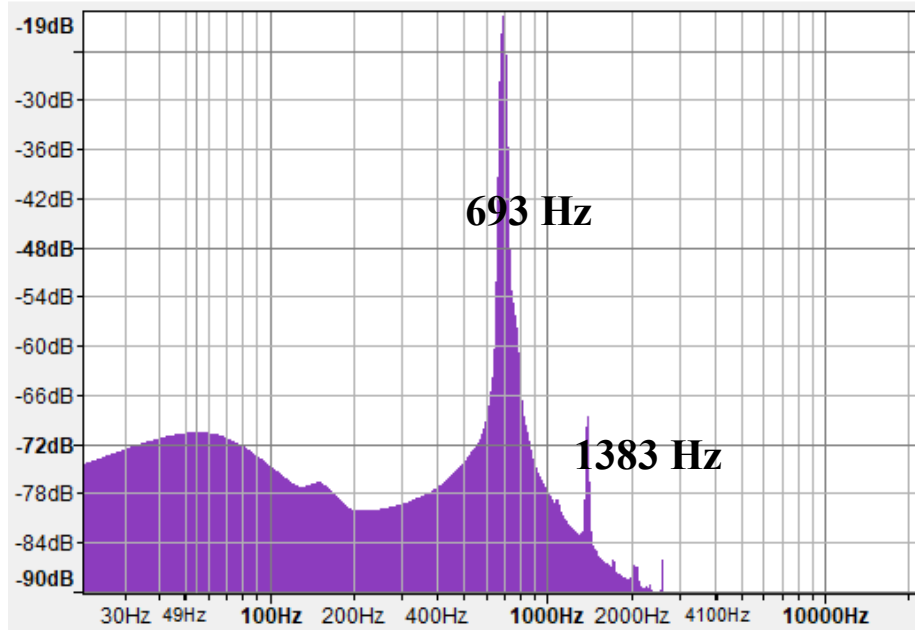


Figure 24: spectre du tuyau cônique

Avec un plus faible débit, nous excitions l'octave inférieure. Le son semble plus pauvre, mais comme le jet est très faible, il est probable que cela n'excite pas suffisamment les harmoniques.

Afin de comparer les sons à la même octave, nous soufflons à la bouche dans les deux tuyaux. En excitant à la bouche, la fréquence fondamentale ne diffère que de 10 Hz. Les spectres semblent quasiment identiques. Ceci va à l'encontre de nos attentes car nous savions que le haut-bois, de forme conique a un spectre plus riche qu'une flûte.

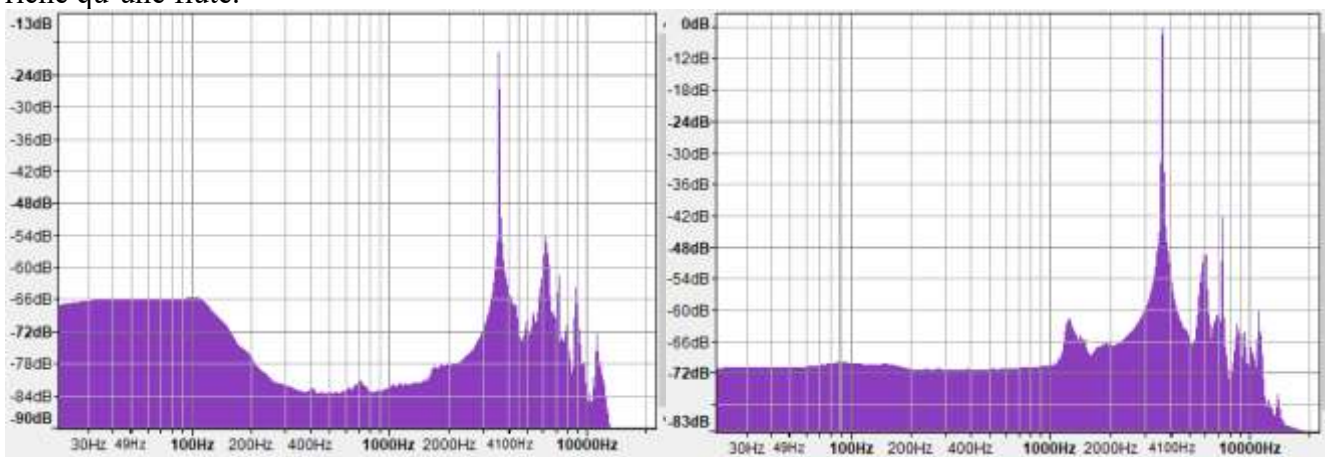


Figure 25: comparaison des deux tuyaux pour la même fréquence

## VIII. Prototype final

### C. Appel à la communauté

Nous avons demandé à la communauté des imprimeur 3D de réaliser le design d'un monobloc d'organettissimo pouvant accepter nos tuyaux d'après le modèle 3D trouvé sur internet. Nous avons soumis les dimensions de la base de nos embouts de tuyau d'organettissimo et demandé la conception de monoblocs unitaires pouvant s'emboîter au gré du nombre de tuyaux d'organettissimo voulu.

Voici le design final :

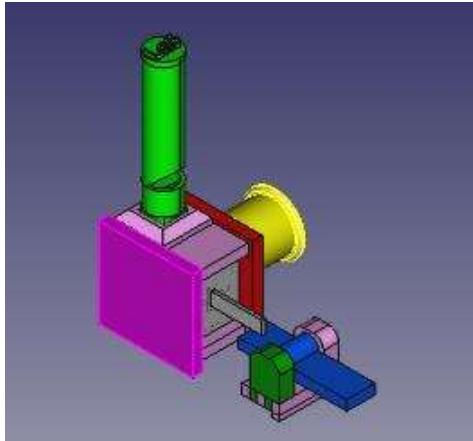


Figure 26: bloc unitaire d'organettissimo



Figure 27: bloc unitaire d'organettissimo imprimé

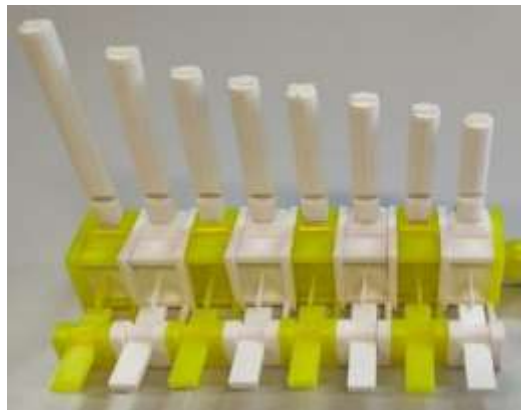


Figure 28 : Assemblage des monoblocs avec nos tuyaux accordés

#### D. Algorithme pour imprimer un tuyau de fréquence choisie

Pour une fréquence  $f$  choisie :

- On détermine la longueur de fenêtre  $W$  en mm à privilégier par la relation :

$$W = \frac{4,72 \times 10^3}{f}$$

- On détermine la longueur de tuyau  $L$  en cm à considérer par la relation :

$$L = \frac{371 \times 10^2}{4 \times f} - 1,66$$

#### E. Influence de paramètres externes et réglage

Puisque la célérité du son dépend de la température et de la pression, l'algorithme précédent ne peut garantir l'exactitude de la fréquence obtenue. Nous avons donc conçu un piston pour fermer le tuyau, afin de procéder à un réglage fin de la fréquence en utilisant l'application phyphox.

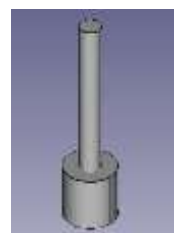


Figure 29: modèle du bouchon-piston

## IX. Conclusion

Nous avons, au cours de ce projet, maîtrisé le fonctionnement, la conception et l'utilisation d'un instrument imaginé.

Dans ce projet nous nous sommes confrontés à différents problèmes, comme faire en sorte que le tuyau fermé – appelé bourdon - joue une note avec une production sonore optimum.

Nous avons créé le design et le protocole expérimental pour arriver à nos fins. Nous avons fait un prototype 2.0 de l'organettissimo en tenant compte de nos récentes découvertes et mesures.

Avec davantage de mesures et le même dispositif expérimental, nous pourrions voir si notre relation

$W = \frac{4,72 \times 10^3}{f_{max}}$  s'applique également à l'octave supérieure et inférieure.

Avec un anémomètre, nous pourrions étudier plus précisément l'impact du débit sur la résonance de nos tuyaux, voir s'il existe une constante  $\theta_{max}$  propre à ce modèle de tuyau.

Nous pourrions aussi changer le diamètre du tuyau et de façon proportionnelle les dimensions de la fente et les dimensions de la lumière pour étudier l'impact du diamètre sur les mesures.

Avec nos optimisations, nous avons constaté que nos tuyaux résonnaient finalement lorsqu'ils étaient ouverts mais pour une grande longueur. L'étude précédente peut donc être intégralement reprise dans ce cas.

Elle peut même être développée en étudiant l'effet de la fermeture progressive du tuyau, en imprimant des bouchons avec un trou central de taille contrôlée, pour reprendre l'expérience de Cavaillé-Coll ci-contre.

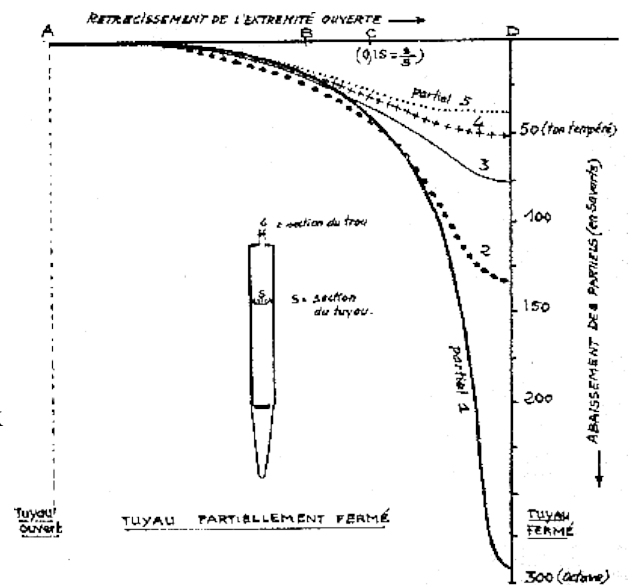


Figure 30: étude de Cavaillé-Coll sur la fermeture progressive d'un tuyau d'orgue

## Sources

[https://www.canal-u.tv/video/espci\\_paristech/souffler\\_n\\_est\\_pas\\_jouer.23008](https://www.canal-u.tv/video/espci_paristech/souffler_n_est_pas_jouer.23008)

<https://www.maxicours.com/se/cours/vibrations-d-une-colonne-d-air/>

<https://www.instructables.com/id/Four-Whistles-Version-2/>

<https://www.youtube.com/watch?v=AO6Hsf3xeuM>

<https://asso-orgue-saujon.jimdofree.com/q%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s-sur-les-orgues/l-organelto/>

[http://fred.elie.free.fr/tuyaux\\_sonores.pdf](http://fred.elie.free.fr/tuyaux_sonores.pdf)

<https://organ-au-logis.pagesperso-orange.fr/Pages/Loituyau.htm>

<https://orgue-bernard.blog4ever.com/>

[https://www.wikiwand.com/fr/Tuyau\\_d%27orgue](https://www.wikiwand.com/fr/Tuyau_d%27orgue),

<http://www.cosmovisions.com/musiTuyau.htm>

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01445568/document>

[http://www.atiam.ircam.fr/Archives/Stages1213/BLANDIN\\_Remi.pdf](http://www.atiam.ircam.fr/Archives/Stages1213/BLANDIN_Remi.pdf)

<http://www.flute-a-bec.com/acoustique.html>