

Organettissimo

Klara Demarle



Benoit Fabre, enseignant-chercheur, directeur du Collegium Musicae de Sorbonne Université









SOMMAIRE

SON	MMAIRE	1
I.	Résumé	2
II.	Introduction	2
III.	Problématiques	2
IV.	Conception d'un tuyau d'orgue	3
Α	Anatomie d'un tuyau d'orgue	3
В	. Une première piste	4
C.	Modélisation 3D	4
V.	Considérations théoriques	6
Α	Résonance dans un tuyau d'orgue	6
В	Influence de la longueur du système résonateur	7
C.	Influence du système excitateur	9
VI.	Dispositif expérimental	10
VII.	Etude du système excitateur.	11
A	Epaisseur de la lumière	11
В	Position de la lumière	12
VIII	Etude du résonnateur	14
A	Evolution du couple longueur de fenêtre W – longueur du tuyau	14
IX.	Prototype final	19
В	Appel à la communauté	19
C	Algorithme pour imprimer un tuyau de fréquence choisie	19
D	Influence de paramètres externes et réglage	20
X.	Conclusion	20
XI.	Sources	21

Lien Vidéo: https://dai.ly/x7zgzar





I. Résumé

Nous avions comme objectif de créer un instrument transportable, intuitif et réparable.

Surfant sur les nouvelles technologies, nous nous sommes appuyés sur l'impression 3D, cette technique en pleine essor se déploie dans tous les Fablab, médiathèques, écoles...

Nous avons conçu un instrument à vent qui utilise un clavier comme le piano, pour sa simplicité d'apprentissage. C'est un orgue miniature.

Nous avons conçu un premier prototype de tuyau d'orgue modifiable et avons identifié 4 paramètres responsables pour une bonne sonorité : la longueur du tuyau, la position du jet par rapport à la lèvre supérieure, l'épaisseur de la lumière ainsi que la hauteur de bouche. En les étudiant nous avons pu adapter ces paramètres dans le but d'obtenir le son le plus fort pour un jet d'air fixé et une note donnée.

Nous proposons enfin un réglage précis de la fréquence d'un l'aide d'un piston pour permettre d'harmoniser l'organettissimo en toute circonstance.

II. Introduction

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.

Notre projet concerne l'élaboration d'un instrument de musique.

Notre instrument doit être facile à apprendre, nous avons pensé d'abord au piano, car nous pouvons voir où nous posons nos doigts, même ajouter des autocollants sur les touches indiquant la note jouée.

Pour des raisons de facilité de transport l'instrument doit être démontable, léger et petit. Aussi nous allons nous appuyer sur l'impression 3D qui se déploie dans tous les FabLab, médiathèques, écoles, pour construire notre instrument. Cela nous permettra d'avoir un instrument démontable et réparable, car composé de plusieurs pièce réimprimables, et léger dû à sa constitution en plastique.

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.

III. <u>Problématiques</u>

Quels sont les paramètres déterminants pour obtenir le son le plus fort pour un tuyau d'orgue et ces paramètres sont-ils interdépendants afin de modéliser et imprimer un mini-orgue en impression3D?





IV. Conception d'un tuyau d'orgue

A. Anatomie d'un tuyau d'orgue

Lorsque l'on appuie sur les touches d'un clavier d'orgue, un clapet s'ouvre et laisse passer un flux d'air sous pression qui vient ensuite provoquer une résonance dans un tuyau ouvert ou fermé présentant une lumière.

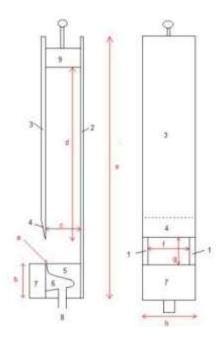


Figure 1: Anatomie d'un tuyau d'orgue fermé appelé bourdon

Source: https://orgue-bernard.blog4ever.com/anatomie-d-une-flute-et-conventions

- 1 Les cotés : longueur e x largeur c, épaisseur (généralement 4 à 6mm et pour nos flûtes sans potelets) Si la lèvre supérieure a été creusée au ciseau dans la face avant seulement dans la partie face à la lumière (a), il reste ce qu'on appelle les potelets qui se prolongent jusqu'à la lèvre inférieure (et les cotés ne sont pas visibles à cet endroit).
- 2 Le fond (ou façade arrière) : longueur e largeur h+1mm pour ponçage
- 3 La façade avec la lèvre supérieure 4 : longueur (e-b-g) x largeur h+1mm épaisseur variable.
- 4 Lèvre supérieure ou biseau, pente 5° à 22° recommandé 8° (l'épaisseur d'extrémité ± égal à la lumière a)
- 5 Noyau: largeur f, profondeur c, hauteur b
- 6 Chambre (creusée dans le noyau)
- 7 Lèvre inférieure : largeur h, hauteur b, profondeur de 2 à 15 mm
- 8 Pied de flûte (arrivée de l'air)
- 9 Tampon (pour les bourdons ou flûtes bouchées)
- a Lumière : espace entre le noyau 5 et la lèvre inférieure 7
- b Hauteur de noyau (et implicitement hauteur de la lèvre inférieure)
- c Profondeur interne
- d Hauteur acoustique (ou longueur acoustique réelle différente de la longueur acoustique théorique)
- e Hauteur totale (ou longueur totale)
- f Largeur interne
- g Hauteur de bouche
- h Largeur de façade





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



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

Nous avons imprimé une partie de ce modèle :



Figure 3 : 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 de ce mini-orgue.

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.

C. 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.





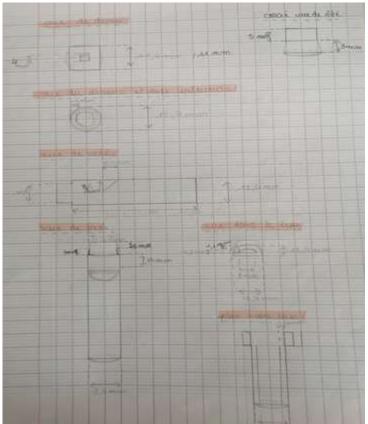


Figure 4 : schémas du modèle de tuyau d'organettissimo avec les mesures prises sur le modèle internet

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

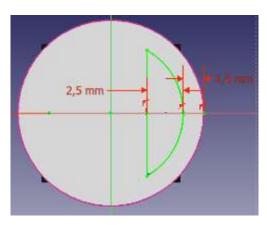


Figure 5 : exemple du design sur mesure de l'embouchure





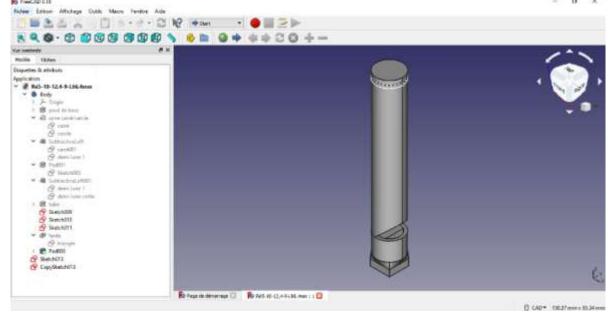


Figure 6 : Modèle 3D final du tuyau reproduit d'après le modèle

V. 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 lèvre supérieure. Le système résonateur est la colonne d'air délimitée par le tube de l'instrument.

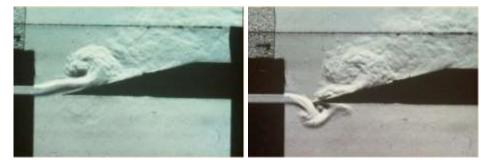


Figure 7 : écoulement de jet d'air à l'embouchure en régime permanent Photos : Université d'Eindhoven, Pays Bas

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 résonnance d'une note dépend de :

- la position de la lumière par rapport à la lèvre 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

Les trois grandeurs caractéristiques d'un son musical sont : son intensité, sa hauteur (fréquence de la note) et son timbre (forme de l'onde).

En réalité, Les sons musicaux sont des sons complexes, ils sont composés de plusieurs sons purs de





fréquences et d'amplitudes différentes. Ainsi, un son musical est la résultante de la superposition de plusieurs vibrations : la vibration fondamentale de fréquence f₁, 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.

B. 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

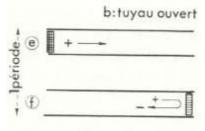


Figure 8 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau ouvert

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 réfléchie avec changement de signe (dépression, signe -) et retourne à nouveau vers le fond. Là, elle est réfléchie 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.

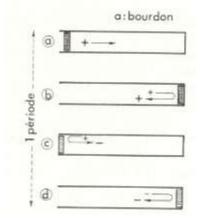


Figure 9 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau fermé

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 :

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

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

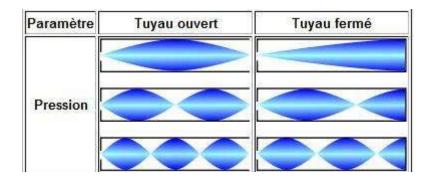


Figure 10 : ondes stationnaires dans un tuyau ouvert ou fermé. La première onde est la fondamentale, les suivantes sont les harmoniques (wikipédia)

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.

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 Cavaillé-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. <u>Influence du système excitateur</u>

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 :

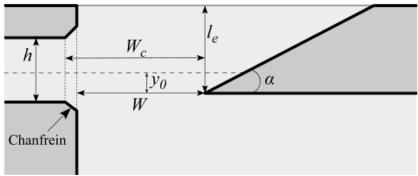


Figure 11 : Schéma de la fenêtre d'une flûte Schéma issu de la thèse de Augustin Ernoult

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.

Le biseau est caractérisé par son angle α 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. Le jet issu de la lumière est perturbé par l'onde acoustique de fréquence fondamentale 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 .

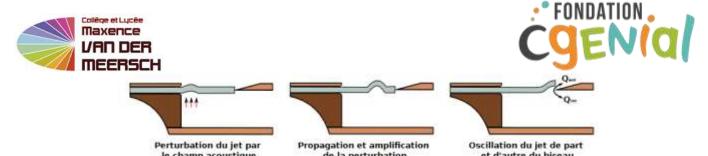


Figure 12: Perturbation du jet d'air issu de la lumière par la surpression de l'onde acoustique Schéma issu de la thèse de Rémi Blandin

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

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

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

$$7 \le \theta \le 14$$

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, donc un son plus aigu, l'augmentation de la fréquence résultante rebascule le facteur θ 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.

VI. 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 13 : 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.





VII. <u>Etude du système excitateur</u>

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 :

$$v_S \times S_{carr\'e} = v_j \times S_{lumi\`ere}$$

 $v_j = v_S \times \frac{S_{carr\'e}}{S_{lumi\`ere}}$

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 $y_0 = +0.75 \text{ mm}$

• tension du souffleur : 11,8 V

Modèle	53-00		1500	
Epaisseur				
maximale de la	2,5	2,0	1,5	1,0
lumière h (mm)				
Analyse spectrale	$f_1 = 724 \text{ Hz} (-32.9 \text{ dB})$ $f_3 = 2231 \text{ Hz} (-38.0 \text{ dB})$ $f_5 = 3733 \text{ Hz} (-67.4 \text{ dB})$ $f_7 = 5240 \text{ Hz} (-64.9 \text{ dB})$	$f_1 = 729 Hz (-29,2 dB)$ $f_3 = 2193 Hz (-53,0 dB)$ $f_5 = 3736 Hz (-66,3 dB)$ $f_7 = 4543 Hz (-63,6 dB)$	$f_1 = 735 Hz (-28.2 dB)$ $f_3 = 2184 Hz (-46.9 dB)$ $f_5 = 3679 Hz (-67.7 dB)$ $f_7 = 5243 Hz (-64.7 dB)$	$f_1 = 732 Hz (-31,6 dB)$ $f_3 = 2222 Hz (-59,2 dB)$ $f_5 = 3727 Hz (-65,8 dB)$ $f_7 = 5244 Hz (-65,4 dB)$
$\frac{S_{carr\acute{e}}}{S_{lumi\grave{e}re}}$	1,62816458	2,0065317	2,62806239	3,85278588

Dans le timbre des tuyaux d'organettissimo, on constate la présence de la $3^{\text{ème}}$, $5^{\text{ème}}$ et $7^{\text{ème}}$ 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.





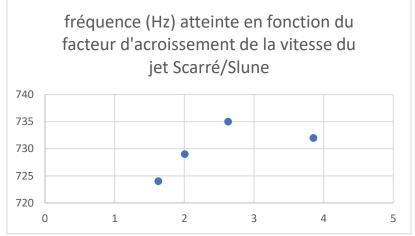


Figure 14 : Evolution de la fréquence en fonction du facteur d'accroissement de la vitesse du jet $\frac{S_{carré}}{S_{lumière}}$.

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.

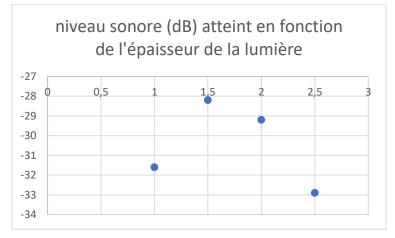


Figure 15 : niveau sonore en fonction de l'épaisseur de la lumière

B. Position de la lumière

CONDITIONS EXPERIMENTALES:

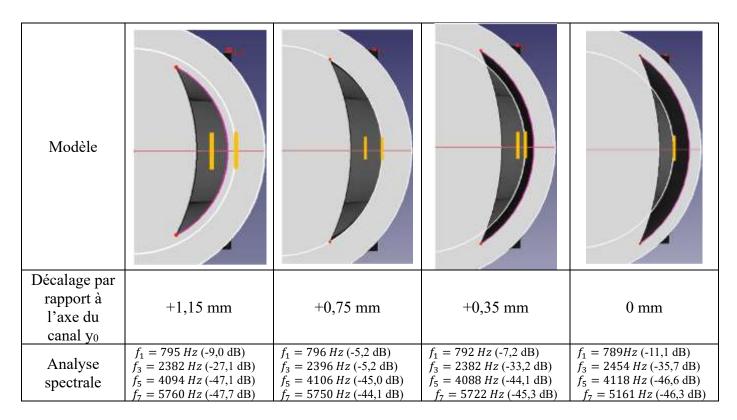
• longueur de tube: 10 cm

longueur de fenêtre : W=6.5 mm
épaisseur max de la lumière : 1,5 mm

tension du souffleur : 11,8V







Nous observons encore la présence de la 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} 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.

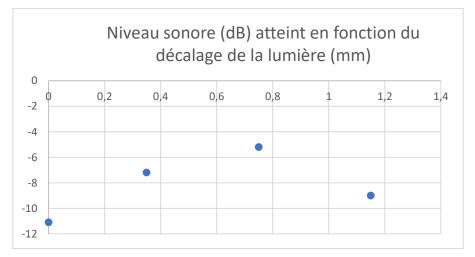


Figure 16 : évolution du niveau sonore du fondamental en fonction du décalage de la lumière par rapport à la lèvre supérieur

D'après nos mesures, il s'agit du modèle où le tranchant de la lèvre supérieur est à l'aplomb du bord extérieur de la lumière, c'est-à-dire le modèle avec le décalage $y_0 = +0.75$ mm.





VIII. <u>Etude du résonnateur</u>

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			
2.0	D '4					1420 11	1210 11	1250 H	1075 II
3,0	Bruit	1997 Hz	1869 Hz	1702 Hz	1593 Hz	1429 Hz	1310 Hz	1250 Hz	1075 Hz
		- 37,5 dB	-24,1 dB	-25,6 dB	-12,2 dB	-12,7 dB	-13.3 dB	-9,9 dB	-22,5 dB
3,5	Bruit	Bruit	Bruit	1701 Hz	1579 Hz	1427 Hz	1314 Hz	1258 Hz	1084 Hz
				-17,5 dB	-18,5 dB	-10,6 dB	-8,9 dB	-9,1 dB	-3,8 dB
4	Bruit	Bruit	Bruit	1657 Hz	1555 Hz	1401 Hz	1303 Hz	1229 Hz	1074 Hz
				-21,8 dB	-16,4 dB	-14,2 dB	-14,0 dB	-12,9 dB	-18,2 dB
4,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1527 Hz	1420 Hz	1319 Hz	1262 Hz	1091 Hz
.,,,					-26,0 dB	-14,6 dB	-12,1 dB	-8,7 dB	-1,5 dB
5,5	2777 Hz	2504 Hz	2263 Hz	Bruit	Bruit	Bruit	1233 Hz	1204 Hz	1087 Hz
,	-18,1 dB	-16,3 dB	-18,6 dB				-25,8 dB	-20.7 dB	-7,3 dB
6,5	Bruit	Bruit	2253 Hz	2007 Hz	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1046 Hz
,			-12,0 dB	-18,3 dB					-17,6 dB
7,5	Bruit	Bruit	Bruit	1974 Hz	1833 Hz	1640 Hz	Bruit	Bruit	bruit
				-17,7 dB	-21,7 dB	-16,6 dB			
8,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1809 Hz	1639 Hz	1516 Hz	1434 Hz	Bruit
					-27,3 dB	-17,5 dB	-19,3 dB	-21,0 dB	





V (cm)	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									
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 installé dans les mêmes conditions, de même la position et l'orientation du micro a changé.

On remarque que, dans tous les cas, la résonnance 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 résonnance pour l'octave supérieure commence à $L_{min}/2$. D'autres mesures auraient permis de voir l'existence de la résonnance 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.





Voici par exemple les points expérimentaux pour une longueur de fenêtre de 5,5 mm :

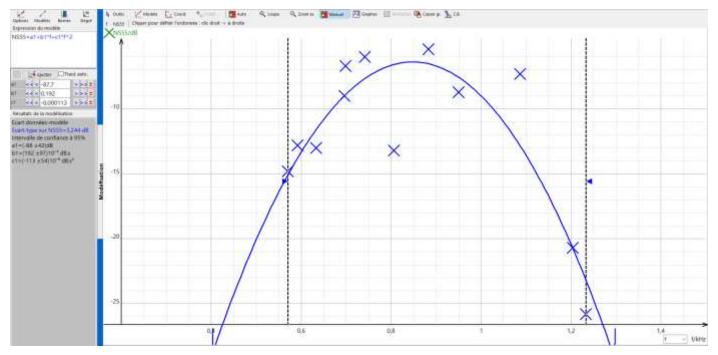


Figure 17 : modélisation avec une parabole du niveau sonore atteint en fonction de la fréquence imposée par la longueur de tuyau, pour une longueur de fenêtre de 5,5 mm

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 réitérons pour toutes les longueurs de fenêtres et obtenons les informations suivantes :

w (mm)	a (dB)	b (dB.s)	c (dB.s²)	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 18: 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

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





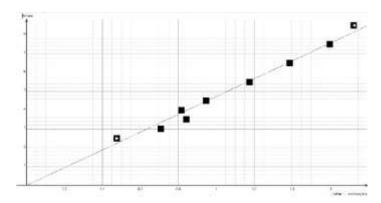


Figure 19 : évolution de la fréquence f_{max} correspondant au niveau sonore maximal atteint en fonction de la longueur de fenêtre W.

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

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

Voici un exemple avec la longueur de fenêtre de 6,5 mm :

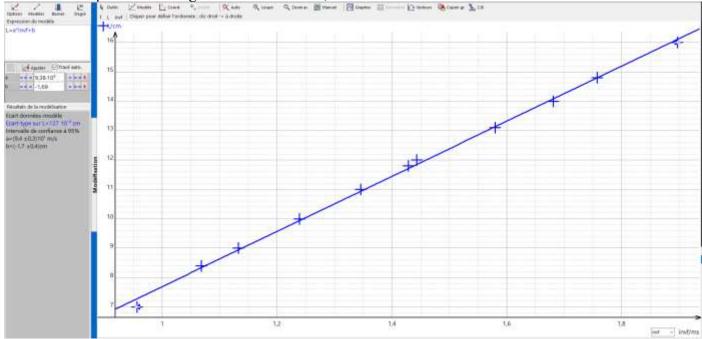


Figure 20 : relation linéaire entre la longueur de tuyau et l'inverse de la fréquence obtenue pour une longueur de fenêtre de 6,5 mm.





On en déduit la vitesse du son dans la flûte par :

$$c = 4 \times k$$

En procédant de la sorte pour toutes les longueurs de fenêtre, nous obtenons les informations suivantes :

W (mm)	k (cm/s)	Δ 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

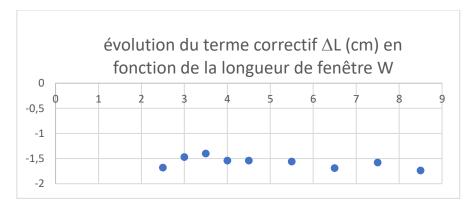


Figure 21 : évolution du correctif de la longueur de tuyau en fonction de la longueur de fenêtre

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

$$\Delta L = -1.58 \pm 0.11 \ cm$$

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

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

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 !

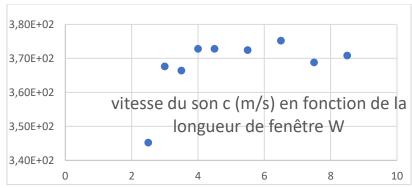


Figure 22 : évolution de la vitesse du son dans les tuyaux en fonction de la longueur de fenêtre W.

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

$$c = 371 \pm 3 \, m/s$$





IX. **Prototype final**

B. 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:

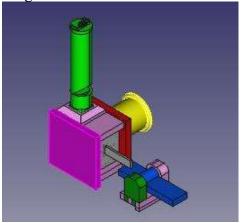


Figure 23:bloc unitaire d'organettissimo



Figure 24: bloc unitaire d'organettissimo imprimé

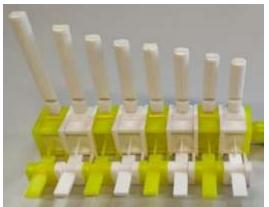


Figure 25 : Assemblage des monoblocs avec nos tuyaux accordés

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

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

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

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





D. 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 FizziQ.

X. <u>Conclusion</u>

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

Figure 26: modèle du bouchon-piston

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 résonnance de nos tuyaux, vois s'il existe une constante θ_{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.

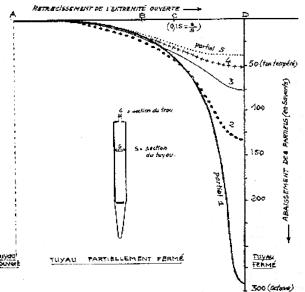


Figure 27: étude de Cavaillé-Coll sur la fermeture progressive d'un tuyau d'orgue

On a parlé de nous sur France Musique!

A Roubaix, un orgue miniature imaginé par quatre lycéens (francemusique.fr)





XI. Sources

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/g%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s-sur-les-orgues/l-organetto/

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,

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.flute-a-bec.com/acoustique.html