Olympiades de Physique-France / XIXème édition
Année 2011/12

Vers les résonances romantiques des tuyaux d'orgue !

Lycée Jean-Jacques Henner d'Altkirch (68)

Réalisation du projet : Julien Labeth (TS2)-Quentin Jolliot (TS2)-Hervé Probst (TS2)- Suzanna Bucher (TS2)
Professeurs encadrants : Philippe Heinis et Frédéric Martin

Résumé

Placé dans le dos du visiteur, sur une tribune souvent inaccessible, l'orgue est un instrument mal connu et un peu mystérieux. Généralement, le public ignore tout du plus complexe des instruments de musique, à commencer par l'existence même d'une machinerie derrière sa façade. Pourtant, premier en date des instruments mécanisés, l'orgue a suivi, au cours d'une histoire de près de 23 siècles, le progrès des techniques en matière de soufflerie, d'acoustique, de transmission de mouvements, d'électricité, d'électronique voire d'informatique.

Dans le domaine de l'acoustique, les sonorités ont évolué au fil du temps grâce à la grande diversité possible des tuyaux : certains sont réalisés en bois, d'autres avec un alliage étain-plomb, d'autres en zinc,… Les caractéristiques géométriques peuvent aussi être très différentes : tuyaux carrés, coniques, cylindriques, … Certains tuyaux fonctionnent sur le principe de la flûte à bec, d'autres sur le principe de la clarinette (anche battante), d'autres encore sur le principe du hautbois (anche libre) C'est pourquoi, dans un orgue, il existe de nombreuses familles de tuyaux appelées « jeux ». Chaque jeu de tuyaux correspond en fait à un timbre particulier (ou « couleur sonore ») souvent propre à l'orgue comme le *Prestant*, la *Montre*, la *Doublette* ou encore la *Fourniture*. Ces « couleurs » différentes sont utilisées par l'organiste afin d'interpréter, par exemple, des œuvres de la musique baroque (F. Couperin, N. De Grigny,…) ou de la musique classique (W.A. Mozart,…)

Mais, devant l'ampleur prise par l'orchestre en Europe dès le milieu du XVIIIème siècle, l'orgue tend à se rapprocher de son concurrent. Les facteurs d'orgues s'efforcent alors par tous les moyens d'enrichir harmoniquement les sonorités afin de produire des « résonances romantiques » et de se rapprocher musicalement des cordes de l'orchestre. Au XIXème siècle, ils réalisent notamment de nouveaux jeux dits « romantiques » ou *gambés* appelés *viole de gambe*, *violoncelle*, *violon*, *salicional* ou encore *gambe* pour les plus courants. Ces jeux ont alors contribué à faire naître la musique d'orgue romantique et leurs sonorités particulières ont inspiré de grands musiciens français comme C. Franck, C. Saint-Saëns, L. J. Lefébure-Wély, A. Guilmant et bien d'autres encore.

Le projet « **Vers les résonances romantiques des tuyaux d'orgue !** » propose de comprendre comment, au XIXème siècle, des facteurs d'orgues ont réussi à enrichir harmoniquement la sonorité des tuyaux d'orgue dans le but se rapprocher des « résonances romantiques » des cordes de l'orchestre !

Sommaire

L'orgue est un instrument de musique à vent, le plus grand et le plus complet de tous par son étendue, le nombre de ses ***jeux*** *et la variété de ses sons. Il est composé d'un grand nombre de tuyaux de différentes espèces, les uns en étain, les autres de plomb, d'autres de bois ; de quantité de machines nécessaires et propres à gouverner et à leur communiquer le vent qui leur donne le son, et d'un grand corps de menuiserie, où le tout est contenu, appelé Buffet, accompagné pour l'ordinaire d'un autre plus petit devant ; de grands soufflets, séparés du corps de la machine, fournissant le vent qui va s'y rendre dans la principale pièce, appelée le sommier, d'où il le distribue à chaque tuyau au moyen du Clavier que l'organiste fait mouvoir avec ses doigts.* (Voir ANNEXE 1)

Dom Bedos de Celles 1766 -traité encyclopédique « L'Art du facteur d'orgues »

Cette définition de l'orgue est à la fois la plus précise et la plus ramassée qu'on ait donnée de l'orgue. Celui-ci constitue une machinerie complexe mais, malgré les transformations considérables que l'instrument a subies au cours des siècles, les composants fondamentaux de l'orgue sont restés les mêmes. Par la suite, nous nous intéresserons exclusivement à la « tuyauterie » de l'orgue. Ce terme regroupe l'ensemble des tuyaux permettant de générer les différents sons d'un orgue.

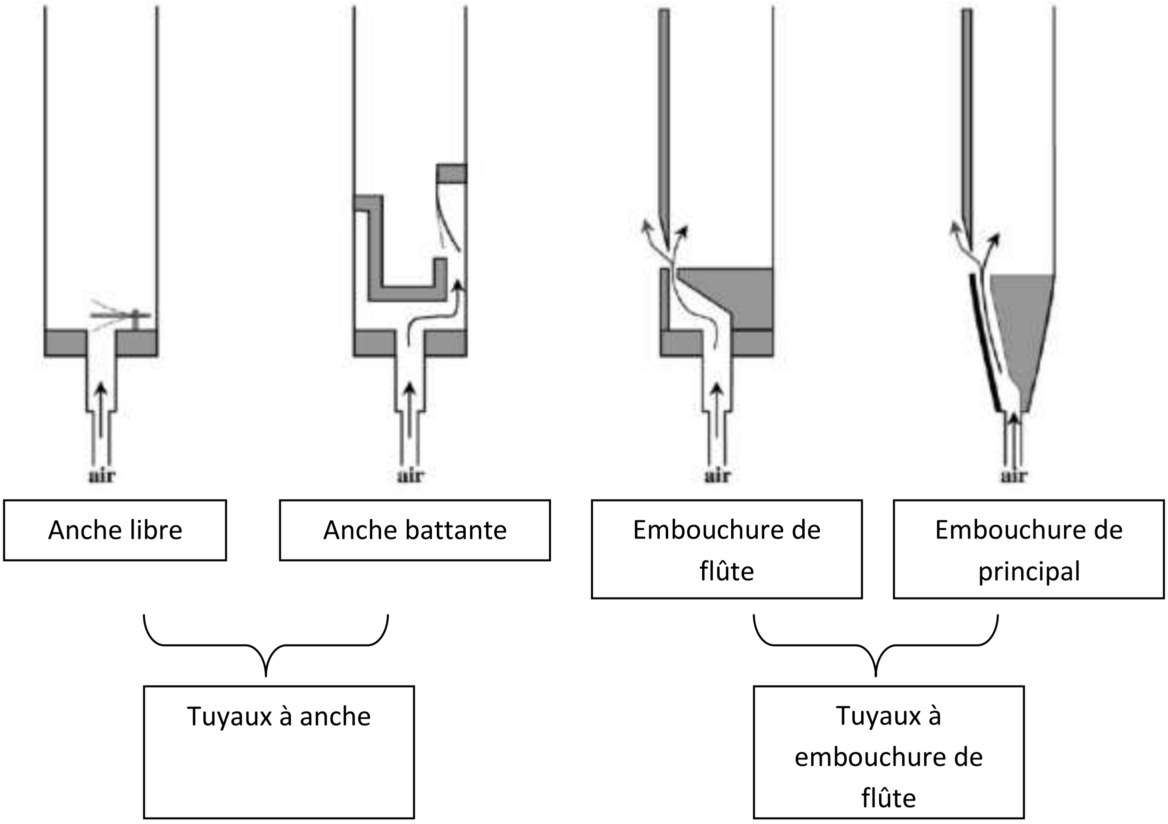
I°) Présentation des tuyaux sonores d'un orgue

Comme pour tout instrument de musique, le tuyau d'orgue associe un **excitateur** à un corps sonore (ou **résonateur**). L'excitateur lance le mouvement vibratoire, le résonateur impose sa fréquence propre et fournit un « timbre de son » au mouvement vibratoire.

1°) Les deux familles

Les orgues comportent plusieurs types de tuyaux sonores, que l'on peut diviser en deux familles :

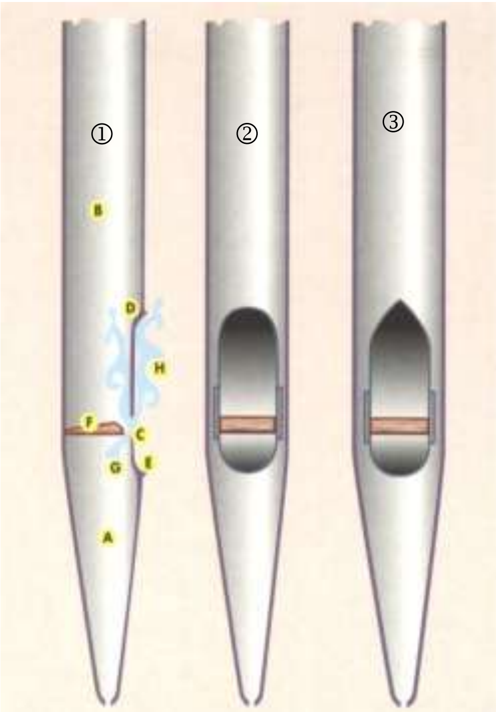
– celle des tuyaux à **embouchure de flûte ou tuyaux à bouche** (l'excitateur est appelé « biseau »)
– celle des tuyaux à **anche (libre ou battante)** (l'excitateur est appelé « anche »)



1.a°) Les tuyaux à embouchure de flûte (ou à bouche)

De forme ronde s'ils sont en métal (alliage étain/plomb, zinc, cuivre) ou de forme carrée ou rectangulaire s'ils sont en bois (sapin, chêne plus rarement poirier ou tilleul).

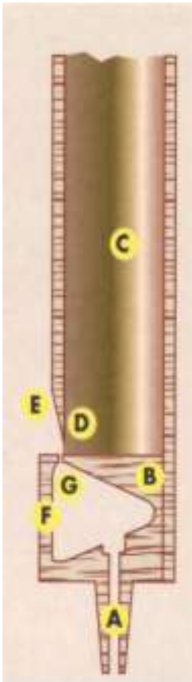
L'air arrivant par le pied du tuyau est dirigé, sous pression, par le **biseau** (**excitateur**) dans un espace étroit qui est la **lumière**. Cet air, comme dans un sifflet ou une flûte à bec, se brise sur la **lèvre supérieure**, produit la vibration, qui, entraînant la masse inerte de l'air contenu dans le corps du tuyau (r**ésonateur**), produit le son. Selon les cas, le tuyau à bouche est ouvert ou fermé par un embout de bois (**tampon**) ou de métal (**calotte**).



1-Tuyau de façade avec écusson relevé (vu de côté) : A : pied, B : corps, C : bouche, D : lèvre supérieure, E : lèvre inférieure, F : biseau, G : lumière, H : courants d'air tourbillonnants

2- Tuyau de façade avec écusson relevé au niveau de la bouche (vu de face)

3- Tuyau de façade avec ogive au niveau de la bouche (vu de face)



Tuyau en bois (vu de côté) : A :pied, B : biseau,

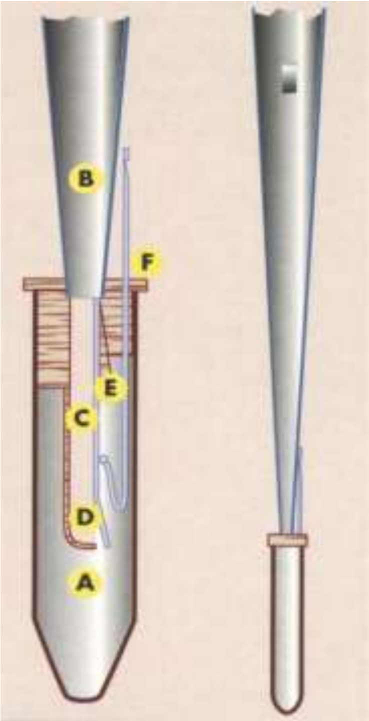
C : corps, D : bouche, E : lèvre supérieure, F : lèvre, G : lumière

Tuyau en bois carré fermé par un tampon

Tuyau en métal cylindrique fermé par une calotte

Remarque : un tuyau d'orgue est toujours ouvert au niveau du biseau. De ce fait, un tuyau ouvert dans sa partie supérieure sera considéré comme un « tuyau ouvert/ouvert » et un tuyau fermé dans sa partie supérieure considéré comme un « tuyau ouvert/fermé ».

1.b°) Les tuyaux à anche



Le principe est ici bien différent. Si dans le cas des tuyaux à bouche on peut évoquer la flûte à bec, pour les tuyaux à anche, on penserait plutôt par exemple à la clarinette (anche battante) ou le hautbois (anche libre). En effet, dans le cas d'un tuyau à anche battante, l'air arrivant par le pied va provoquer la vibration d'une **languette ou anche** (**excitateur** =mince lame de laiton), posée sur un canal (appelé **rigole**) inséré dans le pied au moyen d'un **coin en bois** qui l'emprisonne dans un **noyau** en plomb. La vibration de la languette est amplifiée par le **pavillon (résonateur)**, qui peut revêtir des formes très différentes et provoquera le son.

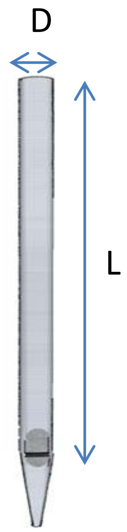
Jeu de tuyaux à anche appelés « trompette » →

1-Tuyau à anche : A : pied, B : corps conique, C : anche (ou languette), D : rigole, E : coin, F : rasette

Dans un orgue, il existe deux types de tuyaux à anche : les tuyaux à anches battantes (cromorne, trompette, clairon, hautbois,…) et les tuyaux à anches libres (Ophicléide, Voix humaine,…)

Remarque : Il est à noter que la dénomination des « jeux » de l'orgue empruntée aux instruments de l'orchestre peut surprendre car la trompette de l'orchestre ne fonctionne pas grâce à une anche battante. De même le hautbois et le cromorne de l'orchestre émettent un son provoqué par la vibration d'une anche libre et non battante ! Les noms attribués à certains jeux d'orgue permettent simplement d'avoir une idée quant à leur timbre comparativement aux instruments de l'orchestre et ceci indépendamment de la nature de l'excitateur.

2°) La « taille » des tuyaux en embouchure de flûte



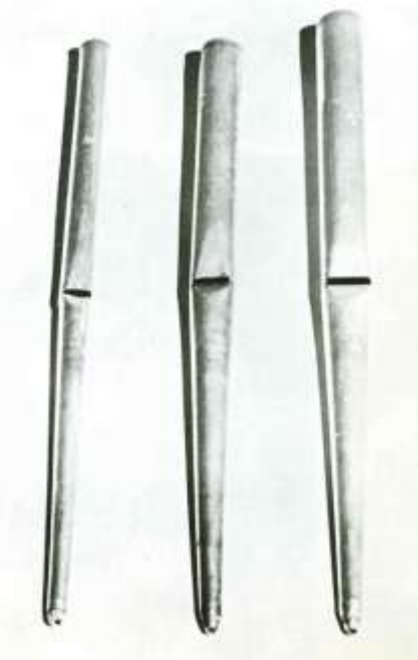
Parmi les tuyaux à embouchure de flûte et rond (tuyaux métalliques) , on peut distinguer 3 sous-familles selon leur « taille ». Chez les facteurs d'orgues, la taille est définie par le rapport suivant :

$$\text{Taille} = \frac{L}{D}$$

L : longueur du tuyau mesurée entre le biseau et l'extrémité supérieure du tuyau (en m)
D : Diamètre intérieur du tuyau (en m)

Dans un orgue, on peut alors distinguer globalement 3 « tailles » de tuyaux selon le rapport L/D.

Il existe ainsi des tuyaux à « taille étroite », des tuyaux à « taille moyenne » et les tuyaux à « taille large ».



(1) (2) (3)

Les trois tailles ensemble

De gauche à droite :
- (1) Un tuyau à « taille étroite »
- (2) Un tuyau à « taille moyenne »
- (3) Un tuyau à « taille large »

(1) **Les tuyaux à taille étroite** : ils constituent **les gambes**. Les jeux correspondants ont une sonorité mordante, douce et non ronde.

Exemples de dénominations de jeux: gambe, violon, violoncelle, salicional,…

(2) **Les tuyaux à taille moyenne** : ils constituent **les principaux** (ou **les montres**). Les jeux correspondants ont une sonorité majestueuse et large avec un certain mordant dans l'attaque du son.

Exemples de dénominations de jeux: Montre, Prestant, Doublette, Sifflet ,…

(3) **Les tuyaux à taille large** : ils constituent **les flûtes** et **les bourdons**. Les jeux correspondants ont une sonorité ronde, ample et douce.

Exemples de dénominations de jeux: Soubasse, bourdon, flûte , …

Il est difficile de donner des domaines de valeurs correspondant aux différentes tailles car elles varient d'un facteur d'orgues à l'autre et d'un tuyau à l'autre dans un jeu de tuyaux donné. Chez Aristide Cavaillé-Coll (un des plus grands facteurs d'orgues du XIXème siècle), lorsque le rapport est grand, entre 20 et 30 alors le tuyau est dit de « taille étroite » lorsqu'on raisonne sur le tuyau donnant la note Do1.

Valeurs issues de Tables d'Aristide Cavaillé-Coll :

- Jeu « Salicional » - Do1 (tuyau le plus long du jeu) - L=2599mm - D=117 – Taille=22
- Jeu « Gambe » -Do1 (tuyau le plus long du jeu) - L=2599mm - D=90mm –Taille =29
- Jeu « Montre » - Do1 (tuyau le plus long du jeu) – L=2599mm - D=152mm –Taille =17

Les jeux « salicional » et « gambe » seront ainsi considérés comme des jeux de taille étroite. Le jeu « Montre » est, par exemple, un jeu de taille moyenne.

II°) Modélisation d'un tuyau d'orgue et d'une corde de violon- étude des ondes stationnaires en régime forcé

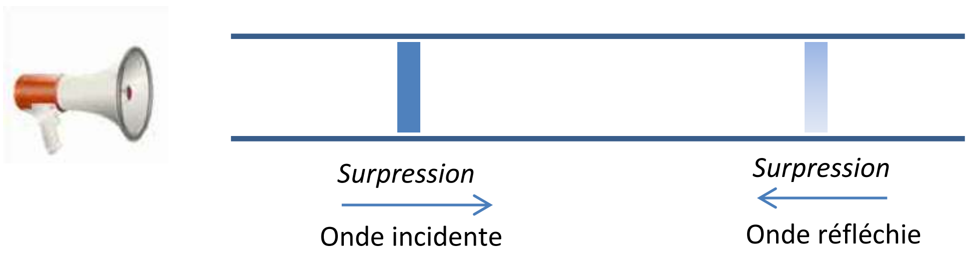
On doit à **Daniel BERNOULLI**, un digne représentant de savants helvétiques, la première théorie cohérente (publiée vers 1740) sur les vibrations tuyaux sonores et des cordes vibrantes.

1°) Modélisation d'un tuyau d'orgue

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.

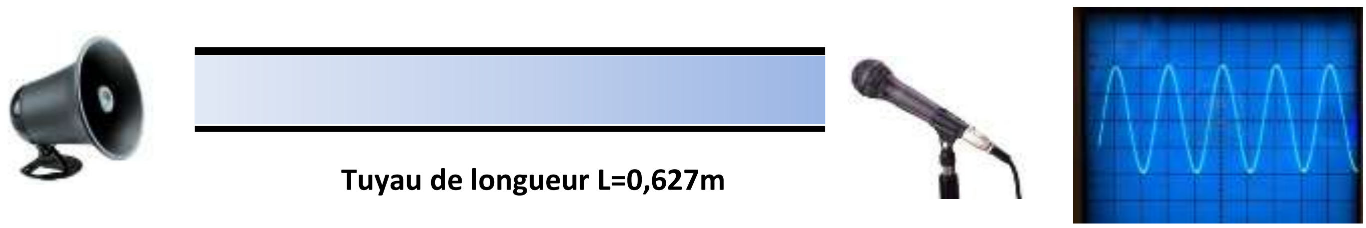
On modélise le tuyau d'orgue ouvert/ouvert par un simple tuyau complètement ouvert aux deux extrémités.

Des zones de surpression suivies par des zones de dilatation d'une onde sonore sinusoïdale créées par un haut-parleur font des allers-retours dans le tuyau à la vitesse V du son (vitesse dépendant de la température-Voir ANNEXE 4). Si la surpression fait 440 allers-retours, le son produit aura une fréquence de 440Hz. L'onde à l'intérieur du tuyau est alors qualifiée de **stationnaire.**



A°) Vibrations forcées d'une colonne d'air d'un tuyau ouvert/ouvert

On a réalisé le montage ci-contre : un GBF alimente un haut-parleur avec une tension sinusoïdale de fréquence f. La membrane du haut-parleur en mouvement vibratoire force l'air du tube, ouvert aux deux extrémités, à vibrer longitudinalement (vibrations forcées). Un micro explorateur, sensible à la pression sonore, est relié à un oscilloscope. Il détecte des vibrations locales de pression p(x,t) ou *surpression*. Un maximum d'amplitude de la tension visualisée (ordinateur avec Latispro) correspond à un maximum de p(x,t) et un minimum de l'amplitude correspond à un minimum de pression p(x,t).



Réglages du GBF (rapport cyclique 50% ; tension de sortie 1,5V mais amplifiée avec un amplificateur branché entre le GBF et le Haut-parleur). Réglage Latispro : acquisition en mode permanent.

On fait augmente la fréquence f du GBF et on relève les fréquences f_n (n=1,2,3…) pour lesquelles la colonne d'air entre en résonance. Pour chaque valeur de f_n, on entend un son intense ce qui se traduit par une valeur maximale de l'amplitude du signal aux bornes du microphone.

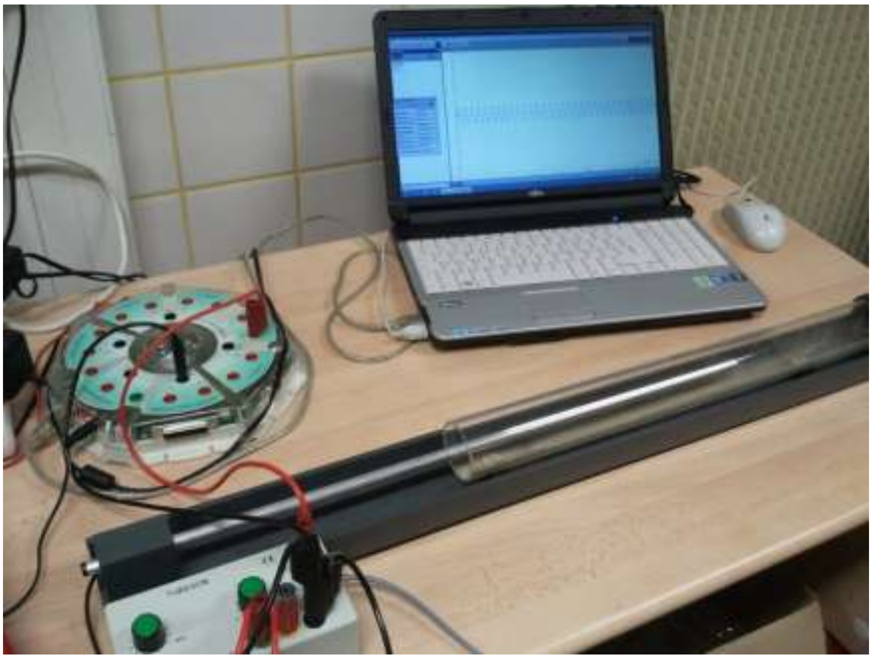
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
Fréquence f(Hz)	255	517	774	1043	1300	1557	1834	2084	2384
Rapports f_n/f_1		2,00	3,00	4,10	5,10	6,10	7,20	8,20	9,30

On en déduit que : $\mathbf{f_n = n \times f_1}$ avec n entier naturel > 0 ($n \in \mathbb{N}^*$)

Chaque valeur de n correspond à un **MODE** de vibration.

n=1 : fondamental; n=2 : 1^er^ harmonique ; n=3 : 2^ème^ harmonique ; …

B°) Vibrations forcées d'une colonne d'air d'un tuyau ouvert/fermé



Dans cette expérience, on a utilisé un micro électret et un tube ouvert/fermé de 50 cm de longueur et de 4,42cm de diamètre intérieur (5,05cm de diamètre extérieur). A l'extrémité fermée, il y a un haut-parleur qui peut émettre un son pur (sinusoïdal) sur une plage de fréquences allant de 140 à 1400Hz. Le micro électret a une bande passante de 50Hz à 12 000Hz largement suffisante. La variation de pression acoustique au niveau du micro est visualisée à l'ordinateur grâce à l'interface Sysam-SP5 et le logiciel Latispro. On fait varier la fréquence f du son et on repère les fréquences f_n de résonance (lorsque le son devient plus intense ou lorsque l'amplitude atteint des valeurs maximales)

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4
Fréquence f(Hz)	163	493	814	1136	1480
Rapports f_n/f_1	1,00≈1	3,02≈3	4,99≈5	7,00≈7	9,10≈9

Les rapports f_n/f_1 correspondent à des nombres entiers impairs

On en déduit que : $\mathbf{f_n = (2n+1) \times f_0}$ avec n entier naturel ($n \in \mathbb{N}$)

Chaque valeur de n correspond à un **MODE** de vibration.

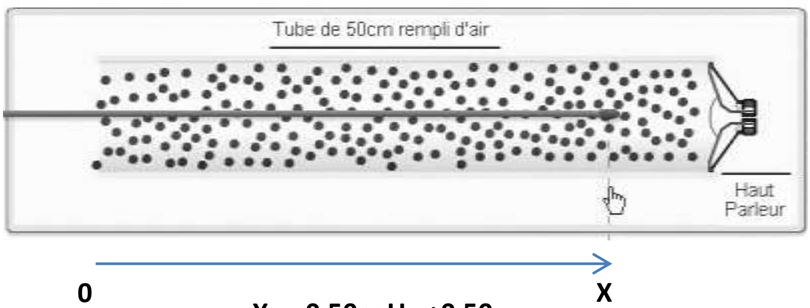
n=0 : fondamental; n=1 : 1^er^ harmonique ; n=2 : 2^ème^ harmonique ; …

C°) Recherche de ventres et de nœuds de vibration de l'air d'un tuyau ouvert/fermé

Dans cette expérience, on a utilisé un micro de très petite taille pour éviter de perturber les ondes incidentes et réfléchies à l'intérieur du tuyau lorsqu'on déplace le micro dans le tuyau. Pour cela, on a utilisé un tuyau ouvert à une extrémité de 50cm de longueur et de 4,42cm de diamètre intérieur (5,05cm de diamètre extérieur). Au niveau de l'extrémité fermée, il y a un haut-parleur qui peut émettre un son pur (sinusoïdal) sur une plage de fréquences allant de 140 à 1400Hz. Le micro électret a une bande passante de 50Hz à 12 000Hz largement suffisante.

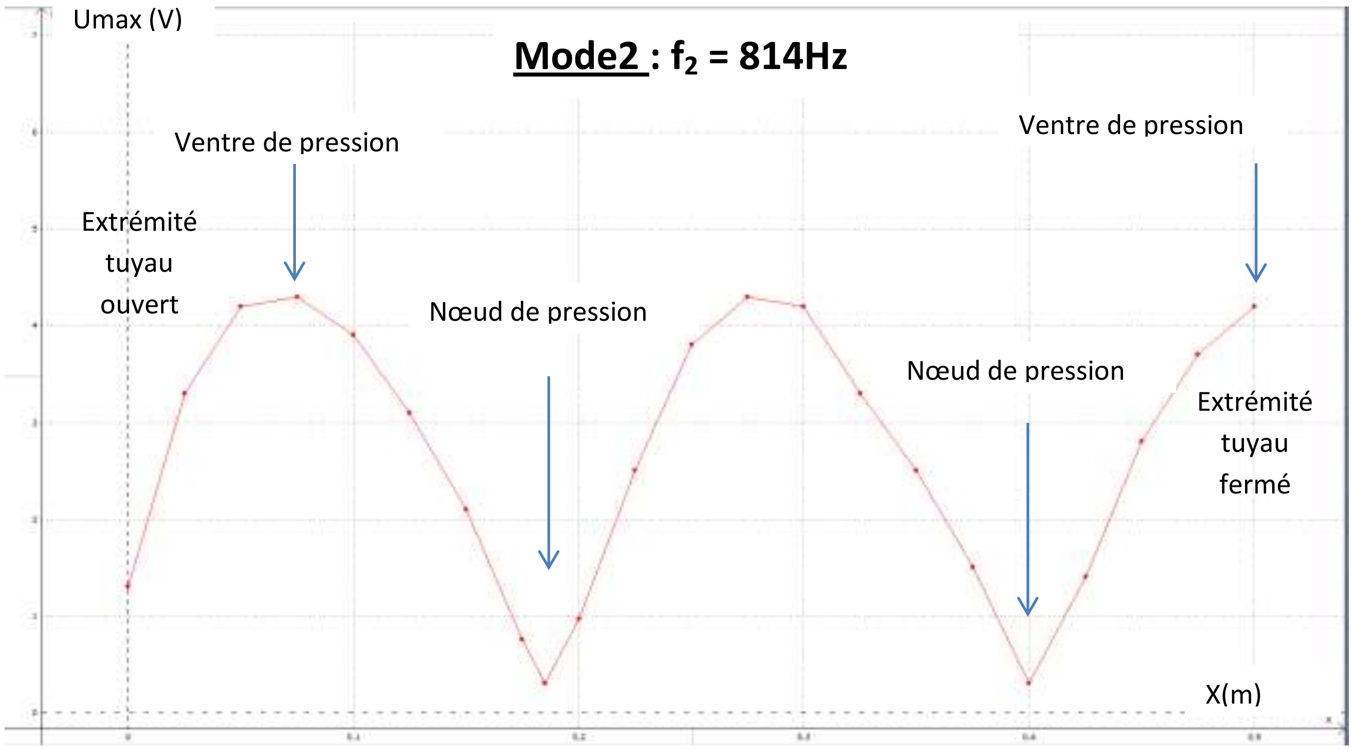
Sur le dispositif, des sorties analogiques permettent de visualiser le signal reçu par le micro, la fréquence f et la tension Ux image de la position du micro (tension variant de 0V à 1V avec la correspondance 0V → micro introduit de 50cm et 1V → micro non introduit).

Pour la fréquence f_2 de résonance (f_2=814Hz), on a déplacé le micro-électret dans le tuyau de 50cm et on a relevé la tension U_{max} du signal sinusoïdal pour chaque position du micro dans le tube par la fonction « mesure automatique » de latispro. La valeur de Ux a été mesurée avec un multimètre en position V_{DC}

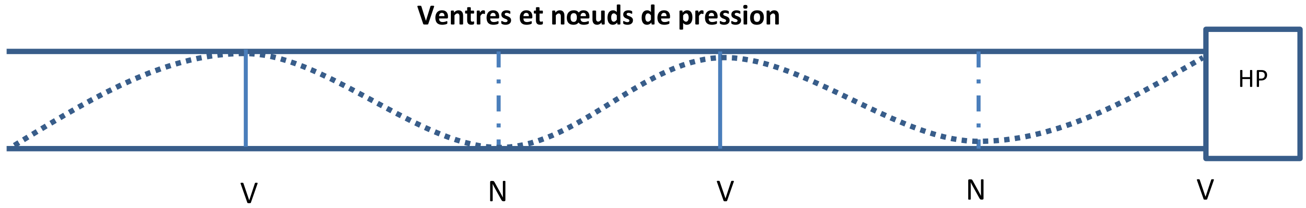


$X = -0{,}50 \times Ux + 0{,}50$

Les résultats sont donnés dans un tableau en ANNEXE 2

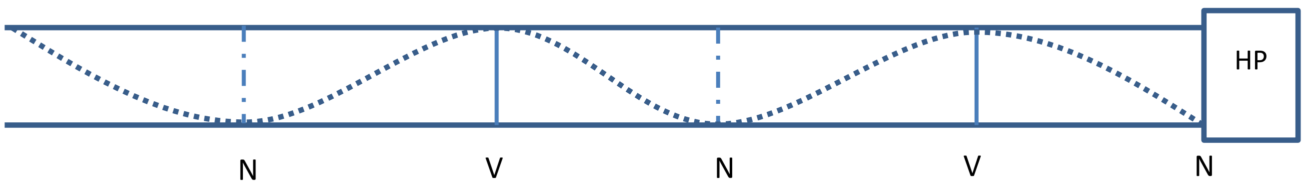


Ventres et nœuds de pression



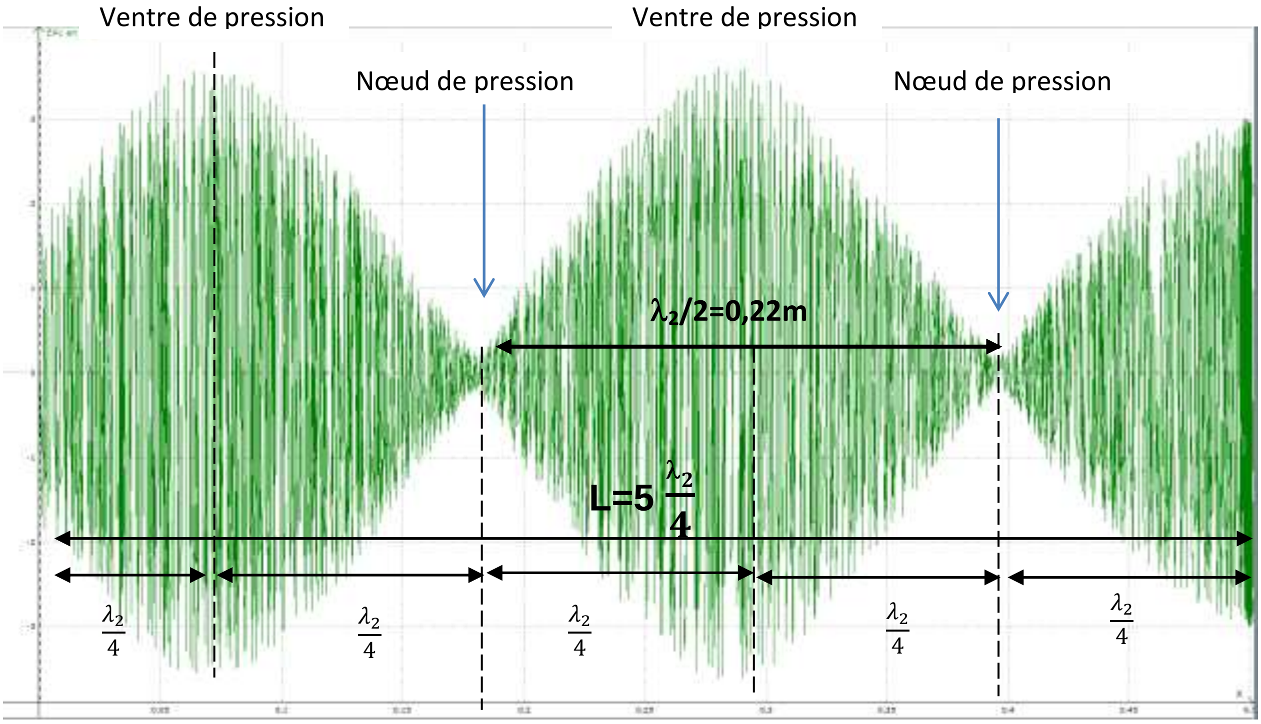
Les ventres et nœuds de pression sont opposés aux ventres et nœuds de vibration de l'air. En effet dans les zones de haute pression, l'air vibre que « très peu », et inversement dans les zones de basse pression l'air vibre « beaucoup ».

Ventres et nœuds de vibration de l'air



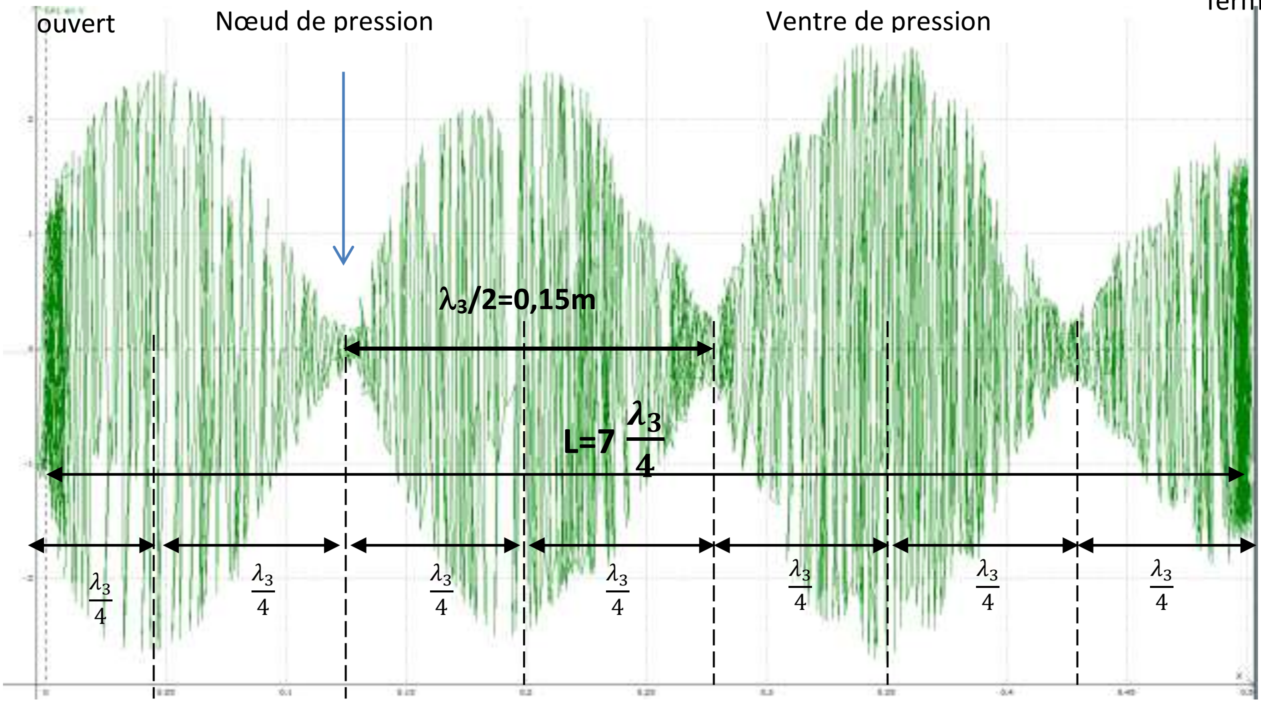
En utilisant le mode « XY » de Latispro, on a pu (EA0←Ux et EA1←tension u(t) au borne du micro), on a obtenu les graphes suivants pour les différentes fréquences en déplaçant simplement le tuyau sur sa coulisse avec la main pendant l'acquisition.

Mode2 : f_2 = 814Hz



Remarque : $\lambda_2 \times f_2$=V=0,44×814=**3,6 ×10^{2}m/s**

Mode 3 : f_3 = 1139Hz



Remarque : $\lambda_3 \times f_3$=V=0,30×1139=**3,4 ×10^{2}m/s**

L'enregistrement des ventres et nœuds de pression permet de remarquer que :

- Dans le mode 2 : la longueur L de la colonne d'air correspond à 5 fois la longueur d'onde λ divisée par 4 : $L = 5 \times (\lambda_2/4)$
- Dans le mode 3 : la longueur L de la colonne d'air correspond à 7 fois la longueur d'onde λ divisée par 4 : $L = 7 \times (\lambda_3/4)$

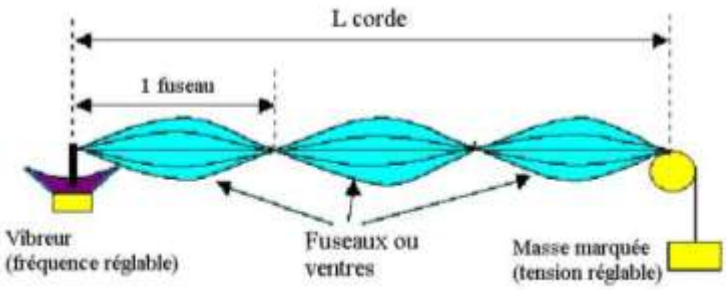
On en déduit que pour un tuyau ouvert/fermé : $\mathbf{L = (2n + 1) \times \frac{\lambda}{4}}$ avec n entier naturel ($n \in \mathbb{N}$)

2°) Modélisation d'une corde de violon

On peut modéliser une corde de violon par une « corde » tendue par une masse marquée à une extrémité et fixée à un vibreur à l'autre extrémité.

On a considéré une corde de 50cm de longueur pour faire le parallèle avec le tuyau étudié précédemment également de 50cm de longueur. Un vibreur, accroché à l'extrémité de la corde horizontale, oscille verticalement à la fréquence f. Cette corde passe dans la gorge d'une poulie pour être tendue à son extrémité par une masse de valeur **M=200g.** Le vibreur est alimenté à l'aide d'un GBF qui délivre une tension alternative sinusoïdale de fréquence f réglable. On a alors fait varier la fréquence des vibrations transversales f jusqu'à l'obtention d'un seul fuseau ample (résonance) qui est le mode de vibration fondamental ou mode 1. Comme on l'a réalisé avec le tuyau sonore, on a augmenté la fréquence f. Pour certaines fréquences particulières (mode 2, mode 3, …), on a obtenu plusieurs fuseaux. Les résultats obtenus sont dans le tableau ci-dessous :

L=50cm



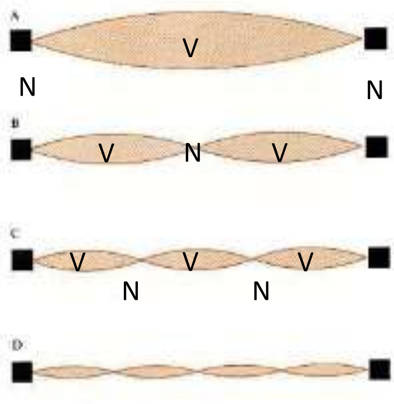
Nombre de fuseaux n	1	2	3	4
Fréquence f(Hz)	**71**	**143**	**216**	**296**
Rapport f_n/f_1	1,0	2,0	3,0	4,2
Longueur d'un fuseau (m)	**0,50**	**0,25**	**1,17**	**0,13**

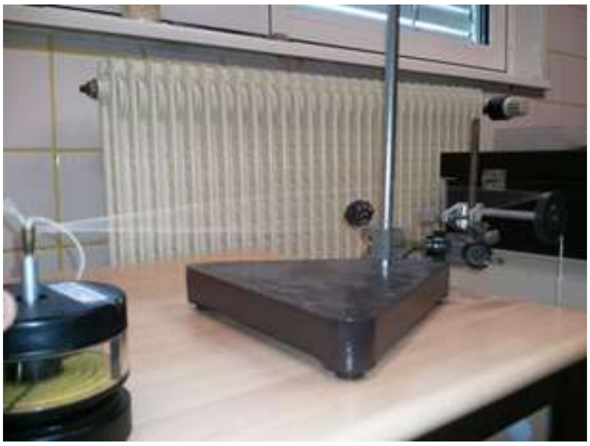
1 fuseau — Mode 1, fondamental

2 fuseaux — Mode 2

3 fuseaux — Mode 3

4 fuseaux — Mode 4





1 fuseau

2 fuseaux

Comme pour les tuyaux étudiés précédemment, on remarque que l'onde stationnaire forme des régions de grandes vibrations et des régions de très faibles vibrations avec des nœuds « N » et des ventres. «V ». Le système nœuds – ventres définit les modes et vibre à la fréquence dite fréquence de résonance. Ils sont indicés par l'entier n ({1,2,...}). Comme pour les tuyaux d'orgue, le premier mode est appelé le mode fondamental, les autres sont les harmoniques.

On remarque donc que les fréquences de résonance propres sont données par :

$$\mathbf{f_n = n \times f_1} \text{ avec n entier naturel > 0}$$

$$\mathbf{L = n \times \lambda/2} \text{ avec n entier naturel > 0}$$

3°) Comparaison des deux modèles

Les résultats obtenus précédemment concordent avec les résultats publiés par D. Bernoulli vers 1740 (Voir ANNEXE 3). Alors que tout semble distinguer un tuyau d'orgue à embouchure de flûte et une corde vibrante puisque dans le premier de l'air vibre longitudinalement alors que dans le second la corde vibre transversalement, on constate que les modélisations conduisent à des résultats similaires. En effet, dans les deux cas, les fréquences propres de résonance sont des multiples entiers de la fréquence f_1 du fondamental. On en déduit que le modèle de la corde vibrante a de fortes similitudes avec le modèle du tuyau d'orgue ouvert/ouvert.

III°) La « hauteur » des jeux

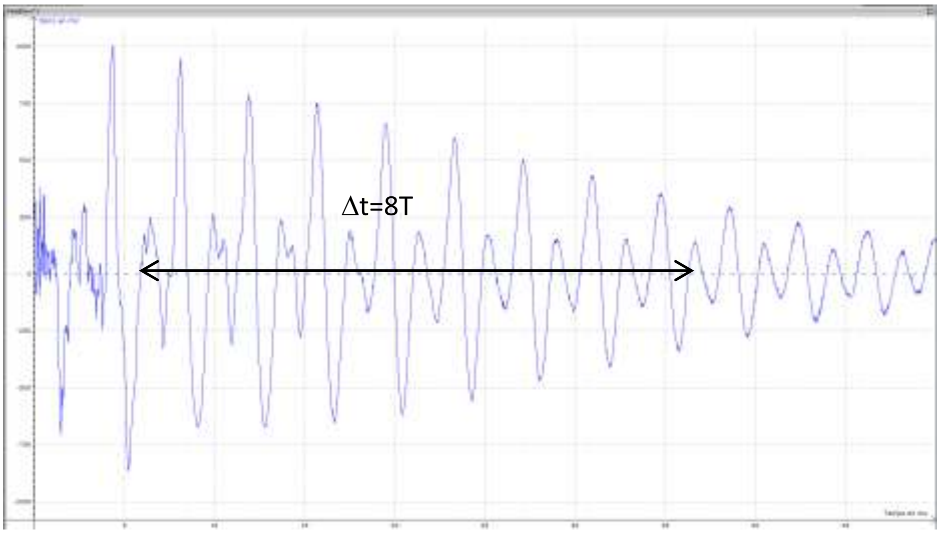
1°) Généralités

La console de l'organiste fait apparaître des « tirants de jeux » permettant de sélectionner un jeu de tuyaux ayant le même timbre (flûte, hautbois, doublette,…) Un orgue peut contenir de 2000 à 4000 tuyaux pour un bel instrument. Aristide Cavaillé-Coll, un des plus éminents facteurs d'orgues français du XIXème siècle**,** avait calculé que sur les instruments romantiques (claviers de 61 touches) dotés de 22 jeux en moyenne, l'organiste disposait de 4 194 303 combinaisons ! Sous chaque « tirant de jeu » figure une étiquette précisant la dénomination du jeu ainsi qu'une indication chiffrée. Elle correspond à la « hauteur » du jeu .La « hauteur » est

liée à la «longueur du tuyau le plus grave du jeu ». Dans cette partie, nous avons souhaité mieux comprendre la notion de « hauteur » d'un jeu en étudiant le modèle théorique du tuyau ouvert/ouvert ainsi que le tuyau d'orgue réel à embouchure de flûte ouvert/ouvert

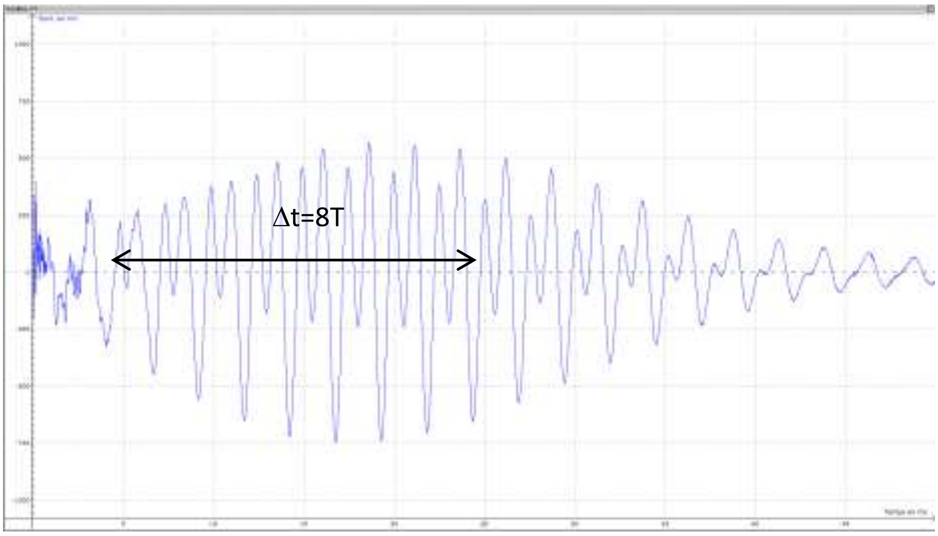
2°) Modèle théorique du tuyau ouvert/ouvert : relation entre longueur et fréquence du fondamental (étude en régime libre)

On a procédé à l'enregistrement de sons générés par un coup porté à l'aide d'un maillet sur des tuyaux en matière plastique de différentes longueurs à une température de 23°C. Pour chacun des tuyaux, on a obtenu l'enregistrement d'un son complexe de fréquence f (fréquence du fondamental) dont l'enveloppe fait apparaitre trois phases « l'attaque du son-le corps du son (très bref ici) et l'extinction » du son. La mesure de la période T a été faite en mesurant une durée $\Delta t=8T$ à l'aide de la fonction réticule du logiciel Latispro. On en a déduit une valeur de T puis de f afin de représenter graphiquement la fréquence f en fonction de la longueur L.



Enregistrement par le micro pour le tuyau de longueur L=62,7cm

La fréquence du son complexe est $2{,}64\times10^{2}$ Hz



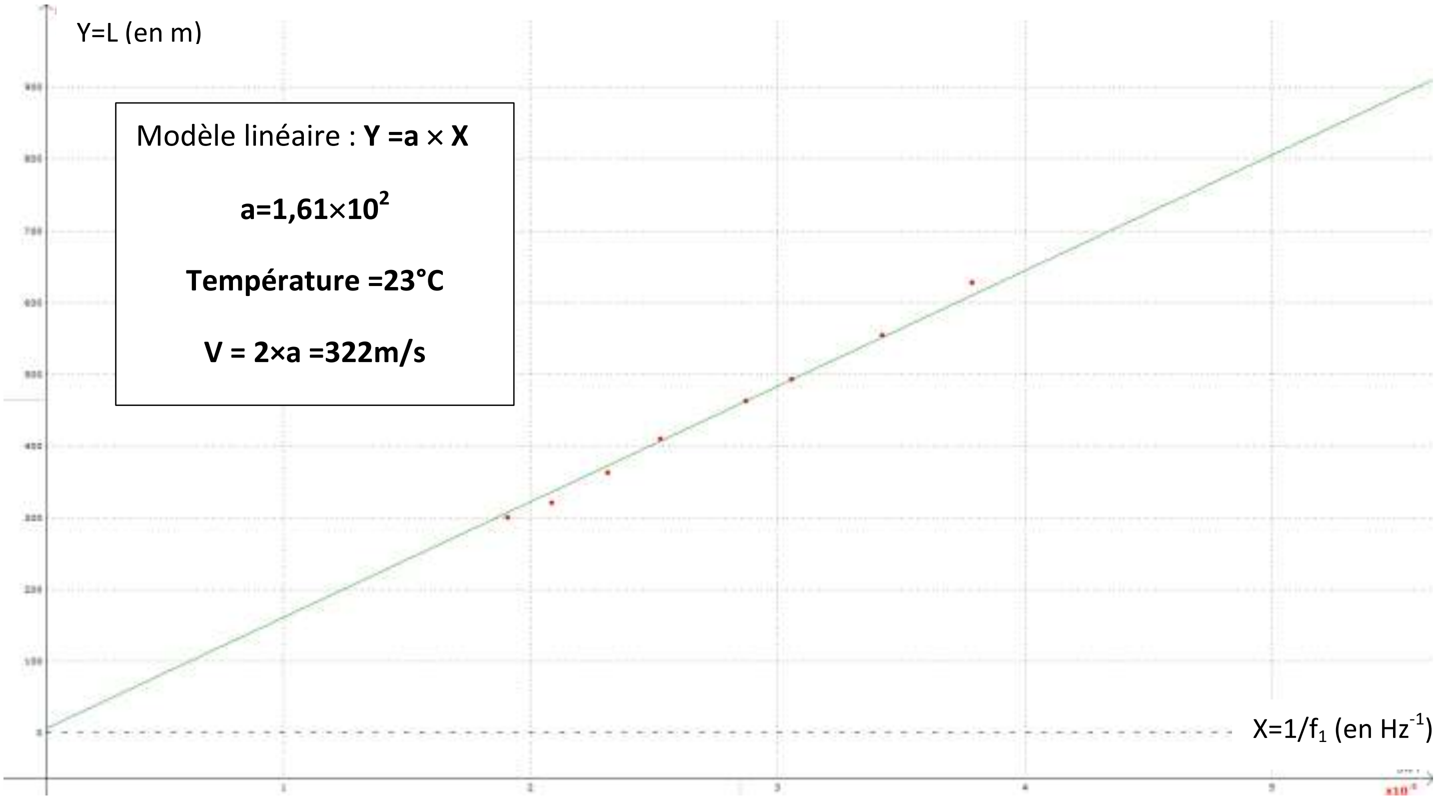
Enregistrement par le micro pour le tuyau de longueur L=40,9cm

La fréquence du son complexe est $3{,}96\times10^{2}$ Hz

Les valeurs obtenues sont indiquée dans le tableau ci-dessous :

Longueur L (m)	**0,627**	**0,554**	**0,492**	**0,462**	**0,409**	**0,362**	**0,320**	**0,300**
Fréquence f_1 du son complexe (ou fondamental) (Hz)	**$2,64\times10^2$**	**$2,92\times10^2$**	**$3,27\times10^2$**	**$3,48\times10^2$**	**$3,96\times10^2$**	**$4,32\times10^2$**	**$4,79\times10^2$**	**$5,24\times10^2$**
Note	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3	Do4

La représentation graphique de L en fonction de $1/f_1$ est donnée ci-dessous. Une étude théorique permet de montrer que la fréquence f et la longueur L d'un tuyau ouvert aux deux extrémités est donnée par :



Une analyse dimensionnelle permet de constater que [a] =[Y]/[X] =[L]*[f] =m/s. Le coefficient directement est homogène à une vitesse en m/s et sa valeur correspond à la moitié de la vitesse (valeur expérimentale) de l'onde sonore sinusoïdale dans le tuyau (ici à la température de 23°C).

$$\mathbf{L = \frac{V}{2} \times \frac{1}{f_1}}$$

L : longueur du tuyau (en m)
f_1: fréquence du fondamental (en Hz)
V : vitesse de propagation du son dans le tuyau (en m/s) (voir ANNEXE 4)

<u>**Conclusion :**</u> **La longueur L d'un tuyau ouvert/ouvert est inversement proportionnelle à la fréquence f_1 du fondamental. Ainsi, plus un tuyau est long, plus la fréquence du fondamental est faible (le son du tuyau est perçu grave). Inversement, plus un tuyau est court, plus la fréquence du fondamental est élevée (le son du tuyau est perçu aigu). La fréquence du fondamental (ou <u>hauteur du son)</u> est directement liée à la longueur L d'un tuyau ici ouvert/ouvert.**

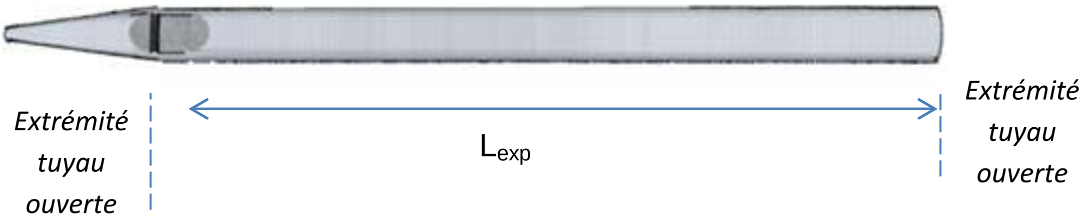
<u>Remarque :</u> En général, la longueur théorique L d'un tuyau est calculée à partir de la vitesse théorique V_{th} du son par les facteurs d'orgues. V_{th} est obtenue à partir de l'expression établie à partir du modèle du gaz parfait avec l'air assimilé à un gaz diatomique (γ=1,4)

$$\mathbf{V_{th}=(\gamma R\theta/M)^{1/2}}$$

où R=8,32 SI est la constante des gaz parfaits, θ la température de l'air en kelvin, M=0,029kg/mol la masse molaire de l'air en kg/mol. A 23°C, on obtiendrait : $V_{th}=(1{,}4\times 8{,}32\times 296/0{,}029)^{1/2}=\mathbf{3{,}4\times 10^2\ m/s}$

3°) Qu'en est-il pour les tuyaux d'orgue à embouchure de flûte ouvert/ouvert ?

Dans cette partie, nous avons souhaité vérifier si la longueur réelle L_{exp} des tuyaux ouvert/ouvert d'un orgue correspond bien à la longueur théorique attendue et calculée à partir de la relation obtenue précédemment en III.2°) avec le modèle théorique (relation de Bernoulli –ANNEXE 3)



Les mesures de longueur ont été réalisées dans les ateliers du facteur d'orgues Guerrier de Willer (68). M. Guerrier nous a mis à disposition une série de tuyaux et un « mannequin ». Nous avons mesuré la longueur L_{exp} d'une série de tuyaux du jeu appelé salicional afin de comparer leur longueur à la longueur théorique L attendue.

Série de 5 tuyaux de la famille « Salicional » monté sur un mannequin ➔

Pour chaque tuyau, nous avons mesuré le diamètre D avec un pied à coulisse, la longueur L (du biseau à l'extrémité supérieure du tuyau). La fréquence f_1 du son complexe (fondamental) a été mesurée directement avec Latispro.

Les résultats obtenus sont les suivants : **Température=20,6°C** – Pression du vent **P= 89 mmWs (mm hauteur d'eau)**

Tuyau	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Fréquence f_1 (Hz) (fondamental)	**274**	**290**	**305**	**325**	**346**
Longueur mesurée L_{exp} (m)	**0,563**	**0,532**	**0,505**	**0,472**	**0,442**
Longueur théorique calculée L = Vth/2f1 (m)	0,627	0,592	0,563	0,528	0,496
D (m)	**0,034**	**0,032**	**0,031**	**0,030**	**0,029**

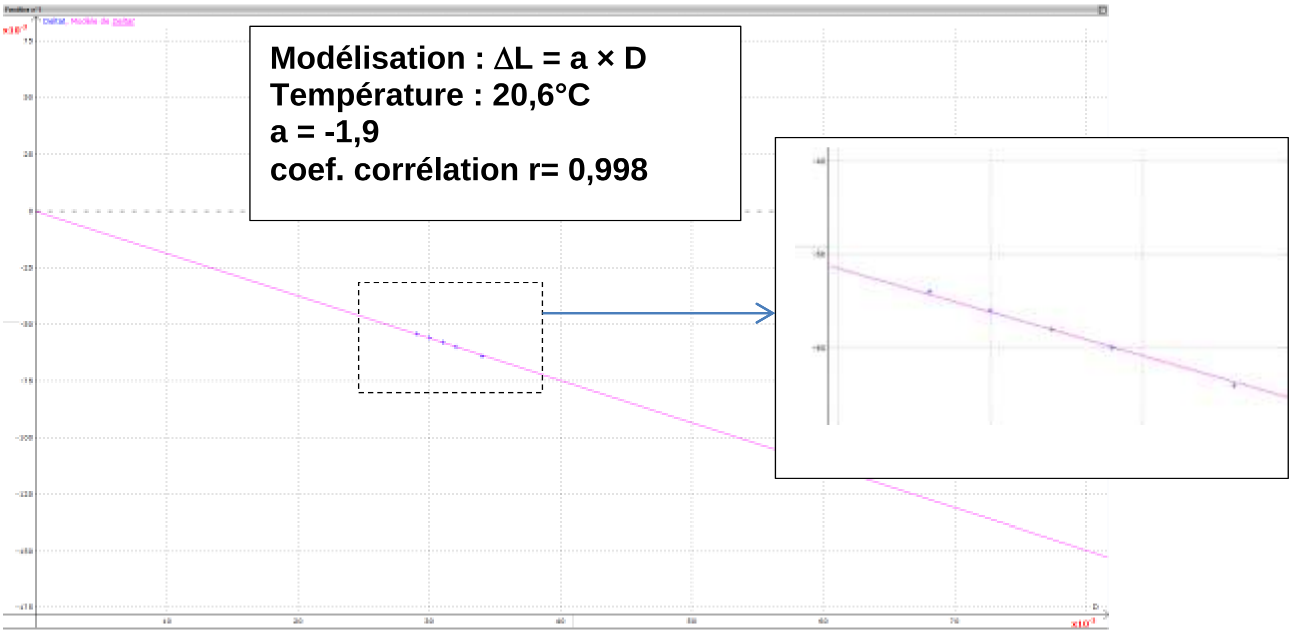
Nous avons comparé les longueurs mesurées L_{exp} aux longueurs théoriques attendues **$L = V_{th}/2f_1$** où la vitesse théorique est $V_{th} = (1{,}4\times 8{,}32\times(273+20{,}6)/0{,}029)^{1/2}$=**$3{,}4\times 10^2$ m/s**

Suite à ces mesures, nous avons constaté que la longueur réelle L_{exp} des tuyaux était différente de plusieurs cm par rapport aux valeurs attendues et que L_{exp} était, pour chaque tuyau, diminuée approximativement et systématiquement du double du diamètre intérieur du tuyau par rapport à la longueur théorique L attendue (et prévue par la théorie de Bernoulli)! Pour cette raison, nous avons représenté $\Delta L = L_{exp} - L$ en fonction du diamètre intérieur D.

Tuyau	1	2	3	4	5
$\Delta L = L_{exp}$-L(m)	**-0,064**	**-0,060**	**-0,058**	**-0,056**	**-0,054**
D(m)	**0,034**	**0,032**	**0,031**	**0,030**	**0,029**

Nous avons ensuite représenté graphiquement ΔL en fonction de D

Puis nous avons procédé à la modélisation suivante : **$\Delta L = a\times D$**



Persévérant dans notre démarche, nous avons découvert que le **23 janvier 1860**, Aristide Cavaillé-Coll – célèbre facteur d'orgues parisien du XIXème siècle- avait fait part de ses observations à l'Académie des Sciences de Paris. En substance, il avait dit :

« Dans une série d'expériences faites en vue de déterminer exactement les sons harmoniques des tuyaux d'orgues […], j'ai reconnu que le diamètre du tuyau n'avait aucune influence sur la longueur des subdivisions de la colonne d'air (longueur d'onde) , mais que la partie contiguë à l'embouchure subissait, au contraire, <u>un raccourcissement d'autant plus grand que le diamètre D du tuyau était plus considérable</u>. »

Cette affirmation, observée par Bernoulli lui-même et par les physiciens qui ont étudié la question après lui, avait porté les théoriciens à faire abstraction de l'embouchure des tuyaux pour ne considérer que des tubes complètement ouverts aux deux bouts, ou bien entièrement fermés d'un seul côté. De cette manière on mettait la théorie en accord avec l'expérience ; mais ce genre de tubes sans embouchure ne pouvait recevoir aucune application dans la facture d'orgues ! Ainsi en considérant des tuyaux ouverts complètement d'un côté et ouverts de l'autre mais avec embouchure de flûte, Aristide Cavaillé-Coll est arrivé à l'affirmation suivante :

« La longueur des tuyaux d'orgue est égale à la longueur prévue par la théorie de Bernoulli diminuée de deux fois la profondeur P du même tuyau »

$$L_{exp} = L - 2P = \frac{V_{th}}{2f_1} - 2P$$

Vth= vitesse théorique du son (m/s)
f_1= fréquence du mode 1 (fondamental)
P= profondeur en m
Nous avons donc essayé de comprendre la notion de profondeur évoquée par Cavaillé-Coll.

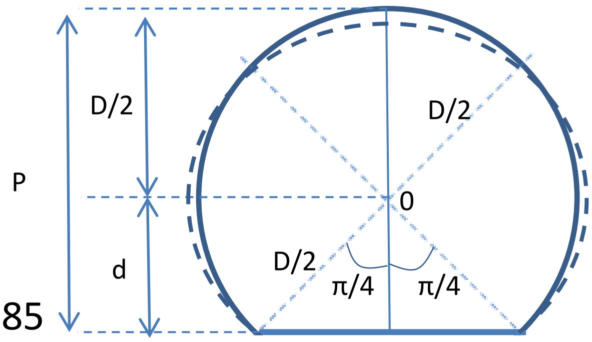
Selon Cavaillé–Coll « **L'aplatissement de la bouche des tuyaux cylindriques, qui est habituellement du quart de la circonférence du tuyau, forme une corde sous-tendant un arc égal aux 3/4 de cette même circonférence. C'est ici la moyenne des perpendiculaires abaissées de cette corde sur l'arc opposé qui doit être prise pour la profondeur P. Or, cette moyenne peut être représentée sans erreur sensible par les 5/6 (=0,83) du diamètre** »

Nous avons calculé la profondeur pour comprendre

l'origine du coefficient 5/6 :

$$P = D/2+d = D/2 + (D/2)\cos(\pi/4)$$

D'où $P = (D/2)(1+\sqrt{2}/2) = D(1/2 + \sqrt{2}/4) = D \times 0{,}85$



Cette relation est valable si on considère que le tuyau reste parfaitement cylindrique au niveau de la bouche après aplatissement de celle-ci. D'après le facteur d'orgues Guerrier que nous avons rencontré, le tuyau n'est plus rigoureusement cylindrique car l'aplatissement de ¼ de la circonférence du tuyau provoque un léger écrasement du tuyau qui se trouve déformé à ce niveau et conduisant a fortiori à une profondeur P un peu plus petite que celle calculée ci-dessus. Cavaillé-Coll parle à juste titre de « moyenne » pour le calcul de cette profondeur en considérant probablement une forme elliptique et non circulaire lorsqu'on observe la coupe du tuyau au niveau de la bouche.

$$P = D \times 0{,}83 = 5D/6 \text{ (selon Cavaillé-Coll)}$$

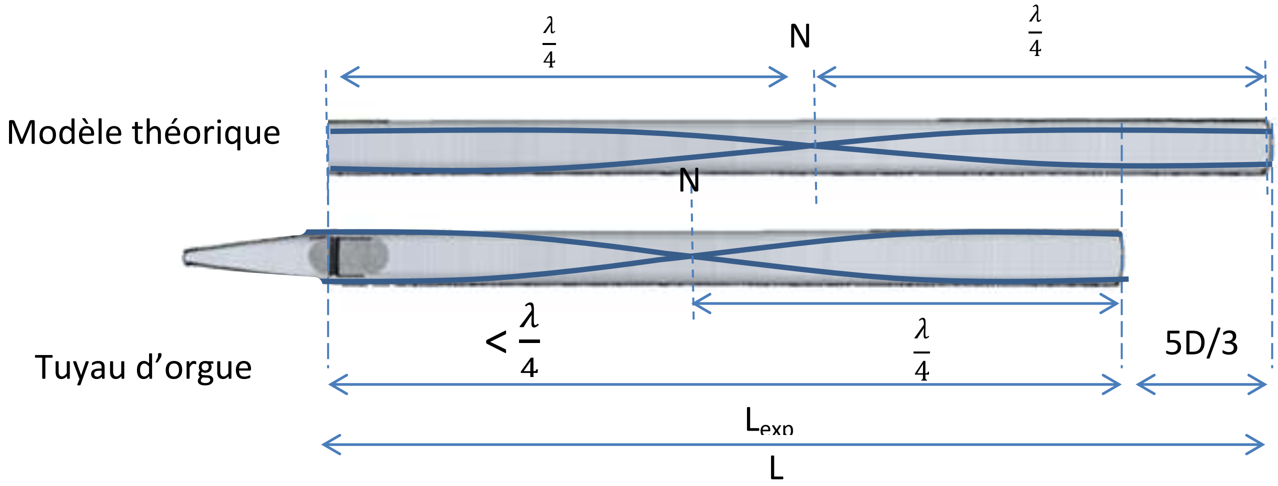
On en déduit que la longueur réelle d'un tuyau est :

$$L_{exp} = \frac{V_{th}}{2f_1} - \frac{5}{3} \times D = L - \frac{5}{3} \times D$$

$$\text{D'où } \Delta L = -\frac{5}{3} D = -1{,}7\, D$$

Cette relation est cohérente avec le résultat de la modélisation obtenu précédemment : $\Delta L = -1{,}9$ D. Cependant, il est difficile de comparer les règles de facture d'orgues utilisées par Cavaillé-Coll avec celles des autres facteurs d'orgues. En effet, les tuyaux utilisés au cours de notre expérience sont des tuyaux classés « Monument Historique » et attribués au facteur d'orgues **Rinkenbach Frères** datant de 1867 (orgue de Tagsdorf-68). Il ne s'agit pas de tuyaux construits scrupuleusement selon les règles établies par Cavaillé-Coll. L'aplatissement au niveau de la bouche peut être différente d'un facteur d'orgues à l'autre ce qui entraine des différences au niveau de la profondeur P et donc au niveau de la longueur du tuyau pour une même fréquence du fondamental (ton du tuyau).

Pour autant, tous les facteurs d'orgues ont des pratiques proches de celles du maître Cavaillé-Coll et savent que la longueur réelle L d'un tuyau d'orgue ouvert avec embouchure de flûte correspond à la longueur théorique L prévu par Bernoulli pour un tuyau ouvert/ouvert diminué d'un peu moins du double du diamètre intérieur du tuyau (diamètre mesuré à l'extrémité supérieur du tuyau).



Dans le mode 1, par exemple, la position du nœud de vibration est déplacé de 2P=5D/3 mais la longueur d'onde reste inchangée.

<u>Remarque :</u> Les règles établies par Cavaillé-Coll lui ont permis d'industrialiser sa fabrication d'instruments :

« La facilité des calculs de cette formule m'a permis de mettre entre les mains de mes plus simples ouvriers accordeurs des Tables et des règles où sont indiquées les vraies longueurs d'ondes sonores, et au moyen desquelles ils peuvent, par une simple opération d'arithmétique ou seulement de compas, déterminer directement et avec une exactitude rigoureuse la longueur normale des tuyaux pour le son fondamental, la position des nœuds de vibrations pour les sons harmoniques »

4°) Influence de la pression P du vent entrant dans un tuyau

L'étude expérimentale des tuyaux à embouchure de flûte présente des difficultés presque insurmontables quand il s'agit de flûtes soufflées à la bouche par un musicien. Ces difficultés sont éliminées pour le tuyau d'orgue quand on dispose d'une alimentation d'air stable et régulière. Dans cette expérience, nous avons souhaité vérifier l'influence de la pression sur la fréquence des harmoniques du son. La pression a été mesurée avec un pressiomètre électronique au niveau de la base du tuyau.

Les facteurs d'orgue mesurent la pression (relative) en mmWs (mm de hauteur d'eau)

1 mmH_2O=9,80638 Pa.

Nous avons mesuré les fréquences du fondamental et des harmoniques avec Latispro pour un tuyau appartenant au jeu appelé « Doublette » (jeu de taille moyenne).

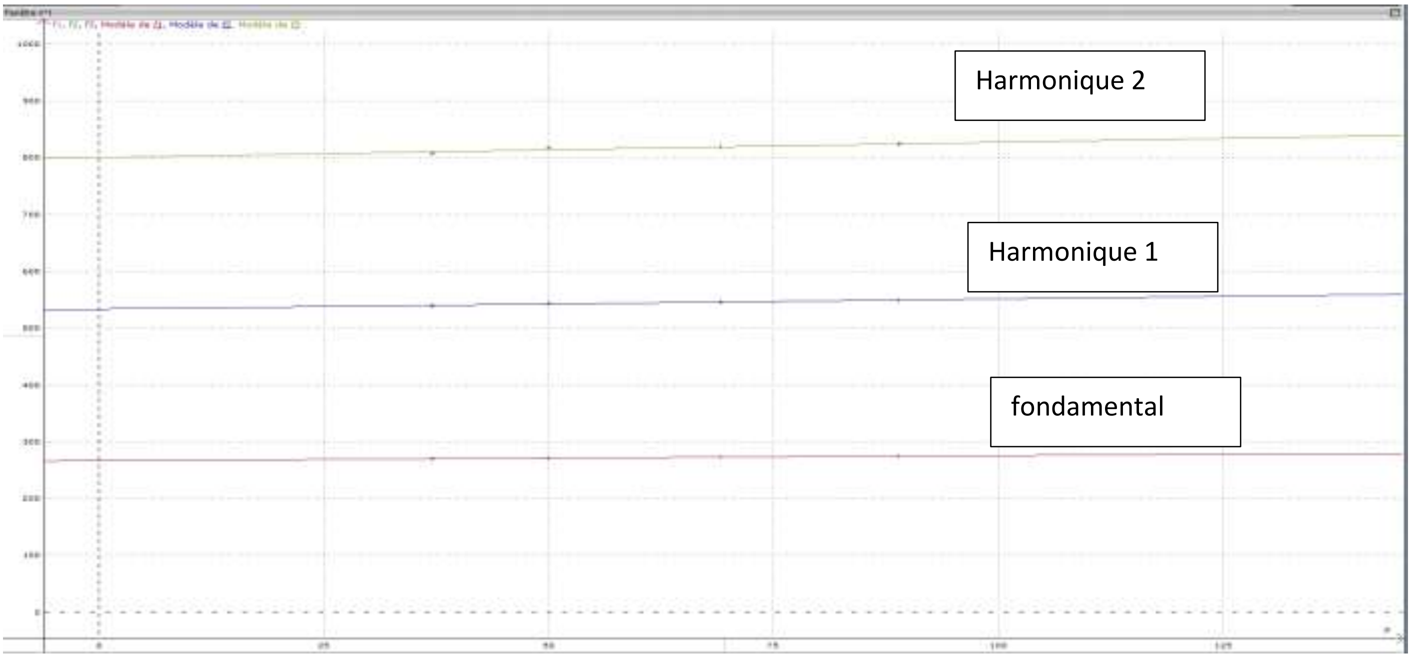
La pression a été modifiée en changeant la masse ou la position des masselottes positionnées sur le soufflet (réservoir à air sous pression).

Voici les résultats obtenus :

Pression (mmH_2O)	37	50	69	89
Pression en Pa	$3{,}6.10^2$	$4{,}9.10^2$	$6{,}8.10^2$	$8{,}7.10^2$
Fondamental (Hz)	269,3	272,3	272,9	274,5
Harmonique 1(Hz)	538,6	544,6	545,8	549
Harmonique 2(Hz)	807,9	816,9	818,7	823,53

Pressiomètre

Soufflet sous pression permettant d'alimenter en « vent » les tuyaux



Sur la plage de variation de la pression, nous avons constaté que la fréquence pouvait être modélisée de la façon suivante :

f= a × P + b (fonction affine)

Résultats :

Fondamental :	f_1= 0,090 × P + 267	$\Delta f_1/\Delta P$=0,090
Harmonique 1 :	f_2= 0,179 × P + 534	$\Delta f_2/\Delta P$=0,179
Harmonique 2 :	f_3= 0,269 × P + 800	$\Delta f_3/\Delta P$=0,269

On en déduit que la pression a une influence sur la fréquence du fondamental et des harmoniques et que l'influence de cette pression P est d'autant plus marquée que l'on progresse dans les harmoniques. La pression est donc un paramètre important lors de l'harmonisation d'un orgue puisque la longueur théorique des tuyaux L dépend de la fréquence du fondamental et donc de la pression.

Calculons la longueur théorique L du tuyau de la « Doublette » donnée par la loi de Bernoulli à différentes pressions.

Température t(°C)=20,6°C ; V_{th}=3,4×10^2 m/s

Pression (mmH_2O)	37	50	69	89
Fondamental (Hz)	269,3	272,3	272,9	274,5
L= $V_{th}/2f_1$ (cm)	63,1 cm	62,4cm	62,3cm	61,9cm

On constate que pour le tuyau étudié (« Doublette »), la longueur théorique peut varier de 1,2cm sur la plage de pression (37 à 89 mmH_2O). Pour cette raison, le facteur d'orgues « harmonise » les tuyaux d'orgues non pas en atelier (pression de travail =89mmH_2O) mais directement sur site. D'un orgue à l'autre, d'un facteur d'orgues à l'autre, d'une époque de construction à une autre…la pression dans les sommiers peut être différente (entre 50 et 100mmH_2O).

La longueur réelle des tuyaux dépendra donc directement de cette pression.

5°) Principe d'organisation des jeux

Plus un tuyau est court, plus il émet des sons aigus et inversement, plus un tuyau est long et plus il émet des sons graves. Chaque jeu de tuyaux porte un nom qui caractérise sa sonorité (son timbre), et ce nom est accompagné de la « hauteur » en pieds (**un pied** « royal » vaut **324,84mm**): **8' (*8 pieds*)** par exemple. Cela signifie que le tuyau <u>le plus grave</u> d'un jeu donné de tuyaux mesure 8×0,3248=2,59m (*cas d'un tuyau à embouchure de flûte ouvert/ouvert*).

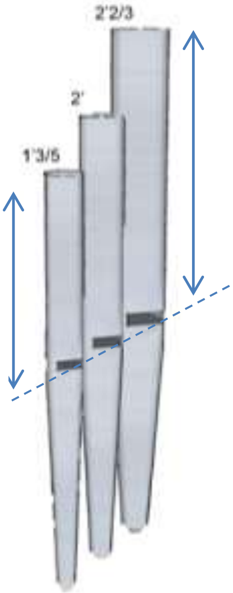
Cette indication correspond à une longueur théorique L du tuyau mais pas à la longueur réelle du tuyau d'orgue !

Pour un jeu de :

32 pieds:	10,38m
16 pieds:	5,19m
8 pieds:	2,59m
4 pieds:	1,30m
2 pieds 2/3:	0,86m
2 pieds:	0,65m
1 pied	0,32m

Longueur théorique du tuyau (ouvert/ouvert) le plus grave

« Hauteur » théorique



Chaque jeu permet, par excitation des fondamentaux de la série des tubes le constituant, d'obtenir une suite ascendante de notes jouées depuis les touches du clavier. Idéalement, il y a autant de tubes que de touches sur le clavier. Le tube le plus long de la série, dont la longueur est exprimée en pieds possède un fondamental qui sonne en do (ut) quand on enfonce la première touche, située tout à gauche du clavier.

C'est le do n°2 pour une jeu de 4 pieds
C'est le do n°1 pour un jeu de 8 pieds
C'est le do n°0 pour un jeu de 16 pieds
C'est le do n°-1 pour un jeu de 32 pieds

notation		Octave							
latine	anglo-saxonne	-1	0	1	2	3	4	5	6
do (ut)	C	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00
do #	C #	17,32	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46
ré	D	18,35	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32
ré #	D #	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02
mi	E	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02
fa	F	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83
fa #	F #	23,12	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96
sol	G	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96
sol #	G #	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44
la	A	27,5	55	110	220	440	880	1760	3520
la #	A #	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31
si	B	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07

(fréquences en hertz)

Supposons que le jeu mis en service soit une « Montre » de 8 pieds (longueur théorique L=8×0,32484=2,59m). Puisque ce tuyau est à embouchure de flûte (tuyau ouvert/ouvert), la première note –à 23°C- est un do (ut) de fréquence :

$$f_1 = V_{th}/2L = 340/(2\times8\times0{,}32484) = \mathbf{65{,}4\ Hz}$$ (do n°1 des musiciens)

d'où :

Harmonique 1 : $f_2=2\ f_1$ =**130,8Hz** (do n°2 qui sonne à l'octave du do n°1)
Harmonique 2 : $f_3=3\ f_1$ =**196,3Hz** (Sol n°2 qui sonne à la quinte du do n°2)
Harmonique 3 : $f_4=4\ f_1$ =**261,7Hz** (do n°3 qui sonne à l'octave du do n°2)
Harmonique 4 : $f_5=5\ f_1$ =**327,1Hz** (mi n°3 qui sonne à la tierce du do n°3)

Donc , si l'on veut que l'instrument sonne juste :

➔ le tube qui va chanter le do n°2 devra avoir un fondamental qui vibre à 130,8Hz. Il va mesurer 4 pieds (valeur théorique).

➔le tube qui va chanter le sol n°2 devra avoir un fondamental qui vibre à 196,3Hz. Il va mesurer 2 pieds 2/3 (valeur théorique).

➔ le tube qui va chanter le sol n°1 devra avoir un fondamental qui vibre à 98,0Hz. Il va mesurer 5 pieds 1/3.(valeur théorique)

➔etc…

De proche en proche, on peut donc en déduire la longueur théorique de tous les tubes qui donnent la gamme établie à partir du do.

<u>Remarque:</u> Pour les tuyaux à embouchure (bois ou métal), il existe différentes manières de réaliser l'accord :

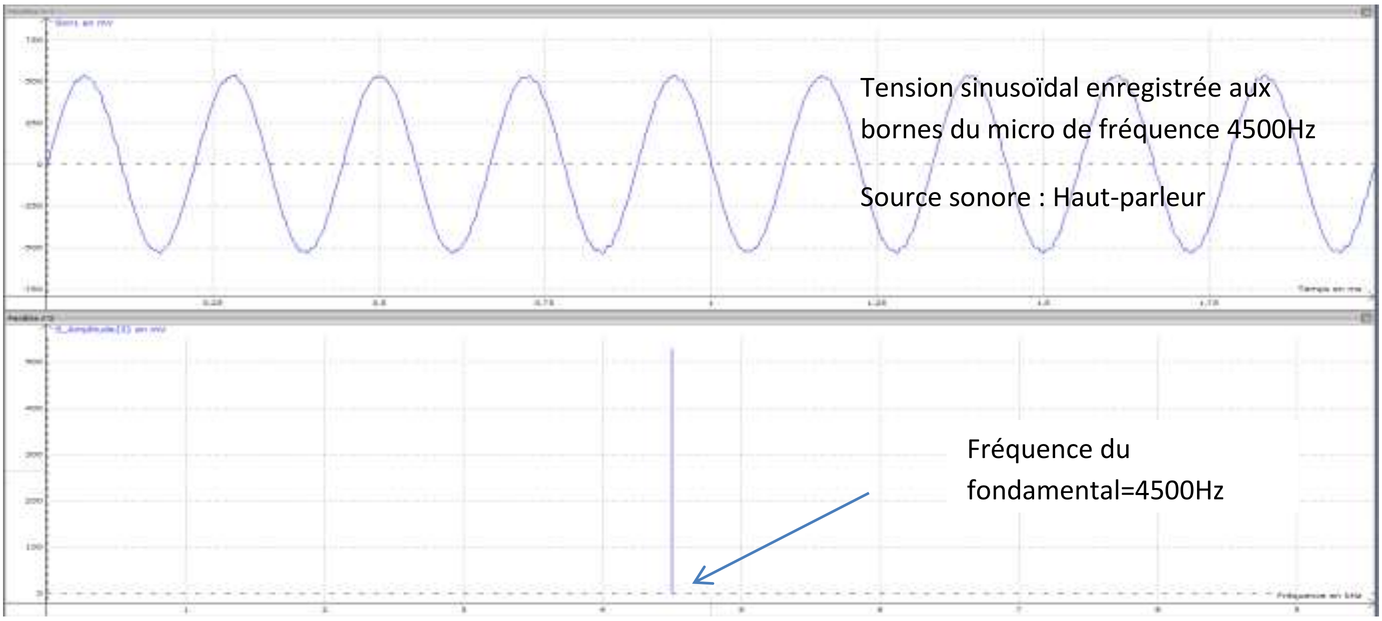
-Déplacer un tampon dans les tuyaux carrés en bois et fermés
-Monter ou descendre la planchette d'accord dans les tuyaux carrés en bois et ouverts
-Enrouler ou dérouler l'encoche d'accord des tuyaux en métal ouverts
-Monter ou descendre la calotte mobile des tuyaux en métal fermés.

IV°) Analyse de Fourier de sons musicaux

Le mathématicien **Joseph Fourier (1768-1830)** démontra qu'un seul signal périodique pouvait être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux appelés les harmoniques.

1°) Cas d'un son pur

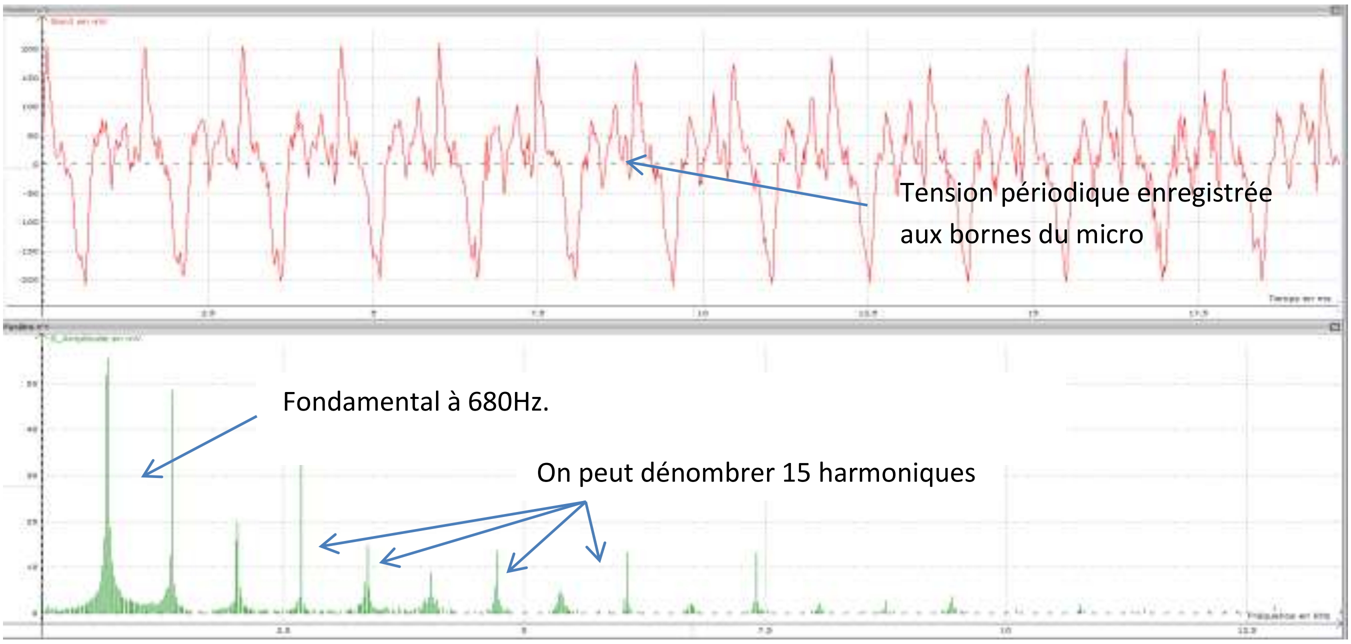
Un son comportant un seul harmonique (fondamental pour le musicien ou 1er harmonique pour le physicien) est appelé son pur. Il s'agit d'une onde sonore sinusoïdale.



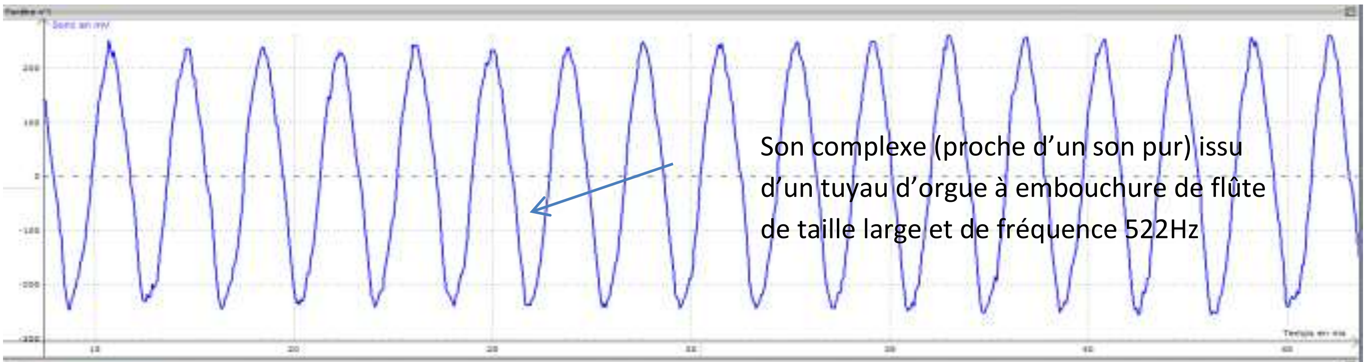
2°) Cas d'un son musical complexe :

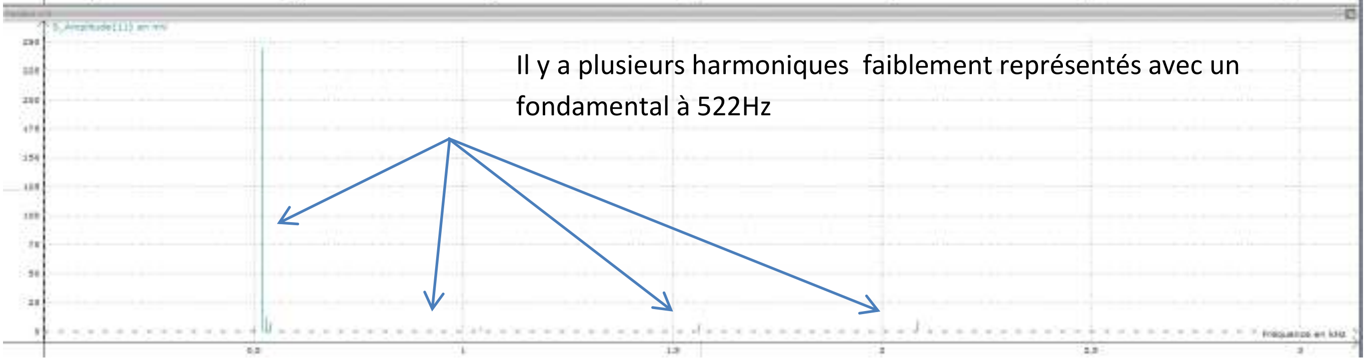
Un son comprenant plusieurs harmoniques est appelé son complexe. Il n'est pas sinusoïdal. La fréquence du son complexe est celle de son fondamental)

A°) Exemple du violon : corde frottée avec archet –note jouée mi4 (f=680Hz)



B°) Exemple d'un tuyau d'orgue à taille large : le bourdon (f=522Hz)





Conclusion : L'analyse de Fourier des différents sons complexes révèle que le son musical d'un violon est très riche en harmoniques (plus de 10 harmoniques avec la note de fréquence 680Hz-mi4) et qu'au contraire le son musical d'un tuyau à embouchure de flûte est très pauvre en harmoniques. Le spectre fait apparaître essentiellement le fondamental ce qui explique que la forme d'onde est proche de la forme sinusoïdale (son quasi pur).

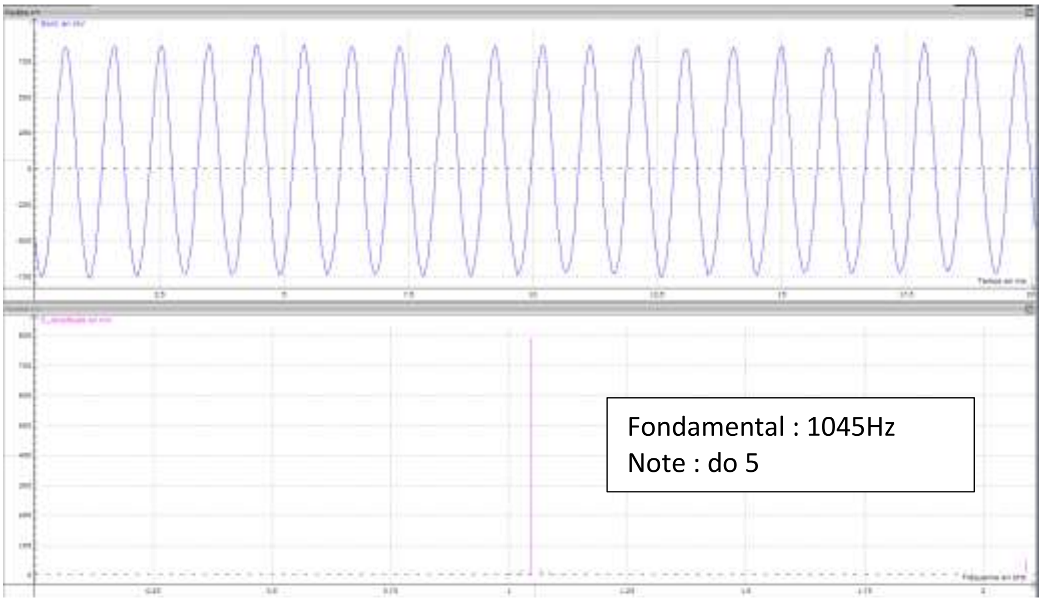
V°) Comment peut-on augmenter la richesse harmonique d'un jeu d'orgue ?

1°) Influence de la « taille » des tuyaux à embouchure de flûte

Les orgues anciens ne sont pas accordés à 440Hz mais souvent en dessous. L'orgue étudié est accordé à 435Hz. Les fréquences sont donc décalées par rapport au tableau de correspondance « fréquence-note de musique » de la page 23. Les enregistrements ci-dessous ont été réalisés sur **l'orgue Joseph Callinet de Dannemarie** (68). Cet instrument a été construit en **1846** par **Joseph Callinet** qui appartient à une des plus importantes dynasties de facteurs d'orgues alsaciens du XIXème siècle. Le buffet est classé Monument Historique et l'accès à la tuyauterie a été difficile (instrument sur deux étages !) Pour réaliser l'enregistrement, nous avons utilisé une perche au bout de laquelle était fixé le micro. Cela a permis de s'approcher des tuyaux à l'intérieur du buffet très profond.

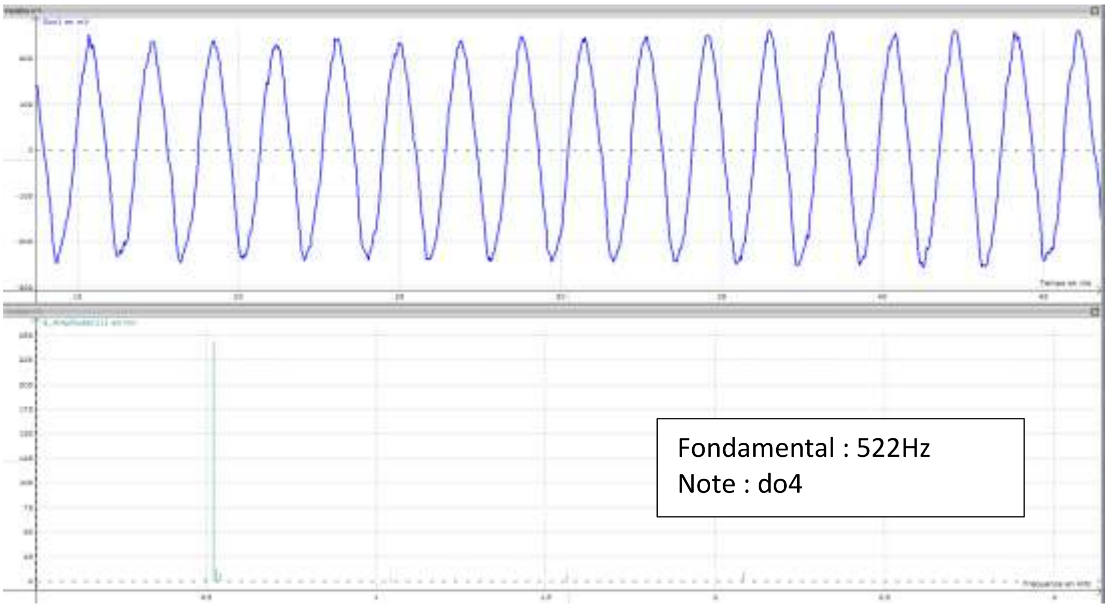
A°) <u>Richesse harmonique des jeux à taille large (flûtes, bourdons)</u>

<u>Exemple :</u> Tuyau de **flûte** <u>en métal</u> appartenant au jeu « **Flûte 4'** » (tuyau d'orgue ouvert/ouvert)



Le timbre de cette flûte fait apparaître un seul harmonique en l'occurrence le fondamental à une fréquence de 1045Hz.

<u>Exemple :</u> Tuyau de bourdon <u>en bois</u> appartenant au jeux « **bourdon 8'** » (tuyau ouvert/fermé par un tampon)



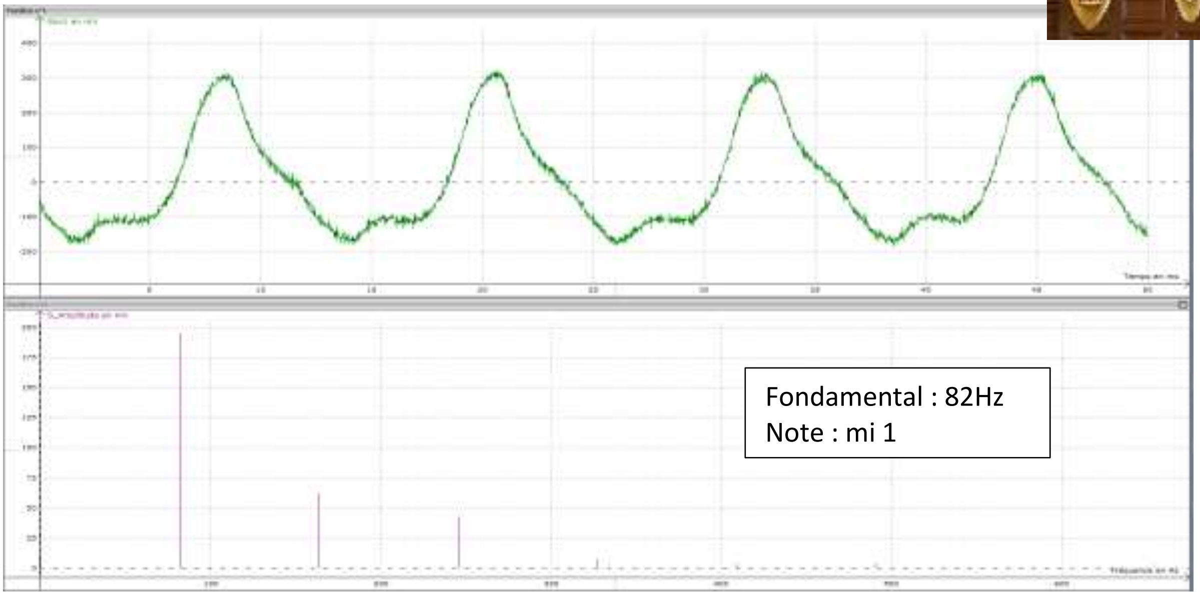
Le timbre de ce bourdon fait apparaître un seul harmonique en l'occurrence le fondamental à une fréquence de 522Hz.

Les jeux à taille large comme les flûtes , les bourdons…encore appelés les « jeux flûtés » sont très pauvres en harmoniques. Leur timbre est proche de celui d'un son pur.

B°) Richesse harmonique des jeux à taille moyenne (Montres, Prestants)

Exemple : Tuyau de **Montre** (ouvert/ouvert) en métal appartenant au jeu « **Montre 16’** ».

Il s’agit d’un des jeux les plus esthétiques et les plus importants de l’orgue. On l’appelle « Montre » parce que précisément c’est un jeu qui se montre ! Il se trouve en façade. On dit qu’il appartient à la famille des principaux ou tuyaux à taille moyenne. Pour accéder à ces tuyaux, nous avons utilisé une échelle posée en façade en veillant à ne pas abîmer le buffet vernis. De la feutrine était positionnée à l’extrémité de l’échelle posée contre la boiserie.

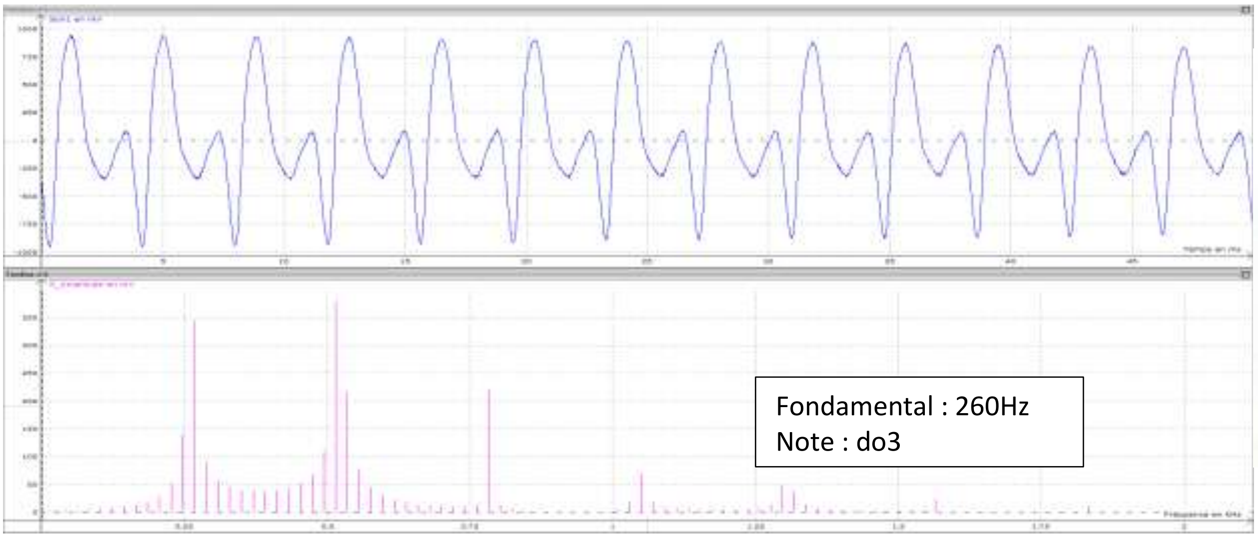


Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte plusieurs harmoniques (essentiellement 3 : **82Hz, 164Hz ; 246Hz**)

Les jeux à taille moyenne comme les montres , les prestants…encore appelés les « jeux principaux » sont plus riches en harmoniques que les jeux flûtés.

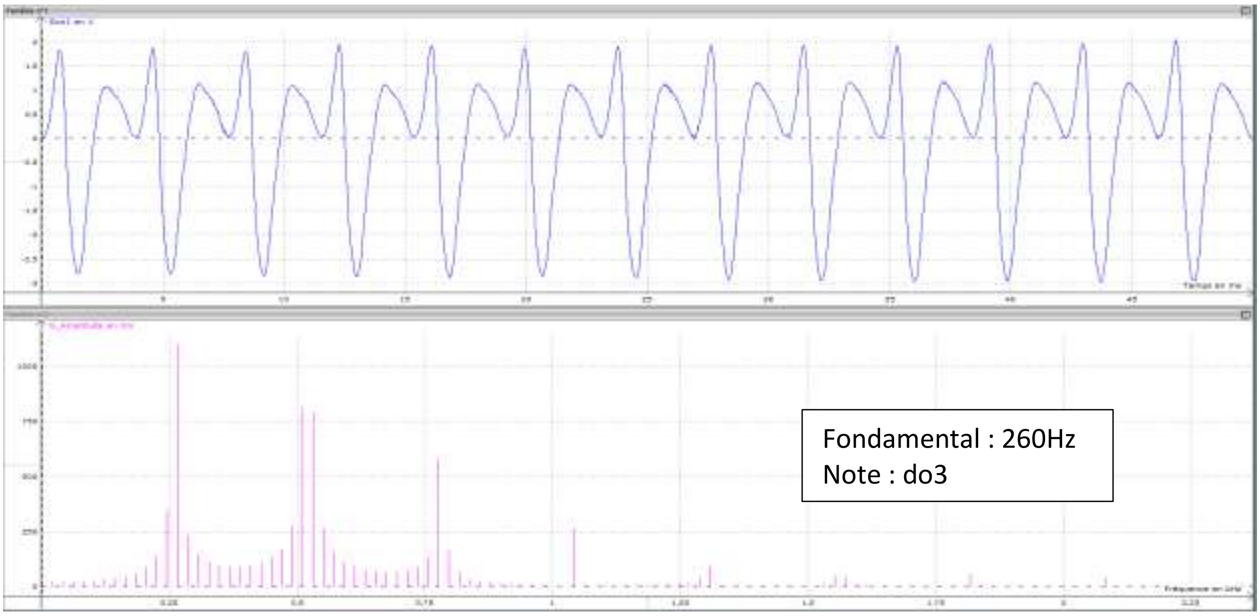
C°) Richesse harmonique des jeux à taille étroite (Salicional, Gambe)

Exemple : Tuyau de **gambe** en métal appartenant au jeux « **Gambe 8’** » (tuyau ouvert/ouvert)



Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte plusieurs harmoniques dont essentiellement : **260Hz, 515Hz, 782Hz, 1052Hz, 1300Hz,…**

<u>Exemple :</u> Tuyau de **salicional** en métal appartenant au jeux « **Salicional 8’** » (tuyau ouvert/ouvert)



Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte plusieurs harmoniques dont essentiellement : **260Hz, 511Hz, 776Hz, 1042Hz, 1308Hz,…**

Tuyau appartenant au jeu gambe 8’

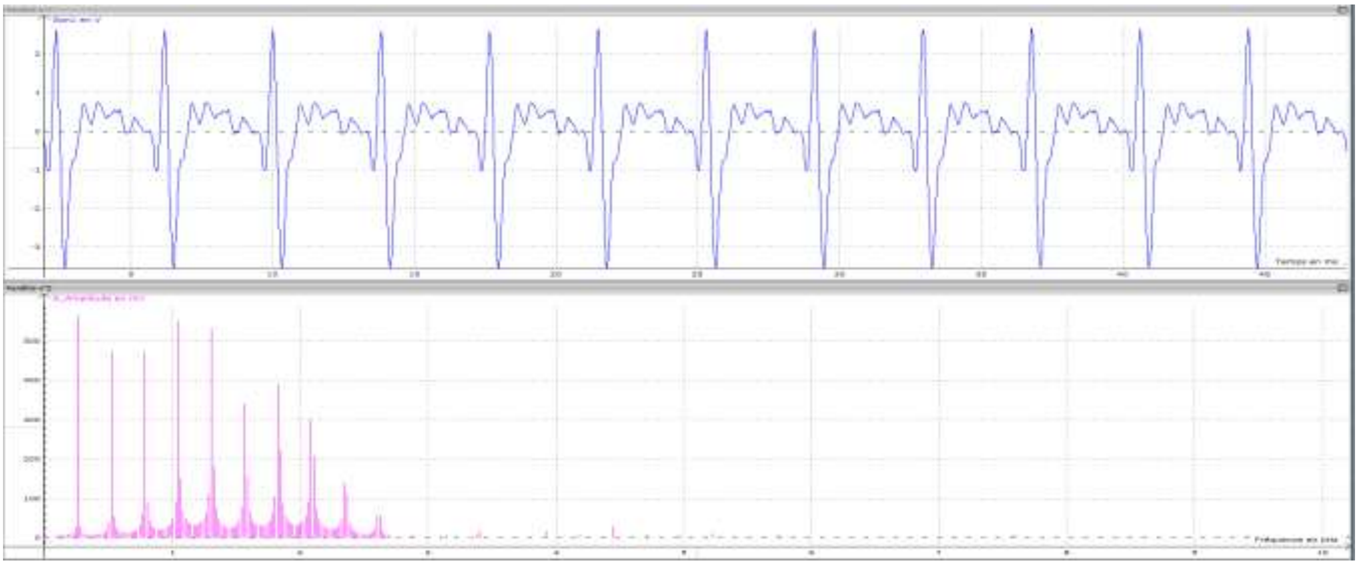
Les jeux à taille étroite comme le salicional , la gambe…encore appelés les « jeux gambés » sont plus riches en harmoniques que les « jeux principaux » et a fortiori plus riches que les « jeux flûtés » .

<u>Conclusion :</u> La « taille » influe donc sur la richesse harmonique. Les jeux de « taille étroite » comme le salicional, la gambe,… sont des jeux comptant de nombreux harmoniques se rapprochant, de ce fait, de la richesse harmonique du violon. Ces jeux de tuyaux ont été façonnés par les facteurs d’orgues au XIXème siècle afin de concurrencer l’orchestre dans le but de faire évoluer les « résonances » des tuyaux vers les sonorités romantiques du violon.

<u>2°) Influence de la nature de l’excitateur : cas de l’anche battante</u>

Nous avons également fait une analyse de Fourier d’un tuyau à anche. Il s’agit d’un tuyau appartenant à la famille des jeux d’anche : la « **trompette** 8’». L’enregistrement correspond au **do3.**

<u>Exemple :</u> Tuyau de **trompette** en métal appartenant au jeux « **trompette 8'** » (tuyau ouvert/ouvert)



Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte de nombreux harmoniques dont essentiellement : **260Hz, 522Hz, 783Hz, 1044Hz, 1304Hz, 1572Hz, 1826Hz, 2081Hz,…**

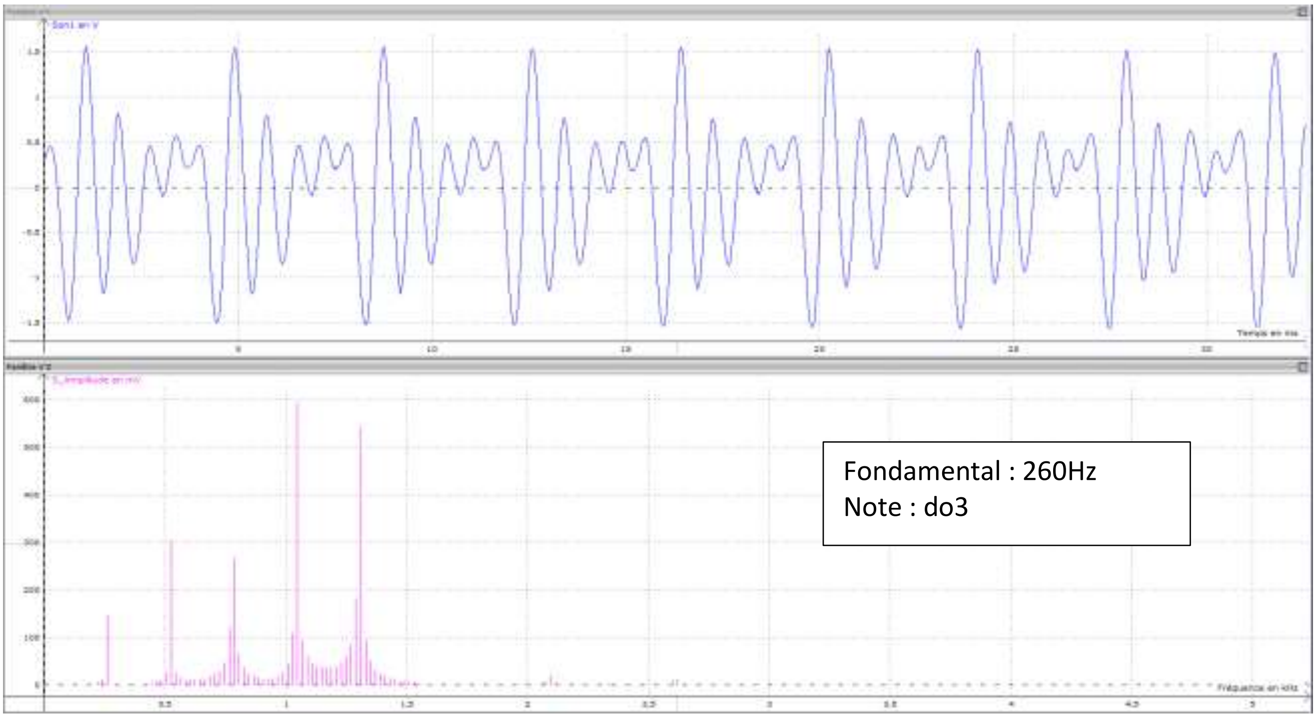
<u>Exemple :</u> Tuyau de **cromorne** en métal appartenant au jeux « cromorne **8'** » (tuyau ouvert/ouvert)

Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte de nombreux harmoniques dont essentiellement : **264Hz, 523Hz, 783Hz, 1043Hz, 1303Hz, 1568Hz, 1828Hz, 2088Hz,…**

On a remarqué que les tuyaux à anche sont encore plus riches en harmoniques que les tuyaux à embouchure de flûte comme la gambe ou le salicional (jeux à taille étroite). Pour autant, leur timbre riche en harmoniques est trop brillant et éclatant pour imiter les cordes. Dans l'orgue, ces jeux d'anche remplacent plutôt les cuivres (trompettes, trombones à coulisse,…) de l'orchestre et non les violons !

3°) Influence du nombre de rangs : cas particulier du « cornet 5rgs »

Nous avons fait l'analyse harmonique d'un cornet dit de 5 rangs. Il s'agit d'un jeu de tuyaux postés c'est-à-dire qu'il n'est pas disposé au même niveau que les autres tuyaux mais en hauteur et alimenté en air par des tubulures en étain/plomb.



Une analyse harmonique de ce tuyau révèle que le son compte 5 harmoniques dont : **260Hz, 525Hz, 786Hz, 1047Hz et 1311Hz.** Chaque harmonique est ici créé par un tuyau à part ! Le cornet 5 rangs comporte 5 tuyaux à embouchure de flûte par note jouée. Chaque touche du clavier fait sonner 5 tuyaux simultanément et permet ainsi, à partir de tuyaux « taille large » type « flûte », d'obtenir un son riche en harmoniques ! Pour cette raison, le cornet appartient aux jeux flûtés et non gambés malgré sa richesse harmonique!

Le jeu de cornet « 5 rangs », malgré sa richesse harmonique, n'a pas un timbre permettant d'imiter les violons de l'orchestre.

4°) Influence de la pression sur la richesse harmonique

De retour en atelier, nous avons considéré un tuyau de « Doublette » (taille moyenne) pour lequel nous avons fait varier la pression d'admission de l'air. Pour chaque valeur de pression, nous avons enregistré le son au niveau de la bouche dans le but de faire une analyse de Fourier (recherche des harmoniques) avec Latispro.

Voici les résultats obtenus :

Pression (mmH_2O)	**37**		**50**		**69**		**89**	
Doublette *tuyau taille moyenne*	**Fréquence (Hz)**	**Amplitude (%)**	**Fréquence (Hz)**	**Amplitude (%)**	**Fréquence (Hz)**	**Amplitude (%)**	**Fréquence (Hz)**	**Amplitude (%)**
Fondamental	**269,3**	**100**	**272,3**	**100**	**272,9**	**100**	**274,5**	**100**
Harmonique 1	**538,6**	**7**	**544,6**	**17**	**545,8**	**37**	**549**	**78**
Harmonique 2	**807,9**	**3**	**816,9**	**6**	**818,7**	**13**	**823,53**	**17**
Harmonique 3					1091,6	2	1098	1
Harmonique 4					1364,5	1	1372,6	1
Harmonique 5					1637,4	1	1647,1	3
Harmonique 6							1921,6	2
Harmonique 7							2196,1	2
Harmonique 8							2470,6	1

On constate que lorsque la pression augmente, le nombre d'harmoniques du son généré par un tuyau de taille moyenne augmente ! Le timbre du son s'enrichit en harmoniques. Cependant, l'amplitude des harmoniques restent inférieure à 3% de l'amplitude du fondamental au-delà de l'harmonique 3.

Certains facteurs d'orgues du XIXème siècle, comme Cavaillé-Coll, ont construit des instruments comportant plusieurs sommiers avec des pressions différentes. Les tuyaux de « taille moyenne » posés sur les sommiers sous pression plus importante (100mmH_2O est un maximum) avaient une richesse harmonique supérieure se rapprochant ainsi des sonorités romantiques du violon.
Cependant, l'effet de la pression sur l'amplitude des harmoniques supérieurs reste limité (moins de 3% dans le cas de la « doublette » étudiée).

Pression (mmH_2O)	50 Doublette (taille moyenne)		50 Salicional (taille étroite)	
	Fréquence (Hz)	Amplitude (%)	Fréquence (Hz)	Amplitude (%)
Fondamental	**272,3**	**100**	**272,2**	**100**
Harmonique 1	**544,6**	**17**	**544,5**	**35**
Harmonique 2	**816,9**	**6**	**816,7**	**21**
Harmonique 3			1089	3

A une pression de $50mmH_2O$, le salicional présente un harmonique de plus et l'amplitude de ces harmonique est plus importante.

Pression (mmH_2O)	69 Doublette (taille moyenne)		69 Salicional (taille étroite)	
	Fréquence (Hz)	Amplitude (%)	Fréquence (Hz)	Amplitude (%)
Fondamental	**272,9**	**100**	**272,8**	**100**
Harmonique 1	**545,8**	**37**	**545,7**	**60**
Harmonique 2	**818,7**	**13**	**818,5**	**21**
Harmonique 3	1091,6	2	**1091,3**	**7,5**
Harmonique 4	1364,5	1		
Harmonique 4	1637,4	1		

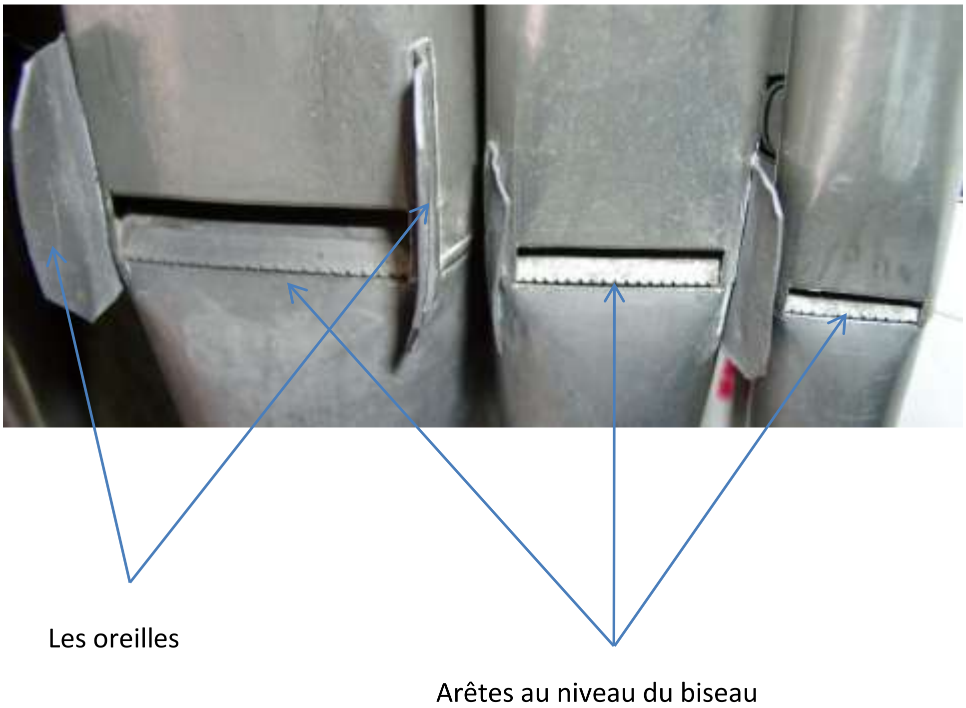
A une pression de $69mmH_2O$, le salicional présente moins d'harmoniques que la doublette ! Mais l'amplitude des harmoniques 1, 2 et 3 est plus importante dans le cas du tuyau à taille étroite (salicional).

L'augmentation de la pression a un effet sur le nombre d'harmoniques notamment des jeux à « taille moyenne ». Cependant, l'amplitude de ces harmoniques reste faible et l'effet sur le timbre assez limité. L'avantage des tuyaux de taille étroite est non seulement le nombre d'harmoniques mais l'amplitude plus importante de ces harmoniques entraînant un effet plus sensible sur le timbre des sons. C'est pourquoi, les facteurs d'orgues ont davantage développé les jeux à « taille étroite » plutôt que d'augmenter les pressions dans les sommiers causant souvent des problèmes d'étanchéité par rapport à l'air.

5°) Les autres paramètres influençant la richesse harmonique

Forme du jet d'air : Nous venons de voir que la pression, mais surtout la taille d'un tuyau, avait une influence sur la richesse harmonique d'un son. Mais d'autres paramètres non étudiés peuvent intervenir comme la **forme du jet d'air qui sort de la lumière**. En effet la forme du jet d'air dépend étroitement de l'état des arêtes du biseau ! Lorsque les arêtes sont vives et tranchantes, le son est riche en fréquences aiguës que l'on retrouve, accompagnées de bruit, à l'attaque du tuyau. Elles produisent des battements avec les harmoniques du tuyau. Le son est alors riche en harmonique, certes, mais instable. Le tuyau grésille !

Les facteurs d'orgues pratiquent alors de petites entailles (« **dents** ») sur le plan incliné du biseau. Le jet d'air s'écoule alors selon des vitesses différentes et il se forme des tourbillons qui s'opposent à la production de fréquences aiguës. L'attaque est plus sûre mais paraît plus molle. L'intensité du fondamental est renforcée et les harmoniques sont plus stables. En revanche, la perte d'harmoniques aigus fait que la sonorité du tuyau est plus lourde, plus terne.



Nature du matériau utilisé : Pour un tuyau d'orgue, la vibration du tuyau existe mais est beaucoup plus faible que la vibration de l'air. Pour des raisons de stabilité en fréquence et de qualité du son, il est souhaitable que les parois ne vibrent pas de façon notable. Sur ce plan, l'étain utilisé présente une inertie suffisante pour empêcher les réactions des parois du tuyau sur l'onde stationnaire. De ce point de vue, le zinc parfois utilisé pour des raisons de coût présente une qualité moindre.

Etat de surface intérieur des tuyaux : autre point important, l'état de surface intérieur des tuyaux ! L'onde stationnaire est d'autant plus énergique et s'établit d'autant mieux que les parois internes présentent moins de frottements. C'est pour cela que l'intérieur des tuyaux est **raclé** (rendu lisse) par les facteurs d'orgues et que les tuyaux couverts de poussière ont une perte de sonorité (timbre) directement liée à la richesse harmonique. Dans un orgue, les tuyaux sont pour cette raison placés dans un buffet qui les protège notamment de la poussière.

VI°) Conclusion

Devant l'ampleur prise par l'orchestre en Europe dès le milieu du XVIIIème siècle, l'orgue tend à se rapprocher de son concurrent. Certains jeux comme le violoncelle, le violon, la gambe, la viole de gambe, la viole d'amour, le salicional… font leur apparition au XIXème et de manière progressive. Même si l'augmentation de la pression dans les sommiers permet d'enrichir harmoniquement les sons, les facteurs d'orgues préfèrent multiplier le façonnage de ces jeux dits « romantiques » visant à imiter plus « efficacement » les cordes de l'orchestre (violons, violoncelles,…) Cela devient une véritable mode ! En France, tous les facteurs d'orgues et tous les experts sont fascinés par ces nouvelles sonorités. Ces jeux ont ainsi contribué à faire naître un nouveau style musical « la musique romantique » et ont inspiré C. Franck, C. Saint-Saëns, L. J. Lefébure-Wély, A. Guilmant et bien d'autres musiciens français et étrangers du XIXème siècle. Suite à cette analyse, nous avons compris les choix réalisés par les facteurs d'orgues à l'époque car ces « nouveaux » jeux qui avait le « vent en poupe »… étaient constitués de tuyaux à « taille dite étroite » générant plus d'harmoniques que les flûtes et autres bourdons, se rapprochant de ce point de vue des timbres des violons de l'orchestre.

Suite à un entretien avec un facteur d'orgues et des mesures réalisées en atelier, nous avons appris que la pression de l'air arrivant dans les tuyaux (le « vent » dans le jargon des facteurs d'orgues) avait une influence sur l'harmonisation des jeux (longueur des tuyaux notamment) et la richesse harmonique du son. Au cours de cette étude, nous avons découvert que la longueur réelle d'un tuyau d'orgue était différente de sa longueur théorique calculée à partir des lois de Bernoulli. Les conditions aux limites d'un tuyau d'orgue étant différentes de celles d'un tuyau cylindrique complètement ouvert aux deux extrémités. Nous nous sommes également rendus compte à quel point l'harmonisation d'un orgue était complexe car en plus de la pression, d'autres paramètres entrent en ligne de compte sur le nombre et l'intensité des harmoniques du son (forme de la lumière, emplacement du biseau par rapport à la lumière, état des arêtes du biseau,…) De plus, il ne faut pas oublier que le son émis par un tuyau dépend aussi de son environnement (les tuyaux voisins, le buffet…) : un tuyau harmonisé en atelier peut par exemple complètement « s'éteindre » en présence de tuyaux voisins dans un orgue. C'est là qu'est nécessaire tout le savoir-faire du facteur d'orgues qui doit avoir de multiples compétences.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement nos professeurs mais également le facteur d'orgues Guerrier de Willer (68) qui nous a laissé travailler librement dans son atelier de nombreuses heures afin d'approfondir notre projet concernant les résonances romantiques des tuyaux d'orgues.

Le hasard fait que Aristide Cavaillé-Coll, le plus éminent des facteurs d'orgues français du XIXème siècle et certainement l'instigateur de ces jeux romantiques, a posé un jour ses valises à Lutter –petit village alsacien non loin des ateliers Guerrier de Willer ; c'est ce jour-là qu'il a notamment qualifié la région Alsace de « Pays des Orgues » !

Aristide Cavaillé-Coll

(Montpellier,1811-Paris,1899)

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement :

-La commune de Dannemarie et le conseil de fabrique de nous avoir donné l'autorisation de faire des mesures dans l'orgue Callinet classé Monument Historique.

-M. Philippe Heinis –Notre professeur de Physique/Chimie au Lycée Jean-Jacques Henner d'Altkirch (68) et organiste à ses heures pour ses conseils.

-M. Frédéric Martin – Professeur au Lycée Jean-Jacques Henner d'Altkirch (68)

-M. Jean-Joseph Feltz – Proviseur du Lycée Jean-Jacques Henner d'Altkirch (68) pour son soutien.

-Mme Catherine Bader-Chevalier- Proviseur-adjointe du Lycée Jean-Jacques Henner d'Altkirch (68) pour ses encouragements.

-Mme Bucher (spécialiste de l'harmonisation) et M. Guerrier (Facteur d'orgues) qui nous ont mis à disposition des tuyaux classés « Monument Historique » , leur mannequin et offert la possibilité de faire des mesures dans leur atelier à Willer (Haut-Rhin) http://www.orgues-guerrier.org/Accueil.html

Bibliographie/Ressources

-Livre Hachette TS spécialité
-Encyclopédie Universalis
-« Le monde mystérieux de l'orgue » de Marcel Thomann –éditions Du Signe
-BUP vol 96-Décembre 2002 « Jeux d'orgues » par Guy Bouyre
-« Ondes » vol 3 –cours de Physique -Berkeley
-Site internet http://decouverte.orgue.free.fr/index.htm réalisé par Eric Eisenberg.
-Film « C'est pas sorcier » -Les grandes orgues

ANNEXE 1

L'orgue constitue une machinerie complexe mais malgré les transformations considérables que l'instrument a subies au cours des siècles, les composants fondamentaux de l'orgue sont restés les mêmes. Pour mieux comprendre un orgue dans ses différentes parties (*de type classique avec traction mécanique*), nous pouvons faire une analogie avec des organes de l'être humain. On peut ainsi distinguer :

- Le **corps et** le **visage** : c'est le **buffe**t et ses tuyaux de montre (ceux qui sont montrés en façade).

- Le **larynx** (avec ses cordes vocales) et toutes les **cavités** (nasales, buccales,…) : ce sont l'ensemble des **tuyaux** qui ont des formes diverses. Chaque tuyau donnant une note et un timbre bien déterminé.

- Le **cœur** : ce sont les **souffleurs**. Aujourd'hui, c'est le **ventilateur électrique**.

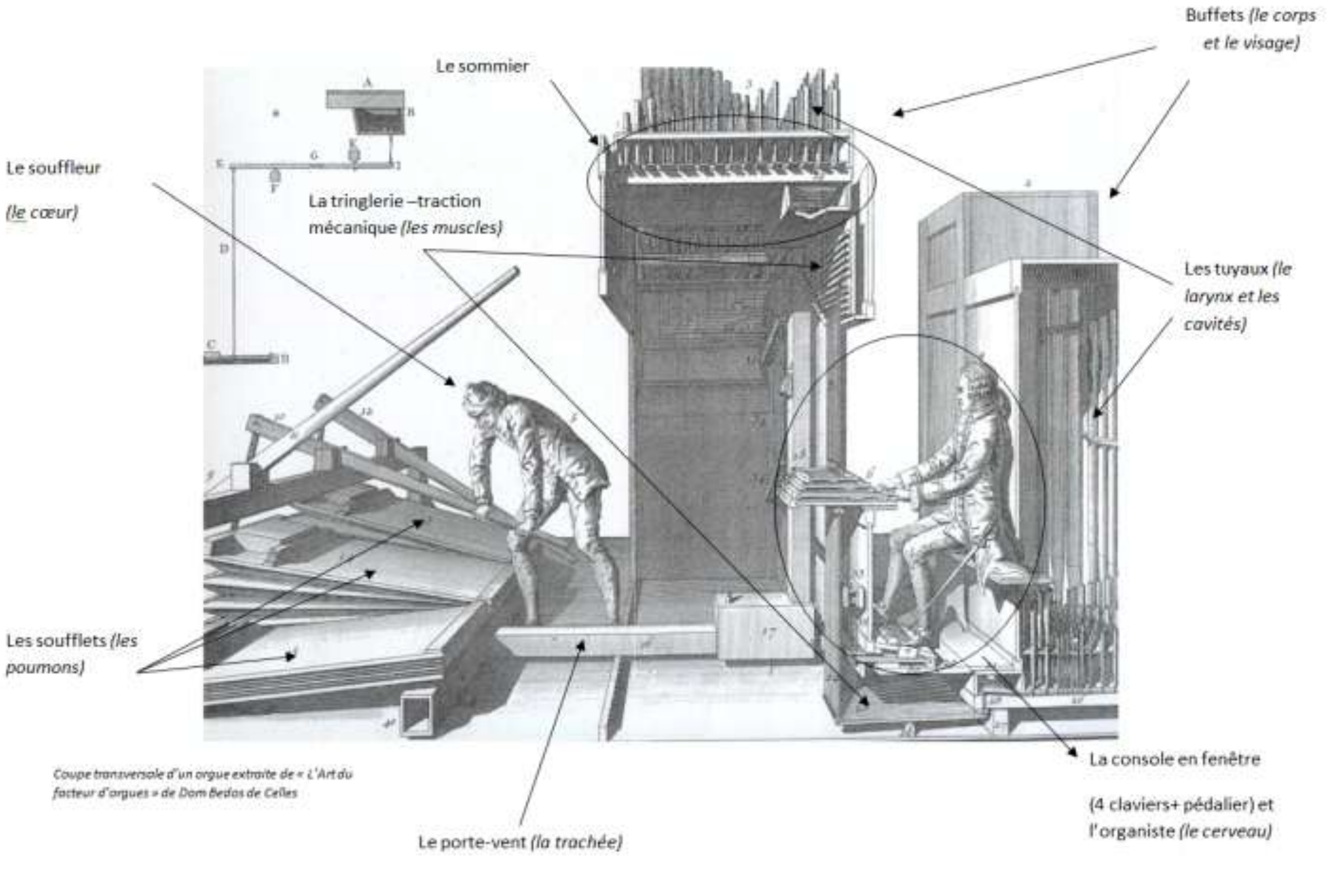
- Les **poumons** : ce sont les **soufflets** stockant l'air sous pression.

- La **trachée** : ce sont les **porte-vents** qui, comme leur nom l'indique, sont des conduits d'alimentation portant le vent du soufflet vers les sommiers (coffres hermétiques qui contiennent l'air sous pression et sur lesquels sont disposés les tuyaux).

- Les **muscles :** c'est toute la **tringlerie, les relais mécaniques en bois et en fer** (vergettes, rouleaux, équerres, pilotes,…) transmettant le mouvement du doigt ou du pied de l'organiste, depuis la touche des claviers manuels et pédalier, jusqu'à la soupape, à l'intérieur du sommier, permettant de faire « sonner » un ou plusieurs tuyaux.

- Le **cerveau** : c'est l'**organiste**, assis à sa **console**, donnant les ordres.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux « organes » permettant de générer directement la large palette sonore : les tuyaux sonores ou ce que les facteurs d'orgues appellent la tuyauterie.



Coupe transversale d'un orgue extraite de « L'Art du facteur d'orgues » de Dom Bedos de Celles

ANNEXE 2

Recherche de ventres et de nœuds de vibration de l'air d'un tuyau ouvert/fermé

Ux	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
X(m)	0,5	0,48	0,45	0,43	0,40	0,38	0,35	0,33	0,30
$U_{max\ (V)}$	4,2	3,7	2,8	1,4	0,3	1,5	2,5	3,3	4,2

Ux	0,45	0,50	0,55	0,60	0,63	0,65	0,70	0,75	0,80
X(m)	0,28	0,25	0,23	0,20	0,19	0,18	0,15	0,13	0,10
$U_{max\ (V)}$	4,3	3,8	2,5	0,96	0,3	0,75	2,1	3,1	3,9

Ux	0,85	0,90	0,95	1,00
X(m)	0,075	0,50	0,025	0
$U_{max\ (V)}$	4,3	4,2	3,3	1,3

ANNEXE 3

Dans un tuyau sonore, il y a une succession régulière de ventres et de nœuds de pression (et donc respectivement de nœuds et de ventres de déplacements). Les résultats expérimentaux obtenus par **Daniel Bernoulli (1700-1782)** sont rappelés ci-dessous :

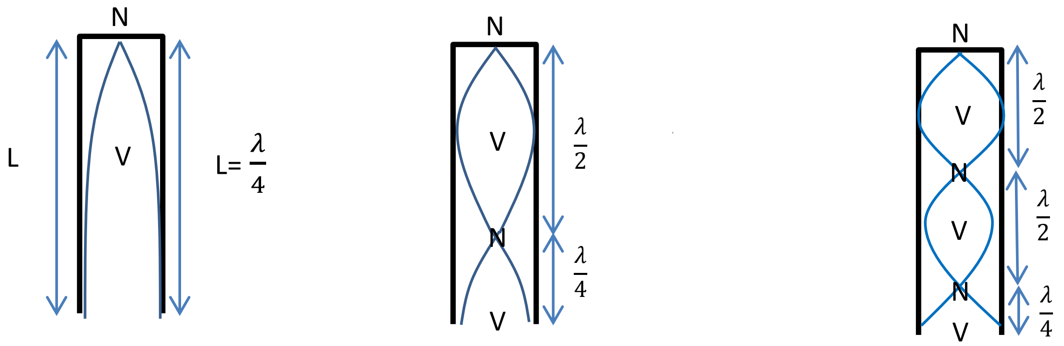
Cas des tuyaux ouvert/fermé

Pour un tuyau ouvert/fermé, les fréquences permises sont telles que (avec n entier→ **n=0,1,2,3,…**) :

$$\mathbf{f}_n = (\mathbf{2n+1}) \times \mathbf{f_0} \text{ où } \mathbf{f_0} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{4L}}$$

Les fréquences f_n des harmoniques sont des multiples impairs de f_0. Les seuls sons possibles sont les harmoniques impairs.

Pour obtenir des ondes stationnaires, la longueur du tuyau est donnée par : $\mathbf{L= (2n+1)\ \frac{\lambda}{4}}$



n=1 n=2 n=3

N et V représentent les Nœuds et ventres de vibration de

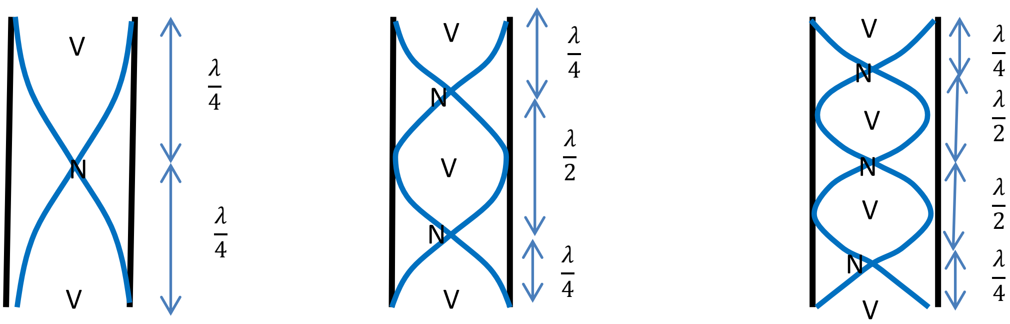
Cas des tuyaux ouvert/ouvert

Pour un tuyau ouvert aux deux extrémités, les fréquences permises sont (avec n entier >0 → **n=1,2,3,…**) :

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{n} \times \mathbf{f_1} \text{ où } \mathbf{f_1} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{2L}}$$

Les fréquences f_n des harmoniques sont des multiples de f_1. Les sons possibles sont les harmoniques pairs et impairs.

Pour obtenir des ondes stationnaires, la longueur du tuyau est donnée par : $\mathbf{L= n\ \frac{\lambda}{2}}$



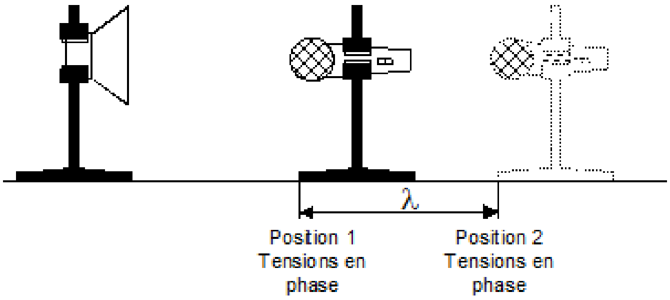
n=1 n=2 n=3

N et V représentent les Nœuds et ventres de vibration de

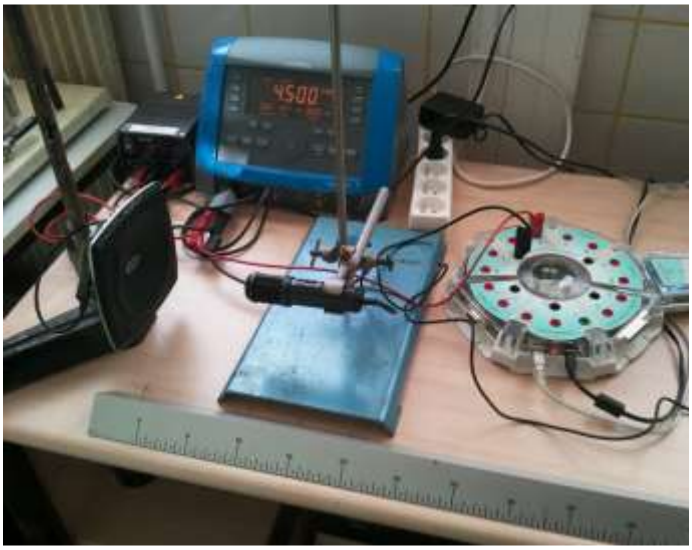
<u>Remarque :</u> On peut remarquer qu'un tuyau ouvert/fermé possède le même fondamental qu'un tuyau ouvert/ouvert de longueur double. Tuyau ouvert : longueur Lo et tuyau fermé : longueur Lf. Les fréquences du fondamental sont identiques si on peut écrire : $k\times(V/2L_0) = (2n+1)\times V/(4L_f)$ où n et k entiers. En choisissant n et k tels que k=2n+1, alors L_f=Lo/2

ANNEXE 4

Mesure de la célérité du son



A l'aide d'un microphone et d'un haut-parleur, tous deux reliés à l'interface d'acquisition SYSAM-SP5, on a visualisé les tensions aux bornes du Haut-parleur et du microphone simultanément à l'aide du logiciel Latispro. Ces tensions traduisent les variations de pression là où se situent précisément le Haut-parleur et le microphone. Pour plusieurs fréquences f (ou période T) d'une onde sinusoïdale, on a mesuré la longueur d'onde λ (pour cela, on a mesuré en 5λ pour augmenter la précision de la mesure de λ). Pour avoir des longueurs d'onde de quelques cm, on a travaillé avec des fréquences allant de $4{,}0\times10^3$ Hz à $6{,}5\times10^3$Hz. Ce qui a limité les déplacements du microphone et donc le phénomène d'atténuation du son. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous :



Fréquence f (en Hz)	Période T(s)	Longueur d'onde λ (m)
$4{,}0\times10^3$	$2{,}5\times10^{-4}$	0,090
$4{,}5\times10^3$	$2{,}2\times10^{-4}$	0,082
$5{,}0\times10^3$	$2{,}0\times10^{-4}$	0,073
$5{,}5\times10^3$	$1{,}8\times10^{-4}$	0,065
$6{,}0\times10^3$	$1{,}7\times10^{-4}$	0,060
$6{,}5\times10^3$	$1{,}5\times10^{-4}$	0,055

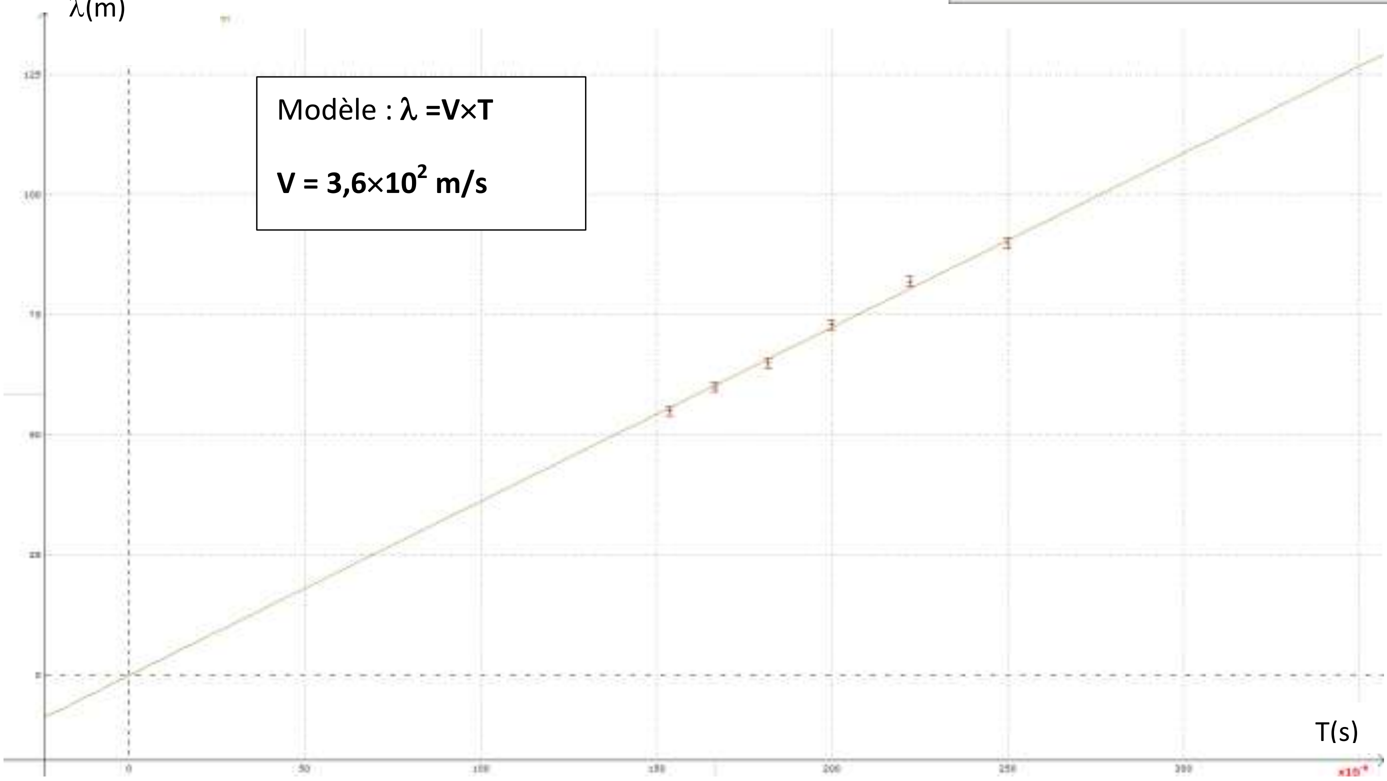
On a tracé λ=fct(T) et on a **modélisé avec la fonction : $\lambda = V \times T$ (fonction linéaire)**

Le résultat de la modélisation conduit à :

V= 3,6×10^2 m/s

Le coefficient de corrélation est : 0,998

L'erreur de mesure de 5λ est approximativement de 5mm de sorte que l'erreur sur λ est estimée approximativement à 1mm (voir barres d'erreurs sur le graphe)



La température de l'air a été mesurée : t(°C) =23°C.
La température en kelvin est donc θ=273,15 + t(°C) = 296 K.
La valeur de la vitesse du son attendue peut être calculée avec l'expression théorique de V obtenue à l'aide du modèle du gaz parfait avec l'air assimilé à gaz diatomique (γ=1,4)

$$\mathbf{V_{th}=(\gamma R\theta/M)^{1/2}}$$

où R est la constante des gaz parfaits, θ la température de l'air en kelvin, M la masse molaire de l'air en kg/mol

V_{th} =(1,4×8,32×296/0,029)$^{1/2}$=**3,4×10^2 m/s**

L'écart relatif entre la valeur expérimentale V et la valeur théorique (valeur attentue) est :

$$\frac{|V-V_{th}|}{V_{th}} = \frac{|3{,}6\times10^2-3{,}4\times10^2|}{3{,}6\times10^2} = \mathbf{5{,}9\%}$$

<u>Remarque :</u> cette célérité dépend de la température θ et influe directement l'accord d'un orgue à tuyaux. Il résulte qu'une variation de température entraîne une variation de la fréquence de l'onde sonore.