



Conception et étude d'un instrument de musique à vent : Le saxophone en escalier

Elèves participants :



Delubac Benjamin

Lemmouchi Idriss



Regoug Ilyess

Mounoussamy
Ludovic

Avec LACLAVERIE Jean-Michel
Professeur encadrant
Lycée Bernard Palissy- AGEN
Académie de Bordeaux

Table des matières

RESUME

ABSTRACT

KEY-WORDS

INTRODUCTION

I - RESONATEURS CONIQUES, CONES EN ESCALIER

II - ETUDE DE TUYAUX SONORES : VERS UNE MODELISATION SIMPLIFIEE DU COMPORTEMENT D'UNE COLONNE D'AIR

- 1. Tuyau cylindrique de diamètre unique ouvert aux deux extrémités**
- 2. Tuyau conique fermé à une extrémité**
- 3. Tuyaux en escalier**
- 4. Interprétation ondulatoire pour des tubes de diamètre constant**

III - ETUDE EXPERIMENTALE D'UN SAXOPHONE EN ESCALIER

1. Courbes Fréquence - Longueur

1.1 Matériel utilisé

1.2 Courbes d'étalonnage fréquence longueur

2. Etude du jeu d'un instrument en escalier

CONCLUSION

DOCUMENTS UTILISES

ANNEXES :

1- CAS PARTICULIER DES ONDES ACOUSTIQUES DANS UN INSTRUMENT DE MUSIQUE A VENT CONIQUE

2- POUR ALLER PLUS LOIN DANS L'APPROCHE THEORIQUE

RESUME

Les instruments d'orchestre d'aujourd'hui sont le fruit du développement et d'évolution durant des siècles. A partir du programme de spécialité physique, nous essaierons de chercher une nouvelle voie pour produire des sons musicaux grâce à un nouvel instrument pourvu d'un tube discontinu.

ABSTRACT

The instruments of current orchestra are the fruit of development and evolution for centuries. From the program of physical speciality, we shall try to look for a new way to produce sounds thanks to a new instrument provided with an intermittent tube.

KEY-WORDS

Acoustique musicale Saxophone Résonateurs coniques

INTRODUCTION

En présentant ce projet, nous n'avons pas la prétention de révolutionner le milieu musical avec notre instrument mais simplement la volonté d'explorer de nouvelles pistes de réflexion en matière de facture d'aérophones. Certains instruments comme la clarinette ont évolué pendant plus de 2500 ans et la plupart des instruments utilisés de nos jours ont leurs origines dans l'Antiquité. Grâce à une série d'améliorations surtout depuis le XVIII^e siècle les instruments actuels possèdent un jeu plus facile, plus expressif, plus juste et sans notes manquantes dans l'échelle diatonique, avec un timbre plus homogène.

De l'Antiquité au Moyen Age, les instruments à vents étaient de simples tuyaux à trous munis d'une lamelle vibrante appelée anche.

Elle peut se présenter sous différentes formes :

- Végétale en sureau, roseau ou plume
- Les lèvres du musicien pour les instruments comme la trompette ou le tuba
- Aérienne (lame d'air vibrante) pour les embouchures de flûte

Le nombre de trous était limité par les possibilités de notre corps, car nous n'avons que dix doigts. Aujourd'hui, grâce à un système de clefs, on a pût augmenter ce nombre. Une clarinette par exemple en possède 17.

La taille aussi devait s'adapter à l'épaisseur de nos doigts alors le sax basse moderne peut en avoir de plusieurs centimètres de diamètre car il a de larges clefs pour les boucher.

La musique jouée actuellement n'est pas forcément satisfaisante sous tous ses aspects. En effet, c'est une musique au nombre de notes limité. La musique classique est riche et ne comporte pas de trous dans l'échelle diatonique, s'appuie sur les nuances, l'harmonie et le mélange des timbres des différents instruments de l'orchestre. Mais tous jouent sur la gamme tempérée. Toutes les fréquences de son ne sont pas possibles pour permettre à plusieurs musiciens de jouer ensemble plus facilement.

En revanche au Moyen Age, l'orchestre n'existait pas donc la normalisation des notes pour créer l'harmonie n'était pas obligatoire. Par exemple, la gamme du fifre d'un paysan était différente du chalumeau de la fermière du village voisin. C'est ce qu'ont remarqué des ethnomusicologues à la fin du XIX^e et du début du XX^e. A l'heure actuelle cette richesse a disparue, tout comme le patois variait d'un village à l'autre, les gammes différaient selon les instruments.

L'instrument que nous avons créé s'inspire de la facture traditionnelle et populaire d'aérophone. Malgré son caractère novateur, car il est constitué de cylindres de diamètre différents associés ensemble, il est construit avec des moyens matériels très rudimentaires qui rappellent ceux des facteurs médiévaux (Voir le travail de nos camarades sur le chalumeau du Moyen Âge). Les facteurs n'ont jamais voulu se pencher sur des instruments à vents présentant des discontinuités de section comme le notre. Tuba, trombone, trompette ou sax ont tous une évolution régulière du diamètre intérieur de leur tube, aucune discontinuité. Pourtant de tels instruments sont réalisables et ont des qualités harmoniques, et c'est ce que nous espérons montrer avec ce projet.

Nous pouvons comparer notre instrument, le saxophone en escalier aux instruments de l'orchestre occidental. Notre projet se caractérise par une colonne d'air et possède une anche simple. Les instruments qui

se distinguent par ces caractéristiques sont les clarinettes, les saxophones et d'autres instruments traditionnels comme les Albokas, certains chalumeaux du Moyen Age... Tous ces instruments sont des instruments à vents (aérophones) qui excitent la colonne d'air par le souffle du musicien, ou par une soufflerie mécanique.

Le saxophone est composé de trois parties soudées : le corps conique, la culasse et le pavillon. Il possède 19 à 22 clés qui commandent l'ouverture et la fermeture des trous latéraux percés sur le corps. Le bec du saxophone est identique à celui du saxophone en escalier. Le saxophone en escalier ne possède que deux parties : le résonateur qui se divise en plusieurs tuyaux de différent diamètre reliés les uns aux autres par des raccords, et l'excitateur qui se compose du bec et de l'anche. Les matériaux du saxophone en escalier sont des matériaux simples : plastiques, ou bambous... Contrairement aux matériaux du saxophone qui sont métalliques. Néanmoins, le son perçu des deux instruments reste à peu près le même lorsque les instruments sont accordés. La clarinette se présente sous la forme d'un long tuyau droit, elle est généralement réalisée en bois noble tel que l'ébène. Encore une fois, comparé au saxophone en escalier, le tuyau est discontinu. Pour ce qui est du bec de la clarinette, il est proche de celui du saxophone en escalier.

Néanmoins tout cela n'aurait pas été possible sans l'aimable participation de M. Jean-Pierre Dalmont du Laboratoire d'acoustique musicale de l'Université du Maine qui nous grandement aidé dans nos travaux et l'Orchestre de la Lyre Agenaise qui nous a fait don d'un de leur tuba durant le temps de nos recherches. Par ailleurs, notre travail s'inscrit dans le cadre de notre cours de spécialité physique en terminale S et a été mené en lien avec deux autres groupes. C'est en suivant le programme d'acoustique de Spécialité en Terminale, que nous avons bâti notre plan. Tout d'abord nous présenterons l'origine de notre idée, c'est-à-dire le travail de JP Dalmont. Puis nous étudierons des résonateurs plus simples que les instruments de musique réels pour obtenir des premiers résultats de modélisation du comportement d'une colonne d'air (C'est-à-dire de simples tubes sans trous). Nous essayerons ensuite d'interpréter les phénomènes ondulatoires sur lesquels nous avons expérimentés. Nos réalisations instrumentales seront ensuite étudiées grâce à l'analyse de Fourier. Enfin nous tenterons en annexe une approche théorique des phénomènes mis en jeu.

I - RESONATEURS CONIQUES ET CONES EN ESCALIER

Le LAUM, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine est une Unité Mixte de Recherche de l'Université du Maine et du CNRS (UMR 6613). L'effectif du laboratoire est d'environ 80 personnes (enseignants-chercheurs, chercheurs, IATOS, ITA, doctorants et post doctorants). Les activités du Laboratoire sont centrées principalement sur l'acoustique « de l'audible » mais le laboratoire a intégré depuis quelques années de nouveaux thèmes de recherche dans le domaine des vibrations et des ultrasons.

(Site du laboratoire : <http://laum.univ-lemans.fr/spip/spip.php?rubrique107>)

C'est sur ce site que nous avons trouvé l'idée de l'instrument que nous avons étudié. Monsieur Jean-Pierre Dalmont, chercheur au LAUM, a étudié les résonateurs coniques et les cônes en escalier. Il s'agit de tuyaux de diamètres différents, associés ensemble pour donner un instrument de musique à vent. Un bec de saxophone est associé à l'ensemble et une anche vibrante en roseau est la source du son.

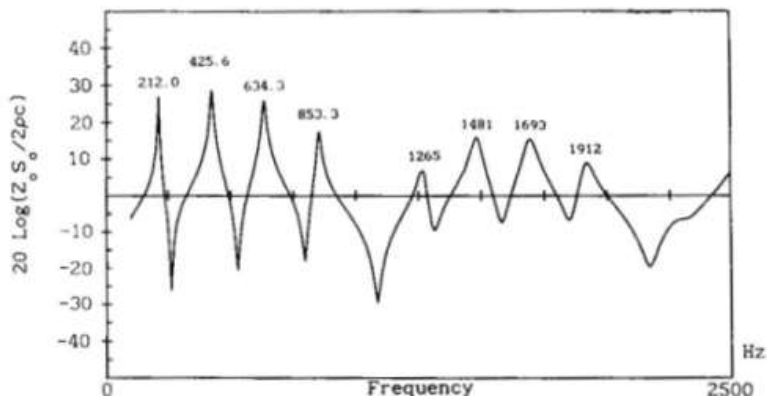
Une explication sur le site permet de comprendre l'intérêt de l'instrument. Pour qu'un instrument à vent fonctionne correctement, il est nécessaire que les fréquences de résonance soient quasiment harmoniques, c'est-à-dire multiple d'une fréquence fondamentale. Cela est vrai pour un cône complet, mais un saxophone n'est pas un cône complet. Il faut laisser une place pour l'anche. Alors pour optimiser l'instrument, les facteurs lui ont donné des formes complexes, issues de multiples essais, afin d'améliorer l'harmonicité des fréquences de résonance.

Monsieur Dalmont a montré qu'un résonateur constitué d'un certain nombre de cylindres de mêmes longueurs et dont les sections sont égales à un nombre entier de fois la section du premier cylindre (cône en escalier dont les sections successives suivent la série 1, 3, 6, 10, 15,...) possède des fréquences de résonance parfaitement harmoniques. Ces instruments peuvent avoir des qualités musicales, et le LAUM a fait réaliser un exemplaire à quatre cylindres dont la photo est ci-dessus. Utilisé avec un bec de saxophone alto ce résonateur sonne parfaitement avec une octave et une douzième parfaitement juste.

Voici une courbe trouvée sur le site du LAUM qui montre le comportement de ce résonateur en escalier. En abscisse la fréquence et en ordonnée le module de l'impédance d'entrée. Cette grandeur physique n'est pas au programme en Terminale S, mais l'allure de la courbe rappelle celle des courbes que nous traçons en TP de spécialité pour l'étude des fréquences de résonance d'un tube excité par un haut-parleur. Pour nous c'est simplement l'amplitude du signal fourni par le micro (ou la tension efficace) qui apparaît en ordonnée. Mais nous pouvons aussi repérer les fréquences de résonance ainsi que la finesse plus ou moins importante des pics.



L'instrument de M Dalmont



Nous avons donc contacté M Dalmont, qui a accepté de répondre à nos questions et de nous fournir un fichier expliquant la fabrication d'un résonateur en escalier. Voilà ce que nous en avons compris.

Dans un tel instrument, l'onde se propageant subit des réflexions à chaque changement de section. Nous avons vu, dans notre cours de spécialité, qu'à la sortie d'un tube résonnant, une partie de l'onde est rayonnée vers l'extérieur, et une partie est réfléchiée vers l'excitateur. Ici, le phénomène est comparable lors d'un changement de section. Il y a donc de nombreuses réflexions, mais au final, elles s'annulent donnant une onde progressive.

Suivant le nombre de section du résonateur, on obtient différents résultats:

-Si celui-ci tend vers l'infini (théoriquement uniquement), on obtient alors un cône.

-Si celui-ci est égal à 1, alors c'est un tuyau cylindrique.

-Si celui-ci est égal à N, l'objet d'étude ne possède pas les harmoniques multiples de N+1 (Expliquant de ce fait, l'absence des harmoniques pairs pour la clarinette)

Les cônes et les cylindres en escalier sont donc très proches. L'étude des cylindres en escalier est plus facile que celle d'un cône. Ils constituent un système d'étude simplifié pour l'étude des instruments coniques. Cependant, s'il n'est pas facile de fabriquer un cône pour un instrument de musique, il n'est pas simple non plus d'associer des cylindres, comme nous avons pu nous en rendre compte pendant nos expériences.

Voici donc le schéma de l'instrument :

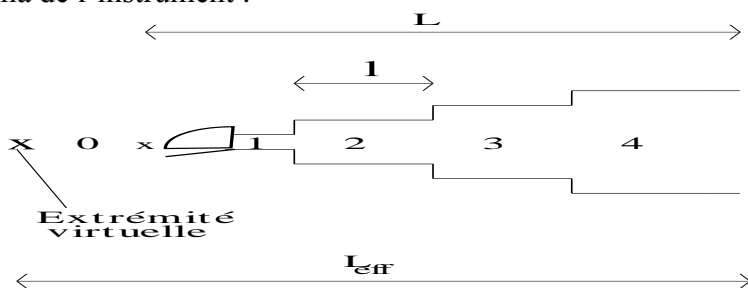


Schéma Jean-Pierre Dalmont

Caractéristiques du système d'étude :

- N est le nombre de section

- L_{eff} est la longueur totale de l'instrument jusqu'à son extrémité virtuelle. En effet, nos expériences en spécialité ou pour les Olympiades nous ont montré que la colonne d'air résonante semble toujours plus longue que le tube qui la contient.

- l est la longueur d'une section

- L est la longueur du couple résonateur- excitateur (de l'instrument)

L_{eff} est donc égale à L plus la longueur d'une section : $L_{eff} = L + l = (N + 1)l$

Comme $f = c/2L$ (Longueur totale), on en déduit $f = \frac{c}{2L_{eff}}$

On connaît ainsi la fréquence fondamentale et donc la note la plus grave, lorsqu'il n'y a pas de trous.

$$f = \frac{c}{2L_{eff}} \Leftrightarrow L_{eff} = c/2f$$

Mais L_{eff} n'étant pas la longueur de l'instrument, on doit modifier la formule:

$$L_{\text{eff}} = c/2f \Leftrightarrow \ell = L_{\text{eff}}(N+1)$$

N sera fixé pour la longueur de l'instrument voulue et donc on obtient $L = N\ell$

Exemple : si on fixe le nombre de cylindres à 4 (c'est un minimum) et que la note la plus grave est un La 220, la longueur L_{eff} sera donc $L_{\text{eff}} = \frac{350}{220}$ et donc $\ell = \frac{L_{\text{eff}}}{4+1} = 16$. La longueur réelle L de l'instrument sera donc $L = 4\ell = 64$.

Nous venons donc de décrire, à partir des explications de M Dalmont, l'instrument que nous voulions essayer de fabriquer. Cependant le but est loin d'avoir été atteint. Trouver des cylindres dont les sections sont dans un rapport 1, 3, 6, 10, 15... n'est pas simple. Les associer correctement entre eux et avec une anche est là aussi très délicat. Notre source de matériaux était un magasin de bricolage. Nous avons donc mené nos essais avec les tubes du commerce que nous avons pu trouver et associer. Le résultat de nos mesures semble plutôt montrer que des associations de tubes qui ne respectent les conditions déterminées par M Dalmont ne fonctionnent pas toujours bien. Malgré nos nombreux échecs expérimentaux pour obtenir un instrument satisfaisant, nos résultats présentent un intérêt qui, nous l'espérons, sera apprécié par le jury. Signalons qu'un instrument en métal est en cours de fabrication par un LEP partenaire.

II - ETUDE DE TUYAUX SONORES : VERS UNE MODELISATION SIMPLIFIEE DU COMPORTEMENT D'UNE COLONNE D'AIR

1. Tuyau cylindrique de diamètre unique ouvert aux deux extrémités

Un tuyau cylindrique de longueur 60 cm et de diamètre intérieur 9 cm est utilisé. Un haut parleur relié à un GBF est placé près d'une extrémité et un micro près de l'autre extrémité. Nous mesurons la tension efficace aux bornes du micro avec un voltmètre.

Nous avons choisi ici de nous limiter aux deux premières fréquences de résonance car l'instrument que nous voulons fabriquer n'a pas la possibilité de changer de registre, c'est-à-dire de faire résonner un son correspondant au partiel 2 ou 3 du tuyau. Pour changer de registre, les saxophones ou les clarinettes utilisent de petits trous particuliers, dirigés par des clefs et permettant « d'éteindre » le fondamental.

Voici les résultats obtenus :

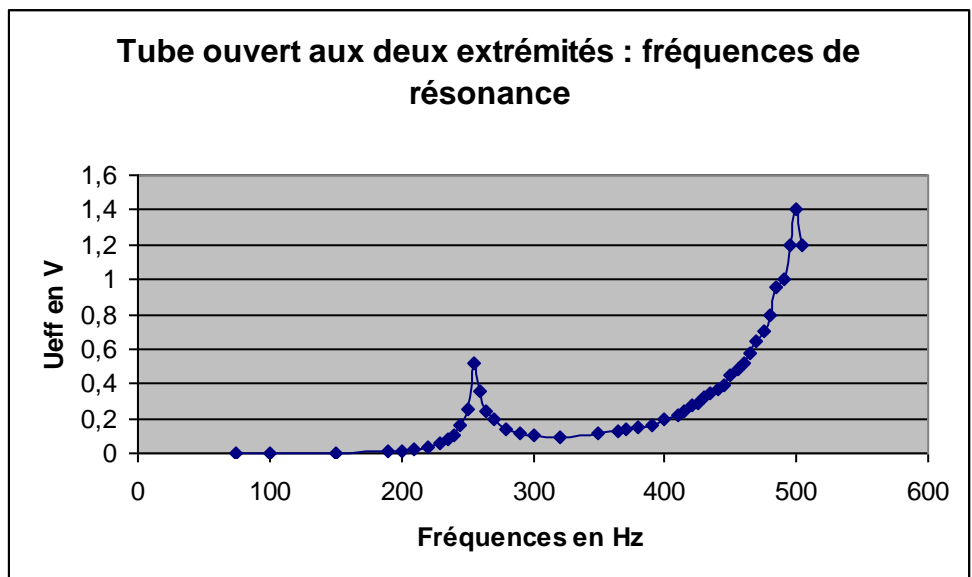
$$F1 = 255 \text{ Hz} \quad F2 = 500 \text{ Hz} \quad F2/F1 = 1,96$$

Les fréquences des deux premiers partiels du tuyau sont presque dans un rapport 2 (2% d'écart). C'est une condition pour obtenir un tuyau harmonique. Les fréquences de ses partiels doivent être des multiples de la fréquence fondamentale.

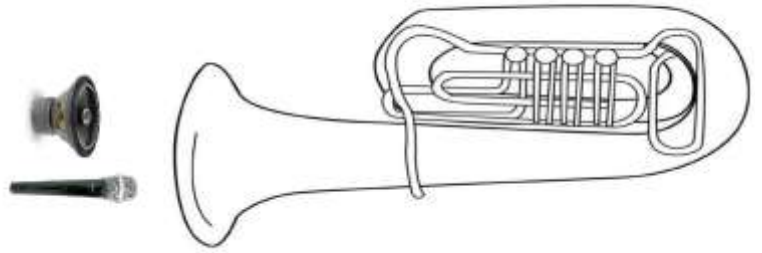
$\lambda/2 = 34000/2/255 = 66,7$ cm. La colonne d'air résonante semble plus longue que le tuyau. (Voir interprétation ondulatoire). La 3^{ème} fréquence de résonance a été déterminée sans relever les points à 760 Hz soit $F3/F1 = 2,98$

2. Tuyau conique fermé à une extrémité

Renouvelons l'expérience précédente avec un tuyau conique. Le seul tuyau conique que nous avons pu étudier est celui d'un tuba, long approximativement de 3m et prêté par l'orchestre d'harmonie « La Lyre Agenaise ». Le GBF et le voltmètre n'ont pas été représentés sur le schéma.



Avec le matériel en notre possession, l'amplitude du signal du micro pour des valeurs inférieures à 340 Hz est trop faible donc pas exploitable, même pour des valeurs importantes du niveau de sortie du GBF. C'est pourquoi nous sommes dans l'incapacité de fournir des résultats pour la fréquence fondamentale. Néanmoins en constatant les écarts entre les différents pics nous pouvons conjecturer qu'elle est proche de 65 Hz. En réalité la première valeur de fréquence de résonance que nous avons détectée est le cinquième harmonique.

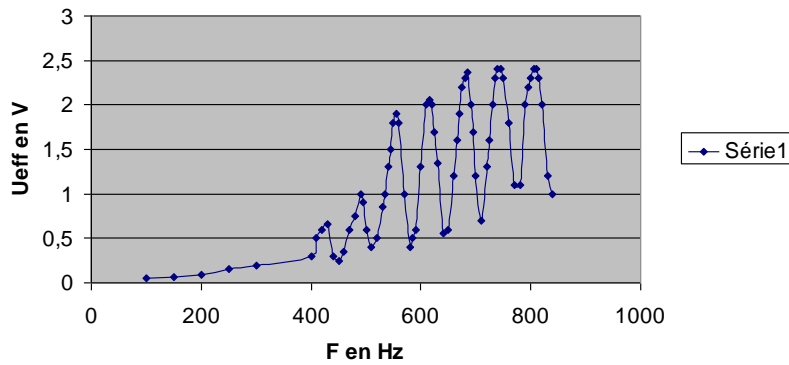


Cet instrument est harmonique, comme nous l'a confirmé le musicien qui en joue. Les pics de résonance sont nombreux et assez fins.

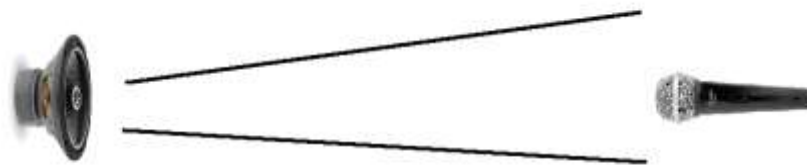
Cet instrument est harmonique, comme nous l'a confirmé le musicien qui en joue. Les pics de résonance sont nombreux et assez fins.

F1 = 340 Hz	F3-F2= 65 Hz
F2 = 490 Hz	F4-F3= 60 Hz
F3 = 555 Hz	F5-F4= 70 Hz
F4 = 615 Hz	F6-F5= 60 Hz
F5 = 685 Hz	F7-F6= 65 Hz
F6 = 745 Hz	
F7 = 810 Hz	

Tension en fonction de la fréquence



Remarque : Nous aurions voulu réaliser l'expérience suivante avec un cône plus simple, ouvert ou fermé. Mais nous n'avons pu trouver un matériel satisfaisant pour la réaliser



3. Tuyaux en escalier

Voici l'étude d'un système en escalier à deux tubes :

Tube 1 : longueur = 35cm

diamètre intérieur = 5,5cm

Tube 2 : longueur = 32cm

diamètre intérieur= 4,5cm

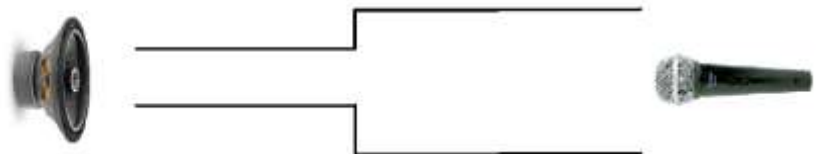
Le système est constitué de deux tuyaux en PVC d'évacuation d'eau reliés par des manchons et raccords du commerce. L'allure de la courbe est très différente des cas précédents. Le premier pic est beaucoup plus important que les autres, plus large, plus intense. La forme des pics est différente de celles des deux expériences précédentes. On trouve :

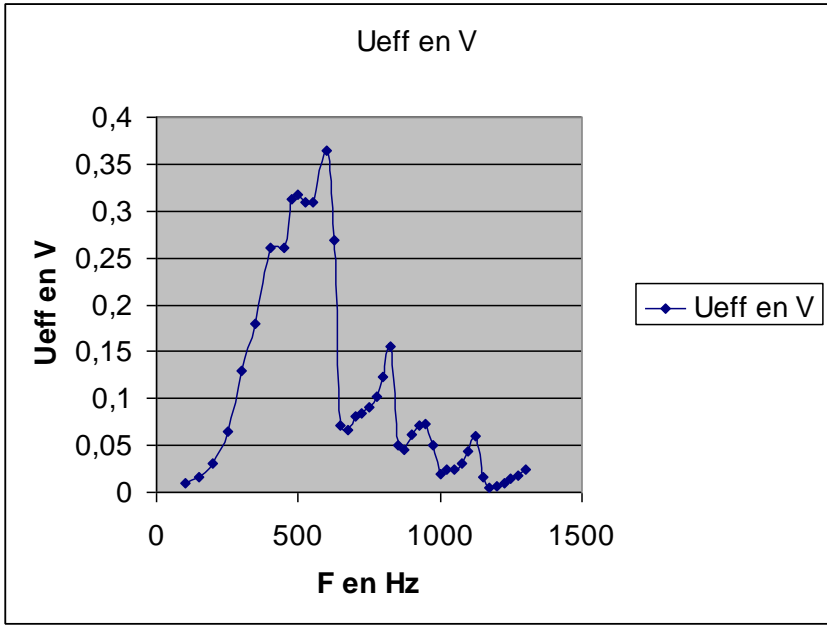
F1 = 600 Hz

F2 = 825 Hz

F3 = 950 Hz

F4 = 1125 Hz





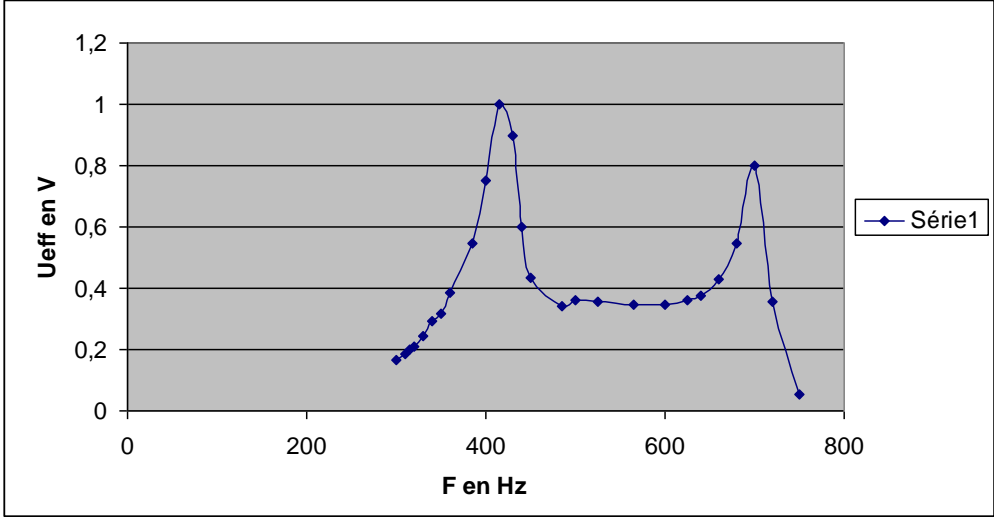
$F_2 - F_1 = 225 \text{ Hz}$
 $F_3 - F_2 = 125 \text{ Hz}$
 $F_4 - F_3 = 175 \text{ Hz}$

Cette association ne semble pas harmonique. Les réflexions ayant lieu au niveau du changement de section ne sont pas complètement satisfaisantes pour obtenir l'équivalent d'un cône harmonique.

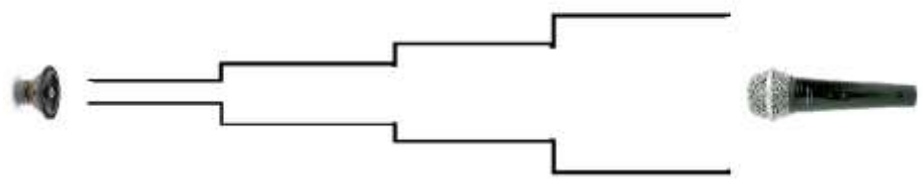
Voici maintenant l'étude d'un second système en escalier à deux tubes de longueurs très différentes:

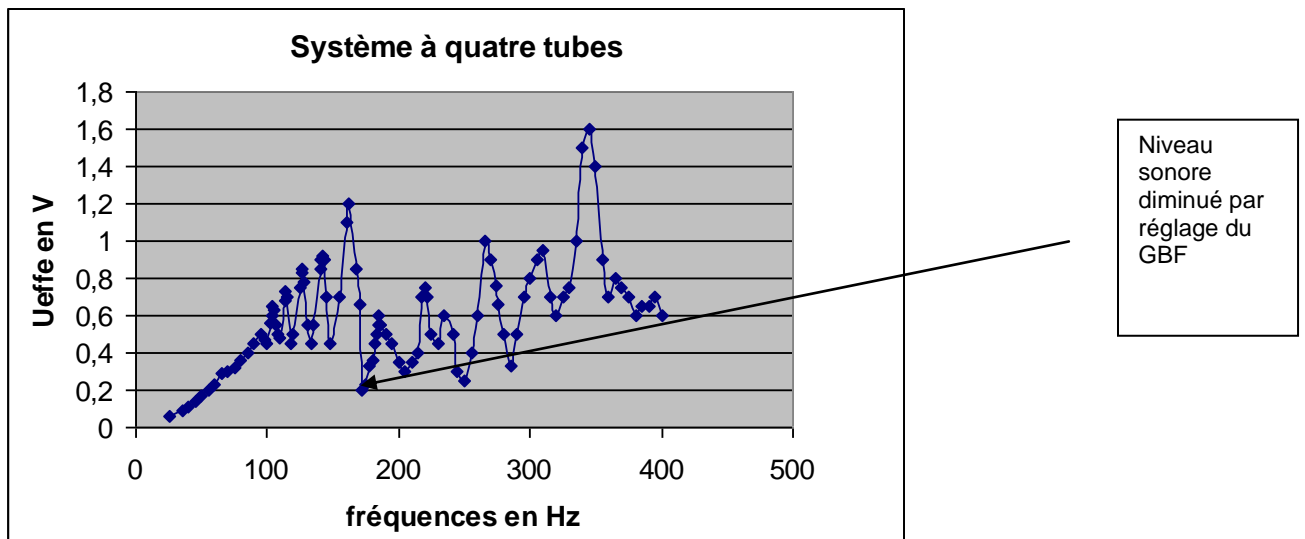
Tube 1 : longueur = 35cm diamètre intérieur = 5,5cm
 Tube 2 : longueur = 20cm diamètre intérieur = 4,5cm

$F_1 = 415 \text{ Hz}$ $F_2 = 700 \text{ Hz}$
 $F_2/F_1 = 1,7$ et non 2, donc le système n'est pas harmonique. Le résultat est très différent du cas précédent. Les pics sont assez fins et le second partiel est un peu moins intense que le premier. Cependant entre les deux résonances, le niveau sonore reste assez élevé. Remarques : Ces expériences sont très pénibles à réaliser car il faut supporter le bruit intense du haut parleur. C'est pour cela que nous n'avons pas poursuivi vers les fréquences plus élevées.



Terminons cette série d'expérience avec un assemblage de quatre tubes de sections différentes (diamètres extérieurs 32mm, 40mm, 50mm, 63mm) et de longueurs proches de 20cm.





On trouve un très grand nombre de fréquences de résonance dans un intervalle de fréquence réduit, et cela, que le système soit fermé à une extrémité ou non. Le cas étudié correspond ici à un tube ouvert aux deux extrémités. Chaque portion de tube peut entrer en résonance séparément, ou bien associée avec un ou plusieurs autres tubes. L'ensemble peut aussi résonner. La multiplicité des réflexions qui ne se compensent pas donne un comportement très complexe et non exploitable musicalement. Le tuyau n'est pas harmonique.

4. Interprétation ondulatoire pour des tubes de diamètre constant

Une onde sonore est longitudinale car elle est due à la compression ou la dilation de l'air dans la direction de propagation de l'onde. L'air étant un milieu élastique la propagation d'une onde correspond à différentes variations de pressions. Toujours dans ce même milieu on peut qualifier l'onde de mécanique car elle ne transporte que de l'énergie et pas de matière. Elle se propage en faisant vibrer les points du milieu matériel

Si une onde progressive longitudinale se propage dans une colonne d'air et rencontre une extrémité fermée d'un tuyau ou une ouverture vers le milieu extérieur, la différence de pression ou la présence d'un obstacle crée une onde possédant les mêmes caractéristiques que l'onde incidente de même direction de propagation, même célérité mais le sens de propagation est opposé, qu'on appelle l'onde réfléchi. Mais il existe une différence entre ces ondes réfléchies : le signe de l'onde.

Si elle rencontre un objet solide l'onde ne change pas de signe, c'est le phénomène de l'écho. Par contre si l'onde rencontre l'ouverture du tuyau (ou un changement de section), la différence de pression va faire changer de signe l'onde c'est à dire que l'onde qui était une compression devient une dépression. Et on assiste à un partage de l'énergie acoustique, une partie se retrouve vers l'extérieur et l'autre reste dans le tuyau. On remarque qu'une onde de dépression a le même comportement qu'une onde de compression lors de sa rencontre avec un obstacle solide (pas de changement de signe).

Dans certaines conditions la superposition des ondes incidentes et réfléchies crée une onde stationnaire, qui ne se propage pas. Il faut que les ondes soient entretenues par un haut-parleur ou une anche excitée de façon continue. Alors à ce moment là, dans certaines conditions, la superposition d'ondes progressives ayant la même célérité crée une onde stationnaire.

On identifie alors deux sortes d'états vibratoires particuliers :

- les nœuds de vibrations qui se traduisent par des points d'amplitude minimale
- les ventres de vibrations qui sont des points d'amplitude maximale.

On note qu'un nœud de pression est un ventre de vibration et qu'un ventre de pression est un nœud de vibration. Le micro est sensible à la pression.

Pour un tuyau à extrémité ouverte la surpression acoustique devient nulle à l'extrémité ouverte ($P=P_{\text{atmosphérique}}$), c'est un nœud de pression. Et à l'extrémité fermée les vibrations de la colonne sont d'amplitude maximale, c'est un ventre de pression.

Pour une onde stationnaire l'espace entre un nœud et un ventre équivaut au quart d'une longueur d'onde et la distance séparant deux nœuds successifs est une demi-longueur d'onde

Pour qu'un tuyau entre en résonance il faut que l'onde soit stationnaire et que la fréquence d'excitation soit multiple de la fréquence propre, ainsi le phénomène de ventre et de nœud est plus marqué et se stabilise. L'onde ne se propage plus

Pour un tuyau à deux extrémités ouvertes on trouve deux nœuds de pression aux extrémités. Alors la longueur L du tuyau doit être multiple entier de la demi-longueur d'onde (ou la distance parcourue en une période)

$$L = k\lambda / 2 \quad (k \text{ entier naturel } \neq 0)$$

Pour c la célérité du son selon les conditions de l'expérience on exprime :

-t le temps pour observer le phénomène

$$t = 2L / c$$

-f la fréquence fondamentale

$$f = c / \lambda = c / 2L$$

et la fréquence des harmoniques

$$f_k = k * f$$

Pour un tuyau fermé à une extrémité on trouve un nœud de pression à l'extrémité fermée.

Alors la longueur L doit être un multiple impair du quart de la longueur d'onde

$$L = (2k+1)\lambda / 4 \quad (k \text{ un entier naturel })$$

La fréquence fondamentale s'exprime par : $f = c / 4L$

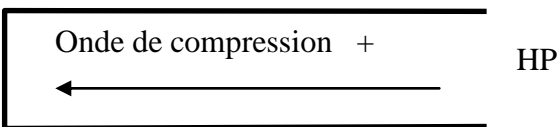
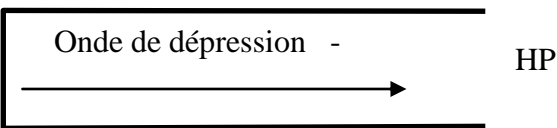
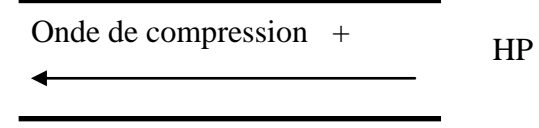
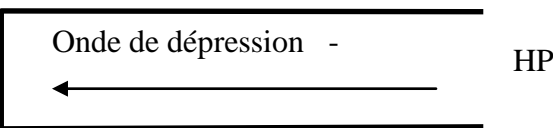
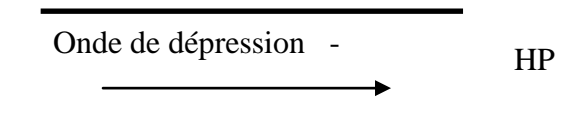
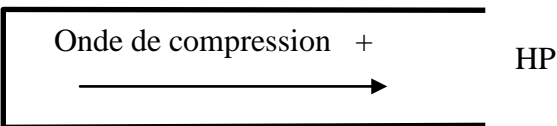
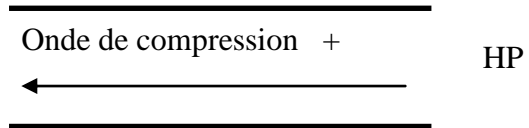
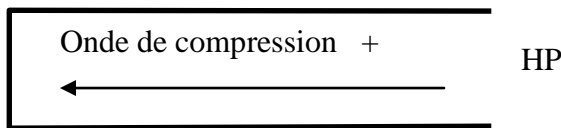
et celles des harmoniques par : $f_k = (2k+1) * f$

Seules les ondes stationnaires permettent la résonance du tuyau et par conséquent produisent un son d'amplitude importante.

Pour devenir une onde stationnaire dans le cas d'un tuyau ouvert aux deux extrémités l'onde parcourt une distance 2L mais pour un tuyau à une extrémité fermée la distance parcourue correspond à 4L.

Tuyau fermé à une extrémité

Tuyau ouvert aux deux extrémités



Plusieurs facteurs peuvent modifier les résultats de nos expériences par rapport aux résultats obtenus par la modélisation, mais la plupart d'entre eux ont une petite influence sur la différence entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux attendu par les modélisations. Ainsi on ne les précise pas pour simplifier les recherches lors de la première étape de modélisation.

Le principe des instruments à vents réside dans sa capacité à laisser s'échapper une partie de l'énergie sonore par les extrémités ouvertes.

Les ondes stationnaires qui vibrent dans le résonateur rayonnent aussi vers l'extérieur mais perturbe aussi l'oscillation interne. Les ondes sonores sont d'abord planes dans le corps du résonateur, puis se déforment et deviennent des ondes sphériques se propageant dans l'espace qui leur est accordé. La source de ces ondes qui est normalement l'extrémité ouverte, si située en fait un peu plus loin que l'ouverture, la longueur L du tuyau est donc plus grande que prévue. La différence entre la longueur acoustique et géométrique peut s'expliquer par le mouvement de l'air généré par l'instrumentiste, la déformation des ondes planes en ondes sphériques ou encore les perturbations autour de l'embouchure. On surestime donc la longueur de l'instrument.

Les tuyaux et les trous influencent aussi le son. Le volume des trous, la surface du tuyau étant imparfaite, la viscosité de l'air font baisser le son et modifie donc la fréquence et le timbre. On assimile les trous fermés à un tuyau continu alors que ce n'est pas le cas, l'embouchure est plus complexe que l'on ne le montre : pour une modélisation plus précise, il faudrait prendre en compte tout ces détails qui ont leurs importance.

Nous avons, toujours dans l'optique de simplifier les analyses, associé un ventre de pression au niveau de l'anche et un nœud sur l'extrémité ouverte : cette hypothèse n'est pas très vrai. Un tuyau continu associé à une anche peut donner des notes variantes selon les réglages de l'anche. Les ventres et les nœuds dépendent donc des réglages de l'anche et bien évidemment sans modifier la géométrie globale de l'instrument.

Nous n'avons pas non plus pris en compte le fait que l'air est envoyé par l'instrumentiste avec une vitesse à l'embouchure, qui engendre le fluide en mouvement, et donc modifie la pression dans le tuyau. Des turbulences interviennent au niveau de l'anche par l'écoulement de l'air ce qui perturbe le système des ondes stationnaires.

III - ETUDE EXPERIMENTALE D'UN SAXOPHONE EN ESCALIER

1. Courbes Fréquence - Longueur

1.1 Matériel utilisé

Pour connaître la fréquence d'un son d'un instrument, il existe un moyen plus simple que celui d'enregistrer le son avec un microphone puis de la calculer après des mesures de période au réticule sur Latispro. En effet, on peut utiliser un accordeur chromatique qui utilise comme référence toutes les notes de la gamme tempérée (les fréquences des notes du tableau). Mais ces appareils utilisent la notation anglo-saxonne.

Lorsqu'il affiche un A, c'est en réalité un La. Voici la notation anglo-saxonne complète :

- A \Leftrightarrow La ; B \Leftrightarrow Si ; C \Leftrightarrow Do ; D \Leftrightarrow Ré ; E \Leftrightarrow Mi ; F \Leftrightarrow Fa ; G \Leftrightarrow Sol

De plus, suivant la fréquence du son reçue, l'accordeur peut afficher La1, La2, La3 ... etc. Cela correspond, en fait, au numéro de l'octave. Deux notes sont à l'octave si le rapport de leurs fréquences est égal à 2. C'est le cas pour pratiquement tous les systèmes de gamme du monde, qui ont tous utilisé la même notion d'octave.

L'accordeur quand il reçoit un son, il n'affiche pas directement la fréquence de la note jouée, il affiche la note de référence la plus proche puis il indique le décalage entre la note reçu et celle de référence: l'écart est en cent. 2 notes successives (ex: do et do#) sont séparé par 100 cent)

Pour connaître une valeur précise de la fréquence jouée, on utilise la formule suivante:

$$c=1200*\log_2 (f_{jouée}/f_{référence}) \Leftrightarrow f_{jouée}=f_{référence}*2^{c/1200}$$

Mais attention à la numérotation des octaves. Notre livre donne le la3 à 440 Hz, mais pour l'accordeur le la4 est à 440 Hz. Nous enlèverons donc toujours 1 à l'indication du numéro d'octave donné par l'appareil.

Pour résumer, il faut connaître pour avoir la fréquence d'un son:

-Le nombre de cent de décalage par rapport à la note de référence

-La note de référence

- Enlever 1 au numéro d'octave

Ensuite, il suffit d'utiliser le tableau du fichier Excel qui donne la fréquence de la note jouée. Il a été bâti en collaboration avec le groupe du chalumeau, les autres faisant un logiciel.

Notes	Fréq Hz	Notes	Fréq Hz	Notes	Fréq Hz	Notes	Fréq Hz	Notes	Fréq Hz		
do	65,406	do	130,81	do	261,63	do	523,25	do	1046,5	cent	Fréquence de référence
do#	69,296	do#	138,59	do#	277,18	do#	554,37	do#	1108,73	25	698,456463
re	73,416	re	146,83	re	293,66	re	587,33	re	1174,66	Fréquence jouée	
re#	77,782	re#	155,56	re#	311,13	re#	622,25	re#	1244,51	708,6157	
mi	82,407	mi	164,81	mi	329,63	mi	659,26	mi	1318,51		
fa	87,307	fa	174,61	fa	349,23	fa	698,46	fa	1396,91		
fa#	92,499	fa#	185	fa#	369,99	fa#	739,99	fa#	1479,98		
sol	97,999	sol	196	sol	392	sol	783,99	sol	1567,98		
sol#	103,83	sol#	207,65	sol#	415,3	sol#	830,61	sol#	1661,22		
la 1	110	la 2	220	la 3	440	la 4	880	la 5	1760		
la#	116,54	la#	233,08	la#	466,16	la#	932,33	la#	1864,66		
si	123,47	si	246,94	si	493,88	si	987,77	si	1975,53		

La dimension et la position des trous jouent un rôle aussi important pour la qualité du son de l'instrument que la forme du tube. En effet, les trous jouent sur la longueur effective L du tuyau : un tuyau bouché rétrécit la longueur du tuyau, et donc un trou bouché rallonge le tuyau jusqu'au trou suivant ouvert. Les trous jouent également un rôle important dans la qualité du son engendré par l'instrument. Théoriquement, la disposition des trous est déterminée par des données physiques. La longueur du tuyau est en rapport direct avec la fréquence du son émis (selon que l'on prenne en compte si le tuyau est ouvert aux deux extrémités ou pas) par la formule :

$$L=c/2f \quad (\text{lorsque l'on considère le modèle du tuyau ouvert aux 2 extrémités})$$

La disposition des trous étant donc en rapport avec les fréquences, on ne peut placer les trous aléatoirement. Afin d'avoir des notes accordés, on doit placer les trous de telle sorte à les avoir en rapport aux notes du système actuel occidental.

Fréquence des notes

note **fréquence**

si# / do 261,6 Hz

do# / réb 277,2 Hz

ré 293,7 Hz

ré# / mib 311,1 Hz

mi / fab 329,7 Hz

mi# / fa 349,2 Hz

fa# / solb 370,0 Hz

sol 392,0 Hz

sol# / lab 415,3 Hz

la 440 Hz

la# / sib 466,2 Hz

si / dob 493,9 Hz

Mais pour nous les trous seront là où nos doigts peuvent les boucher.

1.2 Courbes d'étalonnage fréquence longueur

Le point de départ de notre travail est donc le résultat des recherches de Jean-Pierre Dalmont qui a découvert qu'un instrument discontinu pouvait dans certaines conditions être harmonique, c'est à dire posséder des fréquences de résonance, les partiels, multiples de la fréquence du fondamental. Si l'instrument n'est pas harmonique, lorsqu'une note est produite, ses harmoniques supérieurs ne sont pas égaux aux partiels du tuyau. Les harmoniques ne peuvent s'établir facilement. Le timbre est pauvre.

Il conviendrait donc de choisir les conditions de travail déterminées par M Dalmont. N cylindres associés (avec N>3) ayant des sections selon la série suivante 1, 3, 6, 10, 15.... Cependant la réalisation de

telles associations de cylindre n'a rien de simple. Nous sommes obligés de travailler avec des associations modulables de tuyaux pour essayer de dresser une courbe d'étalonnage. De plus, comment associer des tuyaux cylindriques de diamètres différents tout en gardant un système démontable ? Où trouver des tuyaux dans des rapports de section 1, 3, 6, 10, 15... ? Autant de questions qui nous ramènent à la réalité de nos moyens expérimentaux. Il va falloir travailler avec les moyens du laboratoire de Palissy et le budget de 250 Euros fourni par les Olympiades.

Ce sont donc les tuyaux d'évacuation PVC des eaux usées qui seront le support matériel de notre investigation. Il existe des raccords démontables entre tuyaux de diamètre extérieur 32mm, 40mm, 50mm, 63mm. Par ailleurs le premier tube doit pouvoir s'adapter au bec de saxophone alto utilisé. Il devra être de 16mm de diamètre extérieur. Cela correspond au diamètre de tuyaux destinés à l'alimentation en eau froide ou chaude, qui sont aussi utilisés par nos camarades pour fabriquer la Tclarinette. Le raccord entre le tuyau de 16mm et celui de 32mm sera fait grâce à un bouchon percé.



Instrument à cinq tuyaux associés à un bec de sax alto

Nous avons aussi expérimenté avec des sections de bambous associées, mais la section d'un morceau de bambou n'est pas cylindrique, et le bambou se fend en séchant et lorsqu'il est travaillé. Signalons qu'actuellement un instrument en métal est en fabrication grâce à un LEP partenaire.

En modifiant la position du bec sur les lèvres il est possible d'obtenir deux notes avec le bec seul, la note la plus aiguë étant obtenue en enfonçant davantage le bec dans la bouche.

Voici donc le résultat de nos premières investigations. Après 19 expériences (et beaucoup d'autres avortées qui n'ont même pas été notées ici...), il a été possible de trouver une association de tuyaux présentant certaines qualités. Le jeu doit être facile. Le tuyau doit être le plus harmonique possible. Il doit pouvoir permettre de percer des trous faciles à boucher. Il doit aussi posséder un timbre satisfaisant. Dans tous les cas, nous avons constaté que la longueur effective de la colonne d'air est toujours plus grande que celle du tuyau, comme Jean-Pierre Dalmont nous l'avait indiqué.

Nous avons essayé d'associer en escalier jusqu'à 6 tuyaux de diamètres différents. Ces instruments sont toujours longs car ils nécessitent d'utiliser des manchons et des réductions pour les raccords en plus des tuyaux eux-mêmes. Le jeu n'est jamais facile bien que certaines associations, comme celles des mesures 1 et 6, présentent des qualités harmoniques.

Puis nous avons fait diverses associations en partant de tuyaux de 16 mm associés seuls avec le bec. Le son est facile à émettre, mais le timbre est creux, car sans les harmoniques impairs. C'est ainsi que fonctionne une clarinette. (Dans ce cas là, c'est $\Lambda/2$ qu'il faut comparer à la longueur du tube). Nous avons ensuite rajoutés des tuyaux de diamètre de plus en plus grand (expériences 11, 10, 9, 8, 7, 6). Les tuyaux deviennent de plus en plus difficiles à jouer, et l'on entend même parfois des battements pour la plus longue association. Des portions différentes de tuyau résonnent en même temps sur des fréquences proches. Ce n'est pas utilisable musicalement.

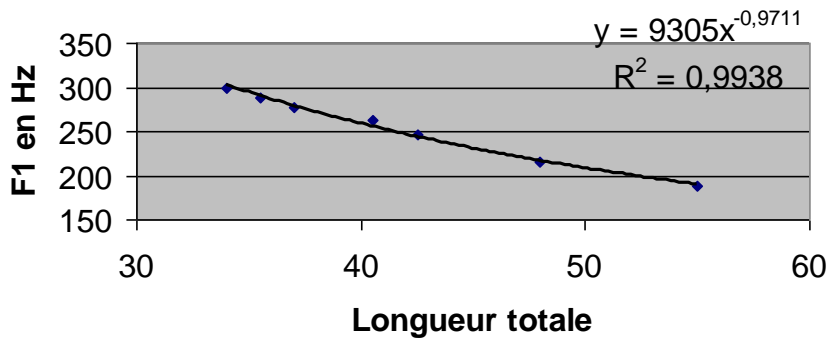
En modifiant les diverses associations nous obtenons généralement des tuyaux qui ne sont pas harmoniques. De plus ces tuyaux sont fastidieux à monter car nous ne pouvons coller les raccords pour pouvoir les démonter, et ces derniers glissent facilement. La question qui se pose alors à nous est le choix du paramètre à faire varier pour obtenir une courbe d'étalonnage. Nombre de tuyaux, diamètre, longueurs respectives de chaque tuyaux (en supposant de garder ou non l'hypothèse de J-P.Dalmont d'utiliser des associations de même longueur) sont des paramètres que nous pouvons choisir. Le résultat de l'expérience 19 a guidé notre choix. Cette association de deux tuyaux de diamètres différents et de longueurs différentes est harmonique et facile à jouer.

c=34000cm/s														Jeu
N°mesure	Bec sax alto	Tuyau D 16	Tuyau D 32	Tuyau D 40	Tuyau D 50	Tuyau D 63	Ltot mesurée	Note 1	F1 en Hz	Lambda/2 en cm	Note 2	F2 en Hz	F2/F1	
0	9							D4-30cent	577		Fa#4	740	1,282	F
1	9	16	21,5	21	34	//////	101,5	B1-20cent	122	139	Fa#4	740	6	M
2	9	16	21,5	21	34	26	127,5	G1+45cent	101	168	////	////	//////	M
3	9	18	//////	//////	//////	//////	27	C3-30cent	514	33	////	////	//////	F
4	9	16	21,5	//////	//////	//////	46,5	G#2+30cent	211	81	////	////	//////	F
5	9	37,5	//////	//////	//////	//////	46,5	D#2	156	109	////	////	//////	F
6	9	8	12	14	16,5	14,5	74	Mi2+40cent	169	101	Mi3+40cent	338	2	D
7	9	9,5	10	9,5	11	11	61	Sib2	233	73	Fa#3	370	1,588	TD
8	9	9,5	10	9,5	11	//////	47	C3	262	65	//////	//////	//////	M
9	9	9,5	10	9,5	//////	//////	37,5	C#3+30cent	282	60	//////	//////	//////	M
10	9	9,5	10	//////	//////	//////	30,5	D3+30cent	299	57	//////	//////	//////	M
11	9	8,5	//////	//////	//////	//////	17,5	Fa3-30 cent	343	50	//////	//////	//////	F
12	9	8,5	13,5	//////	//////	//////	31	Ré#3	311	55	//////	//////	//////	M
13	9	8,5	13,5	11	//////	//////	42	C#3-35cent	272	63	//////	//////	//////	M
14	9	8,5	13,5	11	15,5	//////	57,5	G#2	208	82	G3-20cent	387	1,861	D
15	9	8,5	13,5	11	7,5	//////	49,5	B2+30cent	251	68	A3-30cent	432	1,721	M
16	9	15	23,5	//////	//////	//////	48,5	sol#2+30cent	211	81	A4-45cent	857	4,062	F
17	Trompette	8	23,5	//////	//////	//////	36,5	Ré#3	311	55	La#3	466	1,498	F
18	Tuba	8	23,5	//////	//////	//////	39	do#3+40cent	285	60	la3	440	1,544	M
19	9	8	23,5	//////	//////	//////	40,5	do3	262	65	do4	524	2	F

Nous choisissons donc de nous limiter à deux tuyaux de diamètre 16 et 32. Le premier tuyau sera plus court que le second. En effet il faudra percer des trous. Un trou coupe la colonne d'air résonnante. Un trou ouvert sur le tuyau de 16 mm rend l'instrument équivalent à une clarinette, ce qui n'est pas le but recherché.

L'expérience 17 et 18 avec une embouchure de trompette et une de tuba montre que si l'instrument est utilisé dans ces conditions, il n'est plus harmonique.

Sax un escalier: Variation de la longueur du tuyau de 16 mm



Instrument à un escalier

La modélisation donnée par l'ordinateur se traduit par $F1 = 9305 * 1/(\text{Longueur totale})$

Or $34500/4 = 8625$ m/s si la célérité du son est de 34500 cm/s dans un tube chaud et humide. Il y a un écart de 7,9 % entre ces deux valeurs, ce qui est plus faible que beaucoup d'écart constatés entre expérience et modélisation. Donc pour cette association, d'un tuyau de 32mm et d'un tuyau de 16mm, la modélisation rapproche du comportement d'une clarinette, c'est-à-dire d'un tube fermé à une extrémité. Notre système ne se comporte pas comme un cône, ni comme un cylindre ouvert aux deux extrémités.

Remarque : L'association tuyau bec n'est pas très sûre, et par deux fois le bec est tombé et a été cassé. Mais un bec recollé fonctionne quand même.

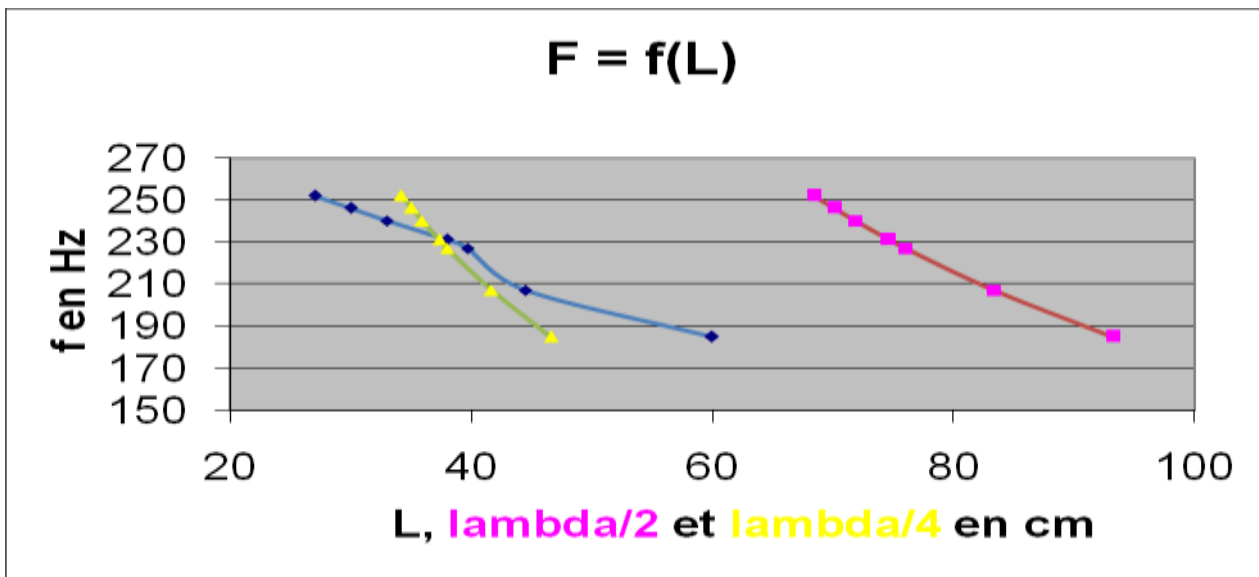
Pour terminer ces séries d'expériences, nous avons essayé un dernier instrument avec 3 tuyaux :

- un tuyau de diamètre intérieur 12mm et diamètre extérieur 16mm, comme dans toutes les expériences précédentes, associé à un bec de saxophone alto
- Un tuyau de diamètre intérieur 34mm et de diamètre extérieur 40mm
- Un tuyau de diamètre extérieur 80mm et de diamètre intérieur 76mm.

Chaque partie mesure 20cm de long.



L en cm	1/L en cm-1	f en Hz	lambda/2 en cm	lambda/4 en cm
60	0,01666667	185	93,24324324	46,62162162
44,5	0,02247191	207	83,33333333	41,66666667
39,7	0,02518892	227	75,99118943	37,99559471
38	0,02631579	231	74,67532468	37,33766234
33	0,03030303	240	71,875	35,9375
30	0,03333333	246	70,12195122	35,06097561
27	0,03703704	252	68,45238095	34,22619048



La comparaison entre la longueur L de l'extrémité du bec au dernier trou ouvert, et $\lambda/2$ ou $\lambda/4$ pour une valeur de f donnée, montre que l'instrument ne suit aucune des modélisations que nous avons évoquées dans la partie précédente. Cependant, pour la longueur la plus importante, il se rapproche de la modélisation par un tuyau cylindrique ouvert aux deux extrémités.

2. Etude du jeu d'instrument en escalier

Notre oreille analyse les sons et leurs variations de fréquence ou d'amplitude en permanence, (leur timbre, force ou couleur). Par exemple, nous trouvons que la voix au téléphone prend un aspect "métallique", ou alors nous ne reconnaissons plus un interlocuteur fortement enrhumé. Très souvent, nous tentons d'identifier l'origine du son, et si possible, de lui trouver une ressemblance avec un son que nous connaissons déjà.

Avec l'ordinateur, analyser le son consiste à calculer un certain nombre d'indicateurs donnés par des formules mathématiques : il s'agit d'en dresser une sorte de carte d'identité quantitative, qui vient compléter l'analyse faite par l'oreille, plus qualitative. L'analyse par l'ordinateur permet d'extraire une représentation du timbre de la voix ou d'un instrument, et d'obtenir les paramètres de l'interprétation vocale ou musicale

La courbe de la tension aux bornes du micro en fonction du temps permet de repérer les moments où la voix est forte (maxima) et ceux où elle est faible (minima). Elle permet de calculer la fréquence du son et de déterminer les caractéristiques du timbre.

La représentation du timbre de la voix est obtenue par un sonagramme, qui permet d'afficher dans le temps la décomposition d'un son sur les fréquences qui le composent. Pour une même hauteur chantée, la répartition d'énergie sur ces fréquences peut varier. Elle est visualisée sur le sonagramme en niveaux de gris : une fréquence associée à une grande énergie apparaît en gris foncé, alors qu'une fréquence moins soutenue apparaît en gris clair. Une voix sombre placera plus d'énergie sur les fréquences graves du son, alors qu'une voix claire placera plus d'énergie sur ses fréquences aiguës.

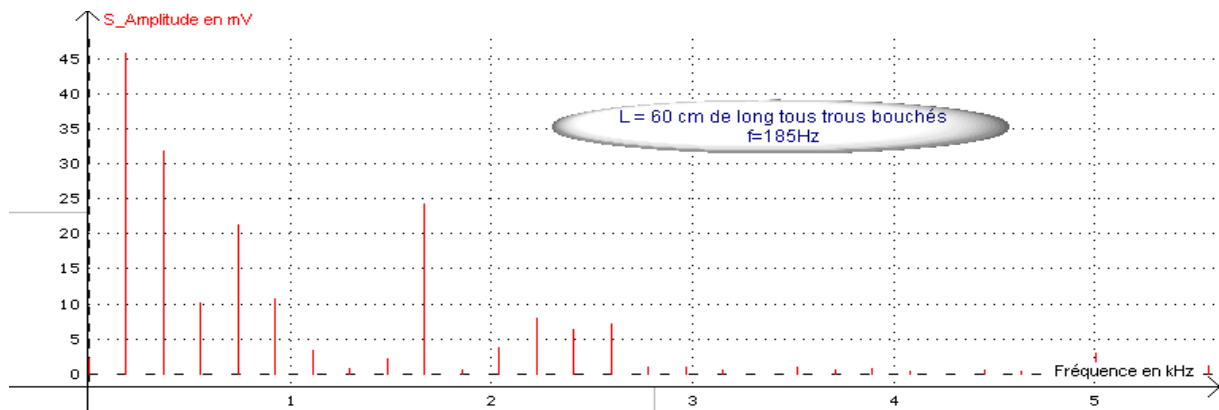
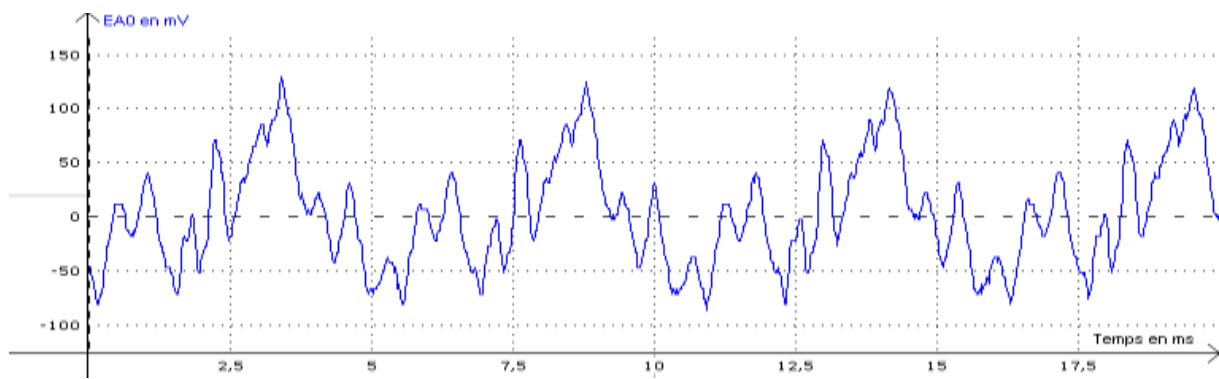
Le logiciel que nous utilisons, Latispro, ne permet pas d'obtenir de sonagrammes sous cette forme, mais donne une analyse de Fourier du signal sous forme d'un histogramme. Le mathématicien Joseph Fourier a montré que toute fonction périodique de période T peut être décomposée une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences f, 2f, 3f, etc.

Pour chaque son étudié, nous devons :

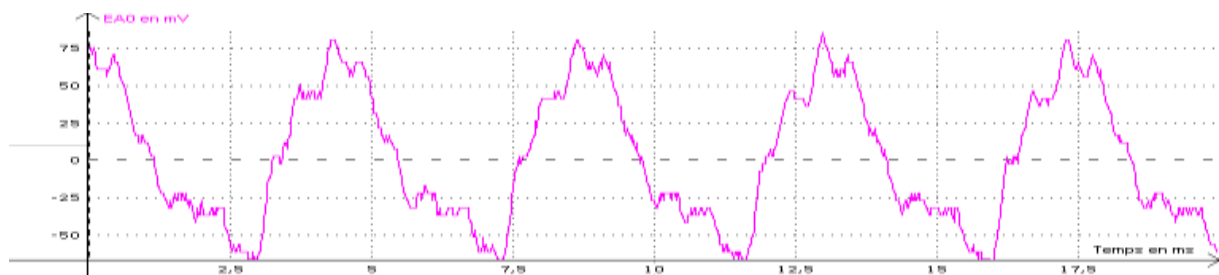
- Enregistrer des fichiers son grâce à un micro branché au boîtier d'acquisition

- Déterminer la période, la fréquence et réaliser le spectre grâce au logiciel LatisPro(ouls : Analyse de Fourier)

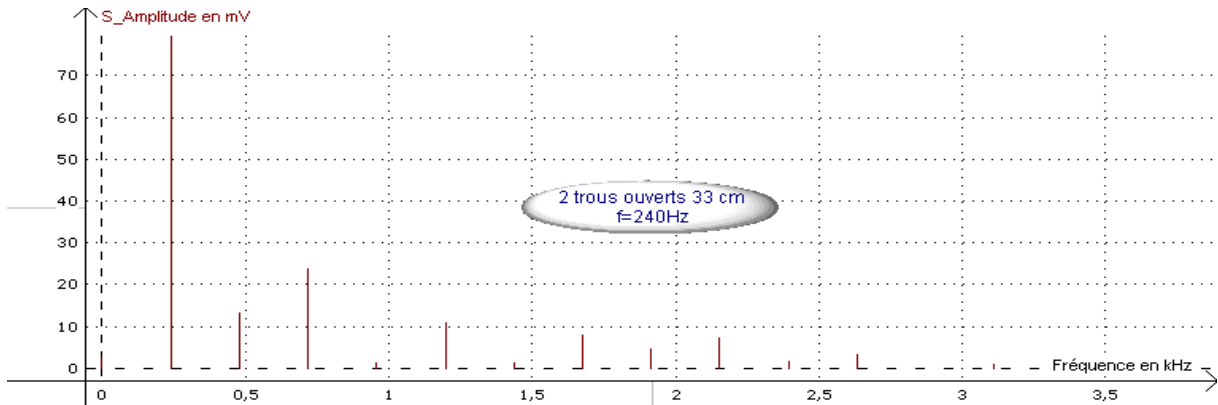
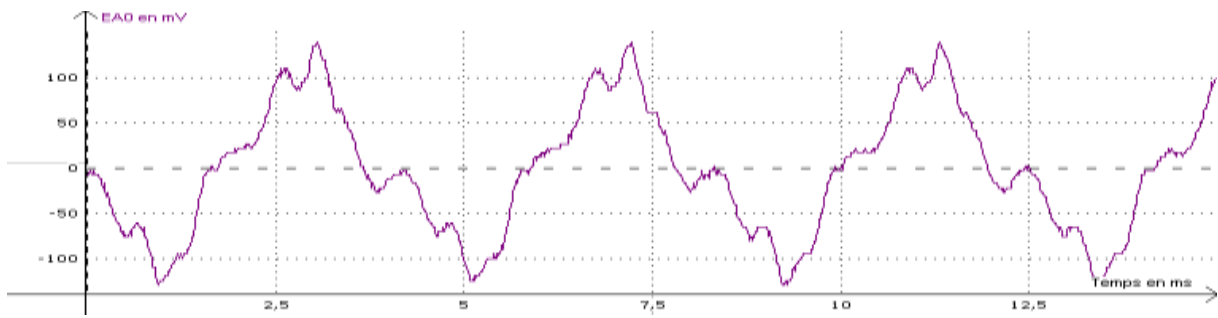
Les spectres sont obtenus ainsi facilement et rapidement. Etudions les résultats obtenus l'instrument à trois tuyaux mesurant 60cm.



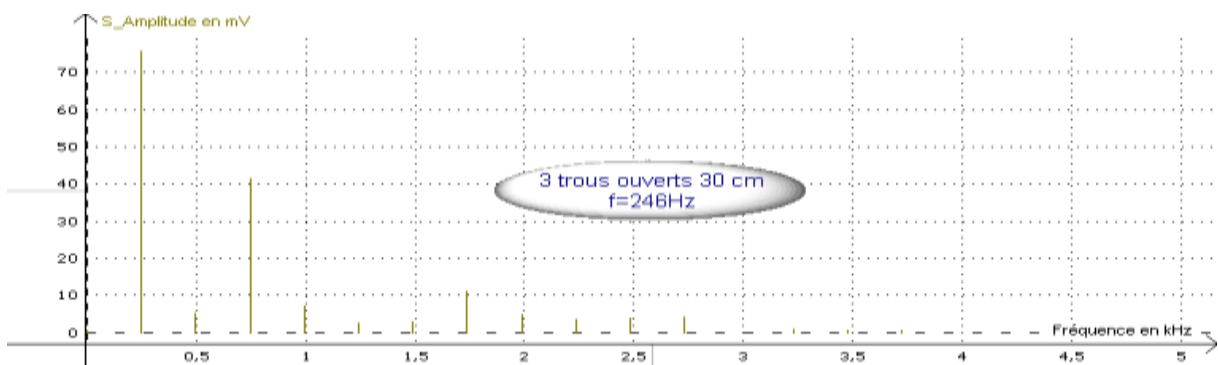
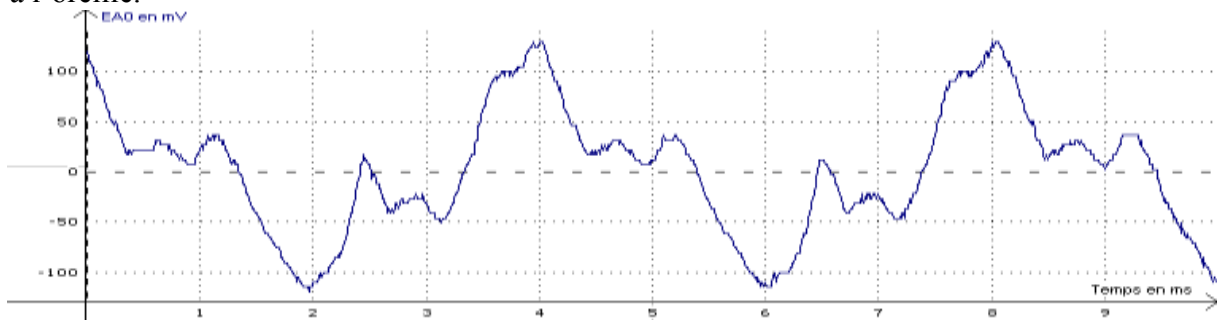
La fréquence fondamentale est la même que celle déterminé grâce à l'accordeur. Les harmoniques pairs et impairs sont présents. L'amplitude des harmoniques 3 et 5 est plus faible que celle des harmoniques 2 et 4. Comme pour un saxophone tous les harmoniques sont présents.



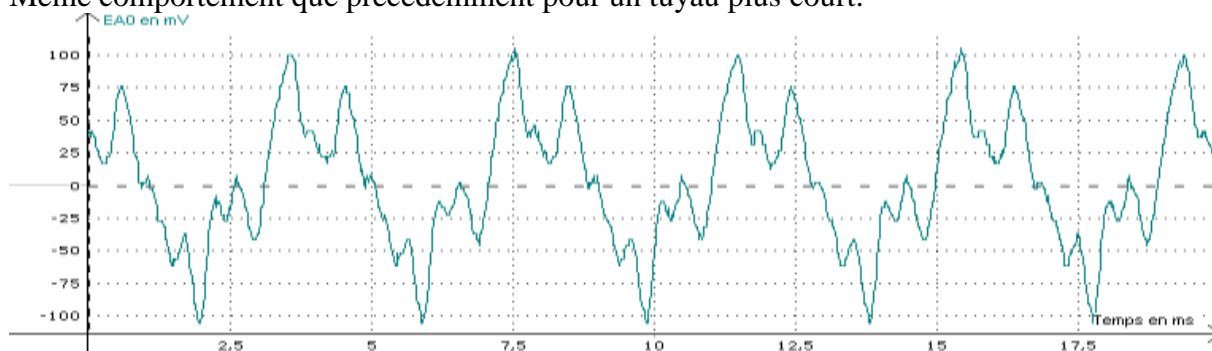
Lorsque nous réduisons la longueur de la colonne d'air résonante en ouvrant un trou, le timbre s'appauvrit. Seul le fondamental a une amplitude importante.

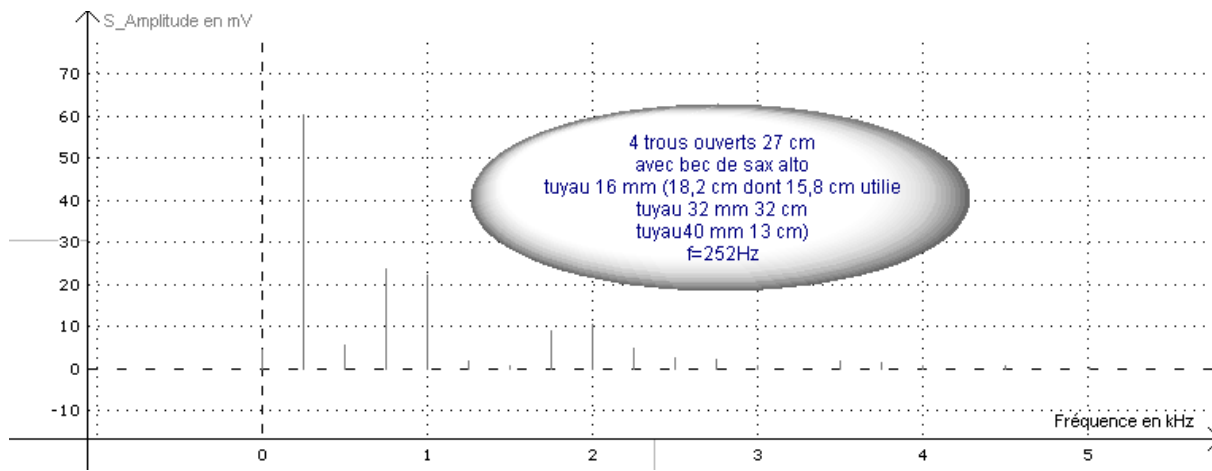


Lorsque la colonne d'air est encore réduite, l'analyse de Fourier change encore. On se rapproche du spectre d'une clarinette. L'harmonique 2 a une amplitude plus faible que celle du 3, comme pour un tuyau fermé à une extrémité qui favorise les harmoniques impairs. Il y a peu d'harmoniques car ils ont du mal à résonner dans le tuyau. En effet il n'est pas harmonique. Le timbre n'est pas riche, mais ce n'est pas pour cela qu'il n'est pas agréable à l'oreille.

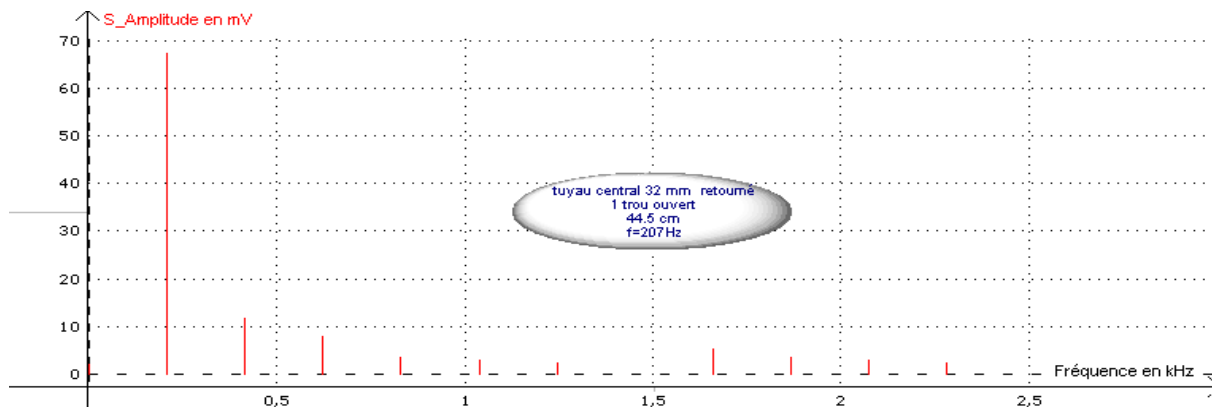
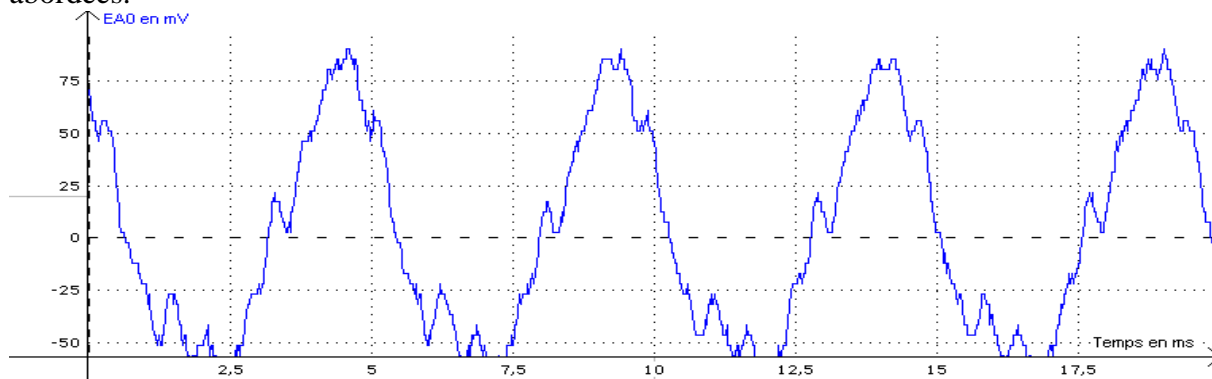


Même comportement que précédemment pour un tuyau plus court.

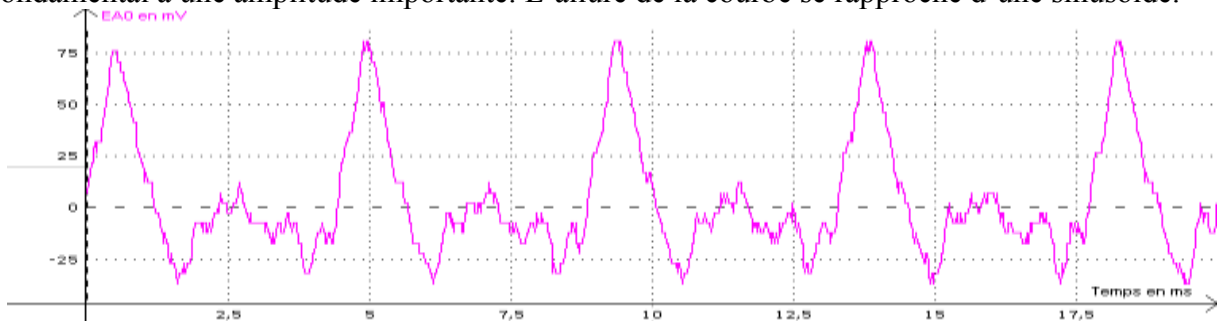


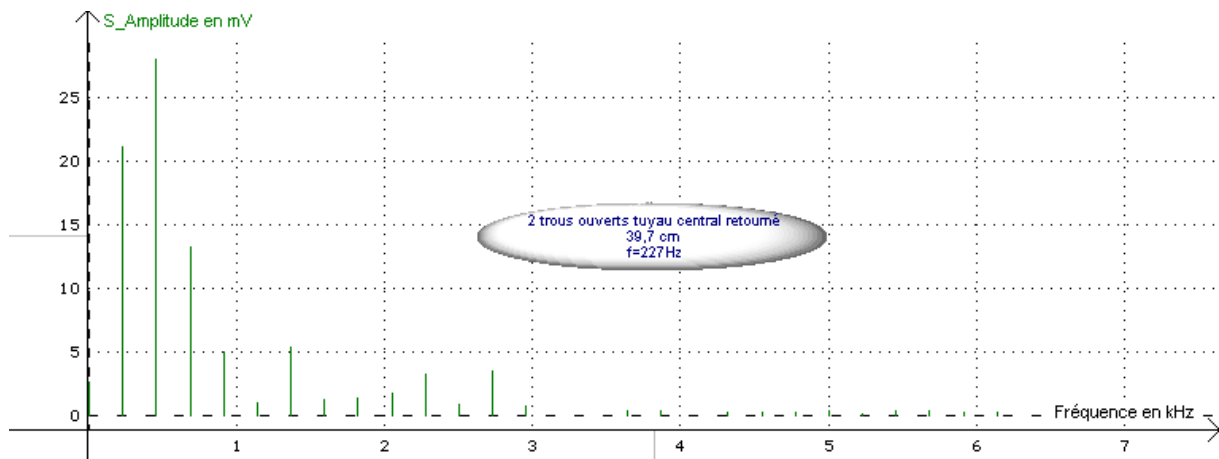


Dans ce cas, l'harmonique 2 est faible, mais le 4^{ème} est presque aussi important que le 3^{ème}. Le comportement de tubes en escalier, à cause des multiples réflexions s'éloigne des modélisations simplifiées que nous avons abordées.

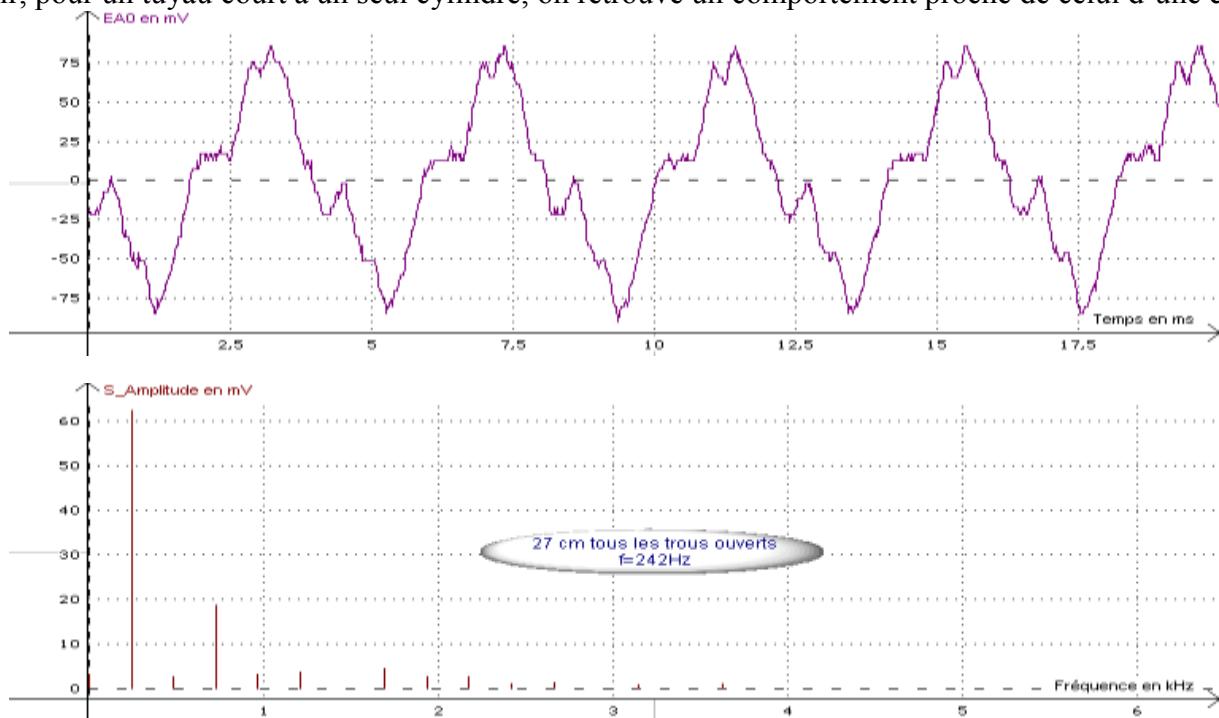


Seul le fondamental a une amplitude importante. L'allure de la courbe se rapproche d'une sinusoïde.





Pour finir, pour un tuyau court à un seul cylindre, on retrouve un comportement proche de celui d'une clarinette



Harmoniques pairs de faible amplitude.

CONCLUSION

Nous voulions faire un instrument en escalier se comportant comme un saxophone. Nous avons obtenus des instruments intermédiaires ayant un comportement proche de celui d'un saxophone pour les plus grandes longueurs et proche de celui d'une clarinette pour les plus courtes.

L'acoustique musicale est une science complexe. Par ce travail, nous avons goûté aux joies de la recherche de pistes nouvelles de fabrication d'instruments à vent, et à la difficulté de réaliser les expériences auxquelles nous pensions.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- Site du laboratoire LAUM : <http://laum.univ-lemans.fr/spip/spip.php?rubrique107>
- P.FLEURY et J.P.MATHIEU, *Vibrations mécaniques, acoustique*, Eyrolles, Paris, 1962 pour la modélisation des ondes stationnaires dans les tuyaux coniques
- Livres de spécialité de terminale S
- Document d'accompagnement des olympiades, sur l'acoustique musicale par notre professeur.
- Stéphane OLIVIER, Hubert GIE, Jean-Pierre SARMANT, *Physique Spé, PC*, PC, Cours et exercices d'application*, Editions Tec&Doc, 2000, pour l'annexe.