



LA

TCLARINETTE



ET LA



COMPLAINTE

DE NARNIA



Elèves participants :



Deshais Capucine



Dujardin Pauline



Latappy Claire



Magnol Marion



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

Table des matières

RESUME

ABSTRACT

KEY-WORDS

PREALABLE

INTRODUCTION

PARTIE 1 : ETUDE DES RESONANCES DE COLONNES D'AIR EXCITEES PAR UN HAUT-PARLEUR : MODELISATIONS SIMPLIFIEES.

1. ONDES STATIONNAIRES DANS UN TUYAU SONORE

1.1 Etude expérimentale des modes de vibration

1.1.1 Tuyau ouvert aux deux extrémités et excité à une extrémité

1.1.2 Tuyau ouvert aux deux extrémités et excité en son milieu

1.1.3 Tuyau en T ouvert aux deux extrémités et excité en son milieu

1.1.4 Clarinette

1.1.5 Mesures automatisées

1.2 Interprétation ondulatoire

1.2.1 Tuyau ouvert aux deux extrémités

1.2.2 Tuyau fermé à une extrémité

1.2.3 Tuyau en T

2. APPROCHE THEORIQUE

PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA TCLARINETTE

1. COURBES FREQUENCE - LONGUEUR

1.1 Matériel utilisé

1.2 Un point de repère expérimental : le schème de Weber.

1.3 Courbes d'étalonnage fréquence longueur

2. CONCEPTION ET JEU D'UN INSTRUMENT A HUIT TROUS

2.1 Comparaisons avec la clarinette

2.2 Le positionnement des trous

2.3 Fabrication des instruments au laboratoire

2.4 Analyse du son et synthèse sonore

3. LES INTERFERENCES

CONCLUSION

LEXIQUE

NOS SOURCES

LES 4 ANNEXES

RESUME

Pour notre participation aux Olympiades de Physique, nous avons conçu et étudié un instrument de musique à vent grâce à certaines relations de l'acoustique musicale que nous avons abordées expérimentalement. Notre instrument est unique et original. Il possède en effet un tube en T ouvert aux deux extrémités, deux pavillons mais un seul excitateur. Il a des possibilités microtonales*. Cette étude est un prolongement du cours d'acoustique de spécialité physique de terminale S et a été menée en collaboration avec deux autres groupes.

ABSTRACT

For our participation to the Physics Olympiad, we have designed and studied a musical wind instrument thanks to the laws of musical acoustics which we have broached experimentalment. Our instrument is unique and original. Indeed, it has one tube in T open on the two ends, two bells but only one exciter. It has microtonale possibilities. This study is an extension of acoustics class of physics speciality of S final year and has been led in collaboration with two others groups.

KEY-WORDS: Acoustique musicale, résonances, harmoniques, interférences.

PREALABLE

A la fin de notre année de Seconde et au début de notre année de Première S, nous avions déjà tenté de commencer à préparer les Olympiades de physique où une partie du travail devait se faire lors des Travaux Personnels Encadrés. Notre projet était de réaliser un photomètre solaire pour étudier le rayonnement solaire. Malheureusement, le groupe étant éclaté dans plusieurs classes et les professeurs encadrant le projet ne faisant pas partie de nos professeurs, le projet n'a pas pu aboutir et a été abandonné.

C'est pourquoi, afin qu'un nouveau projet soit mené à bien et aboutisse, nous avons choisi d'étudier un nouvel instrument en lien avec notre programme de spécialité dans le chapitre consacré à l'étude des sons musicaux. Le proviseur adjoint a pu nous rassembler cette année dans une même classe de Terminale où notre professeur encadrant est notre professeur de spécialité, ce qui facilite les choses. Les cours ont débuté par la partie « Produire des sons, écouter », pour nous permettre de réussir notre projet.

L'idée de fabriquer la Tclarinette nous est venue après avoir voulu étudier un chalumeau* double (petite photo en page de titre). En effet cet instrument médiéval possède comme notre Tclarinette deux tubes mais il est excité par deux anches ce qui est difficile à mettre en bouche. Nous nous sommes alors demandées si une seule anche pour deux tubes était possible. Il fallait donc trouver un moyen de les relier à une anche unique que nous pensions connecter par un T à l'extrémité des deux tubes. Nous sommes ainsi arrivées à l'élaboration de notre instrument unique : la Tclarinette. De plus, nous avons constaté qu'un instrument similaire était présent dans le film *Le monde de Narnia*. En effet, Mr Thumlus joue pour la petite Lucie une plainte avec un instrument étonnant comportant deux tuyaux excités par un seul bec de flûte. Nous avons fabriqué l'instrument qui ne fonctionne pas. Par contre avec une anche à la place du bec de flûte on retrouve un son proche de celui du film. Nous nous sommes alors inspirées de la forme de cette « flûte » appartenant au monde féérique pour concevoir et étudier notre instrument.

Précisons, que nous nous sommes aussi intéressées aux innovations en facture instrumentale pour voir si notre idée était réellement unique et novatrice. Pour cela nous sommes allées sur un site <http://www.aulochrome.com/aulochrome> une référence qui nous a été donnée par notre partenaire M Olivier Jonathan, facteur et réparateur d'aérophone à Agen. Nous avons pu remarquer sur ce site qu'un nouvel instrument construit par M François Louis possède lui aussi deux pavillons comme le notre mais deux anches alors que le notre n'en a qu'une. Ainsi notre instrument présente un nouvel intérêt c'est une innovation en facture instrumentale.

INTRODUCTION

Depuis longtemps les mathématiciens et les physiciens s'intéressent à l'acoustique musicale. L'acoustique est en perpétuelle évolution et les acousticiens constatent que les phénomènes qui permettent l'émission d'un

son par un instrument de musique sont extrêmement complexes et doivent parfois se limiter à des modélisations simplifiées et partiellement satisfaisantes des phénomènes étudiés. Grâce au programme de spécialité de Terminale S nous avons pu approcher certaines notions sur l'acoustique musicale. Nous avons pu particulièrement étudier le comportement d'une colonne d'air excitée par une anche ou un biseau, une modélisation très simplifiée des instruments à vent, afin de déterminer la sélection de fréquences de résonance émises par la longueur de la colonne d'air.

Les instruments de musique existent depuis l'Antiquité et étaient même déjà présents avant. A l'origine, les instruments à vent de l'Antiquité n'étaient que de simples tuyaux percés ayant une anche à l'une de leurs extrémités. Ce couplage ainsi effectué, ils produisaient des sons. Mais ces instruments n'étaient que peu développés : ils présentaient, par exemple, un nombre de trous qui ne pouvaient pas dépasser le nombre de doigts disponibles pour les boucher. Afin d'améliorer leur qualité acoustique, leur maniabilité..., les aérophones* ont connu une lente évolution. C'est surtout à partir du XVIII^e siècle que ces améliorations furent possibles grâce à différentes innovations techniques. Prenons l'exemple de la clarinette, cet aérophone de l'orchestre existe depuis 2500 ans, il a connu de nombreuses innovations pour obtenir l'instrument que nous connaissons aujourd'hui. En effet, l'ancêtre de la clarinette pourrait être apparenté à un chalumeau du Moyen Age qui ne possédait que peu de trous et pas de clés. Un autre groupe d'élèves de notre classe l'étudie. C'est au XVIII^e siècle que l'instrument évolue le plus rapidement. La clarinette possède déjà deux clés en 1754 mais aussi de nombreux inconvénients, notamment l'impossibilité de jouer dans certains tons. Cette impossibilité presque absolue pour l'exécutant de jouer dans d'autres tons que celui dans lequel l'instrument avait été fabriqué a obligé les facteurs d'instruments à construire des clarinettes dans presque tous les tons. L'ajout successif de clés a permis d'augmenter les possibilités de l'instrument. Nous comptons aujourd'hui dix sept trous sur une clarinette. De plus, au cours de son évolution le tube de l'instrument a été modifié afin d'obtenir des résonances satisfaisantes. C'est grâce à de nombreuses recherches, expérimentations et modifications que la clarinette a pu se fabriquer.

D'une part, nous devons noter qu'au Moyen Age notamment, l'orchestre n'existait pas. Il n'y avait donc aucune obligation quant à la normalisation des notes. En effet, la gamme du fifre d'un berger landais n'était pas la même que celle du chalumeau du paysan du village voisin comme l'ont remarqué des ethnomusicologues à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. A cette époque, l'harmonie n'était pas possible et elle n'était pas recherchée; ceci constituait une richesse immense car tout comme le patois différait d'un village à l'autre, les gammes différaient suivant les instruments. De nos jours, l'orchestre s'évertue à l'harmonie la plus satisfaisante possible, la gamme a été normalisée, tempérée et ne présente donc plus la même richesse qu'auparavant. Nous pouvons dire qu'après avoir été le fruit de nombreuses évolutions, les instruments et la musique d'aujourd'hui sont parfois un peu trop "aseptisés"*. Un mauvais musicien peut assez facilement produire des notes justes (mais pas forcément agréables).

D'autre part, alors que la musique grégorienne médiévale possédait huit modes*, chacun donnant une ambiance particulière, une « couleur » particulière, la musique instrumentale occidentale n'a plus que deux modes, le mode mineur et le mode majeur.

Cette constatation nous amène donc à réfléchir sur l'étude de nouvelles pistes d'expérimentations pouvant nous permettre de recouvrer une richesse plus importante dans la musique, grâce à une nouvelle diversité de gammes musicales et d'instrument de musique. Ainsi la Tclarinette peut présenter une nouvelle voie de recherche. En effet, elle n'a jamais été construite et semble pourtant présenter certaines qualités dont nos instruments actuels sont dépourvus. Notons d'abord qu'il s'agit du premier instrument à trous dont l'excitateur est placé au milieu du tube. En effet, nous n'avons pas trouvé la trace d'un autre instrument similaire. Notre instrument permet d'aborder une musique à micros intervalles, intervalle inférieur au demi ton, et ainsi de trouver une « couleur » différente de celle de la musique normalisée occidentale. Notre tentative est une recherche de couleur différente pour la musique. La Tclarinette ne fonctionne ni comme une clarinette, ni comme une flûte. C'est un instrument unique et nouveau.

Pour vous le faire découvrir, nous allons aborder notre investigation par l'étude de colonnes d'air résonnant dans de simples tuyaux. Puis nous étudierons quelles sont les caractéristiques de l'association anche-résonateur. Le plan de notre travail est proche de celui du programme de spécialité sur les sons. La collaboration de Luc Forest, directeur des études de seconde année à l'IUT mesures physiques de Bordeaux I, de Jonathan Olivier, et de musiciens de l'orchestre d'harmonie « La Lyre Agenaise » nous a permis de mener cette expérimentation à sa finalité (La tentative de collaboration avec le LEP pour la fabrication de l'instrument n'a pu aboutir à temps.)

PARTIE 1 : ETUDE DES RESONANCES DE COLONNES D'AIR EXCITEES PAR UN HAUT-PARLEUR : MODELISATIONS SIMPLIFIEES.

1. ONDES STATIONNAIRES DANS UN TUYAU SONORE

1.1 Etude expérimentale des modes de vibration

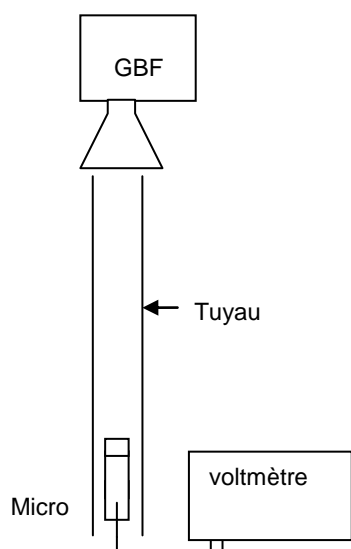
Le but de notre travail est de fabriquer et d'étudier une Tclarinette. Mais c'est un système complexe possédant plusieurs discontinuités. Les 8 trous comme la bifurcation en T sont des discontinuités rendant très difficile l'étude de l'instrument car des turbulences de l'air ont lieu à cet endroit. Plusieurs tuyaux de petit diamètre intérieur sont associés et il est impossible de les explorer avec un micro. De plus, l'instrumentiste agissant sur l'anche et les trous fait pleinement partie du système de production du son. C'est un ensemble compliqué où les vibrations de l'anche excitent à la fois l'air dans l'instrument et celui dans l'instrumentiste. Les deux colonnes d'air sont dites couplées, c'est-à-dire associées par les vibrations de l'anche. Alors pour aborder cette étude, il faut simplifier le système d'étude pour obtenir des premiers points de repère.

Nous remplaçons en premier lieu l'instrumentiste, le bec et l'anche par un haut-parleur alimenté par un GBF. Il est assez simple de maîtriser l'amplitude et la fréquence du signal fourni par le GBF. Pour l'anche cela aurait été impossible. Les tuyaux seront de diamètre plus important que ceux de l'instrument de musique pour permettre le déplacement du micro sans trop perturber le comportement de la colonne d'air. Ces tuyaux seront sans trous.

Avant de nous lancer dans les expériences nous avons consulté plusieurs livres de spécialité de terminales S. On y découvre que le tuyau contient la colonne d'air qui entre en résonance, mais plus les tuyaux sont fins, plus la colonne d'air semble dépasser du tuyau. Avec des tuyaux de diamètre intérieur de plus de 7 cm, la colonne d'air semble moins dépasser du tuyau. C'est pour cela que les travaux pratiques de Terminale proposent d'utiliser des tubes de gros diamètre pour étudier les résonances. C'est donc un argument de plus pour expérimenter avec des tuyaux de diamètre intérieur plus important que ceux d'une flûte ou d'une clarinette. Nous étudierons d'abord un tuyau ouvert aux deux extrémités selon deux modes opératoires différents, puis un tube en T et une clarinette

1.1.1 Tuyau ouvert aux deux extrémités excité à une extrémité :

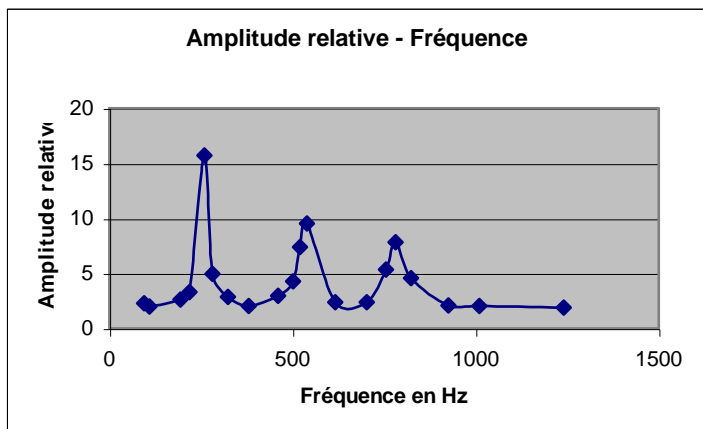
On relie un générateur basse fréquence situé près de l'extrémité d'un tuyau à un haut-parleur. Le diamètre du tuyau peut permettre de déplacer un microphone dans le tube sans trop perturber les vibrations de la colonne d'air. Le tuyau est ouvert aux deux extrémités. La salle conserve une température et une pression atmosphérique constantes pendant toute l'expérience.



Si on augmente la fréquence du générateur de manière progressive, on remarque une augmentation de l'intensité du son pour certaines fréquences et ceci qu'il y ait le micro ou non. La plupart du temps, l'oreille suffit pour repérer ce phénomène. Le tuyau est alors en résonance.

Cependant il faut signaler que l'amplitude du son fourni par le haut-parleur dépend de la fréquence, même lorsqu'il n'y a pas de colonne d'air résonante. Pour évaluer correctement l'amplitude de chaque résonance, il faut donc mesurer l'amplitude du son perçue par le micro sans le tube, puis avec le tube et faire le rapport des deux tensions efficaces obtenues. C'est un travail très long et très pénible car le son aigu est difficile à supporter pour les expérimentatrices. L'expérience dure longtemps à cause des nombreuses manipulations du tube. Plus de 3 h sont nécessaires pour obtenir le résultat suivant.

Avec un tuyau de 60 cm de long et de diamètre intérieur de 7 cm, on obtient les résultats suivants :



Les fréquences de résonance sont les suivantes : $f_1 = 260$ Hz, $f_2 = 540$ Hz, $f_3 = 781$ Hz avec $f_2/f_1 = 2,08$ et $f_3/f_1 = 3,00$.

On appelle f_1 la fréquence du mode fondamental de résonance du tuyau. Les autres fréquences de résonance sont proches des multiples entiers de f_1 . Soit k un entier naturel différent de zéro : $f_k = k (f_1)$

Aux erreurs de mesure près, les fréquences de résonance sont harmoniques, c'est-à-dire multiples de la fréquence fondamentale et les pics sont bien marqués (cf. article de Jean-Pierre

DALMONT, Joël GILBERT et Jean KERGOMARD, « Des instruments à vent harmonique », *Pour la Science*, N°238, Août 97, p 78). Le premier est plus fin que le second qui est plus fin que le troisième. La première résonance a une amplitude plus importante que les autres.

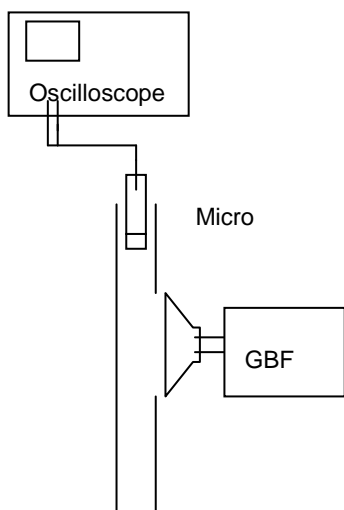
λ est la longueur d'onde (distance séparant deux points consécutifs du milieu vibrant en phase). La demi-longueur d'onde vaut $34000/2/260 = 65,4$ cm, si nous supposons la célérité du son dans l'air de la salle proche de 34000 cm/s. Elle est supérieure de 9 % à la longueur du tube. En déplaçant le micro dans le tuyau, on observe un minimum (nœud) de pression à proximité d'une extrémité ouverte

Avec un tube de 54 cm et de diamètre intérieur 7,8 cm on obtient les valeurs suivantes : $f_1 = 281$ Hz, $f_2 = 570$ Hz, $f_3 = 860$ Hz. Les pics sont semblables à ceux de l'expérience précédente.

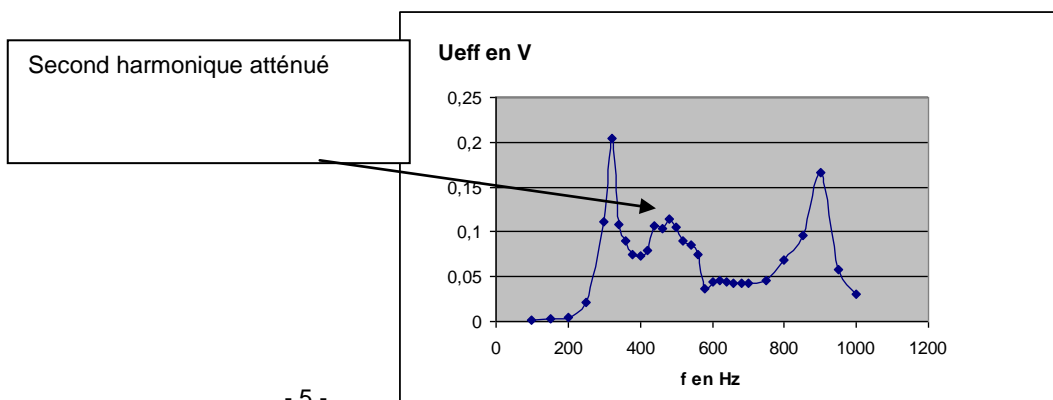
On note que pour f_1 : $\lambda/2 = 34000/2/281 = 60$ cm soit 11,1 % de plus que la longueur du tube.

Ces expériences sont très longues à réaliser. Pour les mesures suivantes nous ne tiendrons pas compte des variations de l'amplitude du son du haut-parleur en fonction de la fréquence. On peut quand même voir les résonances, même si leur amplitude relative respective précise n'est plus accessible. De plus nous n'hésiterons pas à modifier le niveau sonore au cours de l'expérience, pour rendre la situation plus supportable pour les expérimentatrices. M Luc Forest, nous a indiqué qu'en laboratoire de recherche, ces expériences sont réalisées dans des chambres protégeant les oreilles des expérimentateurs, et avec un appareil dont nous ne disposons pas : l'impédancemètre*.

1.1.2 Tuyau ouvert aux deux extrémités excité en son milieu



Le tube, toujours ouvert aux deux extrémités, peut être également excité par son milieu. Ce modèle sera plus proche de notre Tclarinette que les précédents. On a réalisé l'expérience en mettant le haut-parleur au-dessus d'une ouverture de forme circulaire de diamètre 5 cm située au milieu du tube de 54 cm.



La courbe obtenue a un aspect qui nous a étonné. Nous avons d'abord cru à des erreurs expérimentales. L'expérience a été reproduite 3 fois, dont une avec notre professeur, pour obtenir toujours des résultats comparables.

Voici les valeurs des fréquences de résonance :

$$f_1 = 337 \text{ Hz} ; f_2 = 600 \text{ Hz} ; f_3 = 902 \text{ Hz} \text{ et } f_2/f_1 = 1,78 ; f_3/f_1 = 2,68$$

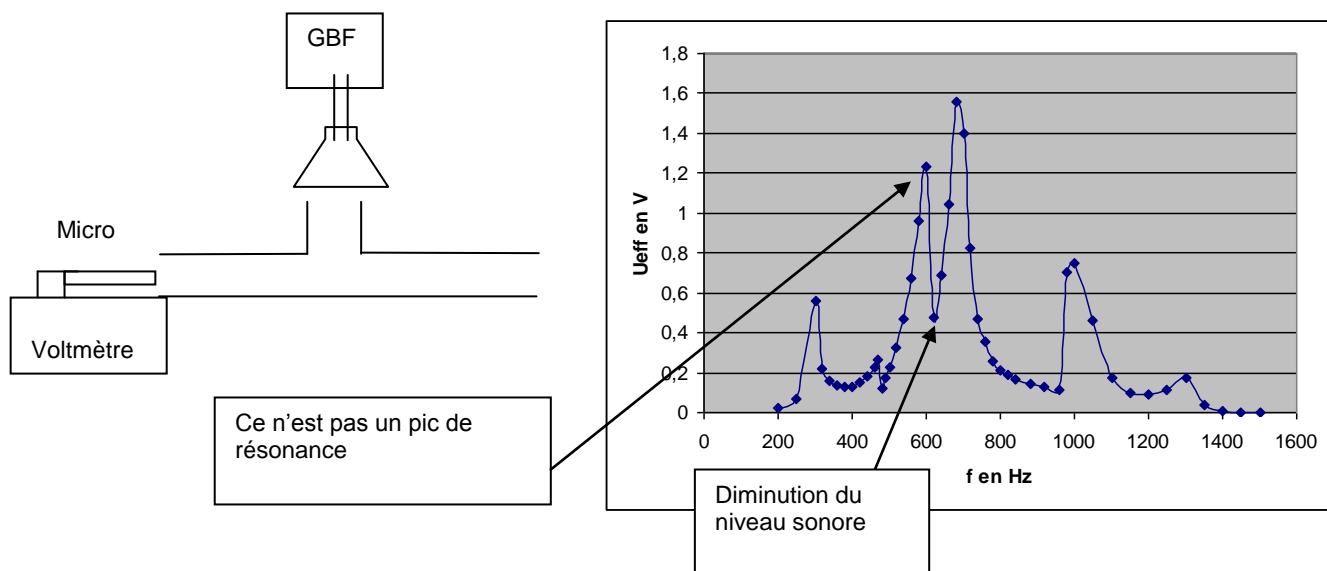
Ces fréquences de résonance sont décalées par rapport à celles obtenues avec le même tuyau excité à une extrémité. Elles sont plus élevées de 20 % pour f_1 , 5% pour f_2 , et 4,4 % pour f_3 . Le tuyau n'est pas harmonique à cause de l'important décalage de f_1 .

Pour le fondamental, on remarque que $\lambda/2 = 34000/2/237 = 50 \text{ cm}$: la demi longueur d'onde est inférieure à la longueur mesurée du tuyau de 7,4 %. C'est un résultat étonnant que l'on ne rencontre pas pour les tuyaux excités à une extrémité, pour lesquels la demi-longueur d'onde est toujours supérieure à la longueur du tube.

Les pics pour le fondamental et le partiel 3 sont fins et intenses. Ces deux résonances sont favorisées par le système. Le partiel 3 est plus important que dans l'expérience précédente. Par contre le second partiel est atténué et plus large.

1.1.3 Tuyau en T ouvert aux deux extrémités et excité en son milieu

On réalise aussi l'expérience avec un tube en forme de T. Le tube, de diamètre 50 mm, mesure 68 cm de long, et le T 15 cm. On obtient les résultats suivants :



Voici les valeurs des fréquences de résonance :

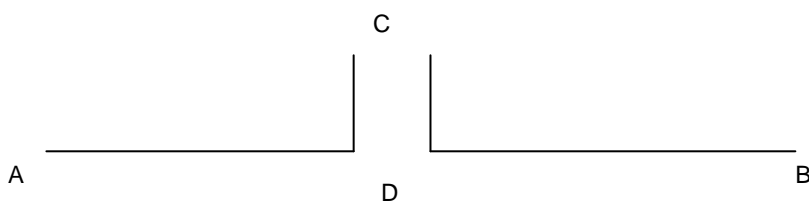
$$f_1 = 300 \text{ Hz} \text{ avec } \lambda/2 = 34000/2/300 = 56,7 \text{ cm} ; f_2 = 470 \text{ Hz} \text{ (très faible amplitude)}$$

$$f_3 = 600 \text{ Hz} \text{ (amplitude très importante)} ; f_4 = 1000 \text{ Hz} ; f_5 = 1300 \text{ Hz} \text{ (faible amplitude)}$$

$$f_2/f_1 = 1,57 ; f_3/f_1 = 2,00 ; f_4/f_1 = 3,33 ; f_5/f_1 = 4,33$$

Cet ensemble ne constitue pas une série harmonique même si $f_3/f_1 = 2,00$. Ces résultats sont eux aussi déconcertants et nous ont troublés longtemps avant de pouvoir les interpréter. Nous n'avons pas pu trouver de littérature sur le sujet. Les tubes en T excités par leur milieu semblent absents des ressources d'Internet et des livres d'acoustique que nous avons consultés. Nous avons donc du réaliser des expériences complémentaires pour mieux comprendre ces résultats.

Les expériences sont réalisées avec Haut-parleur placé en C, micro en A ou B. Nous avons fait varier la longueur CD de la bifurcation.

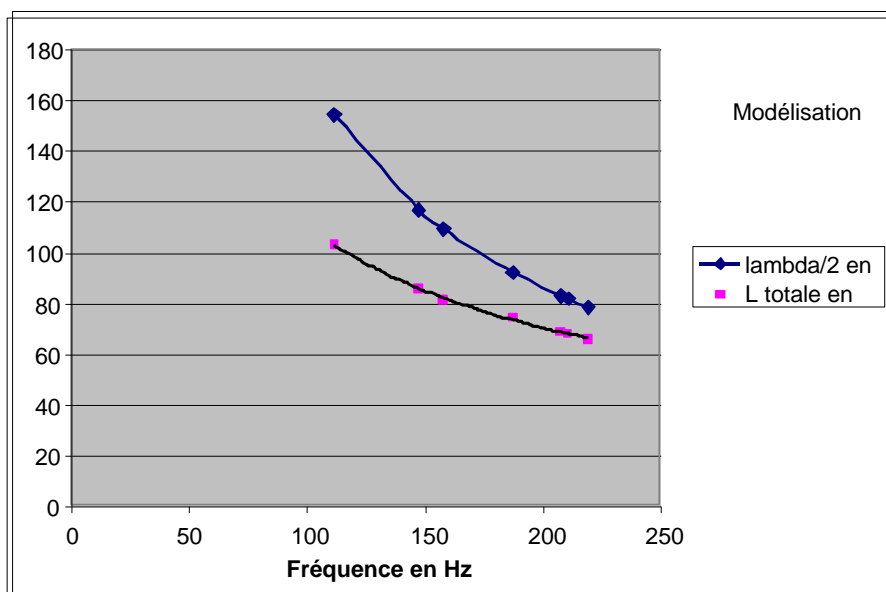


$$AD = DB = 34 \text{ cm} \quad L_{totale} = 34 + 34 + \text{bifurcation}$$

Le diamètre est de 50mm pour les tuyaux. CD est le paramètre que nous faisons varier. Pour chaque valeur de CD nous repérons les fréquences de résonance du tube excité en C. Dans tous les cas nous observons que pour la première résonance, le T a une longueur totale beaucoup plus importante que la demi-longueur d'onde du son. Ce qui est étonnant.

N°expérience	Lbifurcation en cm	Ltotale en cm	F1résonance en Hz	Lambda/2 en cm	F2 en Hz	F3 en Hz	F4 en Hz	F5 en Hz	F6 en Hz
1	8	76	365	46,5753425	481	797	980		
2	15	83	304	55,9210526	485	711	984		
3	20	88	280	60,7142857	481	654	906		
4	23	91	276	61,5942029	615	845	987		
5	27	95	259	65,6370656	495	580	799		
6	31	99	254	66,9291339	535	763	1008		
7	47	115	212	80,1886792	399	493	642	798	1060

On remarque que pour la 1^{ère} résonance la fréquence du son diminue si la longueur CD du tube en T augmente. Traçons donc Ltotale en fonction de la fréquence et comparons avec les valeurs de $\lambda/2$. On constate que les deux courbes ne correspondent pas. La modélisation de l'évolution de Ltotale ne donne pas la fonction attendue. Ltotale n'est pas proportionnelle à l'inverse de la fréquence du son. On peut donc supposer que seule une partie du T détermine la fréquence de résonance du son. Supposons que seule une partie de l'air du tube résonne, par exemple CDA. Dans cette hypothèse, la demi longueur d'onde pour chaque 1^{ère} résonance est très proche de CDA. Pour la 1^{ère} résonance, le tuyau se comporte comme un tube CA ouvert aux deux extrémités, et donc comme si la portion DB était absente. Le tuyau se comporte aussi comme un tube CB ouvert aux deux extrémités, et donc comme si la portion DA était absente. Les deux colonnes d'air CAD et CDB résonnent en même temps sur la même fréquence.



Par contre, la seconde fréquence de résonance n'est pas le double de la première. Pour les expériences n°1, 2, 3, 5, 7, on trouve une 2^{nde} fréquence de résonance proche de 490 Hz. C'est la fréquence de résonance mesurée de l'harmonique 2 du tube AB excité en A, et cela, quelque soit la longueur du tube CD. Dans ce cas, seule la partie AB du tuyau résonne sur la fréquence de son second partiel. De même pour les fréquences proches de 985 Hz, qui correspondent à l'harmonique 4 mesuré du tube AB excité en A quelque soit la longueur de CD.

Pour les autres valeurs des fréquences de résonance, il est difficile de savoir sans expériences en plus qui nous éloigneraient du sujet. Pour l'expérience n°1, la fréquence de résonance à 797 Hz est peut-être le second partiel de résonance du tube CA ou le troisième du tube AB. Mais nous n'en dirons pas plus pour ne pas dire d'erreurs.

Donc pour un tube en T, des colonnes d'air de longueurs différentes peuvent entrer en résonance séparément, ce qui crée un nombre plus important de fréquences de résonance que pour un simple tube. Ce résultat est cohérent avec le contenu d'un article d'acoustique sur les discontinuités que nous a envoyé Luc Forest, directeur des études en 2^{nde} année de l'IUT mesure physique de Bordeaux I, mais dont nous n'avons pas la référence.

La présence du haut-parleur, source de pression acoustique en C tend à imposer un ventre de pression en D soit un noeud de vibration, si CD est petit.

1.1.4 Etude d'une clarinette

Nous avons aussi voulu réaliser l'étude d'un véritable instrument de musique, une clarinette prêtée par la Lyre Agenaise. Cet instrument servira de point de repère lors de l'étude acoustique de la Tclarinette.

On réalise donc de nouveau l'expérience avec une clarinette de 70 cm de long dont tous les trous ont été bouchés avec du scotch. C'est un tuyau fermé à une extrémité. Le micro et le haut-parleur étant placés tous deux à côté du pavillon.

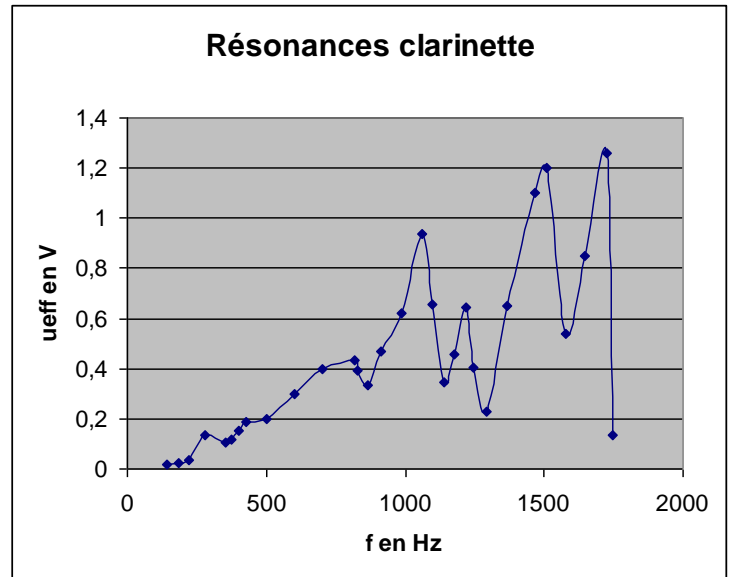


On obtient le graphique ci-dessous :

Pour une clarinette de 70 cm, nous attendions une fréquence de résonance à $f = 121$ Hz, puis une à $3f = 364$ Hz, puis une autre à $5f = 607$ Hz, $7f = 850$ Hz et ainsi de suite. (Voir interprétation ondulatoire ci-après)

Nous avons obtenu les résultats suivants, $f_a = 281$ Hz, $f_b = 817$ Hz, $f_c = 1062$ Hz, $f_d = 1217$ Hz, $f_e = 1507$ Hz, $f_f = 1726$ Hz.

La première fréquence mesurée correspond peut-être à $2x f_{\text{fondamental}}$. La première fréquence de résonance n'est pas décelable. Ces fréquences ne semblent pas harmoniques, et pourtant la clarinette est un instrument harmonique. Le fait de remplacer l'instrumentiste par un haut-parleur a une importante influence sur le résultat.



1.1.5 Mesures automatisées

Fin octobre, en commençant à préparer l'oral, nous avons pensé qu'il serait bien difficile de tracer les courbes précédentes devant le jury, ou même simplement de faire quelques points. Le son du haut-parleur est fort, rapidement désagréable pour les expérimentateurs et doit être maintenu assez longtemps pour faire plusieurs mesures et cerner les résonances. Expliquer notre démarche pendant les mesures aurait été difficile. La question qui se pose donc : Est-il possible de faire varier rapidement la fréquence du GBF de 10 Hz à 1000 Hz et d'enregistrer le son du micro ?

Un GBF possède une sortie vobulation qui donne une fréquence variant linéairement de f_0 à f_g , (fréquences réglables), en quelques secondes. Si cette sortie alimente un haut-parleur, vous n'avez plus besoin de tourner le bouton pour faire varier la fréquence, cela se fait tout seul. Une acquisition sur Latispro de la tension du micro sur 10 s permet d'obtenir une courbe utilisable. Le résultat n'est pas très beau, mais les pics sont visibles et permettent en 10 s d'estimer les fréquences de résonance.

Pour obtenir ce résultat, Latispro est paramétré comme suit :

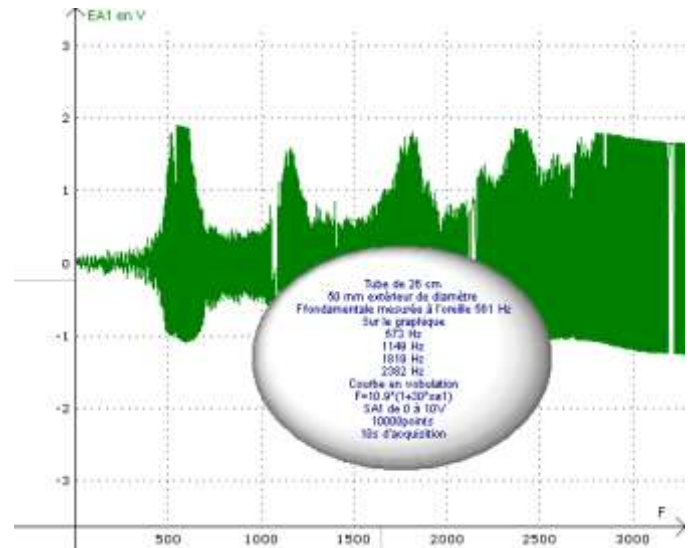
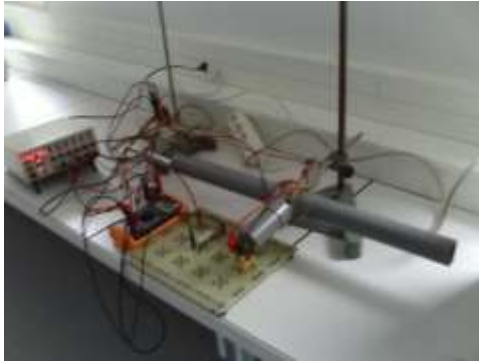
10000 points pour l'acquisition et durée 10s

La sortie SA1 est utilisée. Elle fournit une rampe de tension variant de 0 à 10 V sur une période.

Le signal de cette sortie est envoyé sur le GBF entrée Vobulation

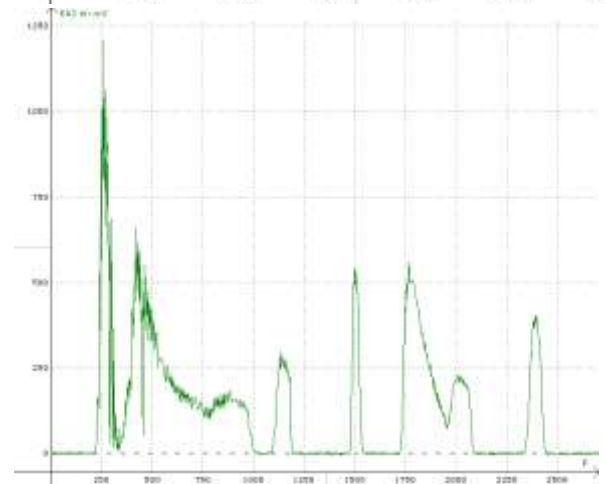
La fréquence est alors donnée par $F = 10,9 \times (1 + 30 \times SA1)$ selon la notice de l'appareil.

Le GBF est réglé sur le calibre 1K et le gros bouton de réglage est au minimum. La fréquence de départ est proche de 10,9 Hz ($U = 0V$). La fréquence finale est $10,9 \times (1 + 30 \times 10) = 10,9 \times 301 = 3281$ Hz. Après un calcul de F sur la feuille de calcul de Latispro on trace la tension aux bornes du micro en fonction de F. Voici les résultats :



En interposant entre le micro et le boîtier d'acquisition un détecteur de crête (comme pour la démodulation d'un signal radio) on peut obtenir une courbe comme celle-là, permettant en quelques secondes de repérer les fréquences de résonance. La diode enlève la partie négative du signal et RC permet d'éliminer les variations rapides du signal, ne sélectionnant que l'enveloppe des variations. $R = 15 \text{ k}\Omega$ et $C = 220 \text{ nF}$

Nous n'avons découvert ce montage qu'à la fin de notre préparation, et il ne nous était pas possible de refaire toutes nos mesures avec.



1.2 Interprétation ondulatoire des résultats expérimentaux précédents :

1.1.1 Tuyau ouvert aux deux extrémités

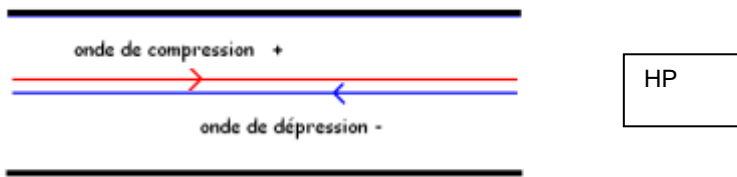
Notre cours de spécialité nous a permis de comprendre les modes de vibration d'une colonne d'air ouverte sur l'extérieur. Une onde sonore est une onde progressive longitudinale qui se propage dans un milieu élastique tel que l'air. Elle ne déplace en aucun cas de la matière mais de l'énergie. La matière, l'air, vibre autour de sa position d'équilibre. Elle est produite par une compression d'une section d'air suivie d'une dépression et se propage dans toutes les directions qui lui sont proposées. Dans un instrument de musique, la seule direction autorisée est celle du tube. Puis l'onde rayonne vers l'extérieur par les trous et le pavillon.

Imaginons une onde sonore se propageant dans la Clarinette. L'onde sonore de compression se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes, on retrouve donc la même onde dans les deux tuyaux. Lorsque celle-ci arrive à l'extrémité ouverte de l'instrument, elle va sortir de l'ouverture et produire une dépression en arrière de celle-ci. Dans un tuyau cylindrique, une onde sonore se déplace jusqu'à ce qu'elle rencontre le pavillon ou un premier trou latéral ouvert. Alors la surpression due à l'onde s'échappe par ce trou et entraîne une quantité d'air vers l'intérieur du tuyau, ce qui crée la dépression.

L'onde de compression se retrouve face à un "mur" de pression. En effet la pression produite à l'intérieur du tuyau est extrêmement faible face à la pression atmosphérique de l'air ambiant. Or, lorsqu'une onde progressive rencontre une telle discontinuité, elle se réfléchit : elle possède alors la même forme, la même direction de propagation et la même célérité que l'onde incidente, mais un sens de propagation opposé et est inversée. L'onde de dépression est donc l'onde de compression qui repart inversée en sens opposé.

Si un tuyau est ouvert à ses deux extrémités, une première onde sonore incidente va être réfléchi au niveau d'un ventre de vibration (ou d'un nœud de pression pour un micro) situé à l'une des extrémités. Cette onde de compression créera alors en sortant du tuyau une onde de dépression ayant la même forme, la même direction, la même célérité mais un sens de propagation opposé à l'onde incidente. De même, lorsque cette onde de dépression atteindra une extrémité elle produira une onde de compression ayant les mêmes caractéristiques

que la première onde incidente. Lorsqu'une onde parvient à une extrémité, sa pression tend à égaler celle de l'extérieur du tuyau autrement dit la pression atmosphérique. En conséquence, la surpression ou sous pression due à l'onde devient minimale. C'est un nœud de pression. Nous n'avons pas pu déterminer exactement sa position expérimentalement, avec un micro, car à la sortie du tube l'onde plane devient sphérique et son amplitude diminue progressivement.



Soit L la longueur du tuyau, c la célérité du son dans les conditions de l'expérience et k un entier naturel différent de zéro.

Lorsqu'un tuyau est ouvert, il y a un enchaînement de réflexions. Il possède un ventre de vibration à chaque extrémité. Deux nœuds consécutifs sont séparés d'une demi-longueur d'onde selon le cours. Ainsi, la longueur L correspond à un nombre entier de demi-longueur d'onde et donc à la distance parcourue par l'onde durant une période: $L = k\lambda/2$.

La durée de ce phénomène est : $t = 2L/c$.

La fréquence fondamentale est : $f = c/\lambda = c/2L$.

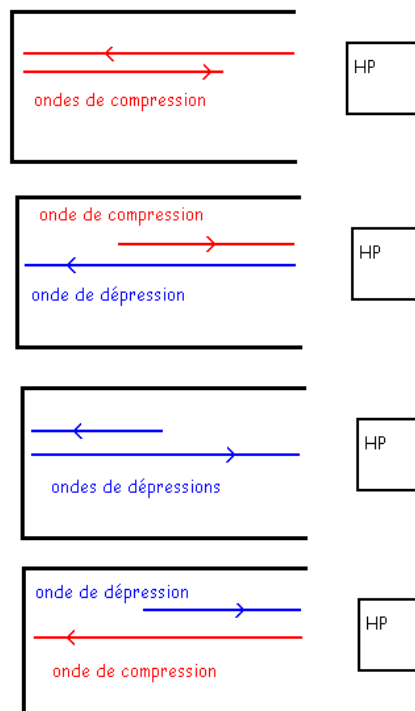
La fréquence des harmoniques est : $f_k = k f_{\text{fondamentale}}$.

Ce résultat concorde bien avec celui de la première expérience.

La Clarinette est un instrument ouvert aux deux extrémités grâce à deux pavillons et donc peut être étudié suivant ces principes.

1.2.2 Tuyau fermé à une extrémité

Si un tuyau est fermé à l'une de ses extrémités, la première onde arrivant à cette extrémité, par exemple une onde de compression, sera réfléchiée à l'identique mais son sens de propagation sera inversé. Ce phénomène est plus couramment appelé l'écho. A une extrémité fermée, il y a un nœud de vibration (ou un ventre de pression) car les vibrations de la colonne d'air ont une amplitude minimale à cet endroit. La paroi gêne les vibrations.



Il peut exister dans le tuyau une onde stationnaire, c'est-à-dire une onde qui ne se propage pas en apparence car elle est la superposition parfaite des ondes incidentes et réfléchies, si certaines conditions sont réunies.

Lorsqu'un tuyau est fermé à une extrémité, la longueur L doit être un multiple impair du quart de la longueur d'onde car l'extrémité ouverte du tuyau possède un ventre de vibration et l'extrémité fermée un nœud de vibration : $L = (2k+1)\lambda/4$.

La fréquence fondamentale est : $f = c/4L$.

Celle des harmoniques sont : $f_k = (2k+1)f_{\text{fondamentale}}$.

La longueur d'onde maximale est atteinte pour $k = 0$: $\lambda_0 = 4L/(0+1) = 4L$.

Les successions d'harmoniques sont impaires. C'est proche de ce que l'on pouvait espérer pour une clarinette.

L'amplitude d'un son mesurée par le micro (en fait V_{eff}) est plus importante lorsque les ondes sont stationnaires. Des longueurs d'ondes différentes et donc des fréquences différentes ne permettent pas toutes au tuyau d'entrer en résonance. Pour qu'il y ait des ondes stationnaires les ondes incidentes et réfléchies doivent être en phase entre elles. Pour un tuyau ouvert ce phénomène correspond à un aller-retour de l'onde soit une longueur de $2L$. Pour un tuyau fermé d'un côté, cela correspond à deux allers-retours, soit une longueur de $4L$.

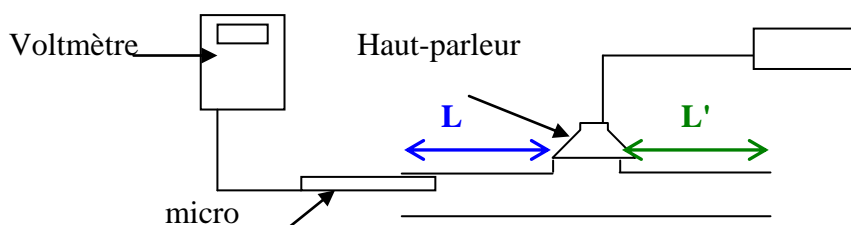
La clarinette est un instrument à anche où au niveau de cette embouchure le tube n'est pas en contact direct avec l'atmosphère. On peut donc la modéliser par un tuyau ouvert à une extrémité et fermé à l'autre.

On obtiendra donc que des harmoniques impairs lorsque le tuyau sera en mode d'ondes stationnaires et le son ne sera possible que si la longueur du tuyau répond à la formule du dessus. Ceci est contraire au haut-parleur avec lequel un son est produit quelle que soit la fréquence. On dit que le système excitateur (l'anche) et le système de résonance (le tuyau) sont couplés.

Cependant nous avons observé des écarts expérimentaux par rapport à ce résultat. Nous avons trouvé des harmoniques pairs dans le son d'une clarinette. La modélisation simplifiée que nous utilisons n'est là aussi qu'un premier point de repère.

1.2.3 Tuyau en T

Pour la Tclarinette, ou son modèle simplifié constitué par un tube en T, l'interprétation des résultats expérimentaux est plus difficile. Nous avons effectué une expérience complémentaire afin de repérer les ventres et les nœuds de vibration dans un tuyau en T ouvert aux deux extrémités et excité en son milieu. Voici le schéma de notre expérience :



$L = L' = 34\text{cm}$ et 15 cm pour la portion de tube placé en face du HP, soit une longueur totale de 83 cm .

Fréquence du GBF : $F = 684\text{Hz}$, correspondant à une résonance du tuyau. Nous avons avancé progressivement le micro dans le tube et nous avons repéré grâce au voltmètre les nœuds et les ventres de vibration.

Attention, il faut noter que le micro est sensible à la pression. Un nœud pression correspond donc à un ventre de vibration et un ventre de pression à un nœud de vibration !!!

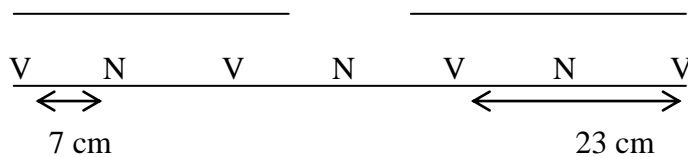
Soit d et d' les distances en cm dont le micro rentre dans les tubes de longueur L et L' . Voici les résultats que nous avons obtenus :

d en cm	tension en V	ventre ou nœud de pression	ventre ou nœud de vibration
0	0,108	Nœud ?	Ventre ?
7	1,99	Ventre	Nœud
23	0,28	Nœud	ventre

34	1,99	Ventre	Nœud
d' en cm			
0	0,076	Nœud ?	Ventre ?
7,5	1,99	Ventre	Nœud
23	0,28	Nœud	Ventre
34	1,99	Ventre	Nœud

Au milieu du tube se situe un ventre de pression. Il est en face de la sortie du HP. Il est imposé par l'excitateur. A l'intérieur de la colonne d'air, il y a une succession de ventres et de nœuds de vibration (ou ventres de pression). Nous avons aussi remarqué que si on éloigne le micro de l'ouverture de la colonne d'air raisonnante la tension efficace diminue, sans qu'il soit possible de déterminer la position du nœud de pression. En effet l'onde plane dans le tube devient une onde sphérique et son amplitude décroît en s'éloignant de l'ouverture. La longueur de la colonne d'air vibrante est plus importante que la longueur réelle du tuyau.

Nous pouvons donc maintenant schématiser l'intérieur d'un tuyau ouvert aux deux extrémités et excité en son milieu.



C'est le tube principal qui résonne sur son harmonique 3.

D'autre part, les ondes sonores peuvent donner des ondes stationnaires dans certaines conditions. L'onde incidente doit d'abord être entretenue, lorsque l'instrumentiste continue de souffler par exemple. Les ondes incidentes et réfléchies doivent être synchronisées. De plus pour obtenir des ondes stationnaires la longueur du tuyau de l'instrument pour une fréquence donnée est une caractéristique importante. La Tclarinette comporte un tuyau ouvert aux deux extrémités et comme nous l'avons vu, l'onde incidente se réfléchit et repart en inversée. Il faut donc que l'onde sonore effectue un aller-retour pour se retrouver en position initiale c'est-à-dire pour que l'onde ayant subi la réflexion et les ondes nouvellement émises soient en phase.

Soit Δt , la durée un aller-retour. Soit L , la longueur du tuyau. Soit c , la célérité des ondes sonores.

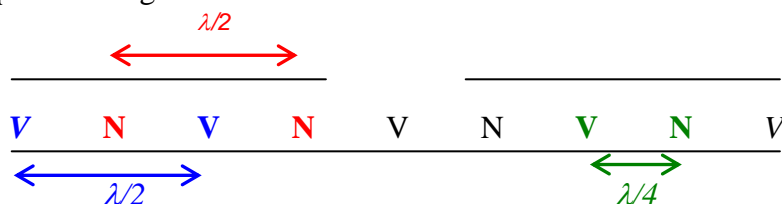
$$\Delta t = 2L/c$$

Pour que les ondes soient en phase, il faut que $\Delta t = nT$

$$\text{On obtient : } 2L/c = nT \Leftrightarrow L = (ncT)/2$$

$$\Leftrightarrow L = n \lambda/2$$

Pour obtenir des ondes stationnaires il faut donc que la longueur du tuyau soit un multiple de la demi longueur d'onde. Deux nœuds consécutifs sont donc séparés d'une demi longueur d'onde et un nœud et un ventre sont distants d'un quart de longueur d'onde.



La Tclarinette résonne donc « par morceaux » c'est à dire soit le tube le plus long de 68 cm, soit la bifurcation et L ou L' . Le T ne résonne pas dans son ensemble. Si la bifurcation intervient, il y a cette fois un nœud de vibration à l'extrémité portant l'anche, donc L est proche des multiples impairs de $\lambda/4$.

2. APPROCHE THEORIQUE

- Selon les conseils du jury régional, nous avons développé cette partie à part, en annexe 1

PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA TCLARINETTE ET D'UN CHALUMEAU

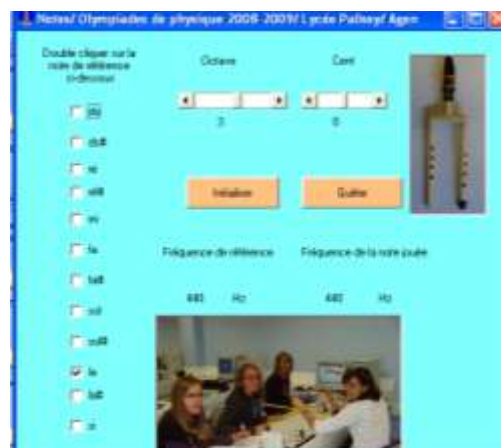
1. COURBES FREQUENCE - LONGUEUR

1.1 Matériel utilisé

Nous avons utilisé un accordeur chromatique Seiko, donnant le nom des notes, leur numéro d'octave et leur écart en cent* par rapport à la note de référence. Soit le nombre de cent*, noté c , séparant la note jouée de la note de référence. Le fréquence de la note jouée se calcule de la manière suivante :

$$f_{\text{note jouée}} = f_{\text{note référence}} 2^{c/1200} .$$

Marion avait étudié le Visual Basic en MPI en Seconde. Un logiciel a été programmé pour faire les conversions nom de note-octave-cent en fréquences (Voir en annexe 2)



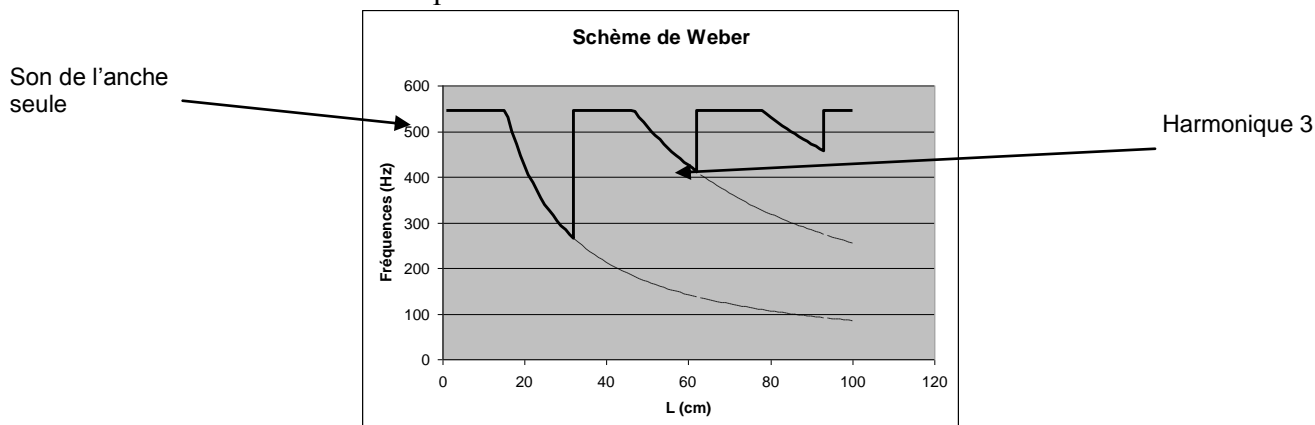
1.2 Un point de repère expérimental : le schème de Weber.

Le tuyau et l'anche de la Tclarinette sont assemblés. Selon les conditions, le son produit dépend du tuyau résonateur si celui-ci réagit, sinon ce sera celui de l'anche seule, s'il ne réagit pas. C'est ce que l'on a constaté avec de petites anches. Chanter dans un long tube en augmentant petit à petit la fréquence des cordes vocales est suffisant pour ressentir la réaction d'un tuyau physiquement. Certaines fréquences sont émises de la même façon que s'il n'y avait pas de tuyau. Dans certaines zones de fréquences, l'augmentation régulière de la fréquence du son n'est plus possible : on ressent physiquement une réaction sur les cordes vocales et on entend un saut de fréquence : ceci est la contre réaction du tuyau. On peut voir la même sorte de phénomène quand un tuyau est excité par une anche.

Nous avons utilisé l'article de notre professeur paru dans le BUP du mois d'octobre 2008 pour comprendre le couplage anche-tuyau.

W.WEBER a longtemps étudié expérimentalement le comportement des tuyaux à anche et leur a consacré des mémoires vers 1827. Marcel Fouché, professeur à l'université Paul Sabatier à Toulouse, a certifié et complété son travail cent ans après.

L'ensemble des lois simples reliant la fréquence du son émit par un tube avec anche et la longueur du tube résonant constitue le schème de Weber. Ces lois ne montrent qu'un phénomène moyen, jamais suivi avec exactitude, mais servant de point de repère pour la suite expérimentale de cette étude. L'alternance régulière des sons de l'anche sans résonateur et des partiels du tube caractérise le schème de Weber.



Le son donné par le tuyau avec une anche peut être dans certains cas le même que celui de l'anche seule. C'est parfois le cas avec les anches de petites tailles. C'est pour cela que nous avons choisi une anche de saxophone ténor pour notre instrument, car ainsi le tuyau réagit toujours. On peut alors obtenir le fondamental ou l'harmonique 3 pour les longs tuyaux.

1.2 Courbes d'étalonnage fréquence longueur

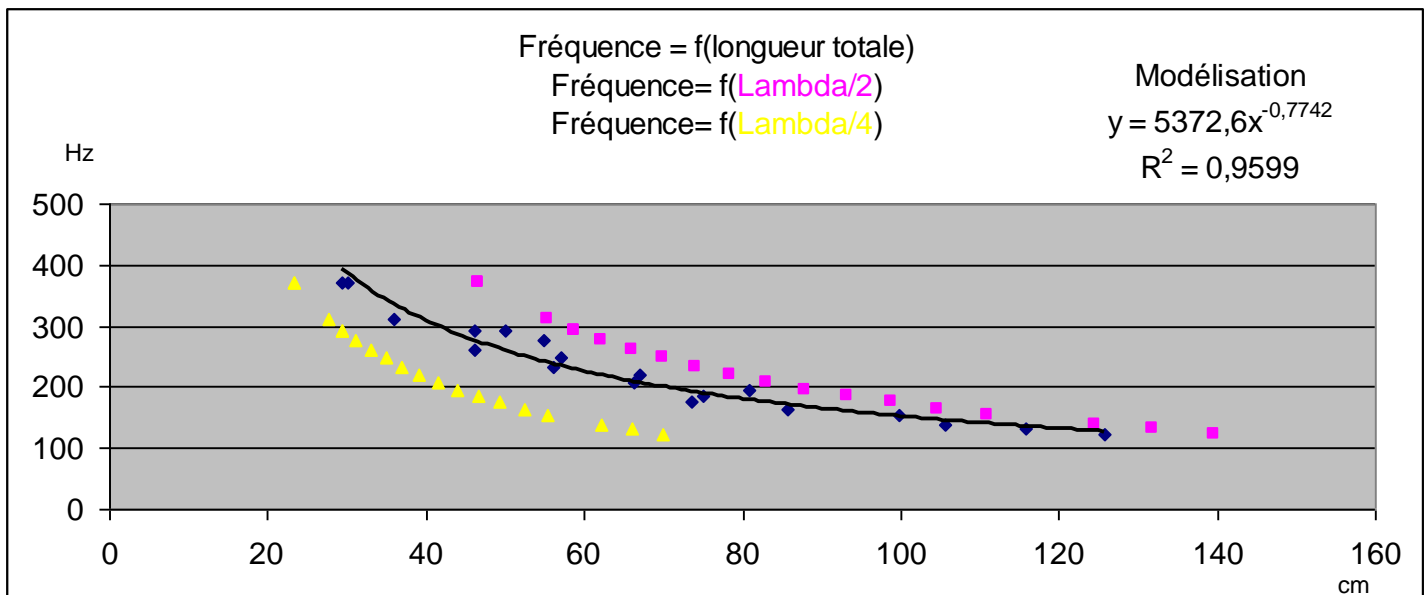
Pour réaliser ces courbes, nous avons utilisé la Tclarinette en plastique. Nous avons remplacé les tuyaux à trous par des tuyaux sans trous de longueur L_1 et L_2 .



Capucine avec la Tclarinette à tuyaux sans trous

Capucine avec la Tclarinette à tuyaux à trous

L1 en cm	L2 en cm	Ltot en cm	Note	F en Hz	$\lambda/2$ en cm
6,5	6,5	36	D#3	311	55,4305913
11,6	11,6	46,2	C3	262	65,940367
16,6	16,6	56,2	A#2	233	74,0343348
21,7	21,7	66,4	G#2	208	83,0924855
25,3	25,3	73,6	F#2	175	98,7972509
31,4	31,3	85,7	E2	165	104,67233
41,2	41,3	105,5	C#2	139	124,458874
51,5	51,4	125,7	B1	124	139,676113
3,2	3,2	29,4	F#3	370	46,6216216
6,5	25,3	54,8	C#3	277	62,2294372
6,5	51,5	67	A2	220	78,4090909
51,5	25,3	99,8	D#2	156	110,861183
51,5	16,6	75	F#2	185	93,2432432
16,6	6,5	46,1	D3	294	58,753406
41,2	16,6	80,8	G2	196	88,0102041
41,2	6,5	57	B2	247	69,8380567
41,2	51,5	115,7	C2	131	131,880734
3,2	51,5	30	F#3	370	46,6216216
3,2	41,2	50	D3	294	58,753406



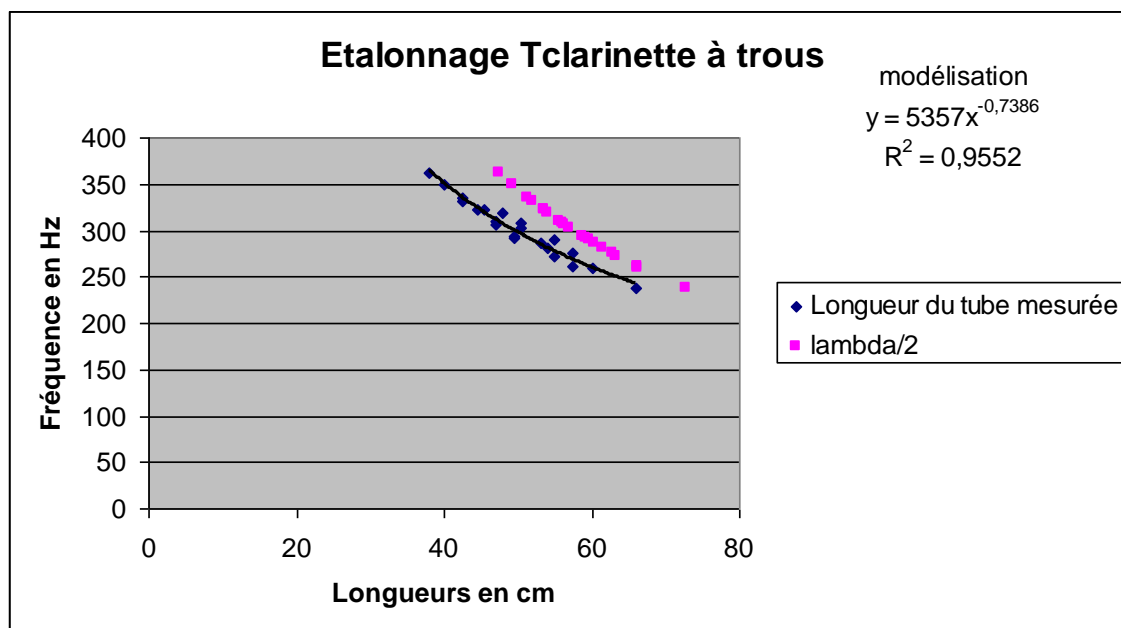
L1 et L2 sont les longueurs des tuyaux testés en cm. Les notes sont obtenues à partir d'un accordeur chromatique Seiko. Ce dernier peut indiquer la fréquence fondamentale du son joué (que l'on peut confirmer en vérifiant à l'oreille avec un piano). Parfois il indique l'harmonique 2 ou l'harmonique 3, et son indication peut basculer de l'un à l'autre. Parfois une 2^{ième} ou une 3^{ième} note peuvent être données par l'instrument (non étudiées ici). Elles sont obtenues en déplaçant les lèvres sur le bec, donc en modifiant la longueur vibrante de l'anche et la longueur de la colonne d'air résonnante. Nous ne sommes pas des musiciennes habituées à souffler sur une anche. La hauteur du son varie souvent au cours d'une même expérience, c'est pour cela qu'il est nécessaire de limiter la précision de la fréquence retenue au Hertz près.

La comparaison avec la demi-longueur d'onde du son montre que le tube semble toujours plus petit que $\lambda/2$ et plus grand que $\lambda/4$. Il ne se comporte ni comme une clarinette, ni comme une flûte. Le comportement se rapproche de celui d'une flûte pour les grandes longueurs et d'une clarinette pour les plus petites.

Puis nous avons repris l'expérience avec des tuyaux à trous. Les mesures de fréquences sur le jeu de Claire avec une Tclarinette à larges trous.

Trous bouchés				Hz	cm	
tuyau noir	tuyau blanc	note	cents	fréquence	c/(2 fréquence)	Longueur du tube mesurée en cm
1234	1234	A# 2	30	237	73	66
1234	123	C 3	-7	261	66	57,5
1234	12	C# 3	-28	273	63	55
1234	1	D 3	-46	286	60	53
1234	0	D# 3	-45	303	57	50,5
123	1234	C 3	-9	260	66	60
123	123	C# 3	23	281	61	54
123	12	D 3	-14	291	59	49,5
123	1	D# 3	-26	306	56	47
123	0	E 3	-40	322	54	45,5
12	1234	C# 3	-15	275	63	57,5
12	123	D 3	-3	293	59	49,5
12	12	D# 3	-21	307	56	50,5
12	1	D# 3	47	320	54	48
12	0	E 3	31	336	51	42,5
1	1234	D 3	-25	289	60	55
1	123	D# 3	-4	310	56	47
1	12	E 3	-42	322	54	44,5
1	1	E 3	11	332	52	42,5
1	0	F 3	5	350	49	40
0	0	F# 3	-33	363	48	38

La longueur de tube utile s'arrête au pavillon ou au dernier trou ouvert le plus éloigné du bec. Comme nous l'avons vu lors de l'étalonnage, la comparaison avec la demi-longueur d'onde du son montre que le tube semble toujours plus petit que $\lambda/2$ et plus grand que $\lambda/4$. Il ne se comporte ni comme une clarinette, ni comme une flûte. Le comportement se rapproche de celui d'une flûte pour les grandes longueurs et d'une clarinette pour les plus petites.



La modélisation pour les tuyaux sans trou n'est pas tout à fait la même que pour les tuyaux avec trous, mais les coefficients sont proches.

2. CONCEPTION ET JEU D'UN INSTRUMENT A HUIT TROUS

2.1 Comparaisons avec la clarinette

L'ambitus* de la clarinette s'étend sur plusieurs registres : le grave, le médium et l'aiguë. La particularité de cet instrument est qu'il possède un trou de douzième permettant de changer de registre mais à la différence d'autres instruments à vent comme la flûte qui peuvent doubler, tripler ... leur fréquence de résonance grâce à un trou d'octave : on peut dire qu'ils octavient, la clarinette ne peut obtenir que des fréquences triples, quintuples ... de la fréquence fondamentale. On dit alors improprement qu'elle quintoye : un second registre de notes est situé à une octave plus une quinte, c'est-à-dire une douzième au-dessus des notes initiales, par exemple de do₂ (note n°1) à sol₃ (note n°12). Il faudrait donc dire qu'elle « douzième »... La fréquence double et ses multiples sont impossibles à atteindre pour une clarinette.

La Tclarinette ne peut pas changer de registre car elle est un instrument court et ne possède pas de clefs. Elle possède un tuyau cylindrique plus parfait que celui de la clarinette, mais elle ne peut ni octavier, ni « douzièmer » les notes. En fait, lorsque tous les trous sont bouchés, on peut passer de la note la plus grave, Sib₂ pour l'instrument en cuivre, à un do#₄ + 40 cent en forçant sur le bec. C'est presque un intervalle de dixième. Lorsque les trous sont ouverts, l'instrument ne peut plus changer de registre car les notes aiguës ne sont pas disponibles à cause du son de palier de l'anche. Elle n'est donc ni assimilable simplement à un instrument ouvert aux deux extrémités sur l'atmosphère (qui octavie), ni à un instrument fermé à une extrémité (qui « douzième »). C'est un instrument hybride. Un instrument unique. C'est notre instrument.

2.2 Le positionnement des trous

(Renvoyé en annexe 3)

2.3 Fabrication des instruments au laboratoire

Voici la Tclarinette en cuivre qui a été fabriqué par notre professeur, et par les agents du lycée pour les soudures. Pour des raisons de sécurité, nous n'avons pas pu directement participer aux découpes, perçages et

soudures. Les deux zones rouges correspondent à la fixation de supports rudimentaires pour les pouces, sous les



tuyaux, pour faciliter la tenue comme sur une clarinette, lorsque les trous sont débouchés. Nous avons pensé la recouvrir d'une couche métallique par électrolyse, mais le temps nous a manqué. Cela aurait pu être un projet à lui tout seul. Une version améliorée est en cours de fabrication par notre partenaire facteur d'aérophone.

Pour trouver l'anche adaptée à notre instrument nous en avons testé plusieurs.

Tout d'abord nous avons testé notre Tclarinette avec une petite anche de chalumeau médiéval mais le tube n'a pas réagit, le son émis

correspondait au son de l'anche seule. Nous avons ensuite essayé avec une anche de clarinette, mais le tube n'a pas réagit. Puis nous avons essayé une anche de sax alto mais le tube réagissait très peu.

Enfin avec une anche plus importante, une anche de sax ténor le tube réagissait plus facilement et nous obtenions un son harmonieux. En fait, plus la surface de l'anche était importante plus le tube réagissait facilement. C'est un instrument à anche faible.

Remarque : nous avons essayé avec une embouchure de trompette ou trombone où l'anche était les lèvres de celui qui jouait de l'instrument, le tube réagissait mal et le son n'était pas musical.

2.4 Analyse du son et synthèse sonore

Afin de déterminer si la Tclarinette est un instrument harmonique et si elle possède un son riche ou non, étudions les différents sons émis par l'instrument. Pour cela, grâce au logiciel d'acquisition Latis Pro nous avons enregistré différents sons. Le son d'un instrument est riche lorsqu'il est composé nombreux d'harmoniques (sons dont la fréquence est un multiple de celle du son fondamental). Il est possible de reconstituer un son riche en superposant les sons dont la fréquence est multiple de la fréquence du fondamental.

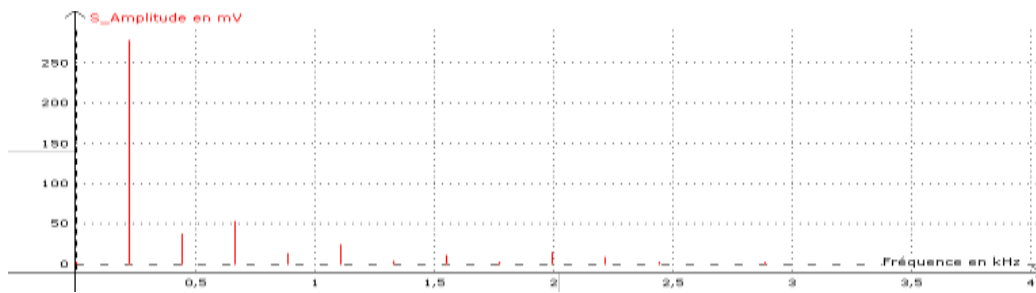
Lorsque la variation de pression en fonction du temps est représentée par une courbe sinusoïdale ou presque, alors le son émit est un son pur. Si la courbe est plus complexe, le son est plus riche.

Expérience n°1 : Tous les trous bouchés

Lorsque tous les trous de la Tclarinette sont bouchés c'est-à-dire que la colonne d'air résonnante à une longueur maximale, voici la courbe représentant le son obtenue :



Cette courbe est la tension aux bornes du micro et ses variations sont à l'image de celle du son. Elle peut être modélisée par une somme de différentes tensions sinusoïdales dont les fréquences sont caractéristiques du timbre de l'instrument. L'analyse de Fourier permet de décomposer le son :

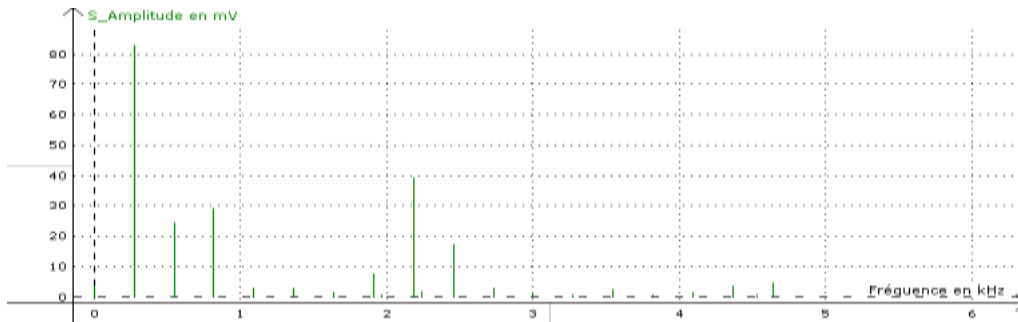


A partir de la décomposition de Fourier on peut déterminer les différentes fréquences composant le son. Le fondamental est la première fréquence observable, elle a l'amplitude la plus importante. Ici, $f_1 = 222\text{Hz}$. On retrouve ensuite : $f_2 = 443\text{Hz}$; $f_3 = 665\text{Hz}$; $f_4 = 887\text{Hz}$; $f_5 = 1\,108\text{Hz}$.

Nous constatons que le son émis est complexe. Il est composé de fréquences d'amplitude f , $2f$, $3f$, $4f$, $5f$. Nous retrouvons donc les harmoniques pairs et impairs. Mais nous ne pouvons pas qualifier le son de riche car le fondamental a une grande amplitude, mais pas les harmoniques. De plus, il n'y a pas de sons parasites aux alentours des fréquences de résonances, comme nos camarades étudiant le chalumeau du Moyen Âge ont pu l'observer avec les anches qu'ils ont fabriquées.

Expérience n°2 : Uniquement les deux premiers trous bouchés de chaque côté

Regardons maintenant les décompositions en séries de Fourier lorsqu'on bouche uniquement les deux premiers trous de chaque côté : La longueur de la colonne d'air est donc plus courte que précédemment.



On trouve :

$f_1 = 273\text{Hz}$; $f_2 = 549\text{Hz}$; $f_3 = 813\text{Hz}$; $f_7 = 1\,905\text{Hz}$; $f_8 = 2\,181\text{Hz}$; $f_9 = 2\,457\text{Hz}$

Ici, nous pouvons qualifier le son de plus riche que dans la première expérience. Le timbre a été modifié. Mais comme précédemment l'amplitude de l'harmonique 2 est plus faible que celle du 3. Les harmoniques 8 et 9 sont assez importants.

Expérience n°3 : Uniquement le premier trou débouché du côté blanc.

Si on débouche un seul trou du côté blanc, on obtient :



On trouve :

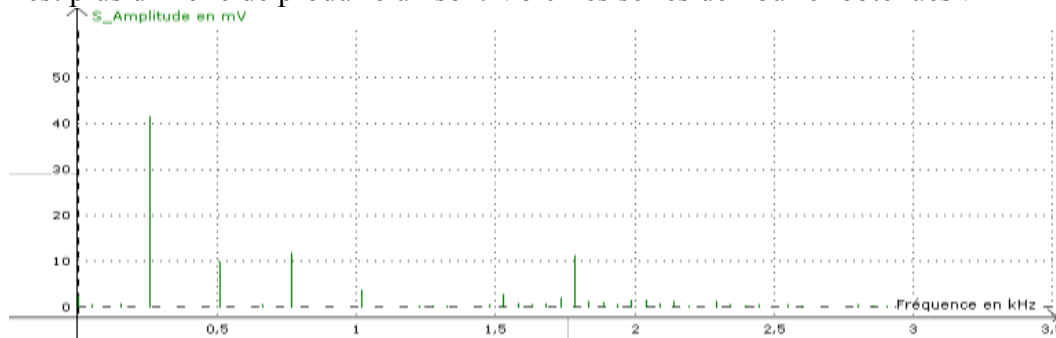
$f_1 = 240\text{Hz}$; $f_2 = 480\text{Hz}$; $f_3 = 726\text{Hz}$; $f_4 = 966\text{Hz}$; $f_5 = 1\,206\text{Hz}$; $f_6 = 1\,446\text{Hz}$; $f_8 = 1\,932\text{Hz}$; $f_9 = 2\,172\text{Hz}$; $f_{10} = 2\,412\text{Hz}$

Le son produit ici est assez riche du fait des nombreux harmoniques obtenus, mais seuls les trois premiers harmoniques ont une amplitude importante.

Nous pouvons donc conclure que les fréquences obtenues par les décompositions de Fourier sont des multiples pairs et impairs de chaque fréquence fondamentale, le son de la Tclarinette est donc harmonique, ce qui est une condition essentielle pour obtenir un instrument ayant une bonne qualité acoustique. Si l'instrument n'était pas harmonique les harmoniques d'un son ne pourraient pas se développer car ils ne correspondraient pas à des partiels de résonance du tuyau. De plus, le son est musical.

Expérience n°4 : trous de petits diamètres.

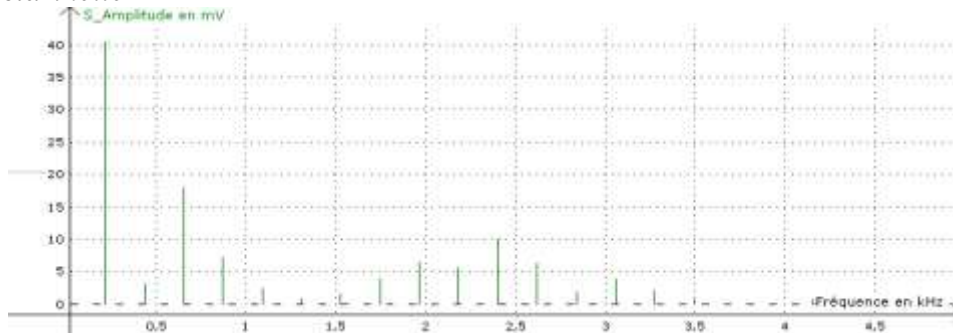
Si nous utilisons une Tclarinette avec des tubes percés avec des trous de diamètre plus petits, nous constatons qu'il est plus difficile de produire un son. Voici les séries de Fourier obtenues :



De plus, cette analyse montre un son moins riche et comprenant plus de parasites de fréquences élevées. Il est difficile à émettre et l'amplitude est faible. Nous pensons donc que la Tclarinette produit un son plus musical si les trous ont un diamètre large.

On constate que l'harmonique 2 a toujours une amplitude inférieure ou égale à celle de l'harmonique 3. Bien que les harmoniques pairs et impairs soient présents dans le son de cet instrument, le fait de placer l'excitateur au milieu tend à favoriser les harmoniques impairs et affaiblir les harmoniques pairs, comme nous l'avions constaté en étudiant la résonance de tuyaux cylindrique excités par leur milieu grâce à un haut-parleur. Nous pouvons maintenant comparer ces analyses à celles d'une clarinette classique qui est un instrument cylindrique fermé à une extrémité.

Expérience 5 : La clarinette



On trouve :

$f_1 = 220\text{Hz}$ (résultat différent de l'étude au haut-parleur. Le tuyau n'a pas une forme simple et l'instrumentiste joue un rôle)

$f_2 = 439\text{Hz}$ mais l'amplitude de cette fréquence est faible ; $f_3 = 659\text{Hz}$; $f_4 = 870\text{Hz}$ mais l'amplitude est faible

$f_9 = 1\,968\text{Hz}$; $f_{11} = 2\,407\text{Hz}$

Nous remarquons que les harmoniques impairs ont des amplitudes plus importantes que celles des harmoniques pairs. Nous pouvons donc en conclure que la Tclarinette possède un son différent de celui de la clarinette, car les harmoniques sont différents pour la Tclarinette et pour la clarinette.

C'est donc un nouveau type de son que nous avons créé avec cet instrument :

- Ce n'est pas une clarinette car les harmoniques pairs sont plus présents dans le son et l'instrument sonne à l'octave supérieure de la clarinette de longueur équivalente.

- Ce n'est pas une flûte car les harmoniques pairs sont moins présents et le son de palier de l'anche limite l'ambitus de l'instrument.
- Ce n'est pas un saxophone car même s'il donne la même note à longueur de tuyau équivalente, le saxophone est conique, mais notre instrument est cylindrique.

C'est donc un instrument unique, ouvert sur l'atmosphère aux deux extrémités comme une flûte, mais aux harmoniques paires atténuées ce qui le rapproche de la clarinette, d'où son nom : Tclarinette !

3. LES INTERFERENCES

- Selon les conseils du jury régional, nous avons développé cette partie à part, en annexe 4

CONCLUSION

Nous avons réussi, avec des moyens matériels modestes à fabriquer un instrument de musique unique, nouveau et qui fonctionne. Il a bien sûr des limites, mais les instruments de l'orchestre en ont aussi. Comme la Tclarinette, la clarinette possède aussi des limites. Notre instrument n'est ni une flûte ni une clarinette, mais un intermédiaire nouveau.

L'intervalle maximal entre les notes possibles est réduit, mais il a la possibilité de produire des intervalles inférieurs au $\frac{1}{2}$ ton. C'est un instrument microtonal. Pour produire de nombreuses notes de la gamme tempérée, les instruments de l'orchestre n'ont pas la possibilité d'accéder aux intervalles inférieurs au $\frac{1}{2}$ ton. La Tclarinette n'a qu'un ambitus réduit, mais elle accède à des intervalles impossibles pour la plupart des autres instruments. Notre but est donc atteint. Nous avons fabriqué un instrument unique qui fonctionne facilement, au son agréable et aux possibilités différentes de celles des instruments actuels.

La complainte de Narnia est une chanson douce, triste, mélancolique. Les intervalles réduits entre les notes jouées par notre instrument permettent de retrouver cette ambiance. La musique obtenue correspond à celle qu'aurait pu jouer l'instrument du film s'il avait été plus réaliste. Dans le film en effet l'instrument produit deux notes en même temps, ce qui est impossible avec un seul excitateur. (C'est le chalumeau double médiéval qui en était capable). Nous espérons que le jury trouvera plaisir à nous écouter comme nous avons eu plaisir à faire ce travail.

Quelles perspectives pour cet instrument ? Espérons qu'un musicien innovant sera séduit par son timbre et ses particularités et composera pour lui une musique nouvelle (Ecoutez notre fichier son).

LEXIQUE :

Aérophone : terme désignant tout instrument dont le son est produit par la vibration d'une colonne d'air.

Ambitus : écart entre la note la plus grave et la note la plus aiguë pouvant être jouée par un instrument.

Aseptisé : toutes les notes émises par un instrument suivent une même gamme normalisée et ne peuvent en différer.

Cent : unité de mesure des intervalles musicaux selon l'échelle logarithmique.

Chalumeau : Aérophone médiéval composé d'un tuyau excité pas une anche taillée, il peut être apparenté au tuyau mélodique de la cornemuse.

Impédancemètre : instrument permettant de mesurer l'impédance acoustique, grandeur physique dépendant de la pression et du débit acoustique.

Mode : différents intervalles séparant chaque note de la gamme.

Microtonal : qualificatif d'un instrument qui est capable de produire des notes séparées d'intervalles plus petits que le demi-ton.

NOS SOURCES

- Livres d'enseignement de spécialité en Terminale S
- Stéphane OLIVIER, Hubert GIE, Jean-Pierre SARMANT, *Physique Spé, PC*, PC, Cours et exercices d'application*, Editions Tec&Doc, 2000, p 688.
- Livre conseillé par Luc Forest : *Les instruments de musique*, Editions pour la Science/Belin, 1985
- Document ressource acoustique de notre professeur