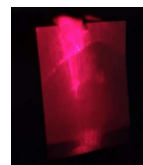




Rubens' fire: Vers un nouveau tube de Rubens



Par les élèves de l'atelier physique du lycée Palissy

Table des matières

Problématique:	2
Remerciements:	2
Introduction (Lilou):	3
A- Résonance d'une colonne d'air dans un tube cylindrique	4
A-1 Résonance d'une colonne d'air (Axel)	4
A-2 Etude expérimentale des fréquences de résonance d'une colonne d'air ouverte aux deux extrémités (Sam)	5
A3- Variation de l'amplitude autour de la résonance à 350 Hz (Axel)	8
A4- Variation de l'amplitude en fonction de la position dans le tube (Axel)	9
B- A la recherche d'un dispositif de visualisation de la pression acoustique avec un oscillateur en polystyrène (Antoine).	10
B 1- Oscillateur de visualisation polystyrène et laser	10
B-2 Amélioration de notre montage	11
B-3 Amplitude des oscillations du vibreur	12
C- A la recherche d'un dispositif de visualisation de la pression acoustique avec des bulles de savon.	13
C-1 Vibrations de bulles de savon (Eloïse)	13
C-2 Visioconférence avec Monsieur Baudouin (Loïs)	14
C-3 Etude quantitative des vibrations d'une bulle (Eloïse)	15
C-4 Visualisation des bulles dans le tube à l'aide de 5 caméras (Loïs)	17
D- Et si nous faisons aussi un tube à gaz ou à fumée...(Axel)	19
D-1 Tube à fumigène	19
D2- Tube et machine à fumée	19
Conclusion (Lilou)	19

Problématique:

Est-il possible de visualiser les ventres et les nœuds de pression dans une colonne d'air résonnante sans utiliser de méthane en combustion?

Remerciements:

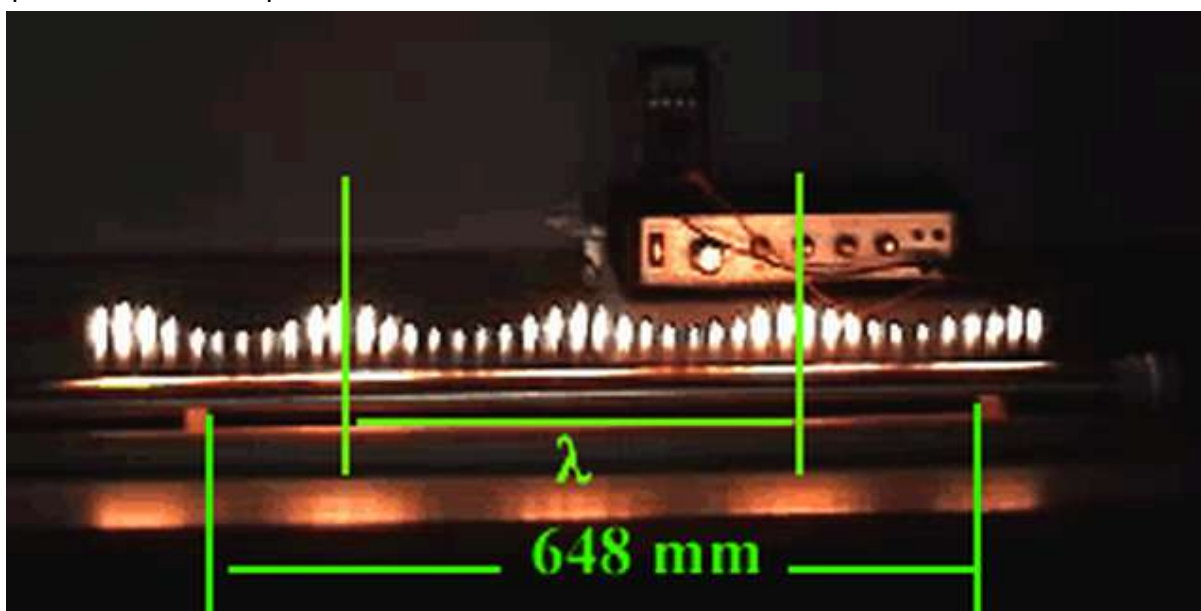
Merci à Monsieur Augustin Ernoult pour avoir accepté de répondre à nos questions ainsi qu'une visioconférence avec notre enseignant. Il est chercheur en acoustique au sein de l'équipe Makutu d'Inria.

Merci à Monsieur Fernando Leal Calderon de l'ENSCBP pour son aide sur l'interprétation des vibrations des films de savon ainsi qu'à Madame Reynier, professeure ingénieure de notre lycée qui a transmis nos demandes.

Merci à Monsieur Michael Baudouin de l'université de Lille pour la visioconférence qu'il a faite avec nous.

Introduction (Lilou):

Le tube du Rubens est un dispositif qui permet de mesurer une longueur d'onde et de visualiser les ventres et les nœuds de pression. Il est constitué d'un tuyau au niveau duquel on a creusé des petits trous à intervalles réguliers afin de laisser passer le gaz combustible. Les deux côtés de ce dernier sont fermés par un capuchon le plus souvent métallique et de l'autre côté par une membrane vibrante. Une fois que le tube est rempli de gaz, on allume ce dernier au niveau des trous. La hauteur des flammes étant d'abord au même niveau, lorsqu'on place une source sonore, comme un haut parleur, alimenté par un générateur de fréquences, l'onde sonore va se propager et se réfléchir sur le capuchon métallique puis sur la membrane; ainsi, lorsque les ondes de même fréquence, de même amplitude mais de sens opposé vont se rencontrer, des interférences ont lieu et donnent des ondes stationnaires. Ces dernières vont affecter le débit de gaz dans le tube à différents endroits, qui est lui-même responsable de la hauteur des flammes.



https://fr.wikipedia.org/wiki/Tube_de_Rubens

Le principal problème pour nous est que ce beau dispositif est interdit d'utilisation dans notre lycée depuis plus de 10 ans. Il a même été jeté avec la disparition des arrivées de gaz.

Nous voulons donc essayer de comprendre son fonctionnement et de trouver un moyen de rendre visible les variations de pression acoustique dans le tube sans méthane et sans flamme.

Pour cela nous allons débiter en étudiant la résonance d'un tube ouvert aux deux extrémités, puis nous chercherons à associer au tube résonnant plusieurs dispositifs sensibles à la pression acoustique pour essayer d'obtenir les mêmes visualisations qu'avec le tube de Rubens original : vibreur léger réfléchissant avec lumière laser, membrane de savon éclairée filmée à la webcam, fumée de fumigène ou de machine à fumée. Nous avons aussi fait fabriquer un tube de Rubens à méthane par les agents du lycée, qui a été testé chez notre professeur.

A- Résonance d'une colonne d'air dans un tube cylindrique

Nous avons fait préparer par les agents du lycée un tube PVC de 10 cm de diamètre et de deux mètres de long. Ils ont positionné tous les 10 centimètres des trous de 5 mm de diamètre. Le tube est ouvert aux deux extrémités, ce qui est plus simple à manipuler pour nous qu'un tube fermé comme l'était le tube de Rubens. Nous avons d'abord cherché à comprendre l'aspect théorique de l'expérience (3 mercredis après-midi) avec les relations fréquence longueur du tube et leur établissement par l'équation de d'Alembert et les modèles de l'oscillateur harmonique (comme en prépa), puis nous avons étudié expérimentalement ces fréquences de résonance.

A-1 Résonance d'une colonne d'air (Axel)

On peut trouver en ligne plusieurs projets expérimentaux étudiant les ondes acoustiques dans un tube, notamment certains de notre lycée, présentés aux concours des Olympiades de physique et C.Génial. Lorsqu'une colonne d'air est excitée par un haut-parleur soumis à un signal sinusoïdal, certaines fréquences sont favorisées. Nous les entendons plus fortement. Ce sont les modes propres de vibration de la colonne qui sont quantifiés. Les ondes sonores qui sont longitudinales permettent l'établissement d'ondes stationnaires dans le tube, qui est une cavité acoustique résonnante.

Il faut distinguer les modes de résonance des colonnes d'air ouvertes aux deux extrémités, fermées aux deux extrémités et celles des colonnes d'air fermées à une extrémité.

Soit c la vitesse du son dans l'air et L la longueur de la colonne d'air, toujours plus longue que le tube. Pour un tuyau sonore ouvert aux deux extrémités ou fermé aux deux extrémités, la fréquence fondamentale est :

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

Les fréquences des harmoniques sont des multiples de cette fréquence fondamentale

Pour un tuyau sonore fermé à une extrémité, la fréquence du fondamental est :

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

Les fréquences harmoniques sont les multiples impairs de cette fréquence fondamentale. Certains d'entre nous envisagent des études d'ingénieur et espèrent intégrer une classe préparatoire scientifique. Nous avons voulu approfondir le sujet avec des cours de PC et PCSI.

L'onde stationnaire qui s'établit dans un tube est régie par l'équation de d'Alembert:(SAM)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \quad \text{avec}$$

$$\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + A \cos(kx + \omega t) = 2A \cos(kx) \cos(\omega t)$$

et avec $\omega = kc$.

(source: https://pedagotech.inp-toulouse.fr/210619/res/polyfiles_3.eWeb/00chapter.pdf)

Nous avons travaillé 3 mercredis après-midi pour comprendre un peu mieux les solutions de l'équation de d'Alembert, et leur lien avec les oscillateurs harmoniques. Ce travail n'est pas dans le mémoire mais nous espérons être capable de répondre à vos questions sur le sujet.

Les nœuds de vibration correspondent à des ventres de pression, c'est-à-dire une forte pression acoustique. Si le tube est ouvert, on a un ventre de vibration c'est-à-dire un nœud de pression acoustique à l'extrémité. Le microphone est sensible à la pression acoustique.

A-2 Etude expérimentale des fréquences de résonance d'une colonne d'air ouverte aux deux extrémités (Sam)

Le tube de Rubens fonctionnait avec du gaz inflammable et pour permettre son débit uniquement par les petits trous percés sur le dessus du dispositif, il fallait que le tube soit fermé aux deux extrémités, raison de sécurité oblige. Nous n'avons pas cette contrainte et nous allons donc étudier un tube ouvert aux deux extrémités et un tube ouvert à une seule extrémité, avec ou sans trous.

Montage expérimental:

Caractéristiques du tube:

Longueur du tube $L = 200.0$ cm. Ces mesures sont faites à la règle en double mesure.

L'incertitude type est égale à une graduation sur racine de 6: $u(L) = \frac{1\text{mm}}{\sqrt{6}} = 0.5$ mm

donc $L = 200.0 \pm 0.5$ cm

Diamètre du tube plastique $d = 9.2 \pm 0.5$ cm

Diamètre du tube métallique $d = 8.2 \pm 0.5$ cm

Protocole:

Un haut parleur est placé à l'extrémité du tube ouvert. Le micro est positionné à l'autre extrémité. On fait varier grâce à un générateur de signaux la fréquence d'une tension sinusoïdale de 50 Hz à 1000 Hz.

On recherche les fréquences de résonance, c'est-à-dire les fréquences pour lesquelles l'amplitude passe par un maximum.

Résultats expérimentaux et analyse:

Tube métallique ouverts aux deux extrémités sans trous diamètre 8.2 cm:

f mesurée(Hz)	λ (m)	k	L (m)
83.4	4.08	1/2	2.04
166.35	2.04	1	2.04
251.0	1.35	3/2	2.04

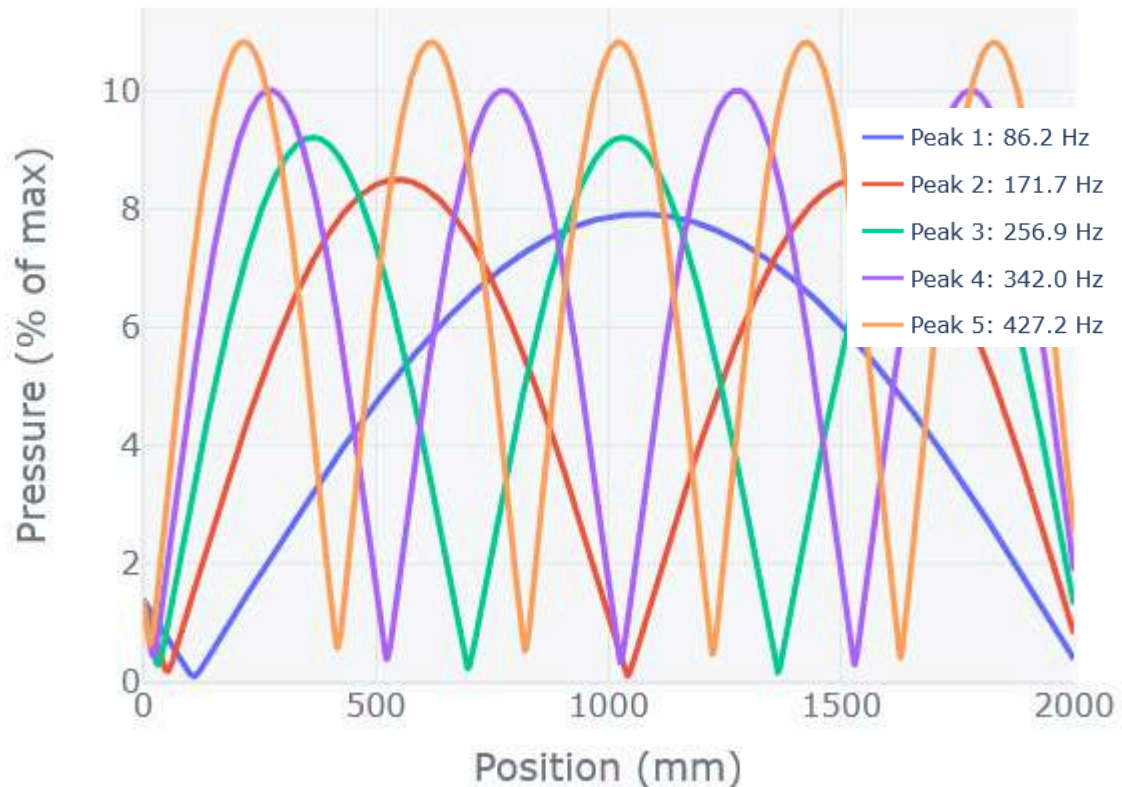
334.0	1.02	2	2.04
-------	------	---	------

avec k, un multiple de $\frac{1}{2}$.

Ces résultats sont cohérents entre eux et montrent que la colonne d'air résonante est plus longue que le tube (écart de 2%).

Voici le résultat de la modélisation obtenue sur le démonstrateur des fréquences de résonance du site de l'INRIA, indiqué par Augustin Ernoult.

(<https://demo-openwind.inria.fr/#geometryTables>) :



On retrouve aux extrémités du tube la pression de l'atmosphère. Le décalage au niveau de la position zéro pour la modélisation d'openwind est due à la présence de la bouche du musicien. On peut visualiser sur le graphique ci-dessus les positions attendues des maxima de pression pour chaque harmonique.

Nous avons un écart de 3.2 % entre la fréquence fondamentale calculée sur openwind et celle que nous avons mesurée, principalement due à la présence de la bouche du musicien dans le modèle ainsi que du diamètre du tube, et pas dans notre expérience.

Tube PVC ouvert à une extrémité avec trous diamètre 9.5 cm:

Numéro de la résonance	fréquences mesurées (Hz)	delta f (Hz)	Amplitude (V)
1	138	64	0.51
2	202	72	1.37
3	272	76	2.8

4	350	82	3.34
5	426	78	2.8
6	510	84	3.4
7	753	92	3.3
8	845	80	2.3
9	925		2.2

Il est plus difficile de déterminer avec précisions les fréquences de résonance de ce tube que du tube sans trous. Nous pouvons supposer que la présence des trous de visualisation perturbe la colonne d'air et l'établissement des résonances.

Moyenne delta f : 78.5 Hz Ecart type : $\sigma = 8.3$ Hz

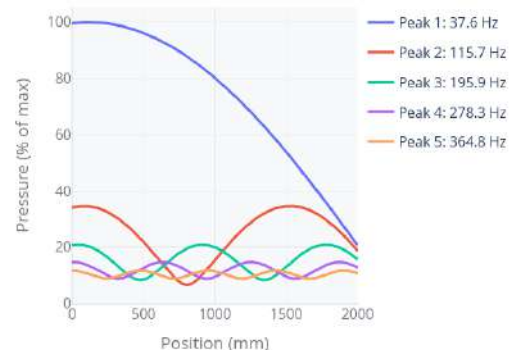
Les fréquences de résonances d'un tube de longueur L Ouvert-Fermé sont données par la

relation : $f = \frac{k \cdot c}{4L}$ avec k un entier et $c=340$ m/s car la température de la salle est 20°C.

Donc la fréquence fondamentale attendue pour une colonne d'air de 200.0 cm est de 42.5 Hz. C'est indétectable avec notre micro. La valeur attendue de la fréquence séparant deux harmoniques impairs est de 85.5 Hz. Nous avons donc une différence entre l'expérience et la formule théorique comme cela a été observée dans de nombreux autres mémoires. On peut expliquer certains des écarts entre les fréquences calculées et mesurées par longueur de la colonne d'air qui diffère de la longueur du tube.

Pour notre expérience la différence de fréquence entre deux harmoniques est proche de 78.5 Hz soit une longueur de la colonne d'air de 216.6 cm. La colonne d'air résonante est plus longue que le tube avec un écart de 8.3 %.

Nous n'avons pas réussi à voir toutes les fréquences de résonance, peut-être à cause de la sensibilité de notre microphone. Voici l'allure des courbes de pression sur openwind



Voici les simulations obtenues sur openwind pour un tube de 2,00 m de long de diamètre intérieur 9,5 cm:

- Pour un tube sans trous ouvert à une extrémité et fermé à l'autre.
- Pour un tube avec trous tous les 10 cm, de 5 mm de diamètre, ouvert à une extrémité et fermé à l'autre.
- Pour un tube avec trous tous les 10 cm ouvert aux deux extrémités.

Tube sans trou OF(Hz)	Tube avec trous OF(Hz)	Tube avec trous OO (Hz)
37.6	38.0	77.2
115.7	116.1	155.8

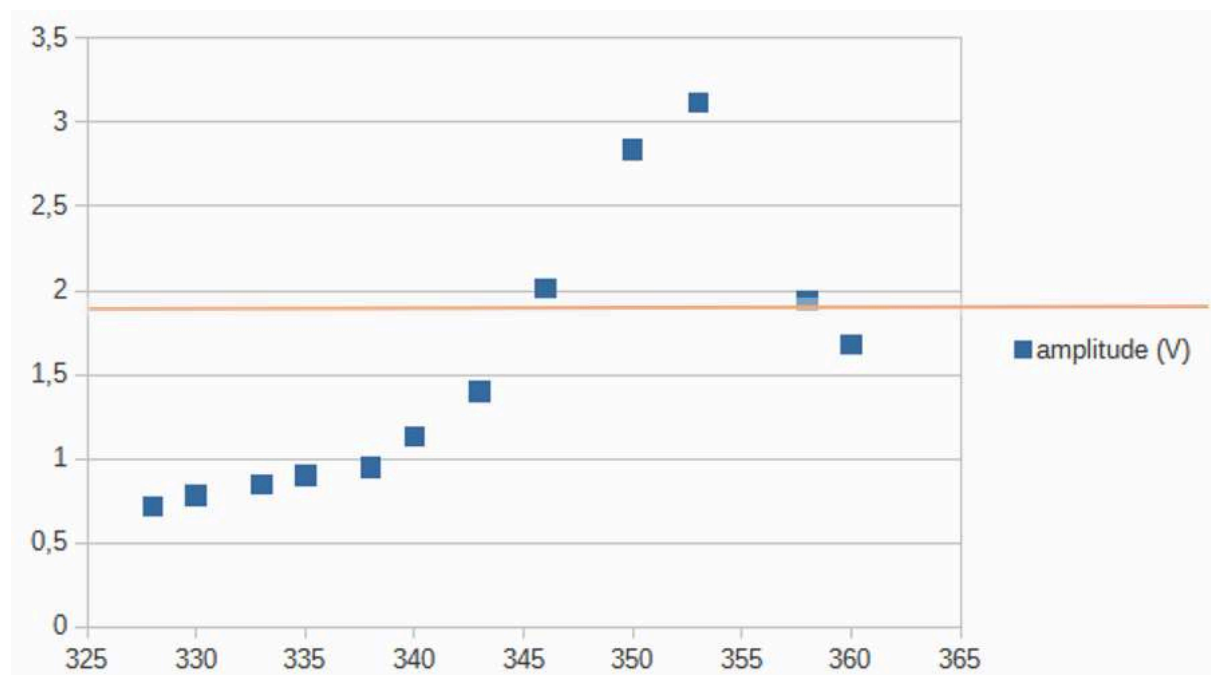
195.9	196.2	237.0
278.3	278.5	321.0
364.8	364.9	410.8

Nous remarquons que ces résultats s'écartent un peu des prévisions que nos formules précédentes donnent car elles ne tiennent pas compte du diamètre du tube et d'autres paramètres comme la position et la taille des trous de visualisation.

Pour le fondamental du tube OO avec trous nous calculons 85.0 Hz, nous mesurons 83.4 Hz au lieu de 77.2 Hz obtenu par la simulation de l'INRIA soit un écart de 10,1 %. La simulation comme nos mesures confirment que la colonne d'air est plus longue que le tube.

A3- Variation de l'amplitude autour de la résonance à 350 Hz (Axel)

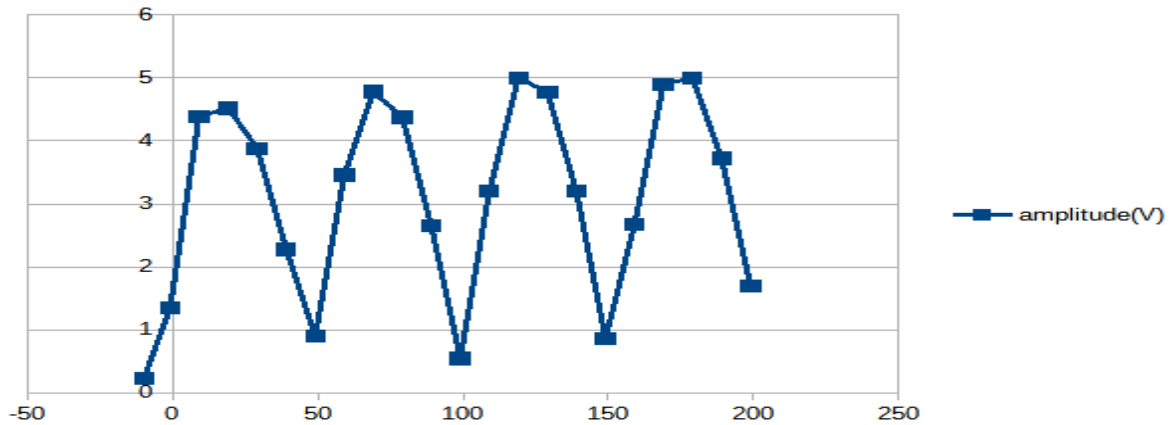
Pour notre expérience du tube de Rubens, il est important de connaître la position des maxima de pression et l'allure des courbes de pression. Nous allons maintenant étudier le profil de variation de l'amplitude du microphone autour d'une des résonances les plus visibles à 350 Hz. Nous estimons la précision de la lecture de la fréquence à 1 Hz près et celle de l'amplitude à 0.03 V. Les valeurs indiquées par Latispro outils mesures automatiques ne sont pas stables.



L'amplitude maximale est de 3.2 V. La largeur du pic est de 10 Hz à $\frac{U_{max}}{2^{0.5}}$. La résonance est assez marquée.

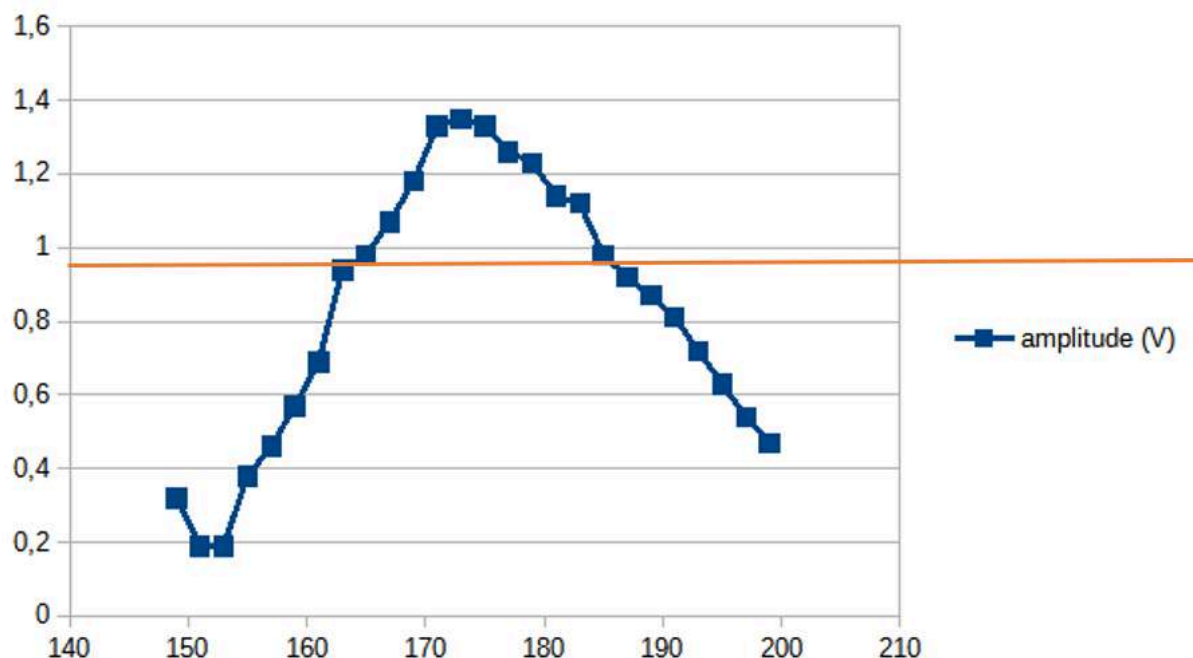
A4- Variation de l'amplitude en fonction de la position dans le tube (Axel)

Nous déplaçons pour cette expérience un microphone dans le tube en mesurant sa position et l'amplitude de sa tension sur Latispro pour le quatrième harmonique tuyau OO.



Courbe de l'amplitude de la tension du microphone (V) en fonction de sa position (cm) dans le tube.

Nous visualisons 4 fuseaux correspondant au quatrième harmonique. C'est ce que nous essayerons de visualiser avec notre montage final. Mais notre courbe manque de points pour identifier plus précisément les minima et maxima. Il est pénible de manipuler longtemps à cause du bruit. Nous recommandons cependant l'expérience uniquement pour le premier fuseau avec davantage de points de mesure.



Courbe de l'amplitude de la tension du microphone (V) en fonction de sa position (cm) dans le tube pour le premier fuseau.

Nous observons une courbe montrant des pics assez marqués. La valeur maximale est de 1.35 V. Nous avons une largeur de 23 cm pour la tension de $\frac{1.35}{2^{0.5}} = 0.95$ V.

Nous voulons maintenant visualiser ces fuseaux sans micro, sans flamme, sans méthane et sans danger.

B- A la recherche d'un dispositif de visualisation de la pression acoustique avec un oscillateur en polystyrène (Antoine).

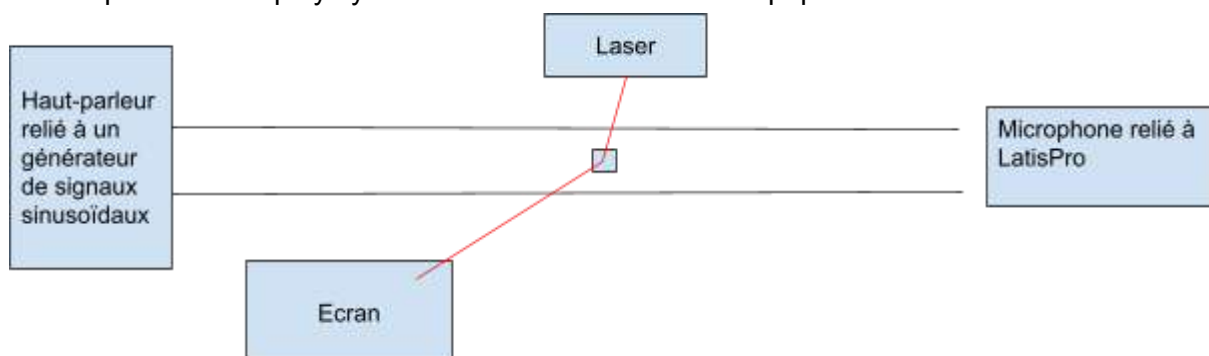
Nous pensons à plusieurs pistes pour remplacer les flammes permettant de visualiser les maxima et minima de pression dans notre tube :

- utiliser un oscillateur de visualisation très léger, du polystyrène par exemple, posé sur un trou du tube de Rubens et associé à un petit miroir et un laser. La réflexion de la lumière laser sur le miroir, projetée sur le mur pourra jouer le même rôle que la flamme du tube historique
- utiliser des bulles de savon posées sur les trous du tube et observer leurs vibrations.
- utiliser des membranes de microphone ou des capteurs piézoélectriques couplés à un dispositif de visualisation (idée abandonnée par la suite)
- Utiliser de la fumée

Une difficulté dont il faut tenir compte est la faible valeur de la pression acoustique (0.1 Pa) face à la pression atmosphérique (10^5 Pa)

B 1- Oscillateur de visualisation polystyrène et laser

Puisque les flammes nous sont interdites, nous pensons utiliser un petit bout de polystyrène avec du papier aluminium sur sa face supérieure, le tout éclairé par un laser dont la lumière se réfléchit sur un écran. Nous avons choisi la fréquence de résonance de 350 Hz pour nos premiers essais d'oscillateurs de visualisation car l'amplitude obtenue sur la tension du micro est élevée et le son n'est pas trop désagréable à supporter. Nous plaçons au niveau du premier maximum (à 27 cm du haut-parleur) et au-dessus d'un petit trou un petit bout de polystyrène recouvert d'une feuille de papier aluminium.

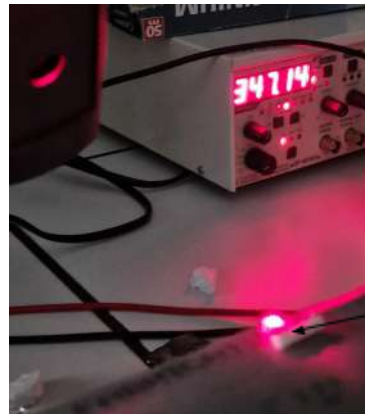
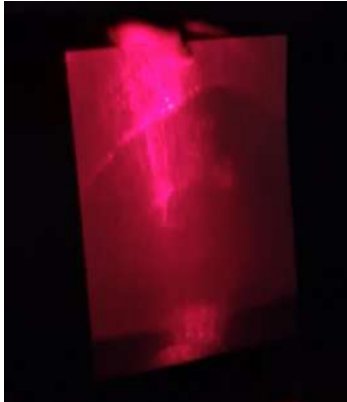


Nous l'éclairons avec laser , et nous observons l'image réfléchie sur un écran blanc (feuille de papier). Nous voyons une image diffuse du laser qui vibre de manière très visible (Elle n'est pas sans rappeler les flammes du vrai tube de Rubens), à la fréquence de 350 Hz. Si nous nous éloignons de cette fréquence, les vibrations s'arrêtent.

Ainsi, un petit oscillateur de visualisation en polystyrène permet d'observer un ventre de vibration. C'est un premier petit succès pour nous!

Pour optimiser notre premier essai nous devons :

- fabriquer un dispositif pour l'empêcher de s'éloigner du trou: joints de plomberie
- remplacer le papier aluminium qui se plie par une paroi réfléchissante et plane: scotch métallique rond environ 0.05g diamètre 5 mm.



Oscillateur

Voici les résonances que ce premier oscillateur nous a permis de visualiser:

Fréquences de résonance Tube OO:

fréquences (Hz)
141
183
247
260
341
498

Fréquences de résonance Tube OF:

fréquences (Hz)
179
238
311
395
470
550

Il est difficile d'évaluer le maximum de vibration de notre petit oscillateur pour déterminer la fréquence de résonance avec précision. C'est pour cela que nous constatons des écarts avec les mesures au microphone. Nous voulons améliorer notre vibreur en optimisant sa forme et sa masse.

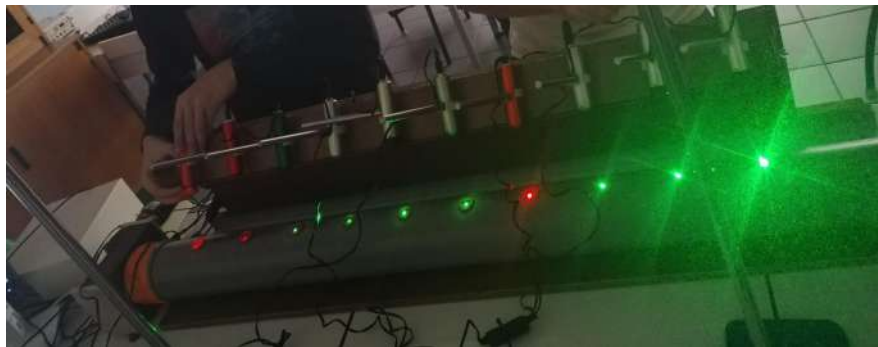
B-2 Amélioration de notre montage

Nous commandons 15 diodes laser que nous allons monter sur un support et une alimentation pour bâtir un système permettant d'éclairer 15 trous et d'obtenir l'équivalent de 15 flammes. Antoine est l'artisan principal de notre montage expérimental. Il n'a pas hésité à acheter lui-même du matériel (voir en annexe). Le 25 septembre, première séance de mise au point de nos montages avec 10 lasers et 5 webcams(voir partie suivante)

On s'aperçoit que les lasers bleus sont inutilisables car leur lumière n'est pas visible. On essaye de projeter au plafond mais la lumière est un peu trop faible. On choisit donc d'interposer un écran fait maison à 70 cm du tube pour obtenir des signaux lumineux bien visibles et comparables à des flammes.

Les essais avec des vibreurs de forme rectangulaire ne sont pas satisfaisants car ils se bloquent, on les

retaille en rond. Les résultats sont meilleurs. Nous visualisons “ *les flammes lasers* ” sur un écran en papier puis sur la fumée d'une machine à fumée. Notre système fonctionne. Les



nombreux essais de vibreur ont permis d'optimiser leur forme et d'obtenir la visualisation des nœuds et des ventres.

B-3 Amplitude des oscillations du vibreur

Nous voulons maintenant savoir si les vibrations de nos petits systèmes réfléchissant la lumière laser sont à l'image de l'amplitude de la tension du microphone au même point.

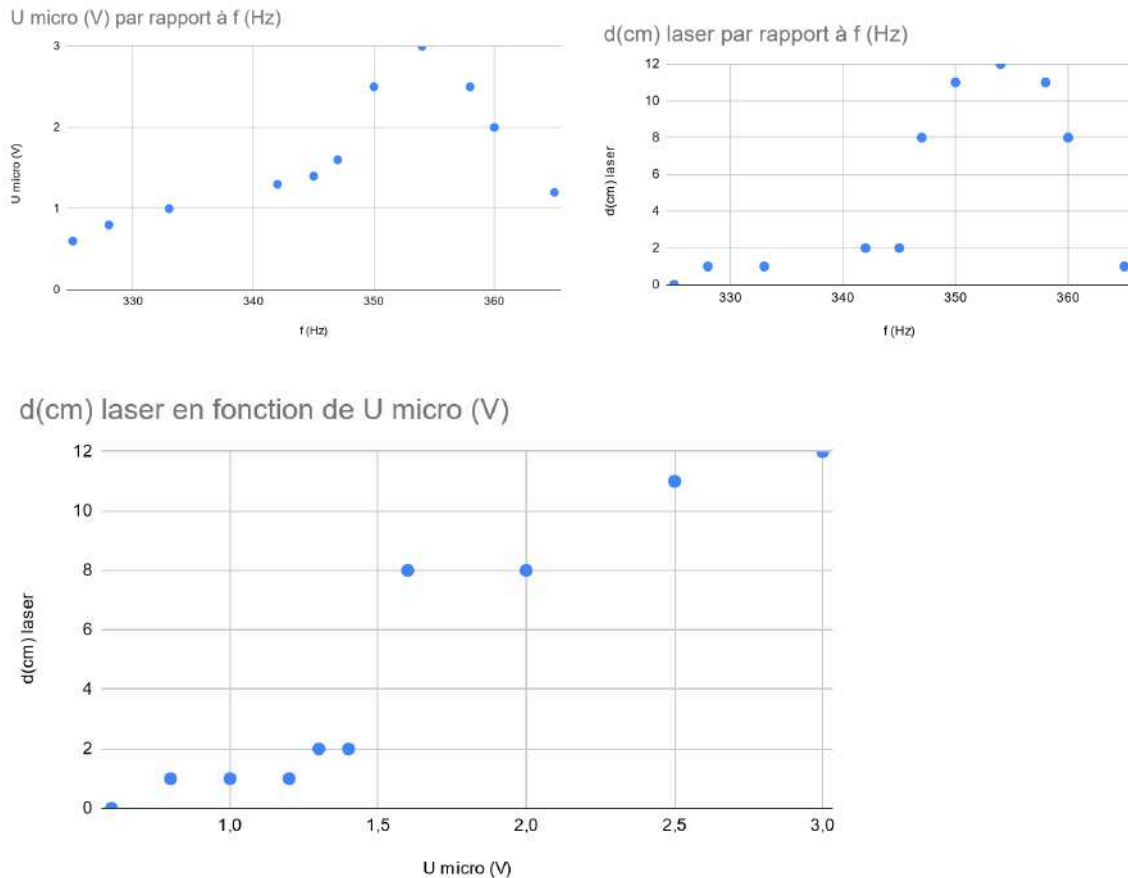
Nous avons étudié pour cela:

- l'amplitude en mV du signal du microphone enregistré sur Latispro
- l'amplitude en cm de vibration du signal lumineux sur un écran placé à 75 cm du tube.

Nos mesures ont été faites autour de la fréquence de 350 Hz, une des moins pénibles à étudier.

Nous constatons que l'amplitude de vibration du signal lumineux n'est pas proportionnelle à l'amplitude du signal du microphone. Cependant l'amplitude est maximale pour la résonance.

Notre dispositif est donc adapté pour visualiser la résonance.

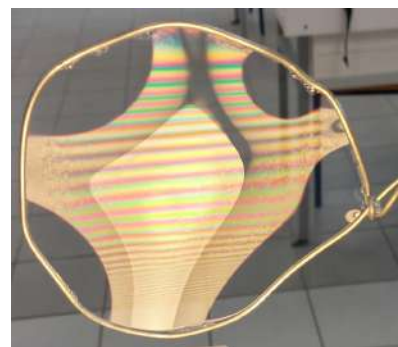


C- A la recherche d'un dispositif de visualisation de la pression acoustique avec des bulles de savon.

C-1 Vibrations de bulles de savon (Eloïse)

Nous débutons une recherche documentaire et trouvons la thèse d'Aymeric Roux : [Bulles et antibulles armurées et pression de radiation auto-induite \(Armoured bubbles and antibubbles and auto-induced radiation pressure\) \(univ-lille.fr\)](#). Ce jour 14 février 2024, Loïs contacte le directeur de recherche, Michael Baudoin en lui demandant une piste pour utiliser les bulles dans notre montage. Il accepte de nous aider et nous propose une vidéo-conférence afin de répondre à nos questions.

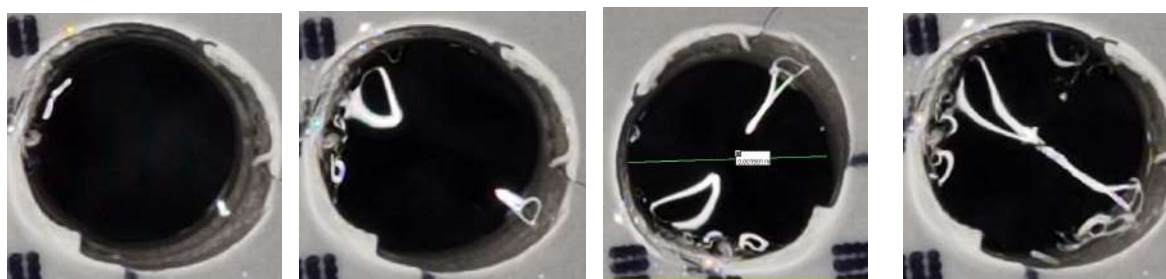
Nous avons aussi débuté les expériences en plaçant un film de savon sur un trou du tube de Rubens. Nous avons choisi d'utiliser le liquide d'un jouet d'enfant servant à faire des bulles. Le film est plus résistant qu'avec des liquides que nous avons préparés à partir de glycérol, eau et liquide vaisselle. On observe des irisations sur le film et



des vibrations de ces couleurs pour les fréquences de résonance du tube. Ce sont les interférences de la lumière qui provoquent ce phénomène. Les ondes réfléchies à l'interface air savon interfèrent avec celles réfléchies à l'interface savon air. La différence de chemin optique provoque des maxima et minima de lumière. Nous avons reproduit l'expérience sur un cercle en fil de fer pour qu'elle soit plus visible.

C'est beau mais comment utiliser ce résultat pour une visualisation comparable à celle du tube original de Rubens? De plus quand on place une bulle au-dessus du trou il y a toujours en même temps un film directement dans le trou qui vibre alors que la bulle elle-même au-dessus montre des irisations. Cependant, la plupart du temps, lorsque nous essayons de placer les bulles au-dessus des trous, elles éclatent ; mais le film de savon au niveau des trous restent quand même. A cause de la fragilité des bulles, malgré plusieurs recettes, nous choisissons d'étudier les films dans les trous et pas au-dessus.

Nous dirigeons le laser vers la membrane de savon placée dans un trou du tube, nous observons sur un écran proche une réflexion qui vibre en fonction de la résonance. Cette expérience est moins probante qu'avec les oscillateurs en aluminium ou polystyrène.



Nous explorons alors une autre voie. Nous remarquons qu'à l'approche de la résonance l'image de l'éclairage de la salle sur le film change. Nous observons deux zones lumineuses, qui s'étendent et se rapprochent lorsque la fréquence se rapproche de la fréquence de résonance. C'est ce phénomène que nous allons visualiser avec des webcams.

C-2 Visioconférence avec Monsieur Baudouin (Loïs)

Aujourd'hui, 13 mars 2024, nous avons fait la visio-conférence avec Michael Baudouin, professeur à l'université de Lille. Nous avons voulu savoir s'il était possible de visualiser les vibrations d'une bulle de savon en l'éclairant avec un laser, en observant l'image sur un écran blanc. Pour commencer, nous avons présenté notre projet à monsieur Baudouin. Puis, pour gagner en notions, il nous a parlé de la pression interne de la bulle, qui est différente de la pression extérieure, de la tension superficielle, qui maintient la forme de la bulle, forme qui doit avoir un volume minimal pour être le moins énergivore possible, et qui est donc une sphère, étant donné que c'est la forme qui utilise le moins d'énergie d'interface.

La différence entre les pressions internes et externes s'exprime par: $\Delta p = \frac{4\sigma}{r}$

σ = tension superficielle et r le rayon de la bulle

Plus le rayon est petit, plus on comprime la bulle et donc par conséquent plus la bulle est petite moins elle bouge, il est donc difficile de voir les différences de fréquences. Nous souhaitons donc visualiser les différences de pression, nous avons donc besoin de bulles

homogènes et grandes. On nous a donc conseillé d'utiliser une caméra rapide afin de visualiser les changements de fréquence. Nous avons donc besoin d'une caméra à 3500 Hz ou plus. Cependant nous pouvons aussi utiliser un stroboscope.

Monsieur Baudouin nous a expliqué les changements de forme de la bulle, ainsi selon la fréquence, on constate différents modes d'oscillation. Elle peut se déformer radialement, c'est-à-dire que sa pression interne change, cela correspond aux basses fréquences donc nous souhaitons de fortes fréquences avec des grandes bulles de taille homogène.

Le glycérol nous permet de former des bulles plus grosses et plus solides. De plus, le glycérol est plus visqueux ainsi il coule moins sur les parois du tube et il attire l'humidité de l'air ce qui contre l'évaporation et donc une éventuelle explosion de la bulle. Il faudra donc jouer sur le facteur d'une bulle stable pour pouvoir visualiser le tracé du laser à travers cette dernière. La densité du glycérol ne va rien affecter de même que la masse du liquide qui ne vont pas changer les vibrations.

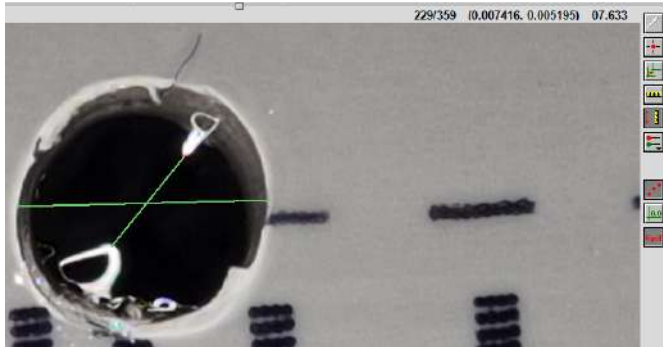
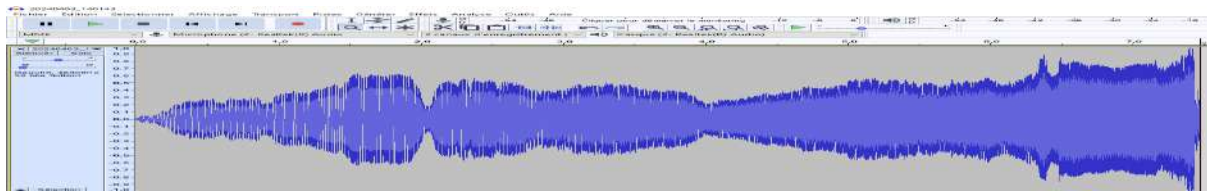
Pour notre expérience il faudrait des dômes (de bulles) au-dessus des trous et pour ceux-ci il faudrait plonger une partie du tube, où il y a les trous pour ensuite fermer hermétiquement le tube avec une pompe à vélo à l'extrémité du tube pour pouvoir maintenir la pression des bulles. Dans notre projet c'est la membrane formée dans le trou du tube qui fausse les résultats car sa surface est trop petite ce qui nous amène à la solution de la pompe à vélo. Nous avons appris que la taille de la bulle dépend de la tension superficielle.

Mise en oeuvre expérimentale:

Après cet échange nous avons placé une bulle sur chaque trou et mis le tube sous pression grâce à une pompe à vélo. Le tube est fermé aux deux extrémités (Haut-parleur fixé sur le tube fermé à gauche et pompe à vélo à droite). Mais les bulles sont instables et éclatent assez vite. La mise sous pression n'est pas la solution pour obtenir des bulles utilisables.

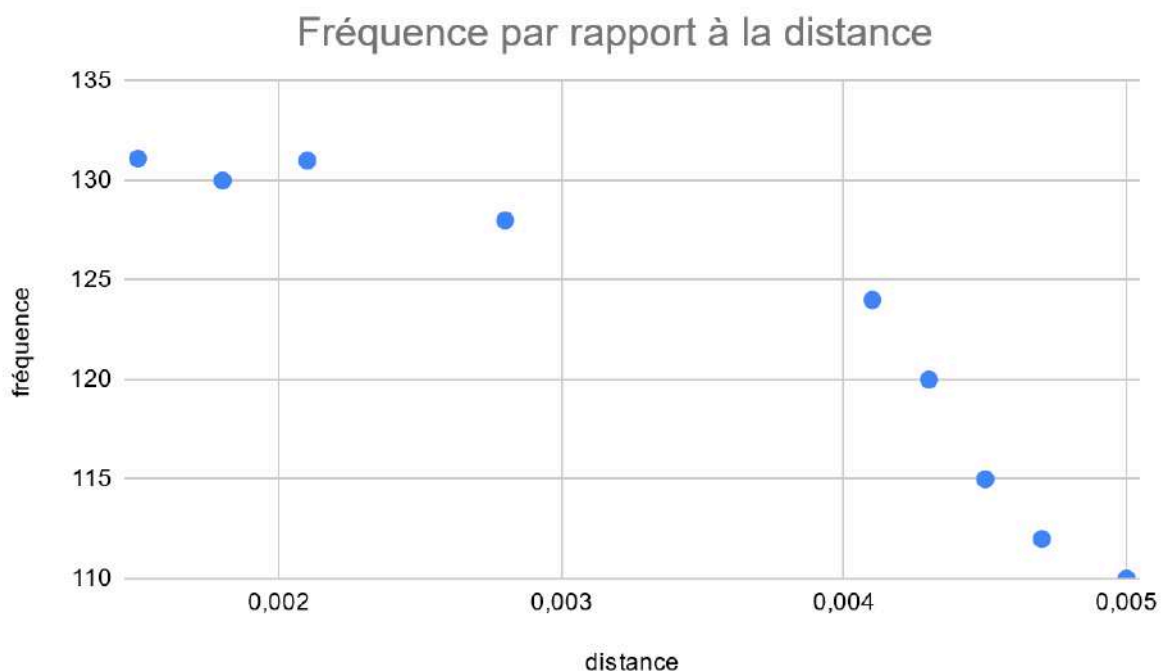
C-3 Etude quantitative des vibrations d'une bulle (Eloïse)

Nous sommes rassemblés ce 03 avril 2024 pour mettre en oeuvre un protocole de visualisation des vibrations des membranes de savons sur notre tube de Rubens. Nous avons préparé un mélange 100 mL d'eau, 25 mL de liquide vaisselle et 8 mL de glycérol. Le tube est fermé aux deux extrémités et associé à un haut parleur et une pompe à vélo (suite au conseil de monsieur Baudouin). Nous filmons le comportement des bulles sur les trous lorsque la fréquence change. Cette étude sera reproduite en septembre-octobre 2024. Nous recherchons les fréquences de résonance de ce tube avec un microphone. Nous avons ici choisi de présenter les résultats pour un trou placé sur un ventre de vibration, où nous attendions donc le maximum de vibration à la résonance. Nous avons fait varier la fréquence de 50Hz à 1000 Hz en quelques secondes et nous avons enregistré un film de l'expérience, avec donc à la fois l'image du film de savon et le son. Nous extrayons le son du film pour l'étudier sur Audacity. Nous déterminons pour différentes dates la fréquence du signal. Pour cela, nous zoomons sur le signal pour visualiser une période dont nous déterminons la durée en échantillons (pour un résultat plus précis que l'affichage par défaut d'Audacity). Nous convertissons le nombre d'échantillons en durée en connaissant la fréquence d'échantillonnage du fichier ici 48000 Hz: $\text{période} = \text{nombre d'échantillons} / 48000$.



Puis sur loggerPro nous étudions le film en déterminant la distance entre les zones lumineuses pour différents instants. (voir tableaux de mesures en annexe). On observe sur l'image un trait vert pour l'étalonnage (diamètre du trou) et un autre pour la mesure de distance entre les deux zones lumineuses avec l'outil distance photo.

En rapprochant les résultats des deux expériences nous obtenons le graphe suivant:

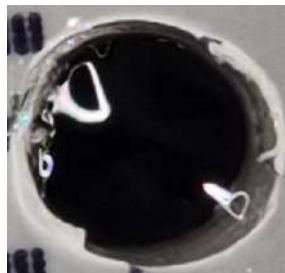


Nous constatons que la distance entre les deux figures lumineuses diminue lorsqu'on se rapproche de la résonance et s'annule à la résonance.

Conclusion : Les bulles de savon éclairées par la lumière peuvent servir à visualiser les résonances de la colonne d'air du tube de Rubens. Nous nous sommes intéressés ici aux mesures pour une seule fréquence de résonance pour un seul point du tube, mais nous l'avons visualisé pour plusieurs autres.

Influence de la position du film de savon sur le tube:

Pour obtenir une visualisation des fuseaux, il faut qu'à la résonance les films de savons placés loin des ventres de pression vibrent moins que ceux sur les ventres et que cela se traduise par une différence de distance entre les zones lumineuses des différents films. Cette expérience est en cours car pour cela il nous faut exploiter en même temps plusieurs flux vidéos(voir partie suivante) et la mise au point n'est pas finie à ce jour. Mais l'observation qualitative des film de savon éclairé nous a permis de constater que c'est bien le cas.



A gauche sur un ventre de pression à la résonance et à droite à 20 cm du ventre.

Interprétation du phénomène: Après l'expérience nous cherchons à interpréter le phénomène. Grâce à Madame Reynier, ingénieur et professeur de physique dans notre lycée, nous transmettons le film de notre expérience à un enseignant chercheur bordelais. Le 11 avril 2024, monsieur Fernando Leal Calderon, de l'ENSMAC de Bordeaux INP a partagé avec nous une explication du phénomène que nous observions. Il nous a indiqué que notre expérience était une illustration des deux formes possibles d'un film de savon :

- le common black film qui est épais.
- le Newton film qui est très très mince.

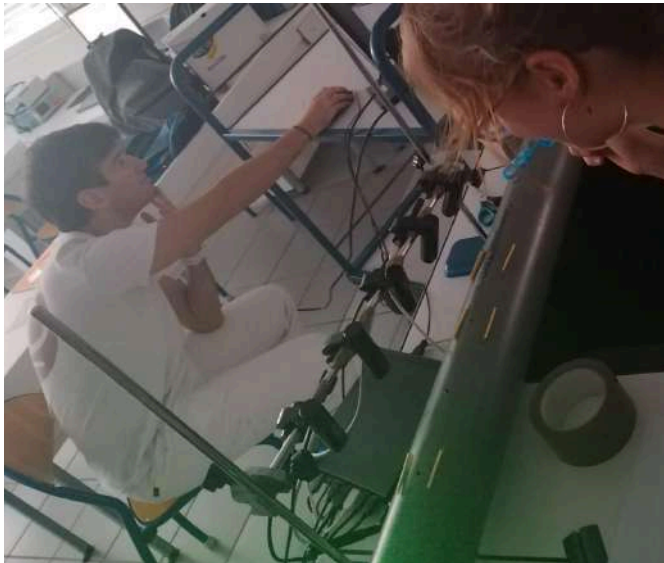
La transition CBF-NBF nécessite le franchissement d'une barrière énergétique. Les ondes acoustiques provoquent des fluctuations erratiques de l'épaisseur qui se traduisent par la transition locale d'un état à l'autre. C'est très spectaculaire. Les films dits "communs" sont des films épais, avec des épaisseurs de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière. Il réfléchissent de ce fait la lumière et apparaissent soit blancs lorsqu'ils sont très épais, soit irisés lorsqu'ils sont un peu plus fins. Les films dits "noirs" sont au contraire fins, leur épaisseur étant de l'ordre de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. De ce fait, ils ne réfléchissent pas la lumière et apparaissent noirs en réflexion. Ceci semble être le cas dans notre expérience. (Le phénomène est expliqué dans le lien suivant :

<https://www.123couleurs.fr/exp%C3%A9riences/exp%C3%A9riences-mati%C3%A8re/em-couleursinterf/>)

C-4 Visualisation des bulles dans le tube à l'aide de 5 caméras (Loïs)

Afin de mieux visualiser les phénomènes que l'on pouvait observer avec nos bulles, nous avons eu l'idée d'utiliser des webcams. En effet l'expérience précédente n'a été faite qu'avec une seule webcam pour visualiser le film sur un seul trou. Notre idée est de visualiser en même temps les flux de plusieurs webcam, chacune filmant un trou différent pour observer des différences d'amplitude de vibration et donc les fuseaux comme sur la corde ou le vrai tube de Rubens..

Pendant les vacances d'été, un élève du groupe Loïs s'est proposé d'écrire un script python qui affiche les flux vidéos de 5 caméras dans une fenêtre ainsi qu'une image du tube montrant les trous auxquels correspond chaque caméra.

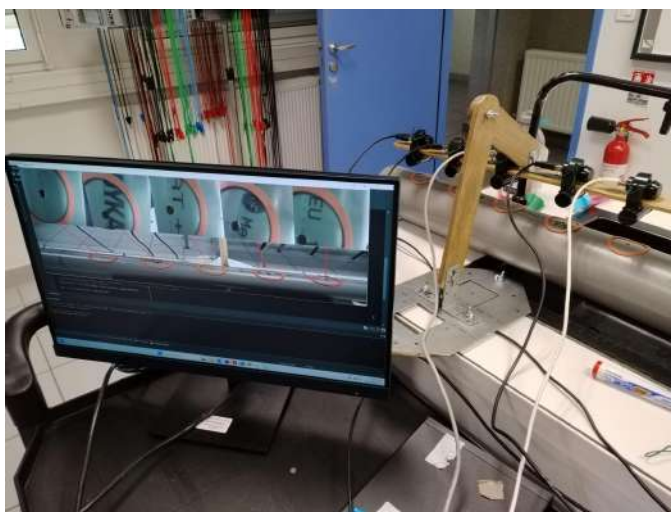


Notre première idée a été d'utiliser des hubs USB afin de pouvoir brancher un grand nombre de caméras sur le même ordinateur. Nous avons donc commencé à rédiger le script en python à l'aide de la bibliothèque `cv2` qui permet la captation des flux vidéos et l'affichage de ceux-ci. Afin d'afficher les différents flux il nous a fallu utiliser la méthode `cv2.hconcat()` qui rassemble plusieurs flux vidéos horizontalement dans la même fenêtre. Au moment de l'exécution, les caméras ne sont pas détectées. Après de nombreuses recherches, nous découvrons qu'il est impossible d'afficher les différents flux

vidéos provenant d'un seul et même hub USB en même temps.

Lors de la mise au point du montage avec les webcams le premier support s'est révélé inadapté, les webcams sont trop loin des trous à filmer. Antoine va fabriquer des X pour placer le support des webcams directement au-dessus des trous à quelques centimètres. Loïs a consacré avec Lilou ce mercredi 25 septembre à gérer les flux de webcams qui se mélangent et font parfois apparaître la même image 3 fois. Finalement, problème résolu même si l'ordinateur chauffe.

Mercredi 09 octobre c'est la catastrophe, le programme ne fonctionne plus, il y a des erreurs. On choisit de préparer deux versions : une avec un ordinateur portable et 1 webcam sur 1 port USB et une avec l'ordinateur compact et 5 webcams sur 5 ports USB.



Mercredi 6 novembre: Loïs a réussi à améliorer le système pendant les vacances de Toussaint. L'ordinateur ne chauffe plus et gère correctement les 5 flux vidéos. Une version avec une webcam pour un ordinateur portable est prête au cas où un problème surviendrait. Nous vous ferons découvrir les images lors de l'oral.

D- Et si nous faisons aussi un tube à gaz ou à fumée...(Axel)

D-1 Tube à fumigène

En dehors du lycée, un essai avec un tube de Rubens à gaz a été fait chez notre professeur. Ayant un peu peur d'y mettre le gaz nous avons pensé à une bombe à fumée. Nous avons fait un essai avec un fumigène et un trompettiste :



La fumée n'a pas rempli de manière homogène le tube et elle est ressortie par nos trous d'observations sur seulement la moitié de la longueur du tube. Nous distinguons deux fuseaux au milieu de beaucoup de fumée. Le tube chauffe. Mais les flux de fumée sont trop importants et gênent le musicien. Il faut explorer une autre piste : la machine à fumée .



D2- Tube et machine à fumée

Loïs possède une machine à fumée que nous testons au lycée le mercredi 16 octobre. Nous espérons pouvoir remplir de manière homogène le tube et obtenir une visualisation des ventres sans intoxiquer personne. Le test est plus concluant que celui avec le fumigène. La fumée sort des trous lors des pics de résonance mais elle sort aussi pendant toute la durée de l'expérience. Lors de la résonance, elle est éjectée plus violemment et on voit des fuseaux se dessiner.

Conclusion (Lilou)

Depuis la fin de notre année de seconde, nous avons eu la chance de pouvoir nous investir dans deux projets expérimentaux pour les concours scientifiques des Olympiades de physique et C.Génial. Le projet du Tube de Rubens nous a fait découvrir les ondes stationnaires dans un tube et un moyen de les visualiser. Il est frustrant de ne pas pouvoir utiliser le gaz au lycée. Les flammes pour mesurer la longueur d'onde du son ne nous sont pas autorisées. Nous avons donc cherché d'autres moyens de visualisation avec des bulles de savon et des petits vibreurs réfléchissant en polystyrène, des webcams. Beaucoup de programmation python et de nombreux bricolages. Nous avons aussi expérimenté en dehors du lycée sur un vrai tube de Rubens à gaz avec des fumigènes. Des échecs, des réussites et des échanges avec des scientifiques. Ce fut un projet passionnant et très prenant. Nous

avons atteint notre objectif. il est bien possible de visualiser les ventres et noeuds de pression dans le tube sans utiliser de méthane.

sources: <https://www.instructables.com/Rubens-Tube-Standing-Wave-Flame/>
<https://www.instructables.com/How-to-make-a-Rubens-Tube/>