

# MP30 – ACOUSTIQUE

20 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

## Commentaires du jury

- **2017** : Ce montage se limite souvent à la mesure de la célérité du son dans l'air et à l'étude du diapason. L'utilisation de la représentation de Lissajous pour mettre en évidence les passages en phase n'est pas généralisée. L'utilisation d'émetteurs et récepteurs ultrasonores est répandue, mais leur principe de fonctionnement doit être connu. Par ailleurs, certains dispositifs commerciaux conduisent à des réflexions parasites qui perturbent les mesures.
- **2014-2016** : Les phénomènes de réflexion/transmission et d'impédance ont aussi leur place dans ce montage. En outre le jury apprécie qu'on ne se limite pas à la propagation dans l'air ni à une gamme de fréquences restreinte aux fréquences audibles. Le montage ne doit pas se limiter à des mesures de la célérité du son. Signalons enfin que les mesures d'atténuation des ondes acoustiques dans l'air qui ont été proposées par les candidats, n'ont pas donné de résultats probants.
- **2012** : On peut penser : (i) aux phénomènes de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes... (ii) aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler... (iii) aux nombreuses applications : instruments de musique, sonar, échographie.

## Bibliographie

- ↗ *CAPES*, **Duffait** →
- ↗ *Physique expérimentale*, **FLTCLD** →
- ↗ **Quaranta I** →
- ↗ *Rhéophysique, ou comment coule la matière*, **Oswald** → Ondes acoustiques dans le dural

## Expériences



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Vitesse de propagation</b>	<b>2</b>
1.1	Dans l'air en fonction de la température . . . . .	2
1.2	Dans d'autres milieux . . . . .	3
1.2.1	Dans l'eau . . . . .	3
1.2.2	Dans le dural . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Caractère ondulatoire</b>	<b>4</b>
2.1	Interférences . . . . .	5
2.2	Effet Doppler . . . . .	5
2.3	Battements acoustiques (Tampon) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Application à l'acoustique</b>	<b>7</b>
3.1	Corde vibrante . . . . .	7
3.2	Acoustique des tubes . . . . .	8

## Introduction

### 1 Vitesse de propagation

#### 1.1 Dans l'air en fonction de la température

⚡ FLTCLD

La célérité  $c$  d'une onde acoustique dans un gaz parfait peut être exprimée en fonction de la température  $T$  grâce à l'expression :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

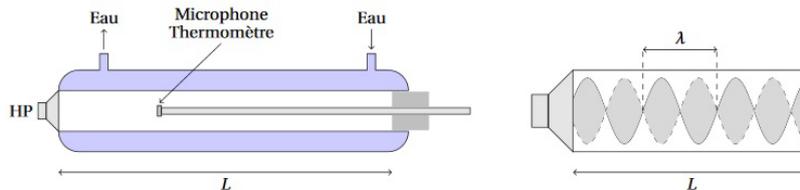
avec  $\gamma$  le coefficient isentropique (ou adiabatique) du gaz,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $M$  la masse molaire du gaz parfait.

On se propose de vérifier cette expression en utilisant le tube de Kundt. Il s'agit d'un tuyau circulaire de longueur  $L$  rempli d'air et thermolisé grâce à un bain thermostaté. Un haut-parleur émet à l'entrée du tube un son qui se réfléchit aux extrémités du tuyau. On a alors des ondes stationnaires. On détecte les noeuds et les ventres de l'onde stationnaire grâce à un microphone placé sur une tige que l'on peut déplacer dans le tube. Un thermomètre est également relié à la tige pour mesurer  $T$ .

Les fréquences de résonance du tube de Kundt s'expriment en fonction de sa longueur  $L$  selon l'expression

$$f_n = (n + 1) \frac{c}{2L} \quad \text{avec } n \text{ un entier naturel}$$

Connaissant l'ordre de grandeur de  $c$ , on en déduit que l'ordre de grandeur de la fréquence du fondamental.



#### Dépendance de $c$ avec la température

⚡ FLTCLD



Matériel :

- tube de Kundt + bain thermostaté
- haut-parleur + GBF
- tige avec le micro et le thermocouple
- oscilloscope

On commence à température ambiante. Noter la valeur de la température ambiante  $T_{\text{amb}}$  dans le tube avec le thermocouple.

Alimenter le HP avec le GBF (amplitude de 2 V) et commencer vers  $f \simeq 2$  kHz.

Mettre la sortie du GBF en voie 1 de l'oscilloscope et la sortie du microscope en voie 2 et passer en mode XY. Trouver une fréquence pour laquelle on a une droite et non pas une ellipse (méthode de Lissajous). On a alors trouvé une fréquence de résonance. Mesurer cette fréquence à l'oscilloscope.

Déplacer le micro pour repérer les noeuds et les ventres de l'onde stationnaire. En déduire  $\lambda$  en prenant le plus de minima et de maxima possibles pour être le plus précis possible.

Répéter l'opération pour différentes températures : remettre la tige dans le tube, **attendre la thermalisation pendant environ 10 minutes**, mesurer la température dans le tube, trouver la fréquence de résonance, mesurer  $\lambda$ .

Tracer  $c^2 = f(T)$ . On peut en déduire  $\gamma$  en sachant que  $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  et  $M = 29 \text{ g/mol}$ .

Curieusement, l'erreur sur la mesure de la cavité dans le tube de Kundt est non négligeable. Il est difficile de prévoir la taille exacte de la cavité à cause de la position un peu incertaine du haut parleur d'une part et de la paroi épaisse en verre à l'autre bout. Au mètre ruban, la précision n'est pas non plus exceptionnelle, et une incertitude de 2cm semble raisonnable. L'erreur sur la température est de l'ordre de 1K (pertes thermiques, microphone non collé au thermocouple, thermocouple qui donne une valeur qui fluctue légèrement, et surtout une erreur systématique ... Changez de thermocouple pour voir!). En tout et pour tout, 1K d'incertitude semble raisonnable. Enfin, il y a la précision sur l'estimation de la fréquence de résonance. Celle-ci est faible, et en général négligeable devant le reste. On laisse Regressi s'occuper du calcul d'incertitude, qui prend donc en compte l'incertitude combinée entre l'incertitude expérimentale ET l'incertitude sur l'ajustement de ces mêmes données expérimentales avec un modèle linéaire, ou affine.

### Remarques

- Le tube de Kundt a une fréquence de coupure basse de l'ordre de 4 kHz. Rester en dessous de cette valeur est crucial pour garantir qu'il n'y a qu'un seul mode dans le tube.
- Le HP n'impose pas un ventre de vibration à l'entrée du tube.
- On se place à la résonance pour que  $\lambda$  ne dépende pas de  $T$ .

## 1.2 Dans d'autres milieux

Nous allons mesurer la vitesse du son dans deux milieux : l'eau et le dural (alliage Al/Cu). Pour cela, on utilise la méthode du temps de vol (faisable aussi dans l'air mais bon pas l'temps d'naïser).

### 1.2.1 Dans l'eau



#### Mesure de $c$ dans l'eau



**Matériel :** dispositif P0.28 avec le bloc de dural, GBF, oscilloscope, pinces croco

Relier le bloc de dural à la masse de l'oscilloscope avec les pinces croco. En effet, le signal reçu est bruité à cause de la propagation d'ondes électromagnétiques entre les transducteurs dans l'eau, et relier le dural à la masse atténue cet effet.

Cacher le bloc de dural dans un coin où il ne gêne pas la propagation des ondes dans l'eau – pour le moment il ne nous intéresse pas. Alimenter un transducteur avec le GBF (amplitude 10 V,  $f = 420$  kHz. Soigner l'alignement des transducteurs pour maximiser le signal reçu et chercher la fréquence de résonance des transducteurs (autour de 420 kHz).

Envoyer des bursts sinusoïdaux avec le GBF à cette fréquence (burst espacés de 10 ms).

Mesurer le temps de vol  $t_{\text{eau}}$  d'une onde pour parcourir la distance  $d$  entre les deux transducteurs, et en déduire la vitesse du son dans l'eau  $c_{\text{eau}}$ . On attend  $c_{\text{eau}} \simeq 1.48 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$ . Les incertitudes sont données par la formule classique de propagation des incertitudes.

#### Précision de la mesure

Ne faire qu'un seul point est peu précis, il faudrait mesurer les temps de propagation pour différentes distances entre l'émetteur et le récepteur et faire une régression linéaire pour que ça soit mieux. Cependant, on n'a pas le temps de faire ça proprement et il est difficile de bouger l'émetteur et le récepteur dans la cuve P0.28. On va donc s'en contenter pour illustrer le principe de la méthode du temps de vol.

### 1.2.2 Dans le dural

↪ Oswald p211

Dans un solide isotrope, deux types d'onde acoustique peuvent se propager :

- Les ondes de compression (ondes P) sont longitudinales et se déplacent à la vitesse

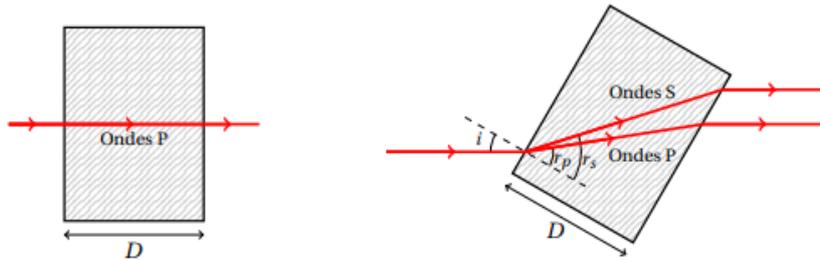
$$c_P = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

avec  $E$  le module d'Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson et  $\rho$  la masse volumique.

- Les ondes de cisaillement (ondes S) sont transversales et se déplacent à la vitesse

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} < c_P$$

Les ondes S ne peuvent se propager dans les fluides (car elles sont transversales).



On obtient, de manière analogue à Snell-Descartes où les vitesses jouent le rôle d'indice optique,

$$\frac{\sin i}{c_{\text{eau}}} = \frac{\sin r_P}{c_P} = \frac{\sin r_S}{c_S}$$

On se limite à un angle d'incidence  $i$  très faible pour l'onde S par considérer qu'elle parcourt une distance  $D$ .

### Mesure de $c_P$ et $c_S$ dans le dural



On utilise le même matos que pour mesurer  $c_{\text{eau}}$ .

#### Mesure de $c_P$ :

Placer le bloc de dural entre les transducteurs dans le sens de la longueur ( $D = 8.5$  cm). Orienter ses surfaces perpendiculairement à l'onde acoustique pour être en incidence normale.

Mesurer le temps de vol  $t_P$  de l'onde. On a alors

$$c_P = \frac{D}{t_P - \frac{d-D}{c_{\text{eau}}}}$$

avec  $d$  la distance entre les transducteurs. Pour le dural,  $E \simeq 73$  GPa,  $\nu = 0.33$  et  $\rho = 2.8 \times 10^3$  kg m<sup>-3</sup> donc on attend  $c_P = 6.2 \times 10^3$  m s<sup>-1</sup>.

#### Mesure de $c_S$ :

Incliner le bloc de dural pour avoir une incidence faible. On observe alors l'apparition d'un second burst dans le signal reçu, correspondant aux ondes S.

Mesurer  $t_S$ . On a alors

$$c_S = \frac{D}{t_S - \frac{d-D}{c_{\text{eau}}}}$$

On attend  $c_S = 3.1 \times 10^3$  m s<sup>-1</sup>

## 2 Caractère ondulatoire

L'acoustique dans les milieux est très complexes en raison de la géométrie des lieux, par exemple l'opéra de Sydney a une terrible acoustique et à coûté 102 millions de dollars. La conception et l'accordage d'instruments de musique sont aussi des points clés car une très faible erreur a des conséquences terribles. Cela est dû au caractère ondulatoire du son, et donc à sa capacité à faire des interférences et battements.

## 2.1 Interférences

➤ Quaranta I à « Sons (propagation libre des) » p352, Duffait CAPES p.287

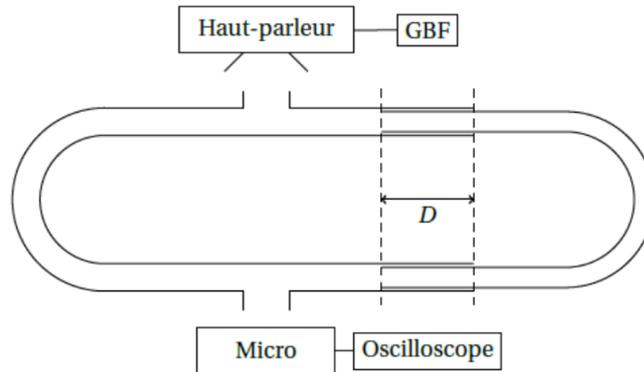


FIGURE 4.5 – Principe du trombone de König.

Le trombone de König, schématisé en figure 4.5, permet d'illustrer le phénomène d'interférence entre deux ondes acoustiques.

On envoie à l'aide d'un haut-parleur une onde à l'entrée du trombone. Une partie de l'onde parcourt la branche gauche du trombone de longueur fixe. L'autre partie de l'onde parcourt la branche droite du trombone qui est mobile. En déplaçant la coulisse d'une distance  $D$ , on fait varier la longueur de la branche de  $2D$ . Au niveau de la sortie, les deux ondes se rejoignent et interfèrent. Entre deux maxima ou deux minima successifs, la différence de chemin acoustique a varié d'une longueur d'onde, soit  $\lambda = 2D$ .

Le trombone étant un système fermé, il peut également développer des ondes stationnaires et un phénomène de résonance à l'intérieur de celui-ci, mais cela n'empêche pas l'observation des interférences.

### Trombone de Koenig



⊖ 3mn

Fixer des cornets P71.21 sur les embouchures du trombone de König P72.2. Placer un haut-parleur alimenté par un GBF devant l'un des cornets du trombone. Placer un micro devant l'autre cornet, et le relier à un adaptateur P74.38 puis à un oscilloscope. Générer une onde de fréquence fixe avec le haut-parleur ( $f = 1$  kHz par exemple). Déplacer la coulisse et relever les positions  $D_n$  correspondant aux  $n$  maxima (ou minima) successifs. On pourra utiliser le mode Haute résolution de l'oscilloscope.

Réaliser la régression linéaire de  $D_n$  en fonction de  $n$  et remonter au coefficient directeur  $\frac{\lambda}{2}$ . Remonter ensuite à la vitesse du son dans l'air  $c_{\text{air}} = f\lambda$ .

## 2.2 Effet Doppler

L'effet Doppler décrit le changement de fréquence perçue provoquée par le changement de la distance émetteur-récepteur. Cet effet va être illustré sur un banc où on a un émetteur piézoélectrique mobile et un récepteur fixe.

La théorie de l'effet Doppler permet d'exprimer la fréquence  $f_r$  du signal reçu par le récepteur en fonction de celle du signal monochromatique émis par l'émetteur  $f_e$  se déplaçant à la vitesse constante  $v_e$  par rapport au récepteur :

$$f_r = \frac{1}{1 - \frac{v_e}{c}} f_e \quad (2)$$

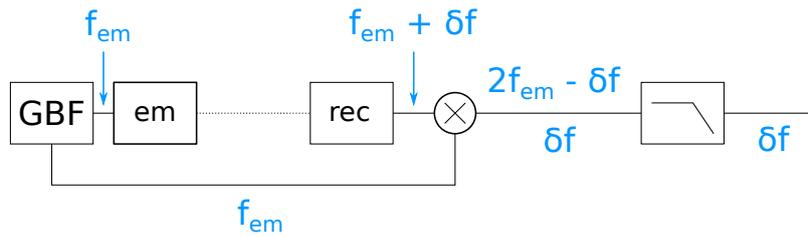
avec  $c$  la vitesse du son dans l'air.

Dans le cas réaliste où  $v_e \ll c$ , on obtient  $f_r \simeq f_e + \delta f$  avec  $\delta f = \frac{v_e}{c} f_e \ll f_e$ . Le signal reçu par le récepteur est donc constitué de deux fréquences avec l'une très faible devant l'autre.

On veut obtenir  $\delta f$  pour en déduire  $v_e$ . On doit donc comparer la fréquence émise  $f_e$  et celle reçue  $f_e + \delta f$ , qui sont très proches. Pour séparer  $\delta f$ , on procède en 2 étapes :

1. On multiplie le signal reçu par un signal de fréquence  $f_e$ . On obtient alors la somme 2 signaux de fréquence  $f_r + f_e$  et  $f_r - f_e$ , i.e. de fréquence  $2f_e + \delta f$  et  $\delta f$ . C'est l'hétérodynage.

2. On filtre ensuite cette somme de signaux avec un passe-bas pour ne récupérer que la composante de fréquence  $\delta f$



### Effet Doppler

⚡ FLTCLD

⊖

On utilise le banc à effet Doppler dans la collection avec l'émetteur et le récepteur ultrasonore (l'émetteur émet à  $f_e = 40$  kHz et alimenté avec du 10 V). Les signaux de l'émetteur et du récepteur sont envoyés sur un multiplieur suivi d'un filtre passe-bas et on observe le signal de sortie à l'oscilloscope.

Lorsque l'émetteur n'est pas en mouvement, on ne détecte aucun signal. En revanche, dès que ce dernier a une vitesse non nulle (constante, de préférence) on enregistre un signal de fréquence  $\delta f$ . On détermine l'incertitude sur  $\delta f$  avec la méthode de notre choix. Pourquoi ne pas utiliser le compteur ? Ou une FFT ?

Deux possibilités viennent ensuite :

- Mesurer la vitesse du son

On mesure la vitesse de l'émetteur avec des détecteurs séparés d'une distance fixe, qui mesurent le temps de parcours entre ces deux émetteurs (en vrai, c'est les mêmes détecteurs que pour le TP sur la chute d'une bille). Ainsi on remonte à une valeur plutôt précise de la vitesse  $v_e$  de l'émetteur.

On trace ensuite  $\delta f = f(v_e)$  et on fait une régression linéaire. On doit avoir une pente  $a = \frac{f_e}{c}$ . On en déduit  $c$  avec une incertitude

$$u(c) = c \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(f_e)}{f_e}\right)^2}$$

### Mesurer précisément la vitesse de l'objet

On connaît la vitesse du son (d'une façon peu importe laquelle), et on a

$$v = c \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{\delta f}{f}}\right) = \frac{c \delta f}{f - \delta f} \tag{3}$$

Incertaince :

$$u(v) = v \sqrt{\left(\frac{u(c)}{c}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta f)}{\delta f}\right)^2 + \left(\frac{u(f) + u(\delta f)}{f - \delta f}\right)^2} \tag{4}$$

## 2.3 Battements acoustiques (Tampon)

Les battements sont ce que l'on utilise pour accorder une guitare au diapason.

Si l'on prend deux diapasons et qu'on les fait sonner ensemble, on a une unissons, mais comme leur fréquence est légèrement différente, on peut entendre, par exemple si l'un des deux est chaud, des battements.

### Étude des battements

⚡

⊖

Faire battre deux diapasons, l'un chauffé avec un bec Bunzen si il faut.

### 3 Application à l'acoustique

intro :diapason wow la caisse de résonance c'est pour avoir une résonance wow incroyable  
Donc les considérations physiques sont utiles en acoustique? :o

#### 3.1 Corde vibrante

Les cordes sous la tension, comme dans des instruments tels que des luths, des harpes, guitares, pianos, violons et ainsi de suite, ont des fréquences de résonance directement liées à la masse, à la longueur, et à la tension de la corde. La longueur d'onde qui créera la première résonance sur la corde est égale deux fois la longueur de la corde. Des résonances plus élevées correspondent aux longueurs d'onde qui sont des divisions de nombre entier de la longueur d'onde fondamentale. Les fréquences correspondantes sont liées à la vitesse  $v$  d'une onde voyageant en bas de la corde par l'équation :

$$f = \frac{nv}{2L}$$

où  $L$  est la longueur de la corde (pour une corde fixe aux extrémités) et  $n = 1, 2, 3, \dots$ . La vitesse d'onde dans une corde ou un fil est liée à sa tension  $T$  et à la masse par unité de longueur  $\mu$  :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Ainsi la fréquence est liée aux propriétés de la corde par l'équation :

$$f = \frac{n\sqrt{\frac{T}{\mu}}}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{TL}{m}}$$

où  $T$  est la tension, le  $\mu$  est la masse **linéique**, et  $m$  est la masse totale.

Une tension plus élevée et des longueurs plus courtes augmentent les fréquences de résonance. Quand la corde est excitée avec une fonction impulsive (pincements de doigts ou coups de marteau), la corde vibre à toutes les fréquences actuelles dans l'impulsion (une fonction impulsive contient théoriquement « toutes les » fréquences). Ces fréquences qui ne sont pas l'une des résonances sont rapidement filtrées et atténuées, ce qui laisse subsister uniquement les vibrations harmoniques que nous entendons comme note musicale.

#### Fréquence de vibration d'une corde

↗ La tête de Johann



(beaucoup de) masses pour stabiliser les supports ... et 2 supports microphone (le gris (sans pile) et le noir (à pile) fonctionnent assez bien) la tige métallique biseauté exprès (merci à Benoît Capitaine!) le filtre et l'ampli (nous avons utilisé "le Stanford"), et une carte d'acquisition avec Latis Pro

On prend une corde fine en nylon dont on peut faire varier la tension en accrochant une masse  $M$  à une de ses extrémités. Alors  $T = Mg$ .

Tracer la régression fréquence de résonance - tension, pour montrer que c'est bien une jolie droite. On fait également la régression sur la masse linéique de la corde si c'est possible. Et on peut aussi faire la régression sur la longueur, mais ça on peut le garder pour la manip suivante.

**Détail des incertitudes :** Pour la fréquence mesurée, c'est difficile de le faire autrement qu'à l'accordeur. Et même à l'accordeur la corde risque de ne pas résonner assez fort ou assez longtemps, pour la faire résonner plus fort : utiliser une boîte de conserve (façon talkie walkie d'enfants). Une autre astuce est de perdre en précision en le faisant à l'oreille, en comparant à une fréquence de référence, ou à un piano. <https://www.szynalski.com/tone-generator/>. L'erreur sur une fréquence  $f$  est alors de l'ordre de  $f \times 2^{1/24} - f$  pour une personne non musicienne et de  $f \times 2^{1/24} - f$  pour un musicien, car pour passer d'une note à la suivante dans la gamme occidentale à 12 notes, on fait  $\times 2^{1/12}$ .

**On peut faire l'acquisition avec Latis :** une acquisition de 2 s est suffisante, pour 100000 points, ce qui fait un pas d'échantillonnage de  $50 \mu\text{s}$  (OK pour Shannon). Enfin, on fait la transformée de Fourier du signal obtenu. On retrouve un fondamental avec des harmoniques.

Maintenant, on se propose de vérifier la décroissance des harmoniques du spectre en  $\frac{1}{n^2}$  où  $n$  est le numéro du mode. Dans le spectre de Fourier, attention à ne pas tirer de conclusion trop hâtive, puisque le micro possède une fonction de transfert qui n'est pas plate. Il faut le vérifier, mais on l'a déjà fait normalement à ce stade.

### Corde Vibrante : décroissance des harmoniques (plus dur)

Prendre une guitare si possible pour faire cette expérience. Mettre en évidence les harmoniques avec la méthode discuté dans le montage MP29.

On commence par étalonner la réponse en fréquence du micro. Ensuite, prendre la TF du signal. Il faut absolument choisir une fenêtre manuelle et prendre le début du signal, parce que la décroissance des modes n'est pas uniforme (c'est ce que l'on veut montrer!). Les hautes fréquences risquent d'être absentes ou pire ne pas être des multiples du fondamental, même si cet effet est faible. L'explication est donnée en détail dans le Garing pour ceux que ça intéresse. C'est un effet d'anharmonicité lié à l'épaisseur de la corde (sur la corde de Mi grave choisie, il y a un fil de nylon autour duquel on réenroule un câble, tout ça pour augmenter la masse linéique et changer la fréquence.).

La partie rigolote commence alors, sur votre spectre de Fourier, vous notez la hauteur des pics pour chaque mode. Ensuite il faut pondérer chaque hauteur par un coefficient que vous déterminez grâce à l'étalonnage du micro réalisé précédemment. Enfin, il reste à tracer le  $\ln$  de l'amplitude en fonction du  $\ln$  de  $n$  où  $n$  est le numéro du mode.

Si tout va bien, la pente est de -2. Je discute des incertitudes dessous.

$\ln(A) = \alpha \ln n + b$ , avec  $b$  qui tend vers 0 et  $\alpha = -2$

**Incertitudes :** Sur la hauteur du pic, il suffit de l'estimer à partir de l'allure de la transformée de Fourier sous Latis Pro. En prenant suffisamment de points, la TF est bien résolue et s'il y a deux pics très proches, prendre l'écart de hauteur entre les deux pics est une borne supérieure de l'incertitude raisonnable.

Concernant la réponse du micro, et donc le coefficient de pondération qui intervient dans le calcul de  $A$ , c'est plus délicat, parce qu'à basse fréquence, le micro utilisé coupe les basses fréquences! Pour estimer les incertitudes, il faut considérer "l'épaisseur" du signal sinusoidal sous Latis Pro. Attention, l'estimation de votre incertitude dépend du calibre utilisé sous Latis Pro, puisqu'elle est bornée inférieurement par le pas d'acquisition du logiciel (si vous observez une "quantification" du signal, changez de calibre).

## 3.2 Acoustique des tubes

Les tubes ont eux une acoustique plus riche, puisqu'ils sont habités par des harmoniques de fonctions de Bessel. Cependant on a aussi un lien entre longueur et note émise, avec  $L$  la longueur et  $d$  le diamètre du tube. Cette équation compense le fait que le point exact auquel une onde sonore se reflète à une extrémité ouverte n'est pas parfaitement à la section d'extrémité du tube, mais une petite distance en dehors du tube.

$$f_n = \frac{nv}{2(L + 0.8d)} \simeq \frac{nv}{2L} \quad \text{Pour un tube ouvert}$$

$$f_n = \frac{(2n - 1)v}{4(L + 0.4d)} \simeq \frac{nv}{2L} \quad \text{Pour un tube fermé}$$

### Tube résonnant

Frapper le tube avec une tong <sup>a</sup> (comme si on voulait boucher le tube), cela émet un son. Retrouver sa fréquence et faire une régression sur la longueur du tube pour montrer que l'on a bien ce que l'on voulait. Il peut être intéressant de faire la dépendance en  $d$ .

On peut également faire la petite expérience de boucher le tube d'un côté, et observer qu'on rend la note une octave plus basse, signe de la division de fréquence par 2.

a. <https://youtu.be/W5sKXqA3puY>

## Conclusion

La musique, c'est bien <3