

# MP30 – Acoustique

**Rmq** : En préparation nous avons essayé plus de montages que ceux présentés au montage. J'ai donc inséré les remarques que nous avons à leur propos dans le compte rendu (et notamment pourquoi on ne les a pas choisies).

## Introduction – Le son comme vibration ordonnée des milieux à l'échelle microscopique

Lorsqu'on pense acoustique on pense musique et salles de concert, bref l'acoustique est la science du son, de sa création à ses effets en passant par sa propagation.

Le son est créé par une perturbation à grande fréquence (comme par ex la vibration de nos cordes vocales ou de la peau d'un tambour) qui fait vibrer le milieu (ici l'air) avoisinant. Il se crée une succession de de surpressions et de dépressions qui se propagent de molécules en molécules.

Il y a donc ici deux mots clés : **vibration** et **milieu matériel**. Ce sont eux qui vont nous guider tout au long de ce montage.

### Expérience 1 : Le diapason arroseur

**Matos** : un diapason \_ sa caisse de résonance \_ un marteau \_ un récipient peu profond et transparent rempli d'eau

D'abord, voici une petite expérience qui permet de relier les notions de vibration et de son. On tape un diapason (tout comme un tambour ou une guitare) et il émet un son.

On l'approche alors d'une surface d'eau et il fait des éclaboussures ! Par ailleurs, dès qu'on le touche du doigt, il arrête de sonner.

**Bilan** : l'instrument vibre et le son est bien relié à cette vibration.

**Rmq** : manip qui marche très bien !

**Réf** : Vibrations mécaniques acoustique, P Fleury et JP Mathieu, Eyrolles

### Questions :

- pourquoi un nouveau son apparaît-il quand le diapason entre au contact de l'eau?

-> le verre entre en vibration

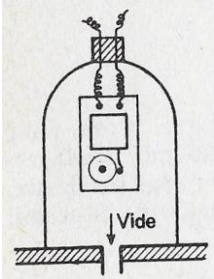
- pourquoi le son émis par le diapason devient-il plus grave quand on met ce dernier au contact de l'eau?

-> ça fait comme lorsqu'on rajoute une masselotte: dans l'air l'oscillateur c'est la tige de métal; dans l'eau c'est la tige de métal et un peu d'eau qui l'entoure (donc plus lourd)

## Expérience 2 : La sonnette et la cloche à vide (-> MP29)

**Matos** : un buzzer \_ une cloche à vide \_ sa pompe \_ un bout de polystyrène isolant

En préparation juste avant le passage on positionne la sonnette (un buzzer sur batterie) à l'intérieur d'une cloche à vide et on fait le vide. Cela permet de gagner du temps.



Maintenant intéressons-nous au deuxième mot clé : le son se propage dans les milieux matériels. La façon la plus simple de s'en assurer est de vérifier qu'il ne se propage pas dans le vide ! On en arrive à cette petite expérience où j'ai enfermé une sonnette allumée à l'intérieur d'une cloche dans laquelle j'ai fait le vide. Là on n'entend rien, mais je vais maintenant faire rentrer peu à peu des molécules d'air dans la cuve et vous allez commencer à l'entendre !

**Bilan** : à première vue, le son se propage dans les milieux matériels car il faut des particules pour pouvoir avoir des ondes de surpression !

**Réf** : Vibrations mécaniques acoustique, P Fleury et JP Mathieu, Eyrolles

### Rmq :

Attention à l'interprétation ! En fait, "*on a fait le vide, du coup il n'y a plus de milieu matériel et donc plus de propagation*" est complètement fausse:

- preuve expérimentale: si on met un sonomètre digital à l'intérieur de la cloche on voit que quand on fait le vide l'intensité sonore augmente (en fait ^^)
- preuve théorique: le libre parcours moyen à 0,1 atm (pression obtenue avec la pompe utilisée) est très inférieur à la longueur d'onde, l'onde se propage donc encore !

C'est en fait une expérience subtile à interpréter en termes d'adaptation d'impédance et de coefficients de transmission/réflexion.

Quand on diminue la pression :  $R = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \rightarrow 1$  et  $t = 2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \rightarrow 0$  (avec 1=air à l'intérieur de la cloche, 2=cloche en verre,  $Z = \rho * c$ ).

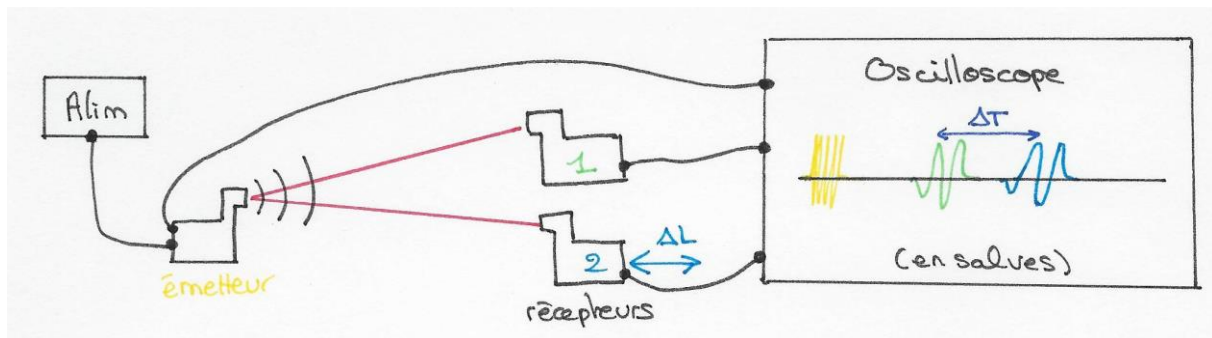
Stratégie : ne pas la faire en introduction mais en fin de montage dans une partie réservée aux mesures d'impédances par exemple.

## Partie 1 – La vitesse du son dans différents milieux

Le son est donc une onde qui se propage dans les milieux matériels. Et en particulier il est légitime de penser que sa vitesse de propagation va dépendre de la densité en particules du milieu. Plus il y a de molécules dans un même espace, plus elles se passent le message vite et plus l'onde se propage vite. C'est comme pour les dominos express, où le but est de les resserrer le plus possible pour que le parcours soit le plus rapide possible ! Regardons donc ce qui se passe pour un gaz, un liquide et un solide.

### Expérience 3 : La vitesse du son dans un gaz : l'air (-> MP29 ?)

**Matos :** un émetteur \_ une alim 5V \_ deux récepteurs \_ rail moduson \_ oscilloscope \_ thermomètre \_ longue règle graduée (50cm) \_ formules d'incertitudes préparées dans excel.



Donc c'est parti, mesurons la vitesse du son dans notre gaz préféré, l'air. On va se placer dans le domaine des ultrasons (vers 44kHz) pour pouvoir travailler à petite échelle (c'est le domaine de l'acoustique aux plus courtes longueurs d'ondes). On utilise pour cela un émetteur ultrason et deux récepteurs en parallèle face à lui. L'émetteur envoie des salves assez longues (en jaune ici) et on observe bien les deux réponses tardives des deux récepteurs.

Maintenant je vais en décaler un et hop ! on voit que son signal est encore plus retardé. Je vais ainsi pouvoir mesurer la vitesse du son en mesurant le temps de parcours de l'onde entre les deux récepteurs. Utiliser 2 récepteurs me permet de m'affranchir des diverses incertitudes sur la position précise de l'émetteur et du récepteur dans les têtes et de l'éventuel temps de propagation dans l'électronique. Faire les mesures en relatif me permet aussi de prendre la référence la plus précise possible sur les signaux de réponse, en particulier le point anguleux final. Donc je zoome et je mesure. J'utilise aussi le moyennage pour une plus grande précision avec la répétition des mesures.

$$\Delta L = \dots \quad 50 \text{ cm} \pm 2 \text{ mm} \quad \Delta T = \dots \quad 1,44 \pm 0,04 \text{ ms} \quad c = \frac{\Delta L}{\Delta T} = \dots \quad 347 \pm 10 \text{ m/s}$$

$$\text{En théorie : } c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}} \quad m = 29 \text{ g/mol} ; \gamma = 1,4$$

$$\text{Mesure de T avec un thermomètre : } T = \dots \quad 21,7^\circ\text{C}$$

$$\text{Calcul de la valeur théorique : } c = \dots \quad 344 \text{ m/s}$$

Les résultats expérimentaux collent bien avec ce modèle théorique.

**Rmq :** Avant le passage on règle l'émetteur (bouton tournant) pour avoir une réception d'amplitude maximale. On peut aussi régler l'oscillo sur 2 périodes de trains d'onde. Attention, il faut un déclenchement en « front puis front » sur CH1 avec un retard de 6,5 ms.

**Rmq :** L'émetteur peut fonctionner en continu ou en salves (courtes ou longues). On a ici fait le choix d'utiliser le mode en salves longues. Voici les différences :

\* **En continu (vitesse de phase):** on superpose les signaux des deux récepteurs, puis on en déplace un en comptant le nombre de périodes défilant  $\rightarrow \Delta L$  pour N périodes  $\rightarrow \lambda$  ( $\sim 8,5\text{mm}$ ). On relève aussi la fréquence des oscillations ( $f \sim 41\text{kHz}$ ). Puis on en déduit  $c = f \cdot \lambda = \dots \quad 349 \text{ m/s}$

\* **En salves (vitesse de groupe):** cette fois on se base non plus sur la fréquence des ondes mais sur celle des pulses. On visualise les réponses des récepteurs à l'oscilloscope. On les aligne, puis on en décale un très loin en gardant l'autre fixe et on mesure le retard entre les deux signaux à l'oscilloscope. Les longs pulses donnent un point de repère plus fiable (point anguleux final).

Dans un milieu non dispersif vitesse de phase et vitesse de groupe sont égales.

**Réf :** Notice sur l'intranet (Banc à ultrasons [ENSC 431]) \_ BUP n°742 (notice 55)

## Questions / remarques :

- c'était bien de faire les mesures de vitesse en relatif avec 2 récepteurs ou en déplaçant un récepteur (et pas en mesurant une distance à l'émetteur).
- comment marchent les émetteurs / récepteurs ?
  - > avec des piézo-électriques
- l'amplitude des ultrasons diminue avec la distance à l'émetteur: qu'est-ce qui joue ?
  - > 2 phénomènes possibles: dilution sphérique (décroissance en  $1/r$  de l'onde sphérique, cf Huygens Fresnel) et absorption par le milieu (exponentielle décroissante): dans l'absolu on pourrait mesurer l'évolution de la décroissance de l'amplitude avec la distance pour voir lequel des 2 phénomènes gagne.
- pourquoi les molécules d'air dans l'atmosphère ne tombent pas par gravité ?
  - > à cause des chocs: elles rebondissent sur celles d'en-dessous! (cf  $mgz/kT$  dans le facteur de Boltzmann pour la pression: compétition entre la gravité et les chocs dus à l'agitation thermique)
- quelles hypothèses pour pouvoir utiliser  $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}}$  ?
  - > gaz parfait diatomique + propagation adiabatique réversible
    1. adiabatique? -> échelle de temps courte ( $Q = 0$ )
    2. réversible? -> c'est réversible pour les molécules d'air (pas pour l'onde!) -> petites oscillations réversibles des molécules d'air autour d'une position d'équilibre
    3. pourquoi  $\gamma=1,4$  ça marche? -> pas de degrés de liberté vibrationnels internes: il y a un palier de température pour ça -> en dessous de  $900^\circ\text{C}$ ,  $\gamma=1,4$  est valide

## Expérience 4 : La vitesse du son dans un liquide : l'eau (-> MP29 ?)

**Matos :** cuve rouge (avec émetteur, récepteur, alim) remplie d'eau \_ oscillo \_ règle graduée \_ excel avec formules d'incertitudes

Intéressons-nous maintenant à un liquide, par ex l'eau pour faire simple. Cette fois les molécules sont plus rapprochées que dans l'air, on peut donc se douter que le message passe plus vite d'une molécule à l'autre et que le son se propage à une vitesse plus grande !

On utilise cette fois un émetteur et un récepteur adaptés au milieu aquatique. Ils sont mis face à face dans cette cuve rouge remplie d'eau comme représenté ici. Comme précédemment, on peut observer le signal envoyé et celui reçu à l'oscilloscope. Comme nous n'avons ici qu'un seul récepteur, nous allons relever les retards de réception pour deux positions du récepteur pour améliorer les incertitudes de mesure. Comme pour le cas de l'air, on moyenne le signal reçu à l'oscilloscope.

$$\Delta L = \dots \quad 36,6 - 19,5 = 17,1 \text{ cm} \pm 0,1. \quad \sqrt{2} = 0,14 \text{ cm}$$

$$\Delta T = \dots \quad 199,84 - 85,35 = 114,69 \mu\text{s} \pm 0,03 \mu\text{s}$$

$$c = \Delta L / \Delta T = \dots \quad 1494 \text{ m/s} \pm 12 \text{ m/s}$$

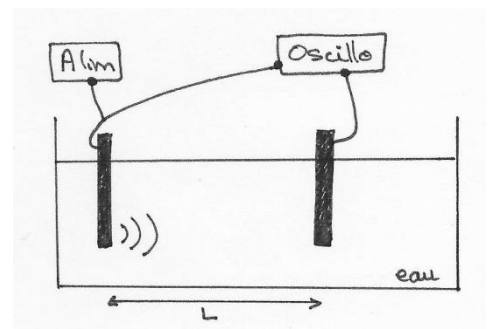
On peut comparer cela à la valeur théorique  $c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \chi_s}}$  qui vaut  $1497,4 \text{ m/s}$  à  $25^\circ\text{C}$ .

**Rmq :**  $1430 \text{ m/s}$  dans l'eau douce et  $1550 \text{ m/s}$  dans l'eau de mer à  $20^\circ\text{C}$ .  $+1\text{g/L}$  de sel ->  $+1,1 \text{ m/s}$

**Bilan :** on observe bien une vitesse plus élevée que dans l'air !

**Réf :** notice sur l'intranet (Ensemble d'étude de la propagation d'une onde ultrasonore dans un solide [ENSC 410])

**Rmq :** le récepteur est un peu capricieux... On a demandé à ce qu'il soit réparé si possible.

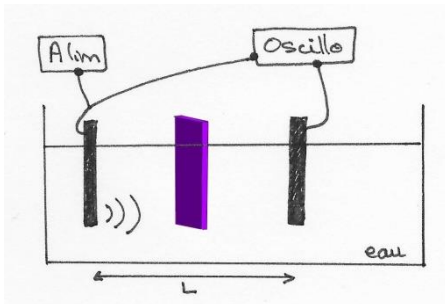


## Expérience 5 : La vitesse du son dans un solide : le duralumin (-> MP29)

**Matos :** idem expé 4 \_ duralumin \_ excel avec formules d'incertitudes

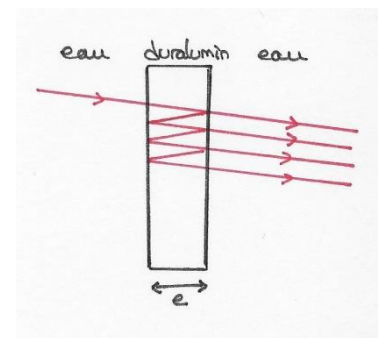
Maintenant, regardons ce qui se passe dans les solides. Nous avons ici une plaque de duralumin. C'est un alliage de cuivre et d'aluminium. Il est particulièrement utilisé dans l'industrie aéronautique du fait de sa grande résistance.

J'ajoute la plaque entre l'émetteur et le récepteur.



Cette fois c'est le fait que les ondes sonores puissent être réfléchies plusieurs fois et dans la plaque qui va nous permettre de déterminer leur vitesse dans celle-ci. En effet, on va observer à l'oscillo un premier train d'onde dû aux ondes qui ont traversé une fois la plaque, puis un deuxième correspondant à celles qui ont fait un aller-retour supplémentaire dans la plaque (plus long de  $2x$  l'épaisseur), puis un troisième, un quatrième...

**Rmq :** ce sont les pics tous resserrés !



$$e = 14,5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{Nombre d'intervalles visibles entre les pics } N = \dots \quad 3$$

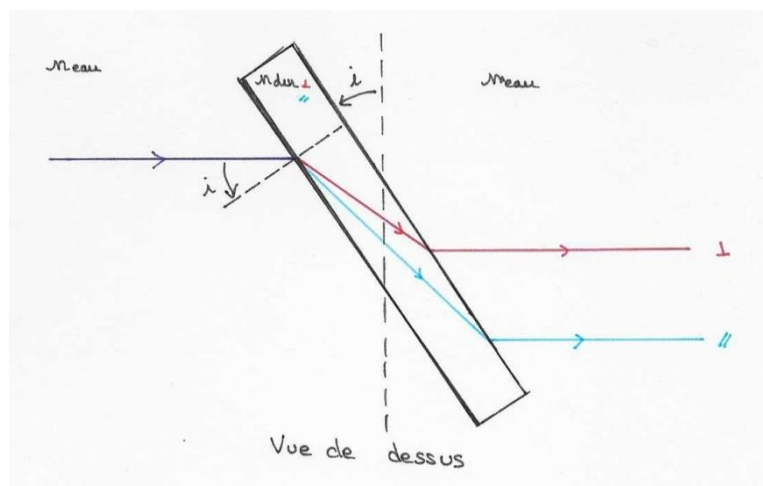
$$N\Delta L = N \cdot (2e) = \dots \quad 87 \pm 1,2 \text{ mm}$$

$$N\Delta T = \dots \quad 14,1 \pm 0,1 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{N\Delta L}{N\Delta T} = \dots \quad 6170 \text{ m/s} \pm 96 \text{ m/s}$$

En fait il ne s'agit là que d'une des deux vitesses que peuvent avoir les ondes lorsqu'elles se propagent dans le duralumin. En effet, il existe aussi une vitesse transverse lorsque la plaque n'est pas disposée perpendiculairement à la direction de propagation des ondes. Mais dans ce deuxième cas, ce sont des ondes transversales (ondes S en sismologie) et plus les ondes longitudinales (P) de compressions-dilatation auxquelles nous sommes habitués dans l'air. Elles sont plus lentes.

**Autre méthode possible :** cette fois on utilise la possibilité de tourner la plaque de duralumin. Cela va nous permettre de progressivement faire apparaître les pics dus aux ondes transversales. A cause de la possibilité de réflexion totale, les pics des ondes longitudinales vont disparaître à  $\alpha = i_{//,c}$ , puis ceux des ondes transversales vont s'éteindre pour  $\alpha = i_{\perp,c}$ . On peut alors en déduire  $c_{//,dur}$  et  $c_{\perp,dur}$  par l'application des lois de Descartes.



$$i_{//,c} = \dots \quad \Rightarrow \quad c_{//,dur} = c_{eau} / \sin(i_{//,c}) = \dots$$

$$i_{\perp,c} = \dots \quad \Rightarrow \quad c_{\perp,dur} = c_{eau} / \sin(i_{\perp,c}) = \dots$$

**Rmq** : possibilité d'en déduire le module d'Young de la plaque de Duralumin. On mesure ses dimensions et sa masse pour avoir  $\rho$  et on utilise  $c = \sqrt{E/\rho}$  (mais mauvaise approximation, cf résumé 2013). On peut comparer à la valeur de E donnée dans le CRC Handbook 83<sup>e</sup> édition.

**Rmq** : Les angles ne sont pas précisément mesurables et le phénomène n'est pas évident à voir (tout petit). Nous avons donc trouvé des valeurs très éloignées de la réalité... A voir avec le récepteur réparé... Nous n'avons donc pas présenté cette 2<sup>e</sup> méthode en montage. Le jour J, si on veut faire cette manip je pense qu'il vaut mieux essayer cette manip avant de l'insérer dans le plan, pour être sûr que ça marche bien !

**Réf** : notice sur l'intranet (Ensemble d'étude de la propagation d'une onde ultrasonore dans un solide [ENSC 410])

**Bilan** : Nous voyons bien ici que dans un solide, la vitesse du son est encore plus élevée, car les particules sont encore plus serrées.

### Questions / remarques :

- pourquoi on n'a pas fait les mesures de cisaillement dans le duralumin? ordre de grandeur de la vitesse des ondes de cisaillement?
- analogie optique pour la plaque de duralumin?
  - > Fabry Perot (bien dire qu'on est en incidence normale)
- d'où vient la grosse incertitude sur la vitesse dans le duralumin?
  - > mesure peu précise de e, prendre un pied à coulisse.
- quel est le rôle de la température dans les célérités à part dans l'air ?
- l'eau est-elle compressible? un peu -> pourquoi "un peu"?
- est-ce que c'est nécessaire de parler de la compressibilité du milieu? évidemment
- comment la masse volumique varie avec la température? ->  $\rho = \rho_0 + (1^{\text{er}} \text{ ordre en } T)$ , c'est un DL d'une exponentielle de Boltzmann
- pour quelle composition du duralumin est donnée la vitesse théorique? est-ce qu'on connaît précisément la composition de notre plaque? à vérifier
- réflexions sur le bord de la cuve? -> s'affranchir directement du problème en montrant le pic qui se déplace quand on bouge le récepteur, pour montrer qu'on peut s'affranchir des conditions aux limites
- pour libérer du temps ailleurs, on peut faire la mesure de vitesse dans l'eau seulement en préparation (ça n'a pas grand intérêt car c'est à peu près le même concept que dans l'air et dans le duralumin, risque de somnolence).

**Transition** : maintenant que nous venons de mettre en évidence le rôle fondamental du milieu sur la propagation du son et notamment son influence majeure sur la vitesse de ce dernier, nous allons nous intéresser à d'autres phénomènes très intéressants traduisant le caractère ondulatoire du son.

## Partie 2 – Autres propriétés du son caractéristiques des ondes

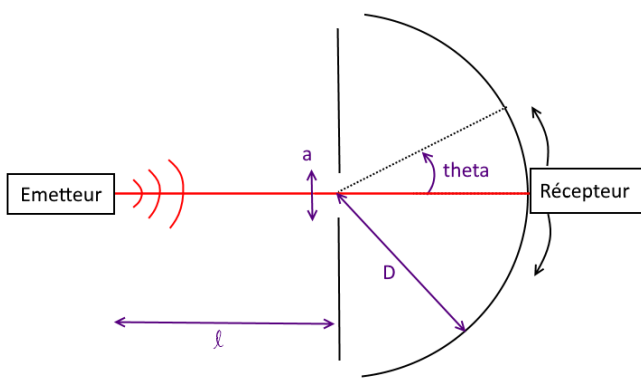
Et oui, le son se comporte bien comme une onde ! Et ces phénomènes de diffraction, interférences, battements, résonance etc... font partie de notre vie quotidienne sans que nous en ayons vraiment conscience !

## Expérience 6 : Diffraction des ondes sonores

**Matos :** idem expé 3 \_ demi-cercle moduson \_ fente (avec L et T sur l'émetteur et une marque pour repérer la position du récepteur) \_ excel avec formules d'incertitudes

Commençons par parler diffraction. Comme en optique, c'est un phénomène qui devient important lorsque l'onde arrive sur une ouverture ayant le même ordre de grandeur que sa longueur d'onde. La voix humaine varie communément entre 120 Hz et 300 Hz, ce qui correspond à une longueur d'onde variant entre 3 et 1 mètres. L'onde sonore arrivant au niveau d'une porte ouverte subit donc une diffraction, c'est ce qui permet à une personne qui n'est pas située dans l'axe d'entendre quand même de l'autre côté !

**En option :** Commençons donc par mesurer la longueur d'onde de ces ultrasons. Il suffit de reprendre l'expérience 3 avec un seul récepteur, de se mettre à l'échelle d'une période, puis de décaler ce dernier de façon à passer par exemple 10 périodes. On en déduit  $\lambda=8,5 \text{ mm} (\pm 0,1\text{mm})$ . Une fente de 20 mm suffira donc pour observer une belle tâche de diffraction.



Changement de décors, on place le récepteur sur un arc de cercle et on regarde la variation d'intensité reçue en fonction de l'angle avec la normale.

On prend pour valeurs :  $a=20\text{mm}$

$l=200\text{mm}$  (ou plus ?)

$D=165\text{mm}$  (arc de cercle le plus petit)

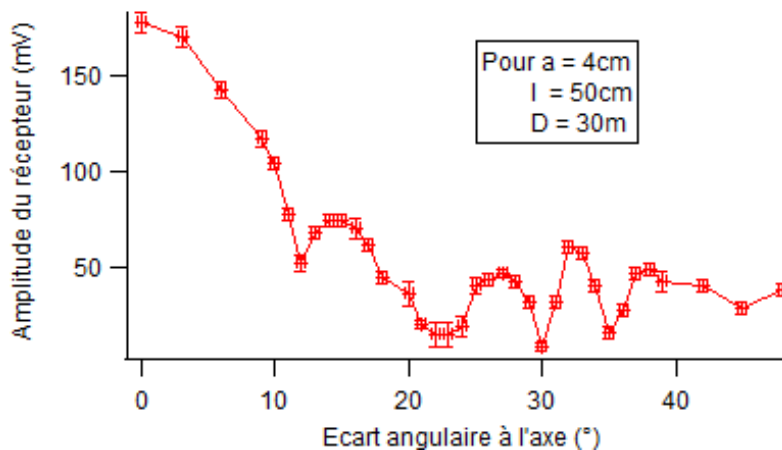
Puis on fait varier  $\theta$  pour trouver la largeur de la tâche centrale de diffraction,  $\Delta\theta$ . (Comme en optique)

$\Delta\theta = \dots 53^\circ \pm 5^\circ$

En théorie :  $\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = \frac{\lambda}{a}$  soit,  $\Delta\theta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{a}\right) = \dots 50^\circ \pm 1^\circ$

**Bilan :** les ondes acoustiques diffractent !

**Rmq :** Ce n'est pas évident que le récepteur puisse détecter une annulation du signal, mais au moins une forte baisse. Nous avons essayé de relever point par point la figure de diffraction en préparation, mais elle n'est pas extrêmement belle... C'est pourquoi on s'est contentés de la largeur de la tâche centrale.

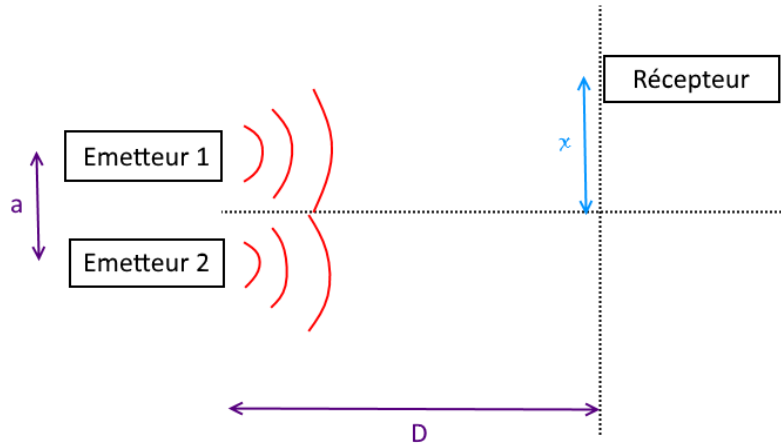


**Réf :** Notice sur l'intranet (Banc à ultrasons [ENSC 431]) ; Physique expérimentale aux concours de l'enseignement, élec, acoustique, JP Bellier, C Bouloy, D Guéant, Dunod

## Expérience 7 : Interférences ultrasonores

**Matos :** idem expé 3 (avec T et coude) \_ modèle de distances en papier \_ courbes sur Igor

**Rmq :** préparer une courbe de relevé d'intensité en fonction de l'angle avec Igor en préparation, ainsi que la courbe à construire en live  $x=f(\rho)$ .



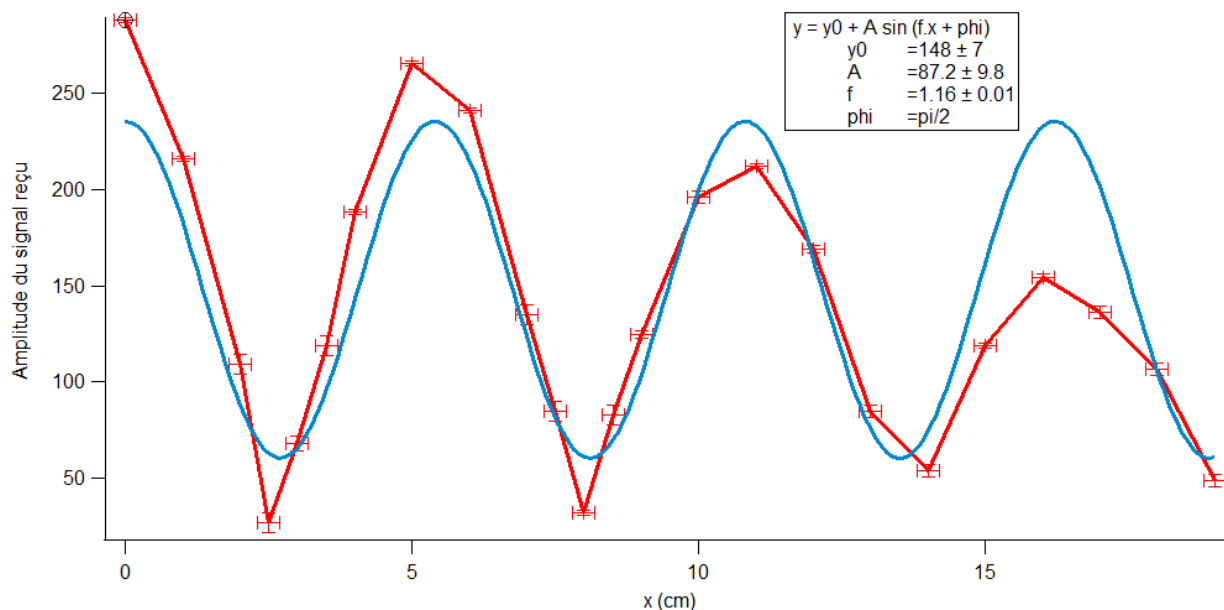
Maintenant, retirons la fente et regardons ce qui se passe lorsqu'on met deux sources accordées en fréquence côte à côte. On les sépare de  $a$  et on ajuste l'amplitude du gros sur celle du petit (cf notice en salle 75). On change de décors (pour varier) :  $D=50\text{cm}$  et  $a=8,5\text{cm}$ .

**Rmq :** Cette expérience est aussi faisable sur l'arc de cercle. Le seul inconvénient est que les angles sont mesurables de façon peu précise...

Puis on relève les variations d'amplitude du signal reçu lorsque le récepteur change de position le long de la règle. On distingue nettement les franges d'interférence.

1) En préparation nous avons relevé cette variation d'amplitude en fonction de  $x$ , et nous l'avons ajustée à un cosinus sous Igor :  $y=y_0+A\cos(f.x)$

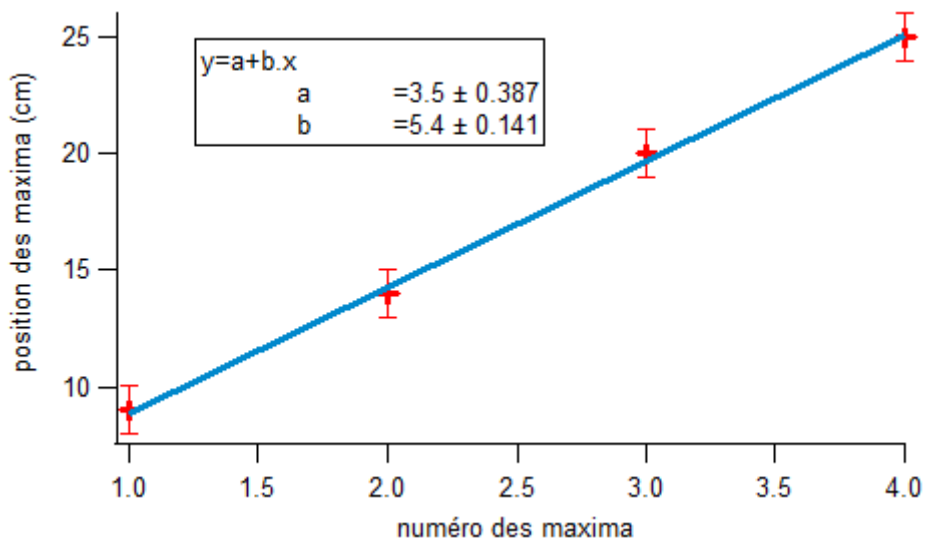
Nous obtenons un premier ordre de grandeur de l'interfrange :  $i \approx \frac{2\pi}{f} \approx \dots$  **5,4 cm**





2) Maintenant, si l'on repère les différents ordres  $p$ , on peut tracer  $x$  en fonction de  $p$ . On obtient une droite de pente  $i$  (sur Igor).  $i$  est obtenu de façon plus précise :  $i = \dots 5,4 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$

$$\text{Incertitude} \approx \delta x \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{9} + \frac{1}{16}}{4}} \approx 0,3 \text{ cm}$$



**Théorie :** pour  $D \gg a$ , interfrange  $i \approx \frac{\lambda \cdot D}{a} = \dots 5,0 \pm 0,1 \text{ cm}$

**Réf :** Nous ne sommes pas dans les conditions aux petits angles pour les franges les plus loin, c'est sûrement pourquoi nous trouvons un interfrange un peu plus grand.

**Réf :** Notice sur l'intranet (Banc à ultrasons [ENSC 431]) ; Physique expérimentale aux concours de l'enseignement, élec, acoustique, JP Bellier, C Bouloy, D Guéant, Dunod

**Bilan :** les ondes acoustiques peuvent interférer

### Questions / remarques :

- si l'on veut gagner du temps pour faire d'autres manips, ce n'est pas la peine de faire interférences + diffraction: c'est mieux de faire les interférences et de parler de la diffraction dans ce cadre (elle module la figure d'interférence en décroissance en sinus cardinal au carré). On revient alors à la taille des cristaux de quartz des piézo-électriques.

- sur la courbe  $x(p)$  (position des maxima): est-ce que le point (0,0) appartient à la courbe et pourquoi ?

-> oui si on le prend comme point de mesure

- calcul de l'incertitude de l'interfrange théorique et hypothèse d'indépendance des paramètres

- comment on rend les sources cohérentes ?

-> on les synchronise en les reliant par un câble coax

- analogie optique?

-> trous d'Young

- qui joue le rôle de la source primaire ?

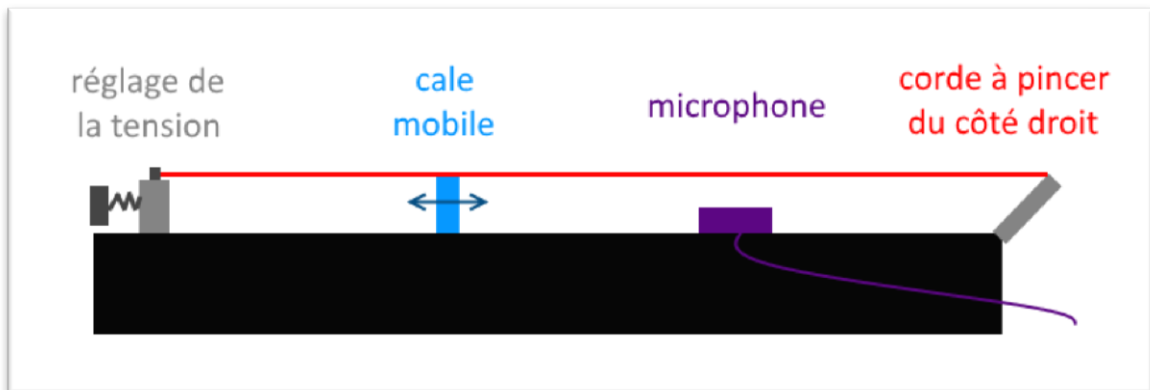
-> L'oscillateur électronique du gros émetteur qui crée le signal électrique et l'envoie aux piézo-électriques des deux émetteurs (qui jouent le rôle des trous).

## Expérience 8 : Modes propres : corde de guitare (-> MP29 ; MP31 ; MP26?)

**Matos :** corde de guitare sur support \_ cale mobile \_ microphone adapté \_ oscillo \_ ordi avec Igor

**Rmq :** préparer une courbe de relevé de fréquence fondamentale en fonction de la longueur de corde avec Igor en préparation.

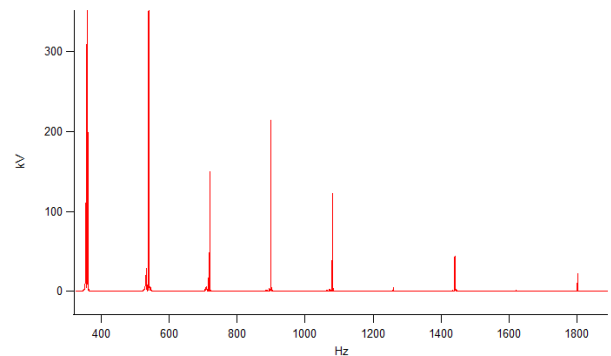
On va observer ici une propriété des ondes en milieu fini : l'existence de modes propres stationnaires. On va s'intéresser à une corde de guitare dont on peut faire varier la longueur vibrante avec une cale. Un microphone adapté est relié à un oscilloscope.



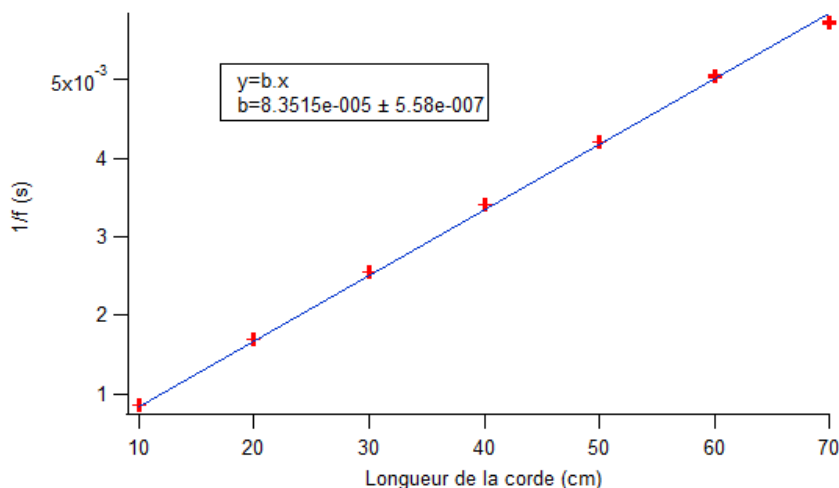
Lorsque l'on pince la corde, elle se met à vibrer et émet un son formé d'une superposition des fréquences propres du bout de corde utile (tels que  $L = p \cdot \lambda / 2$ ).

On réalise alors une acquisition en mode single à l'oscillo (de 20s \_ **2s/carreau** !) et on l'importe sous Igor pour réaliser une belle FFT.

On observe une dizaine d'harmoniques, bien multiples du fondamental.



On a fait cela pour plusieurs longueurs de corde et relevé fréquence du mode fondamental à chaque fois pour pouvoir tracer  $1/f$  en fonction de la longueur de corde utile. On obtient une belle droite témoignant de la linéarité entre  $1/f$  et  $L$ .



En théorie :  $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  où T est la tension du fil et  $\mu$  sa masse linéique.

$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = 2/\text{pente} \approx \dots \quad 240 \text{ m/s}$$

ODG :  $\mu \approx 1 \text{ g/m} \Rightarrow T \approx 60 \text{ N}$  (cohérent avec ce que l'on trouve pour une corde dans la littérature)

**Bilan :** en milieu fermé, les ondes acoustiques deviennent stationnaires et se répartissent en modes propres au système.

### Questions / remarques :

- la vitesse de quoi mesure-t-on ici ?

-> vitesse transverse de propagation de l'onde dans la corde

- c'est une onde transversale: du coup est-ce toujours de l'acoustique?

-> oui, nous sommes habitués aux ondes sonores longitudinales car ce sont les seules qui se propagent dans les fluides. Mais il y a aussi les transverses dans les solides (exemple des ondes sismiques, retour sur le duralumin). Mais dans ce cas-là, 1D, direction « hors » du matériau... Assez complexe pour l'interprétation, autant faire plus simple si on le peut ! Par ex le tube de Kundt.

- c'était dommage de finir par l'AN sur la tension de la corde qui est peu propice à être discutée (T = 60 N, euh ok, et alors ?). Finir le montage sur un résultat précis et d'intérêt physique important !

- bien rajouter un point sur la courbe de 1/f en fonction de L le jour J, sinon c'est presque inutile de l'avoir faite, il faut absolument la valider en direct !

- il faut projeter l'écran du PC pour montrer ce qu'on fait en direct (et s'il y a un problème de projecteur, se placer du côté du jury pour qu'il puisse vérifier ce que l'on fait).

**Rmq :** Le point sensible est bien expliqué là :

[http://alainrobichon.free.fr/cours/Physique/Ondes/Ondes\\_sonores\\_fluides\\_2.pdf](http://alainrobichon.free.fr/cours/Physique/Ondes/Ondes_sonores_fluides_2.pdf)

### Conclusion :

Nous avons vu que l'acoustique était l'étude des propriétés des ondes sonores et que celles-ci étaient dues aux vibrations de particules dans un milieu. Nous avons ainsi vu l'influence de la densité de ce milieu sur la vitesse de propagation de ces ondes. Puis, nous avons pu mettre en avant d'autres caractéristiques du son dues à son caractère ondulatoire, telles que la diffraction, les interférences et l'existence de modes propres. Nous retiendrons donc que le son rejoint la lumière, les rayons X et les ondes radio dans le gd groupe des ondes, et se comporte ainsi généralement de manière semblable.

Nous verrons dans le prochain TP qu'on peut utiliser ces propriétés du son pour sonder notre environnement et cela est très utilisé par les animaux tels que les chauves-souris, mais aussi par les sous-marins ou diverses applications médicales.

**Rmq :** Bon poly pour la théorie des ondes sonores :

[http://www.editions.polytechnique.fr/files/pdf/EXT\\_0840\\_2.pdf](http://www.editions.polytechnique.fr/files/pdf/EXT_0840_2.pdf)

## Commentaires généraux et autres expériences non présentées

### Commentaires généraux sur \*ce\* montage

- 2 sujets qu'il est avantageux d'aborder: la réflexion totale (duralumin; cloche à vide) et les ondes de cisaillement (n'existent que dans les solides).
- c'est périlleux de faire la corde vibrante dans ce montage; par ailleurs si on fait la corde on aura forcément des questions sur la caisse de résonance et ça devient vite compliqué si on n'y est pas préparé.
- autres expériences possibles: diapasons désaccordés, tube de Kundt (c'est moins ambigu que la corde vibrante sur le caractère acoustique des ondes parce qu'on peut vraiment parler de milieu matériel), diffraction acousto-optique...
- ébauche de plan proposée:
  - 1: propagation** (air ; eau en préparation seulement ; duralumin en incidence non normale pour voir le cisaillement)
  - 2: propriétés ondulatoires** (interférences à 2 sources et y discuter de l'enveloppe de diffraction)
  - 3: adaptation d'impédances** (expliquer la cloche à vide; une autre expérience?)

### Commentaires généraux sur \*les\* montages

- 3 choses intéressent le jury: si on sait manipuler, si on est dans le thème et si on sait faire les incertitudes
- il faut au moins montrer 2 courbes jolies et mettre à chaque fois un point en direct dessus (et ajuster après si ça s'y prête)
- il faut une manip "séduisante" en fin de montage (pas seulement au début!)
- c'est bien au moins une fois sur une valeur d'incertitude de discuter quel paramètre est à l'origine de l'incertitude (qui a la plus grande incertitude relative?)
- ne jamais faire des ajustements sur autre chose que des droites
- quand est-ce qu'on force un ajustement linéaire à passer par (0,0)? dans 2 cas: soit c'est directement un point de mesure, soit on est en train de tracer quelque chose du genre réponse vs excitation (et donc on s'attend qu'à excitation nulle la réponse soit nulle)
- quand on doit discuter de l'influence de la température, réfléchir s'il y a des facteurs de Boltzmann quelque part: un facteur de Boltzmann apparaît quand il y a compétition entre quelque chose et l'agitation thermique; c'est aussi toujours bien de mesurer la température en direct
- si possible, varier les traitements d'incertitudes: faire de la propagation des incertitudes et des mesures statistiques (dans le cas de protocoles difficilement contrôlables: mesurer plusieurs fois la même chose, en moyennage à l'oscillo par exemple... mais bien maîtriser les questions de coefficients de Student)

### Incertainces (voir cours de JFR quand on l'aura eu)

2 possibilités pour la propagation d'incertitudes:

- **dérivée logarithmique**: la plus pessimiste car on envisage que les incertitudes soient systématiquement du mauvais côté: donne des barres d'incertitudes souvent bcp trop grandes
- **formule où on somme les carrés des (dérivées partielles)\*(incertitudes)**: valable en supposant que les erreurs sont réparties aléatoirement sur une gaussienne autour de la moyenne (hypothèse de tirages aléatoires et indépendants)

### Expérience 9: Modes propres : tube de Kundt (-> MP29 ; MP31)

Propagation guidée dans un tube. On y déplace en micro à l'intérieur et il donne la position des nœuds et des ventres de pression. Visualisation de l'onde stationnaire. Permet aussi de mesurer la vitesse du son, et cela à différentes températures si le tube peut être entouré d'un bain thermostaté.

Réf : BUP n°742 (notice 55)

### Expérience 10 : Battements avec deux diapasons (-> MP25 ; MP31?)

On utilise un système fortement monochromatique. On remarque cette forte sélectivité en fréquence lorsque l'on positionne 2 diapasons côte à côte, que l'on en frappe un puis qu'on l'arrête en le touchant. On entend alors le second qui a été mis en vibration par le contact. Cela ne marche plus si l'on a désaccordé ce dernier.

On regarde alors la superposition des ondes créées par deux tels systèmes, et on observe (dans le cas où l'un des deux est désaccordé) de beaux battements à l'oscilloscope.

**Mesure directe :** On relève la période de l'enveloppe, qui nous donne la différence des fréquences.

$$\Delta f_{mes} = \dots 1/0,317 = 3,15 \text{ Hz}$$

**Mesure par FFT avec Igor :** On dissocie les 2 pics dus aux deux diapasons et on relève leurs fréquences.

$$f_1 = \dots 439,715 \text{ Hz} \quad f_2 = \dots 436,549 \text{ Hz}$$

$$\Delta f_{FFT} = \dots 3,166 \text{ Hz (marche bien ! ne pas oublier les incertitudes)}$$

**Autre idée de partie possible (retirée par manque de tps) :**

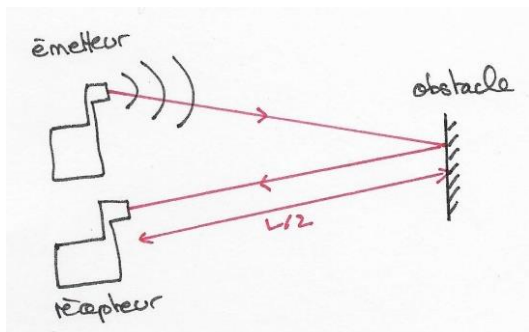
### Comment l'environnement peut modifier les propriétés des ondes sonores.

Si l'on met des obstacles sur le chemin des ondes sonores, celles-ci vont voir leurs propriétés intrinsèques être modifiées. D'un autre point de vue, on peut remonter aux caractéristiques de ces obstacles à l'aide de ces ondes !

Les propriétés fondamentales d'une onde sont sa direction de propagation, sa fréquence et son amplitude. On va voir ce que leur modification peut donner comme information sur les obstacles rencontrés.

### Expérience 11 : Mesure de distance : principe du radar (-> MP26 ; MP29)

On reprend le matériel de l'expérience 3. Cette fois on dispose le récepteur et l'émetteur côte à côte et l'on ajoute une surface réfléchissante (en ultrason).



On soustrait le retard ainsi obtenu à celui mesuré lorsque le récepteur est collé à l'émetteur. La valeur ainsi obtenue correspond au temps de parcours de l'onde ultrasonore selon le trajet [sortie de l'émetteur – écran – entrée du récepteur], que l'on peut directement mesurer avec une règle.

$$\Delta T = \dots 760 - 80 = 680 \mu\text{s} \quad L_{\text{trajet\_mes}}/2 = \dots 10,5 \text{ cm}$$

On réutilise la valeur de la vitesse du son précédemment obtenue pour en déduire la distance de l'écran (attention triangle !) et la comparer à celle mesurée à la règle.

$$L_{\text{trajet\_radar}}/2 = \Delta T \cdot c/2 = \dots 12,0 \text{ cm}$$

**Rmq :** mettre l'écran plus loin pour avoir une meilleure précision !

**Bilan :** on fait rebondir l'onde sur une surface réfléchissante qui change sa direction de propagation en son opposé, permettant de la retrouver au même endroit qq instants plus tard. Le décalage temporel ainsi mesuré nous donne accès à la distance de l'objet.

## Expérience 12 : Mesure de vitesse : autre fonctionnalité du radar

L'idée est de reproduire le fonctionnement des radars de voiture et de mettre l'écran réfléchissant en mvt afin de pouvoir envoyer une onde d'un endroit et de la réceptionner à ce même endroit. Mais si l'on veut utiliser le banc Doppler alimenté par un moteur, on doit mettre l'émetteur en mouvement face au récepteur. Cela s'apparente alors plus à la perception d'une sirène d'ambulance passant près de nous (elle émet en mouvement, nous recevons).

Si la source émet à  $f_0$ , le récepteur recevra une fréquence  $f = f_0 \frac{c}{c-v_r}$  où  $v_r$  est la vitesse relative de la source par rapport au récepteur. C'est l'effet Doppler.

Si  $v_r$  est positif : la fqce apparente semble plus élevée, le son est plus aigu (l'ambulance se rapproche).

Si  $v_r$  est négatif : la fqce apparente semble plus basse, le son est plus grave (l'ambulance s'éloigne).

$v_{r_{mes}} = \dots$

$f = \dots$

$f_0 = \dots$

$v_{r_{calc}} = \dots$

**Rmq** : nous n'avons pas trouvé l'alim du moteur...

**Rmq** : deux idées pour mesurer  $f$ , soit faire un stop sur l'oscillo, soit utiliser un multiplieur et un filtre RC (cf résumé 2015 -> fqce des battements  $\Delta f = f_2 - f_1$ )...

**Rmq** : on peut tracer une courbe pour plusieurs valeurs de  $v_r$ . En théorie  $|\Delta f| = f_1 \cdot v_r / c$

**Rmq** : autre expé plus qualitative : visualisation en direct de la FFT (penser à l'utilité du repliement) d'un diapason auquel on imprime un mouvement de va-et-vient avec la main. Le pic ne reste pas à 440Hz mais varie autour de cette valeur.

**Réf** : notice sur l'intranet (Ensemble pour effet Doppler [ENSC 489])

**Réf** : avec multiplieur : BUP n°804

**Bilan** : L'émission d'une onde sonore par un objet en mouvement modifie sa fréquence à la vue des observateurs immobiles. Le décalage de fréquence ainsi créé est lié à la valeur de la vitesse de l'émetteur.

## Expérience 13 : Détermination de masse volumique du duralumin avec l'étude des interfaces

(-> MP29)

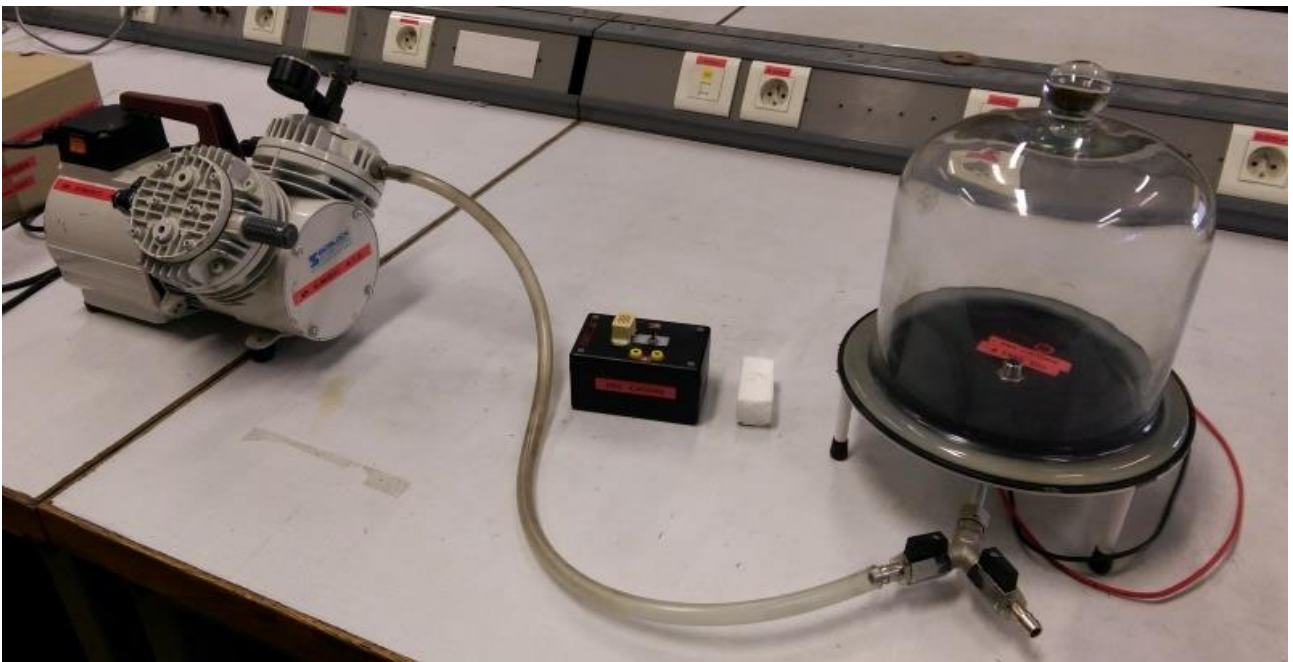
Cf résumé fait en 2015

(ça n'a pas trop marché pour nous en préparation)

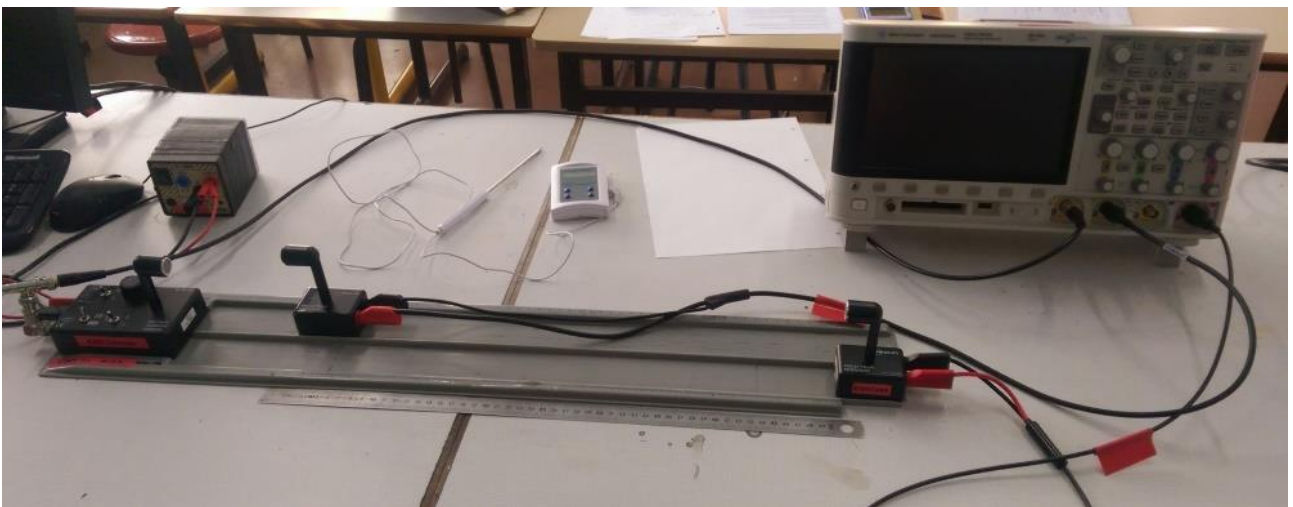
## Photos des montages



Expérience 1



Expérience 2

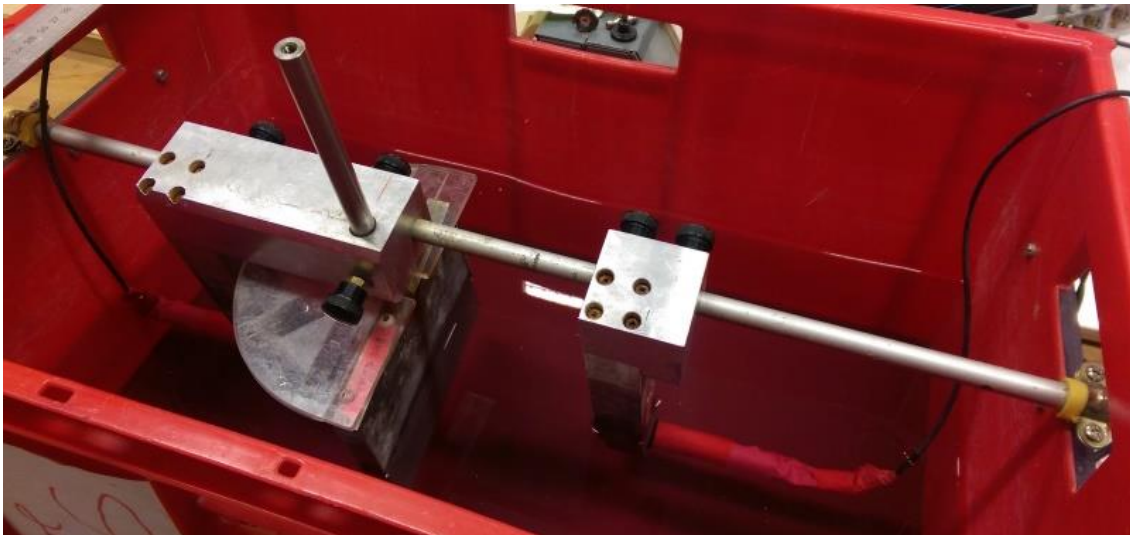


Expérience 3

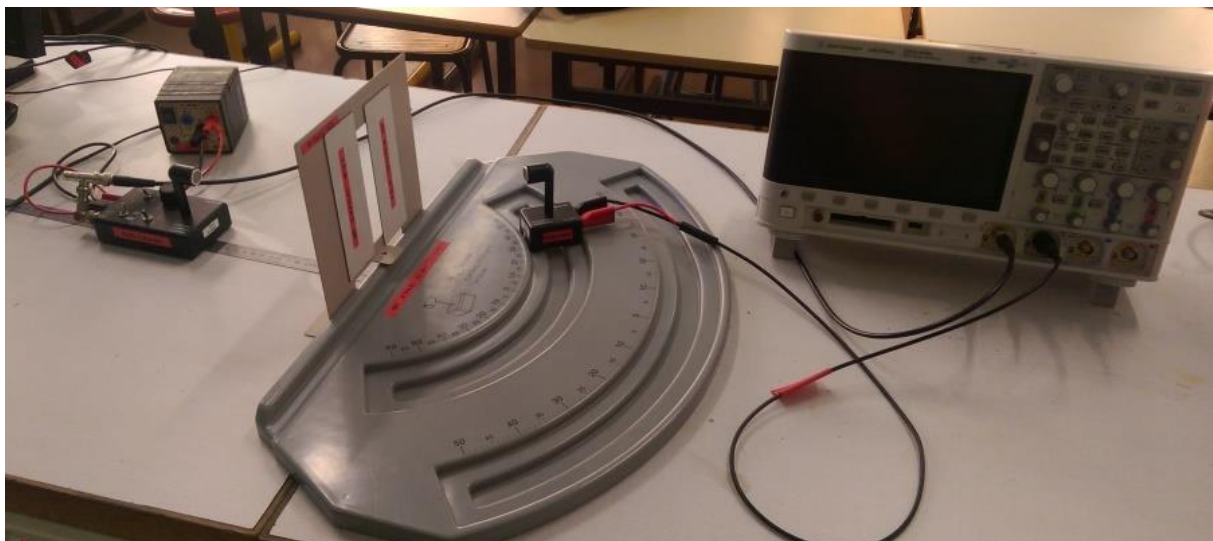




**Expériences 4 et 5**

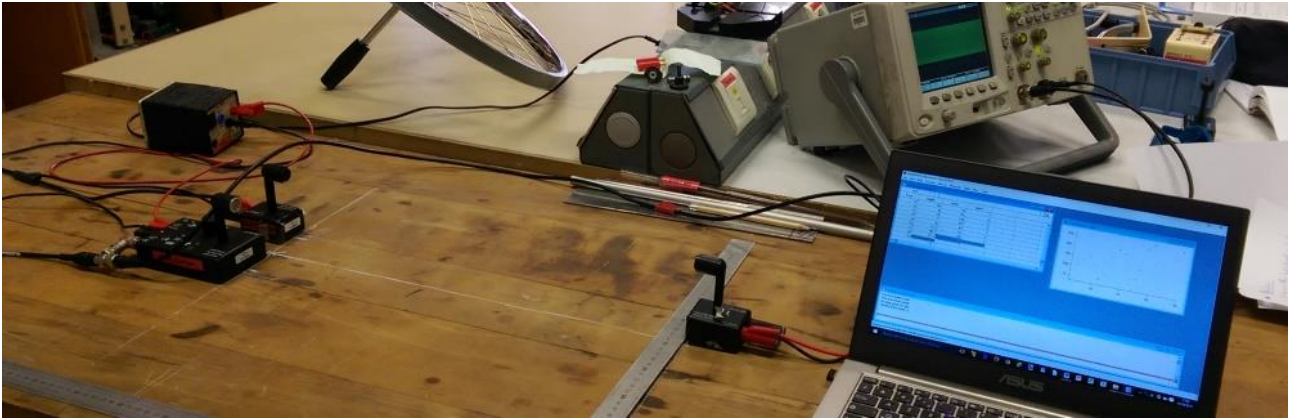


**Expériences 4 et 5**



**Expérience 6**





**Expérience 7**



**Expérience 8**

N'hésitez pas si vous avez des questions sur le montage,  
Audrey Chatain : [audrey.chatain31@gmail.com](mailto:audrey.chatain31@gmail.com)  
Arthur Bouchut : [arthurbouchut@live.fr](mailto:arthurbouchut@live.fr)

## Rapports de jury

### **2015 et 2014 : M30**

Les phénomènes d'interférences, 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. En tout état de cause, 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.

### **2013 – 2011 – 2010 (pas très variés !): M33**

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.

### **2012 : M33**

Le jury attend des notions plus variées que les seules mesures de célérité. On peut penser :

- aux phénomènes de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes...
- aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler...
- aux nombreuses applications : instruments de musique, sonar, échographie...

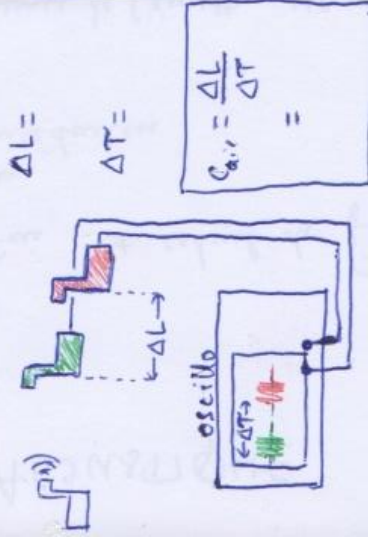
# N30 ACOUSTIQUE

Intro : son = vibration qui se propage dans le milieu matériel

- diaphragme arroseur
- sonnette et cloche à vide

I La vitesse du son ds ≠ milieu

A. Dans un gaz : l'air



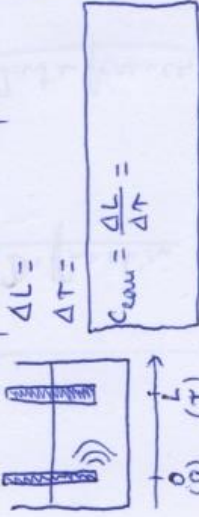
théorie  $T = c_{air} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

Caché par la curve



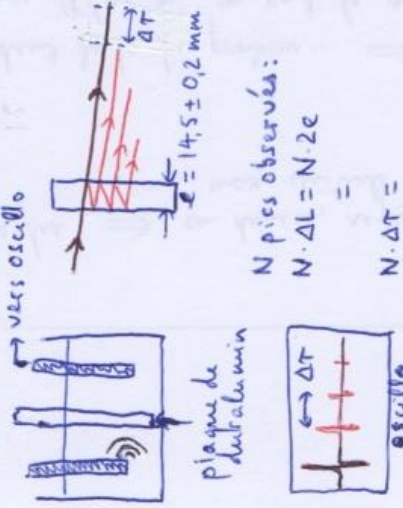
B. Dans un liquide : l'eau

→ 2 positions du récepteur



$c_{eau} (25^\circ C) = 1497 \text{ m.s}^{-1}$

C. Dans un solide : le duralumin



N pics observés :

$N \cdot \Delta L = N \cdot 2e$

$N \cdot \Delta T =$

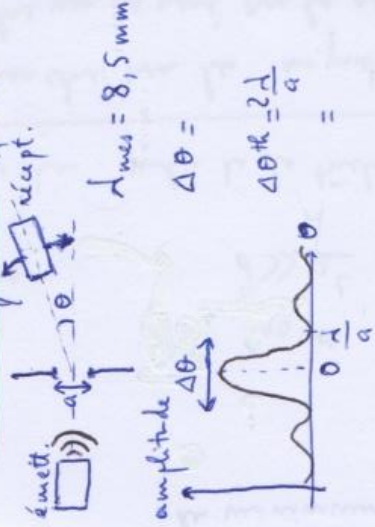
$c_{dur} = \frac{N \Delta L}{N \Delta T} =$

$c_{dur} = 6195 \text{ m.s}^{-1}$

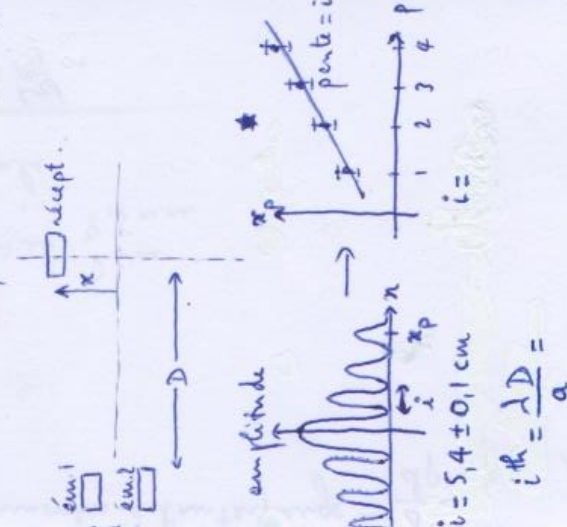
⚠ l'épaisseur de la plaque de duralumin est plus facile que ce que donne la notice

II Autre propriété du son caractéristique des ondes

A. La diffraction (fente)

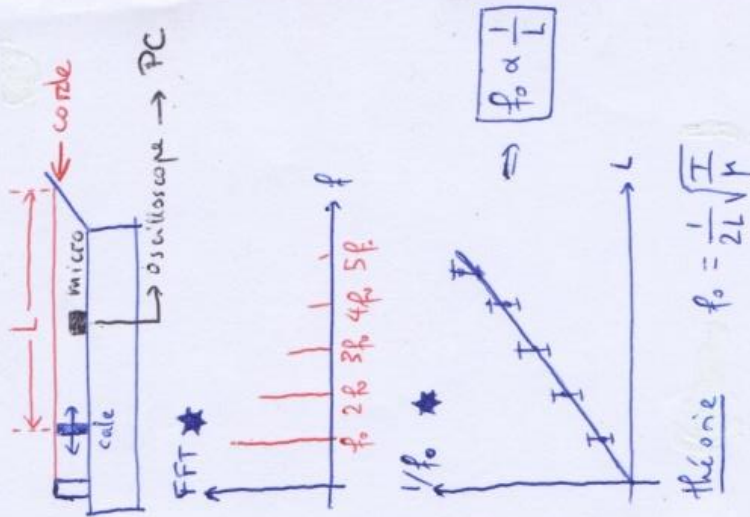


B. Les interférences (2 sources cohérentes)



$i_{th} = \frac{\lambda D}{a}$

C. On du stationnaires (milieu fixe)



\* à tracer en direct