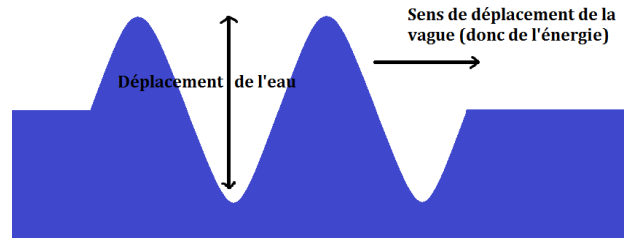


## P5 Ondes acoustiques ; acoustique musicale

On appelle **onde mécanique** le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu élastique, sans transport de matière mais avec transport d'énergie.

L'exemple le plus facile à visualiser est celui d'une vague. Il s'agit d'une **onde transversale** car la perturbation se propage horizontalement alors que l'eau se déplace verticalement.



Dans ce montage, nous étudierons les ondes acoustiques (ou ondes sonores). Dans ce cas ce sont les molécules d'air dont on considère le mouvement.

### 1. LE SON EST UNE ONDE

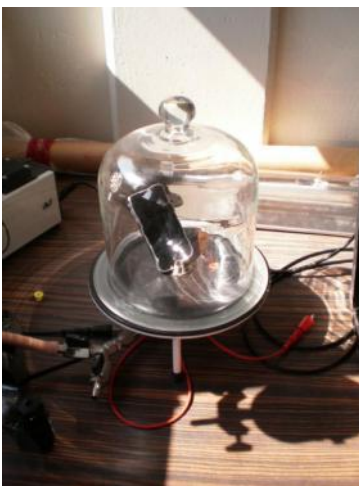
#### 1.1. OBSERVATION

Afin de mettre en évidence le phénomène de déplacement d'air lors de la propagation d'une onde sonore, on place une bougie allumée devant un haut-parleur alimenté par un GBF. Lorsque l'on est dans les plus basses fréquences (environ 60Hz) et avec une amplitude notable, on constate que le haut-parleur vibre et que la flamme devient vacillante bien qu'elle ne soit pas en contact avec l'appareil.



Contrairement à l'exemple de la vague, les ondes acoustiques sont des **ondes longitudinales**. Le déplacement de l'air se fait dans le même sens que se propage l'onde.

#### 1.2. NECESSITE D'UN MILIEU DE PROPAGATION



Si le son est une onde mécanique, cela signifie qu'il ne peut se propager que dans un milieu élastique.

Lorsque l'on place une source de musique sous une cloche à vide et que l'on fait le vide à l'intérieur, on constate que le son qui ne nous parvient plus. Lorsqu'on laisse rentrer progressivement l'air à l'intérieur, le son nous revient graduellement.

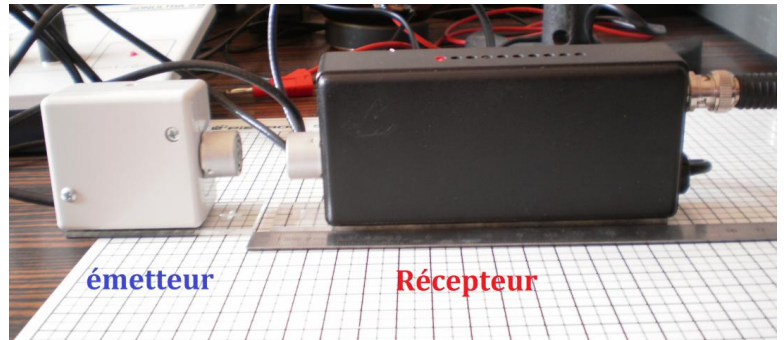
L'air est un milieu élastique : comme tout gaz, il occupe la totalité du volume qui lui est disponible et exerce une pression sur son entourage. Il permet donc la propagation du son. Dans le vide, cela n'est plus possible ce qui explique que l'on ne puisse plus entendre l'appareil.

Cette expérience contredit tous les films de science fiction dans lesquels un vaisseau spatial explose et est entendu. Dans la « réalité » les combats spatiaux sont silencieux ...

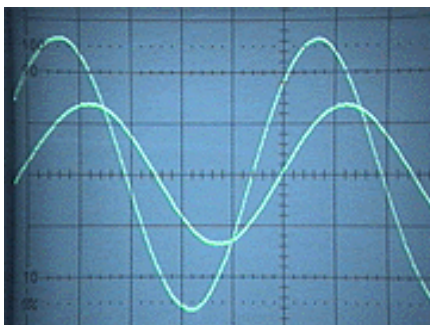
**NB :** Il est important de noter que dans cette expérience, l'impossibilité pour le son de se propager n'est pas réellement due au vide. Les pompes que l'on utilise ne sont pas suffisamment efficaces pour créer un vide total sous la cloche mais abaissent tangiblement la pression. La différence de pression entre les milieux extérieur et intérieur conduit à un phénomène de réflexion total de l'onde sonore.

### 1.3. MESURE DE LA VITESSE D'UNE ONDE ACOUSTIQUE DANS L'AIR

Maintenant que l'on a prouvé que le son est une onde, on est en mesure de l'étudier et de réaliser des mesures telles que sa **célérité**. Pour se faire, on utilise un émetteur et un récepteur à ultrasons.

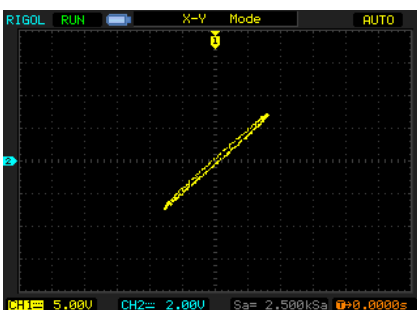


Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquences élevées les rendant inaudibles (ici l'émetteur est paramétré sur 40 kHz). Les ultrasons se propagent dans une direction unique. Il est impératif de bien aligner émetteur et récepteur. Une règle permet de suivre l'écart les séparant.

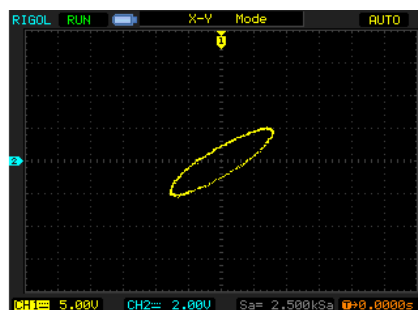


Si on affiche les deux signaux (celui émis et celui reçu) sur un oscilloscope, on observe un déphasage dû à la distance séparant les deux dispositifs. Ceci va permettre de mesurer la célérité des ondes sonores.

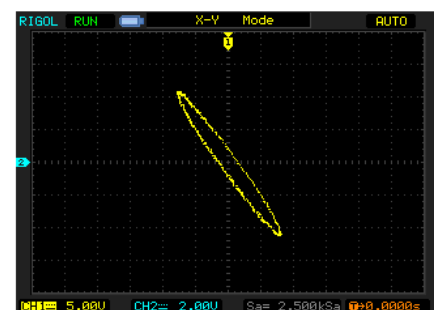
Une étude du déphasage est plus aisée lorsque l'on passe en mode XY sur l'oscilloscope. On commence par positionner le récepteur (l'émetteur étant fixé) de telle façon à ce que les signaux soient en phase. Ensuite éloigne le récepteur jusqu'à les retrouver à nouveau en phase. La distance parcourue correspond à la longueur d'onde  $\lambda$  du signal.



$$\varphi = 0$$



$$\varphi > 0$$



$$\varphi = \pi$$

Afin de minimiser les erreurs de mesure, on mesure plusieurs longueurs  $\lambda$  :

$$8 \lambda = 7,1 \text{cm} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = 8,88 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

donc  $c = \lambda \cdot f$  nous donne **c=355m/s**

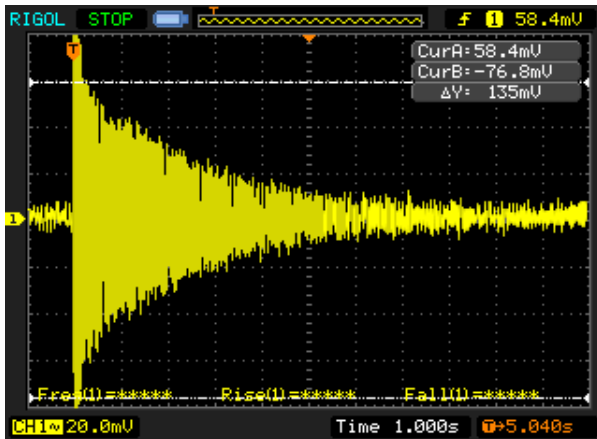
Cette valeur est proche de la valeur tabulée de 341m/s dans les conditions standards d'expérimentation.

## 2. ONDE ACOUSTIQUE ET MUSIQUE

### 2.1. CARACTERISATION D'UN SON

Si nos oreilles nous permettent de « capter » les ondes sonores qui nous parviennent, c'est notre cerveau qui réalise le plus gros du travail en les interprétant. La caractérisation d'un son que nous entendons est liée à des paramètres physiques que l'on peut retrouver et mesurer sur un oscilloscope relié à un microphone.

#### a) Intensité

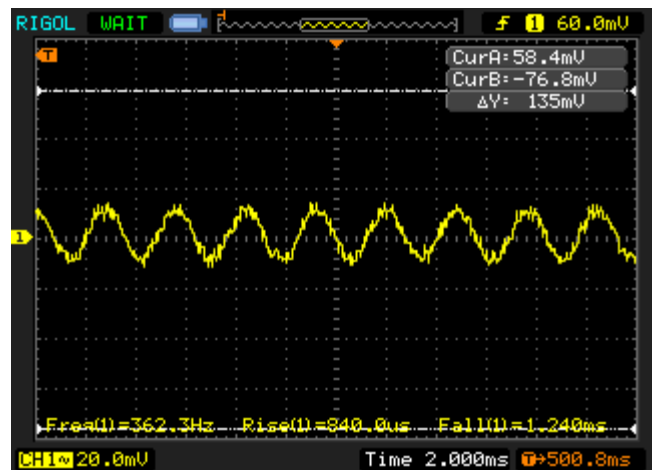
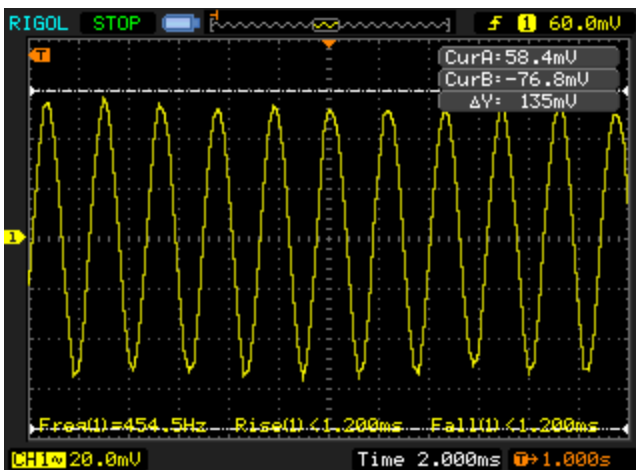


On enregistre le son d'un diapason après l'avoir tapé avec le maillet. A l'oreille, on s'aperçoit que l'intensité du son diminue progressivement. Ceci correspond à une diminution de l'amplitude des oscillations sur l'oscilloscope.

Ainsi ce que notre oreille perçoit comme le volume sonore correspond en réalité à **l'amplitude** du déplacement d'air accompagnant la propagation de l'onde acoustique.

#### b) Hauteur

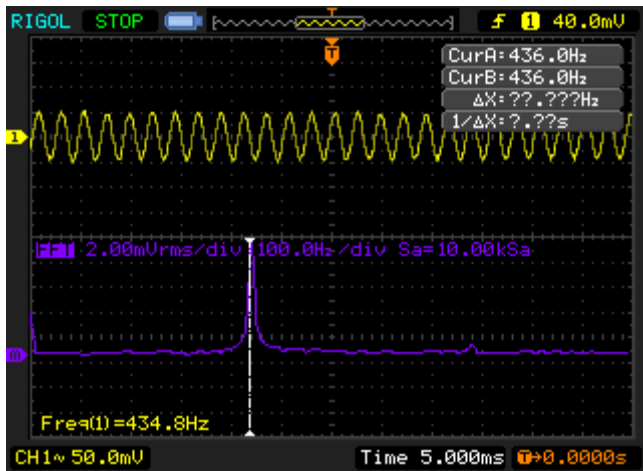
A présent, on réitère l'enregistrement en étudiant un intervalle de temps plus court. On observe (oscillogramme de gauche) des oscillations sinusoïdales à une fréquence de 454Hz. Lorsque l'on rajoute des masselottes sur le diapason, on constate que le son entendu est plus grave. A l'oscilloscope (oscillogramme de droite), on observe cette fois des oscillations à une fréquence inférieure.



La hauteur d'un son, que nous qualifions de **grave** ou d'**aigu**, est en fait liée à la **fréquence** des oscillations de l'onde acoustique correspondante.

### c) Timbre

Notre cerveau est capable de distinguer une même note produite par différents instruments. Comme on l'a vu précédemment, une note correspond en fait à une fréquence. On commence par enregistrer sur l'oscilloscope (en utilisant le mode single) le son produit par un diapason qui sert à donner le « la ».

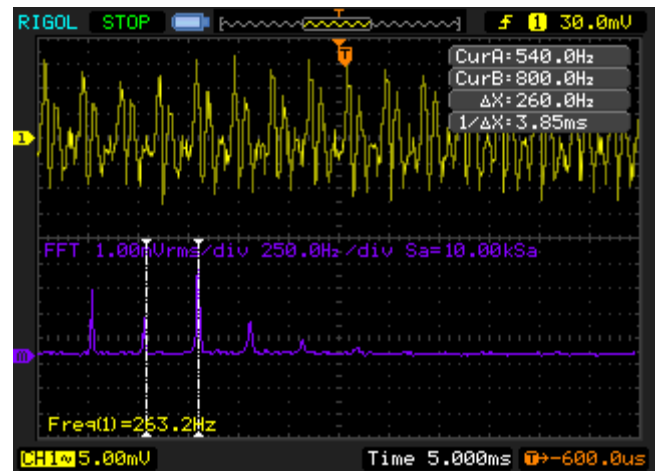


à gauche : enregistrement du diapason

On constate que le signal récupéré est une onde sinusoïdale. Sa fréquence est donnée par l'appareil et est de 435Hz. L'oscilloscope permet aussi de réaliser une transformée de Fourier. Dans le cas du diapason, on trouve un pic unique à la fréquence mesurée.

à droite : enregistrement de voix (tentative d'avoir un son pur)

En réalité une note donnée par un instrument de musique, même si elle est parfaitement juste, n'est quasiment jamais une onde sinusoïdale. On choisit donc d'étudier l'instrument le plus commun dont on puisse disposer : notre voix. On réitère la même opération avec l'oscilloscope.



Cette fois-ci la fréquence indiquée par l'oscilloscope est de 263Hz. Pourtant le signal n'est pas sinusoïdal et la transformée de Fourier indique plusieurs pic. Le premier est effectivement à 263Hz. Il s'agit du **mode fondamental**. Si on regarde, avec les curseurs, l'écart entre les pics suivants, on constate que cet écart est lui aussi égal à environ 260Hz. Les fréquences de ces modes sont donc proportionnelles à celle du fondamental. Ce sont les **modes harmoniques**.

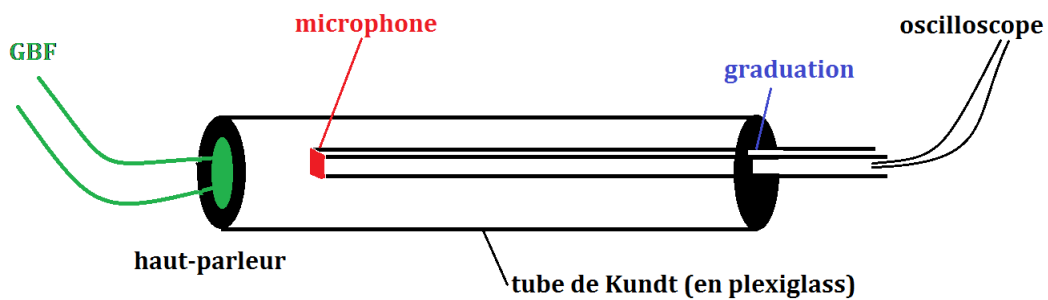
Ainsi ce qui caractérise une note est la fréquence de son fondamental. Par contre, ce qui permet de différencier deux instruments jouant la même note sont ses harmoniques et leurs amplitudes. Il s'agit du **timbre** du son. Plus celui-ci comporte d'harmonique et plus il est qualifié de **riche**.

Le cerveau humain est capable de réaliser une opération similaire à une transformée de Fourier. Cela lui permet de différencier les instruments de musique, le timbre de chaque instrument étant unique.

## 2.2. ONDES STATIONNAIRE DANS UN TUBE DE KUNDT

Le fonctionnement de la plupart des instruments de musique repose sur des phénomènes de résonance et d'ondes stationnaires. On s'intéresse aux instruments à vent. Ils comportent des cavités de résonance dans lesquelles les ondes acoustiques se réfléchissent pour former des **ondes stationnaires**.

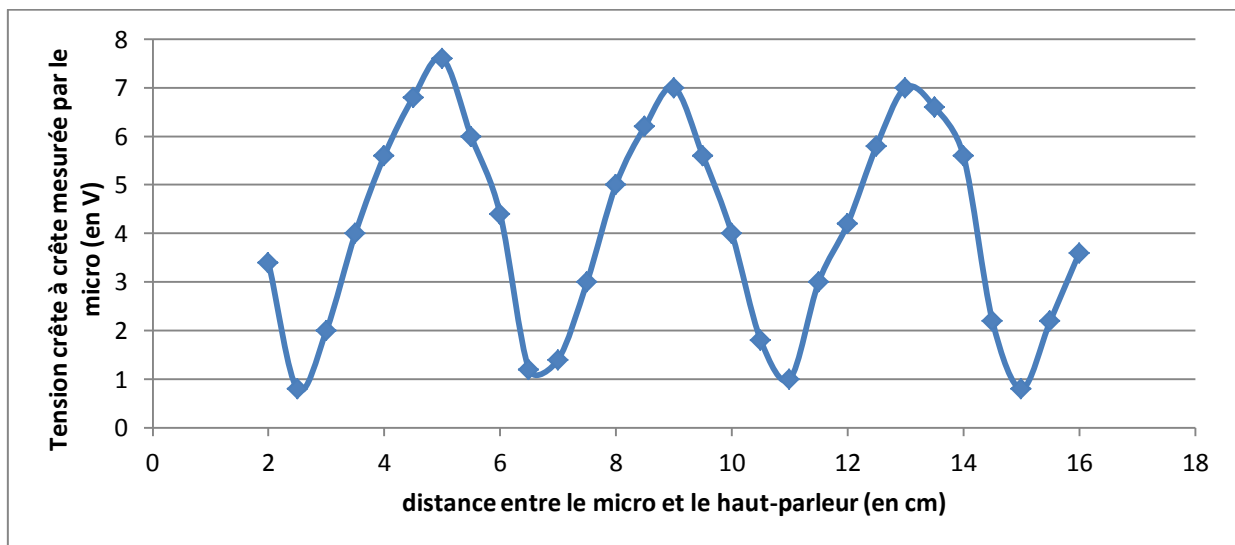
Quand on souffle dans un instrument, l'onde sonore résultante n'a rien d'oscillations harmoniques. C'est le phénomène de **résonance** qui « sélectionne » la note désirée.



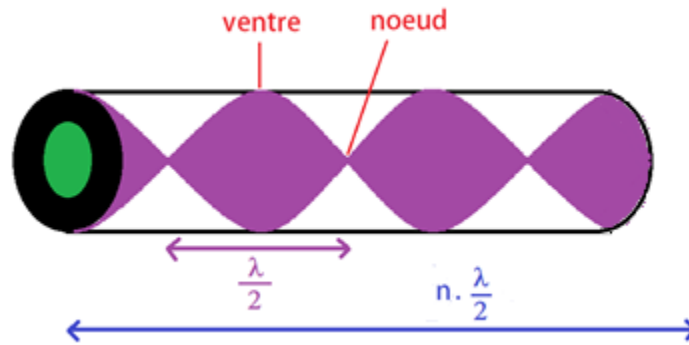
On travaille ici avec un **tube de Kundt**. Ce dispositif est composé d'un tube de plexiglass bouché à ses deux extrémités par un haut parleur et une surface permettant de faire glisser un microphone à l'intérieur. Le haut-parleur est alimenté par un GBF.

On constate, en déplaçant le microphone, qu'il existe des maxima et des minima de vibration dans le tube. On commence par placer le micro sur un maximum et on fait varier progressivement la fréquence du GBF. On cherche une fréquence pour laquelle l'amplitude est maximale : on se place donc à la **résonance**.

On obtient la résonance à  $f = 4,3 \text{ kHz}$ . On déplace alors le microphone dans le tube en mesurant à l'oscilloscope l'amplitude crête à crête de la tension délivrée par celui-ci (proportionnelle à l'amplitude des vibrations). On fait ça sur une quinzaine de centimètres (le tube mesurant 50cm).



On reconnaît là l'indication de l'existence d'une onde acoustique stationnaire dans le tube. Les minima mesurés sont les **nœuds** de vibration et les maxima les **ventres**. A l'extrémité du tube où se trouve le haut-parleur, on a un ventre de vibration et à l'autre on en a un second. En effet, la paroi de vibrant pas, c'est là que la pression est maximale.



Pour qu'une onde stationnaire existe dans le tube (de longueur  $d$ ), il faut donc que la longueur d'onde de l'onde acoustique générée par le haut-parleur réponde à l'équation  $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ .

On mesure un écart moyen entre deux nœuds de 4cm. Ceci correspond donc à une longueur d'onde de 8cm. On retrouve alors la fréquence  $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{341}{0,08} = 4,26 \text{ kHz}$ . Cette valeur est effectivement proche de celle sélectionnée sur le GBF.

De plus on constate qu'en prenant  $n = 12$ , l'équation (ci-dessus en bleu), on retrouve une longueur  $d$  effectivement de 50cm. Ceci confirme la théorie d'une onde stationnaire acoustique.

### CONCLUSION

Nous avons retrouvé plusieurs propriétés particulières aux ondes pour les ondes acoustiques au cours de ce montage. Il faut savoir que notre oreille est limitée dans leur perception. Nous sommes capables de percevoir des sons dans le plage de fréquence allant de 20Hz à 20kHz.

Ce n'est pas pour cela que les autres domaines de fréquences doivent être négligés. Bien que nous ne les entendons pas, les ultrasons sont utilisés dans de nombreux domaines comme l'échographie ou les sonar. Leur principale propriété est leur directionnalité. Alors que les ondes sonores audibles se propagent dans toutes les directions (comme lorsqu'on laisse tomber un caillou dans un plan d'eau), les ultrasons se propagent principalement dans une direction.