

# TP de Physique n°2 : Mesure de la vitesse du son dans l'air

## Objectifs :

- Etablir et mettre en œuvre un protocole expérimental afin de mesurer la vitesse du son dans l'air, à l'aide d'émetteurs et de récepteurs d'ultrasons.
- Apprendre à utiliser un oscilloscope.
- Réfléchir aux sources d'erreurs expérimentales liées à votre protocole, puis réaliser une étude statistique grâce à l'ensemble des valeurs trouvées dans la classe, afin d'évaluer l'incertitude-type de mesure. Vous présenterez votre résultat sous forme d'un intervalle avec un niveau de confiance de 95%.
- Rédiger un rapport clair et précis, où vous expliquerez votre protocole à l'aide de schémas et où vous présenterez vos résultats en insistant notamment sur le calcul de l'incertitude.

## Matériel à disposition :

- Un oscilloscope numérique.
- Un émetteur d'ultrasons sinusoïdaux, qui doit être alimenté par une tension continue de 15V. Un bouton sur l'émetteur permet de régler la fréquence des ultrasons émis autour de 40 kHz. Sur le boîtier de l'émetteur, on peut choisir soit une émission continue d'ultrasons, soit une émission par salves.
- Deux récepteurs d'ultrasons identiques avec une sortie BNC permettant de les relier à l'oscilloscope.
- Un rail double muni d'un emplacement pour l'émetteur et de deux glissières graduées pour les récepteurs.

## **Prise en main de l'oscilloscope :**

L'oscilloscope est un voltmètre qui permet d'obtenir la courbe d'une tension au cours du temps. Il est donc extrêmement utile pour l'étude des tensions variables.

La plupart des oscilloscopes ont deux voies (voie 1 et voie 2), c'est à dire que l'on peut observer simultanément deux tensions au cours du temps.

Il existe deux types d'oscilloscopes, les oscilloscopes analogiques et les oscilloscopes numériques : les oscilloscopes analogiques sont beaucoup plus gros à cause de la présence d'un « tube cathodique » (comme sur les anciennes TV ou écrans d'ordinateurs). Idéalement, il faudrait être capable d'utiliser les deux types d'oscilloscopes (car vous ne savez pas lequel vous devrez utiliser lors des concours). Heureusement, les réglages sont à peu près identiques sur les deux.

On donne ci-dessous un aperçu des réglages les plus importants : observez les différents boutons sur l'oscilloscope en même temps que vous lisez :

### **1) Chacune des deux voies possède 3 modes de fonctionnement :**

- **GND** signifie « ground », autrement dit « masse » (ou « terre ») : dans ce mode, le signal est mis à zéro et la « trace » (i.e. la courbe qui apparaît à l'écran) sera donc horizontale : cela peut être utile pour remettre le zéro au centre de l'écran (à l'aide du bouton « position »).
- **le mode « DC » est le mode à utiliser par défaut** : il permet de visualiser le signal « tel quel », sans aucune modification
- le mode « **AC** » est utile si on ne s'intéresse qu'à la composante variable du signal : en effet, dans ce mode, la valeur moyenne du signal est mise à zéro.

**2) Sur chacune des deux voies, on peut régler la « sensibilité verticale », c'est à dire le nombre de Volts par division (une « division » correspond à un carreau sur l'écran) : cette molette permet de modifier l'échelle verticale, ce qui revient en quelque sorte à « zoomer » plus ou moins sur la courbe.**

On peut choisir un calibre différent sur chaque voie : ainsi, si la tension en voie 1 est plus faible que celle en voie 2, on pourra utiliser par exemple 0,5 V/div en voie 1 et 2 V/div en voie 2.

**3)** Réglage de la base de temps : ce bouton permet de régler la « sensibilité horizontale », autrement dit, le nombre de secondes (ou plutôt millisecondes ou microsecondes) par division. À nouveau, cela revient à « zoomer » plus ou moins, mais cette fois-ci sur l'axe horizontal.

Notez que contrairement aux réglages verticaux, il n'y a ici qu'un seul bouton, ce qui signifie que vous ne pouvez pas régler indépendamment les échelles de temps des deux voies, vous devez utiliser le même temps/division en voie 1 et en voie 2.

**4)** Réglage du « déclenchement » ou de la « synchronisation » (« trigger » en anglais) : ce groupe de commandes est utile lorsque la trace sur l'oscilloscope n'est pas stable : par exemple, si elle n'arrête pas de bouger, ou bien si plusieurs traces se superposent et rendent l'image illisible.

Si vous rencontrez ce problème :

- vérifiez d'abord que la « source » de la synchronisation est correcte : si votre signal est sur la voie 1 mais que la source de synchronisation est la voie 2, cela va poser problème. Vous pouvez aussi choisir une source « externe » mais dans ce cas là, il faut envoyer un signal de synchronisation sur la prise « EXT » en bas de l'oscilloscope

- ensuite, essayez de jouer sur le « niveau » de déclenchement (bouton « level » en anglais) : tournez ce bouton jusqu'à ce que la trace se stabilise.

**5)** Boutons de mesures :

Les oscilloscopes numériques modernes sont capables de faire des mesures automatiques sur un signal. Ainsi, vous pouvez choisir de mesurer, entre autres :

- la fréquence  $f$  ou la période  $T$  du signal
- la tension crête à crête ( $V_{pp}$ ) ou la tension moyenne ( $V_{moy}$ )
- le déphasage entre deux signaux

Si le signal est trop irrégulier, il est possible que les mesures automatiques ne fonctionnent pas : vous devrez alors utiliser les « curseurs » (cursors) : par exemple, pour mesurer une période, placez deux curseurs verticaux au niveau de deux pics successifs du signal et la différence de temps entre les deux curseurs apparaîtra à l'écran.

**6)** Signalons enfin la présence, sur la plupart des oscilloscopes modernes, d'un bouton « AUTOSET », où l'oscilloscope essaye de déterminer lui-même les meilleurs réglages en fonction du signal appliqué. Ce bouton est pratique mais vous essaieriez de ne pas en abuser et de ne l'utiliser que quand vous n'arrivez vraiment pas à trouver les bons réglages vous mêmes. De plus, ce bouton a ses limites : à nouveau, si le signal est trop faible ou trop irrégulier, l'oscilloscope n'arrivera pas à « s'auto-régler ».

## **I Utilisation de l'émetteur d'ultrasons en mode « émission continue » :**

Alimentez l'émetteur avec une tension continue de 15 V et utilisez-le en mode « continu » (il émet les ultrasons de manière continue, et pas par salves). Placez un récepteur en face de l'émetteur et reliez-le à la voie 1 de l'oscilloscope.

Réglez la fréquence de l'émetteur pour que l'amplitude du signal reçu soit la plus grande possible (il y a une fréquence bien précise pour laquelle émetteur et récepteur entrent en résonance, et le signal devient alors très intense, ce qui est pratique pour travailler).

Mesurez à l'oscilloscope la fréquence  $f$  du signal (vous donnerez sa valeur avec un nombre de chiffres significatifs correspondant à l'incertitude estimée de mesure). Cette fréquence correspond-elle bien au domaine des ultrasons ?

Etablissez puis mettez en œuvre un protocole permettant de mesurer de façon précise la longueur d'onde des ultrasons, puis déduisez-en la valeur de la célérité  $c$  du son dans l'air.

## **II Détermination de l'incertitude sur la valeur de $c$ :**

**1)** Selon vous, quelles sont les sources d'erreurs dans la mesure que vous avez faite ? Faites une évaluation de type B de l'incertitude-type sur la valeur de  $c$  que vous avez mesurée.

### **Rappel : évaluation de type B de l'incertitude**

- Dans un premier temps, vous pouvez estimer avec un peu de « bon sens » les erreurs que vous avez commises sur les différentes valeurs que vous avez mesurées. Par exemple, si vous avez mesuré une distance à la règle, l'incertitude est sans doute environ de +/- 1 mm (si la règle est graduée au mm). Si vous avez mesuré une durée avec un chronomètre, l'incertitude est certainement de +/- 1 s...

- Ensuite, il faut « propager » ces incertitudes sur la valeur finale que vous avez calculée à partir des valeurs mesurées.

Par exemple, pour déterminer une vitesse  $v$ , vous avez mesuré une longueur  $d$  (avec une incertitude  $u(d)$ ) et une durée  $T$  (avec une incertitude  $u(T)$ ). Vous cherchez ensuite l'incertitude sur la valeur de  $v = d/T$ . Pour les produits et les quotients, la règle est simple : il faut ajouter les incertitudes relatives.

On aura donc :

$$\frac{u(v)}{|v|} = \frac{u(d)}{|d|} + \frac{u(T)}{|T|}$$

ou plutôt (car la formule précédente surestime légèrement l'incertitude finale) :

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(T)}{T}\right)^2}$$

**2)** En considérant le caractère aléatoire des erreurs commises, et sachant que l'on dispose de 12 mesures de  $c$  indépendantes (les mesures des 12 binômes du groupe de TD), on peut gagner de la précision en effectuant un traitement statistique sur l'ensemble des mesures.

La meilleure estimation de  $c$  sera alors la valeur moyenne des 12 valeurs obtenues par les différents binômes (on peut éventuellement exclure une valeur si elle est manifestement trop éloignée des autres).

On pourra alors faire une évaluation de type A de l'incertitude, c'est à dire une évaluation statistique.

#### **Rappel : évaluation de type A de l'incertitude**

Quand on dispose d'un ensemble de  $N$  mesures  $x_i$  d'une grandeur  $x$  (par exemple ici les 12 valeurs différentes de la vitesse du son mesurées par les 12 binômes), la meilleure estimation possible de  $x$  est la valeur moyenne :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Ensuite, pour déterminer l'incertitude associée à la valeur de  $x$ , on calcule d'abord l'écart type expérimental (qui traduit la dispersion entre les différentes mesures) :

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

L'incertitude-type sur la valeur de  $x$  est alors donnée par l'écart-type de la moyenne :

$$u(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{N}}$$

Cette formule est assez logique : elle traduit le fait que plus le nombre de mesures indépendantes de  $x$  est grand, plus la valeur moyenne se rapproche de la valeur vraie, et donc plus l'incertitude diminue. On comprend bien que si on répète 100 fois une mesure et que l'on fait la moyenne, on aura au final une valeur plus fiable que si on n'avait répété que 3 fois l'expérience.

Des calculs de statistiques plus poussés montrent alors que la valeur vraie  $a$  :

- 68% de chance de se trouver dans l'intervalle  $[\bar{x} - u(x), \bar{x} + u(x)]$

- 95% de chance de se trouver dans l'intervalle  $[\bar{x} - 2u(x), \bar{x} + 2u(x)]$

On présentera donc le résultat final sous la forme d'un « intervalle de confiance », par exemple :

$$x = \bar{x} \pm u(x) \text{ à } 68\%, \text{ ou bien :}$$

$$x = \bar{x} \pm 2u(x) \text{ à } 95\%$$

Faites ce traitement statistique sur l'ensemble des 12 valeurs de  $c$  de la classe et donner le résultat final sous forme d'un intervalle de confiance à 95%.

3) Sur Wikipédia, on trouve le tableau suivant (les valeurs sont donnée à une pression de 1 atm) :

Temperature $T$ in $^{\circ}\text{C}$	Speed of sound $c$ in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Density of air $\rho$ in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
+35	351.88	1.1455
+30	349.02	1.1644
+25	346.13	1.1839
+20	343.21	1.2041
+15	340.27	1.2250

ainsi que la formule :  $c = (331,3 + 0,606\theta) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (où  $\theta$  est la température en  $^{\circ}\text{C}$ ).

Vos résultats expérimentaux sont-ils en accord avec ces valeurs ?

### **III Mesure directe de la célérité en utilisant le mode « salves » de l'émetteur :**

Placez l'émetteur en mode « salves » et observez les signaux reçus par les récepteurs. Il est fort possible que, dans ce mode, la synchronisation de l'oscilloscope soit difficile. Dans ce cas, reliez la sortie BNC de l'émetteur à l'entrée TRIG.EXT.IN de l'oscilloscope et choisissez comme source de la synchronisation de l'oscilloscope le signal externe.

Une fois que les réglages sont corrects, décrivez et interprétez ce que vous observez à l'oscilloscope. En utilisant ce signal, établir un protocole de mesure directe de la célérité  $c$  du son et l'appliquer.

### **IV (S'il vous reste du temps) Mise en évidence d'interférences ultrasonores :**

En utilisant deux émetteurs et un récepteur d'ultrasons, réalisez un dispositif expérimental permettant de mettre en évidence le phénomène d'interférences avec des ondes sonores et mettez-le en œuvre. Décrivez et interprétez vos observations.