



## Thème I. Ondes et signaux (ondes)

# TP n°17 Célérité des ondes ultrasonores

Vendredi 21 mars 2025

📌 La totalité de l'énoncé doit être lue avant la séance de TP, et les questions précédées d'une étoile \* doivent être faites.

### Compétences exigibles du programme :

- ✓ Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire
- ✓ Mesurer une longueur d'onde acoustique à l'aide d'un support gradué et d'un oscilloscope bicourbe.
- ✓ Mesure d'une fréquence directement à l'oscilloscope.
- ✓ Décalage temporel/Déphasage à l'aide d'un oscilloscope numérique : Reconnaître une avance et un retard. Repérer précisément le passage par un déphasage de  $0$  ou  $\pi$  en mode XY.
- ✓ Capacité numérique : simuler, à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, un processus aléatoire permettant de caractériser la variabilité de la valeur d'une grandeur composée.
- ✓ Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé.

### Matériel :

- 1 émetteur ultrason et 2 récepteurs ultrasons ; leur alimentation continue +12V ;
- oscilloscope ;
- règle ; pâte à fixe ; scotch.

### 📌 Objectifs du TP

- Mesurer la célérité du son dans l'air d'une onde ultrasonore de deux façons : par mesure de la longueur d'onde et de la période ; puis par mesure du temps de vol.
- Utiliser la mesure de la célérité du son dans l'air pour mesurer la température de l'air.
- Déterminer les incertitudes en utilisant la simulation Monte-Carlo, et l'étude statistique.

## I Description des émetteur/récepteur

Les émetteurs d'ultrasons, alimentés par une alimentation continue dont il faut régler la valeur à 12 V peuvent émettre des ondes ultra-sonores dans deux modes :

- En **mode salve** : l'émetteur génère des **salves de durée très brève**.
- En **mode continu** : l'émetteur génère une **onde acoustique sinusoïdale** de fréquence  $f$  bien déterminée, caractéristique du matériau piézoélectrique qui constitue l'émetteur (et le récepteur).

Les émetteurs et récepteurs d'ultrasons sont constitués d'un cristal de quartz qui est un matériau piézoélectrique :

- si on applique une tension aux bornes du quartz, il subit alors une déformation mécanique (il se dilate ou se contracte). Cette déformation est proportionnelle à la tension appliquée. Cette propriété est à la base du fonctionnement d'un **émetteur d'ultrasons** car en lui appliquant une tension alternative à ses bornes, on induit une vibration du quartz et la couche d'air au contact du quartz est alors perturbée, il s'ensuit la propagation d'une onde de compression-dilatation dans les couches d'air successives c'est-à-dire l'apparition d'une onde acoustique.
- si le quartz subit une déformation alors une tension apparaît à ses bornes. Cette tension est proportionnelle à la déformation. Cette propriété est la base du fonctionnement d'un **récepteur d'ultrasons** car lorsqu'une onde acoustique perturbe la couche d'air au contact du quartz, celui-ci subit une déformation (compression-dilatation) et on observe alors une tension à ses bornes.

## II Mesure de la célérité avec une onde sinusoïdale

### Utilisation des émetteurs

- ☞ L'émetteur est alimenté par une **tension continue +12 V** et fonctionne en **mode continu**, il émet alors une onde ultrasonore sinusoïdale.

### II.1 Propagation et déphasage

Au niveau d'un récepteur situé à une abscisse  $x_0$  donnée, l'onde ultrasonore reçue s'écrit :

$$p(x_0, t) = p_0 \cos(2\pi ft + \varphi(x_0))$$

où

- $\varphi(x_0) = -\frac{2\pi f}{c}x_0 = -\frac{2\pi}{\lambda}x_0$  est la phase à l'origine des temps qui dépend de la position du récepteur ;
- $f$  la fréquence,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $c$  la célérité de l'onde ultrasonore, avec  $c = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$ .

Le récepteur convertit l'onde ultrasonore reçue en une tension électrique observée à l'oscilloscope qui s'exprime selon

$$u(t) = U_m \cos(2\pi ft + \varphi(x_0))$$

### Questions préliminaires

- On place deux récepteurs, sur le même axe ( $Ox$ ), respectivement aux abscisses  $x_1$  et  $x_2$ .
- Q1. \* Exprimer les tensions  $u_1$  et  $u_2$  observées à l'oscilloscope aux bornes des deux récepteurs.
  - Q2. \* Exprimer le déphasage entre  $u_1$  et  $u_2$  en fonction de  $\lambda$ ,  $x_1$  et  $x_2$ .
  - Q3. \* À quelle condition liant  $x_1$ ,  $x_2$  et  $\lambda$  les tensions  $u_1$  et  $u_2$  sont-elles en phase ? en opposition de phase ?  
*On pourra introduire des entiers pour traduire ces conditions.*
  - Q4. \* Comment repérer précisément des tensions en phase ?

### II.2 Mesure de la célérité

#### Protocole

-  Celui-ci sera évalué.
- Q5. \* Rédiger un **protocole détaillé** permettant de mesurer la célérité du son dans l'air.

#### Expérience

- ☞ Après avoir fait valider le protocole par l'enseignante, réaliser l'expérience proposée.


#### Mesures

- Q6. Noter vos observations.
- Q7. Noter vos mesures et en déduire la valeur de  $c$ .

## II.3 Estimation de l'incertitude par Monte-Carlo

Pour estimer l'incertitude-type sur la valeur de  $c$ , il faut déterminer sa **variabilité**, qui est elle-même une conséquence de la **variabilité de  $\lambda$  et  $T$** .

### Principe de la simulation Monte-Carlo


Q8. \*  Cette question sera évaluée.

Rappeler le principe de la simulation Monte-Carlo et de son utilisation pour évaluer les incertitudes expérimentales sur une mesure unique. *Je n'attends pas de ligne de code, ni de python, je veux des phrases en français qui explique ce que c'est, ce qu'il faut faire, et ce qu'on en fait.*

### Évaluation des incertitudes expérimentales

➤ Évaluer les intervalles des positions du 2<sup>e</sup> récepteur et de la période, au sein desquels vous pouvez être raisonnablement certain.e que la position du récepteur lors du passage en phase se situe.

### Mise en œuvre de la simulation Monte-Carlo

➤  Mettre en œuvre informatiquement la méthode de Monte-Carlo pour déterminer un très très grand nombre de valeurs de célérité et en tracer son histogramme.

➤  Calculer la valeur moyenne et l'écart-type de ces  $N$  valeurs de  $c$ .

Q9. Conclure avec le résultat de la mesure, **écrit dans les règles de l'art**.

## III Célérité du son dans l'air et température

### III.1 Valeur de référence de la vitesse du son dans l'air

La célérité du son dans l'air est une grandeur tabulée depuis plus d'un siècle, c'est-à-dire que de nombreux expérimentateurs ont déjà réalisé dans le passé de nombreuses fois l'expérience de façon très précise, et la mise en commun de ces résultats a permis de dresser une table de valeurs de célérité en fonction de différents paramètres.

La valeur de référence de la célérité du son dans l'air est donnée pour la température  $\theta$  en °C, par :

$$c_{\text{ref}} = 331,5 \sqrt{\frac{\theta + 273,15}{273,15}}$$

### III.2 Mesure de la température par mesure de la vitesse du son

#### Détermination de la température de l'air

Q10. Que pensez-vous de la mesure de la qualité de la célérité du son effectuée précédemment ?

Q11. Comment en déduire la température de l'air à l'endroit et au moment de la mesure ?

Q12. Conclure sur le résultat de la mesure de la température (avec une incertitude!).

### III.3 Conclusion

#### Expérience

➤ Mesurer la température au thermomètre électronique.

#### Comparaison des deux mesures

Q13. Évaluer l'incertitude-type sur cette mesure de température à l'aide de la notice constructeur.

Q14. Déterminer l'écart normalisé entre les deux mesures de la célérité de température. Conclure.