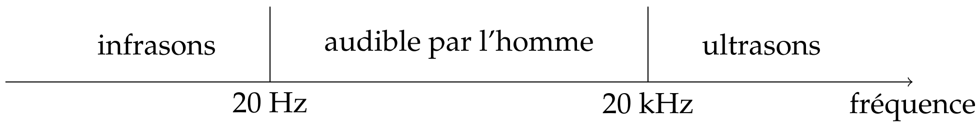
1 Généralités sur les ondes acoustiques

Q 1. Dans une onde transversale, la direction du déplacement local des points du milieu est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (ex : onde le long d'une corde). Dans une onde longitudinale, la direction du déplacement local des points du milieu est la même que la direction de propagation de l'onde (ex : onde de compression dans un ressort).

Les ondes acoustiques sont des ondes longitudinales (compression des couches d'air, comme dans un ressort).

Q 2. L'homme perçoit les sons entre 20 Hz et 20 kHz environ.



2 Mesure de la vitesse du son

2.1 Mesure d'échos ultrasonores

Q 3.

Q 4. L'onde émise par l'émetteur est réfléchie sur l'écran une première fois. L'impulsion a alors parcouru la distance $2D$. Un premier écho est alors reçu par le récepteur.

Le premier écho est ensuite réfléchi sur la surface du récepteur, puis de nouveau sur l'écran, ce qui produit un deuxième écho. L'impulsion a alors parcouru la distance $4D$. Le second écho est ensuite réfléchi et ainsi de suite.

En théorie, on devrait voir un nombre infini de maxima mais chaque réflexion atténue l'impulsion. Ici, on distingue nettement 3 à 4 échos.

Q 5. La durée Δt séparant le début de deux échos consécutifs correspond à la durée nécessaire pour faire un aller-retour entre le récepteur et l'écran, soit $2D$. En mesurant cette durée, on peut ainsi remonter à la célérité $c = \frac{2D}{\Delta t}$ du son.

On pourra faire une moyenne de la valeur de Δt pour plus de précision, ou mesurer la durée séparant deux échos non consécutifs, pour la même raison.

On mesure Δt entre deux échos consécutifs. En considérant que trois échos sont visibles pour chacune des deux salves, on a ainsi 4 mesures de Δt, ce qui permet de faire une moyenne.

Salve	1	1	2	2
Echos considérés	1 et 2	2 et 3	1 et 2	2 et 3
Δt (ms)	1,05	0,95	1,10	0,90

$$c = \frac{2D}{\Delta t_{moyen}} = 320\ m.s^{-1}$$

Q 6. On peut par exemple calculer l'incertitude $u(c)$ associée à c en estimant l'impact des incertitudes sur D et sur Δt sur la valeur de c.

Considérons que seule la mesure de D est entâchée d'erreur. On a alors

$$u_D(c) = \frac{2u(D)}{\Delta t_{moyen}} = 2\ m.s^{-1}$$

Considérons maintenant que seule la mesure de Δt est entâchée d'erreur. En estimant $u(\Delta t) \simeq 0,1\ ms$ (une demi graduation de la figure). On a alors

$$u_{\Delta t}(c) = \frac{1}{2}\left(\frac{2D}{\Delta t_{moyen} - u(\Delta t)} - \frac{2D}{\Delta t_{moyen} + u(\Delta t)}\right) = 4.10\ m.s^{-1}$$

L'incertitude sur c est principalement due à l'erreur liée à la mesure de Δt. On ne prend donc en compte que cette erreur.

2.2 Utilisation d'une onde progressive sinusoïdale

Q 7. La période d'une onde progressive sinusoïdale est la plus petite durée nécessaire pour que l'onde se répète identique à elle-même. La longueur d'onde correspond à la distance séparant deux points en phase consécutifs de l'onde (période spatiale).

L'onde possède une période spatiale et une période temporelle, elle dépend sinusoïdalement du temps et de la position, on parle donc de double périodicité spatio-temporelle.

Q 8. En utilisant par exemple la courbe $EA0$, on peut mesurer $2,5T = 65\ \mu s$. On en déduit $T = 26\ \mu s$.

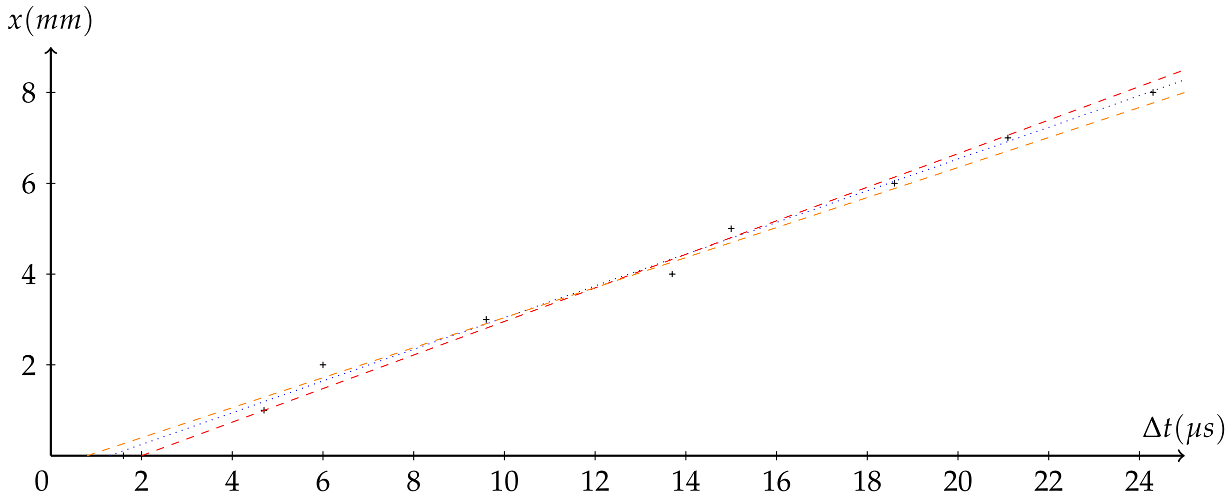
Q 9. La distance séparant l'émetteur et le récepteur introduit un déphasage lié à la propagation de l'onde, ce qui explique qu'on observe un décalage temporel entre les deux courbes.

Mesurons le décalage Δt qui sépare $t = 0\ \mu s$ et l'instant où $EA1$ passe l'axe des ordonnées en montant. Cette durée correspond, modulo un nombre entier de périodes, à la durée nécessaire pour que l'onde se propage de l'émetteur au récepteur.

On a $\Delta t = 13,7\ \mu s$.

La célérité du son est toujours définie par $c = \frac{x}{\Delta t + nT}$. On peut tracer la courbe $x = f(\Delta t)$. On obtiendra en théorie une droite de pente c car $x = c\Delta t + ncT$. Cette méthode ne nécessite pas la connaissance de n.

Q 10. On obtient la courbe suivante



On obtient bien une droite (en pointillés), d'équation $x = a\Delta t + b$ (avec $a = 349\ m.s^{-1}$ et $b = -0,45\ mm$). Par identification, la pente de la droite est la célérité du son donc $c = 349\ m.s^{-1}$.

Q 11. On peut estimer une incertitude sur c en déterminant les pentes extrêmes des droites donnant des résultats plausibles (en pointillés sur le graphe ci-dessus). On obtient $c_{max} = 370\ m.s^{-1}$ et $c_{min} = 331\ m.s^{-1}$. On peut estimer l'incertitude $u(c)$ sur c avec

$$u(c) = \frac{c_{max} - c_{min}}{2} = 2.10\ m.s^{-1}$$

2.3 Discussion des résultats

Q 12. La valeur théorique de la célérité du son ($c_{th} = 345\ m.s^{-1}$) se trouve dans l'intervalle de confiance pour la deuxième mesure mais pas pour la première.

La première mesure n'est donc pas cohérente mais la seconde oui.

Q 13. La précision de la mesure est meilleure (incertitude plus faible) avec la seconde méthode. Cette amélioration de la précision s'explique notamment par le fait d'avoir utilisé plus de points de mesures dans la seconde méthode. On limite ainsi les erreurs de mesure.

On peut remarquer que les intervalles de confiance des deux méthodes se recoupent, elles sont donc cohérentes entre elles mais la première méthode n'est pas cohérente avec la théorie.

Ici, la seconde méthode est la plus précise et elle donne des résultats cohérents avec la théorie.

3 Expérience du tube de Kundt

3.1 Généralités théoriques sur la propagation d'une onde acoustique

Q 14. Le quotient RT/M a la dimension d'une énergie par une masse. Or une énergie s'exprime comme Masse.Longueur^2.Temps^{-2}. En appliquant la racine carré au résultat précédent, on obtient bien la dimension d'une vitesse.

3.2 Dispositif expérimental et analyse théorique

Q 15. En injectant la solution complexe proposée dans l'équation de d'Alembert et en simplifiant par

$e^{i\omega t}$, on obtient l'équation suivante

$$\frac{d^2\underline{V}(x)}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2}\underline{V}(x) = 0 \; .$$

En identifiant avec la forme proposée dans le sujet, on a $k^2 = \omega^2/c^2$.

La constante k est liée au vecteur d'onde $\vec{k}$, indiquant la direction de propagation de l'onde.

Q 16. L'équation précédente est analogue à l'équation d'un oscillateur harmonique sur la fonction $\underline{V}$, dépendant d'une coordonnée d'espace x. On a alors deux solutions indépendantes e^{-ikx} et e^{ikx} avec deux constantes $\underline{V}_{\mathrm{d}}$ et $\underline{V}_{\mathrm{g}}$ à déterminer par les conditions aux limites.

(*Pas la peine de justifier en écrivant l'équation caractéristique mais si des étudiants proposent cette justification, c'est très bien*).

Q 17. Pour déterminer les constantes $\underline{V}_{\mathrm{d}}$ et $\underline{V}_{\mathrm{g}}$, on utilise les conditions aux limites en $x = 0$ et $x = L$. Les deux constantes obéissent à deux équations

$$\begin{aligned} \underline{V}_{\mathrm{d}} + \underline{V}_{\mathrm{g}} &= v_{\mathrm{HP}} && (1) \\ \underline{V}_{\mathrm{d}} e^{-ikL} + \underline{V}_{\mathrm{g}} e^{ikL} &= 0 \; . && (2) \end{aligned}$$

L'onde de vitesse complexe s'écrit alors de la manière suivante

$$\underline{V}(x) = \frac{v_{\mathrm{HP}}}{\sin(kL)} \sin[k(L-x)] \; .$$

Q 18. Les dépendances spatiale et temporelle sont découplées dans l'expression de l'onde de vitesse $v(x,t)$. On a donc une onde stationnaire.

La conditions aux limites en $x = L$ impose un nœud de vitesse car la vitesse y vaut . En revanche en $x = 0$ il n'y a ni nœud ni ventre de vitesse puisque la condition aux limites impose $v(x = 0, t) = v_{\mathrm{HP}} \cos(\omega t)$.

Q 19. En utilisant les résultats obtenus pour l'onde de vitesse, on détermine l'expression de $\underline{P}(x)$ à partir de la formule donnée dans le sujet,

$$\underline{P}(x) = -i \frac{Z v_{\mathrm{HP}}}{\sin(kL)} \cos[k(L-x)] \; .$$

L'expression complète de la surpression acoustique est donc

$$p(x,t) = \frac{Z v_{\mathrm{HP}}}{\sin(kL)} \cos[k(L-x)] \sin(\omega t) \; .$$

Il s'agit également d'une onde stationnaire.

Q 20. Nous remarquons que pour une OPPH, se propageant dans le sens des x croissants, on a la relation $p(x,t) = Zv(x,t)$. On peut donc proposer l'analogie acoustique-électrique suivante $v \leftrightarrow i$ et $p \leftrightarrow u$, où i et u sont respectivement un courant et une tension.

Q 21. Pour les valeurs de k telles que kL est un multiple de π, on observe une amplitude maximale de l'onde de surpression car $\sin(kL) = 0$. Cette condition est vérifiée pour les fréquences suivantes

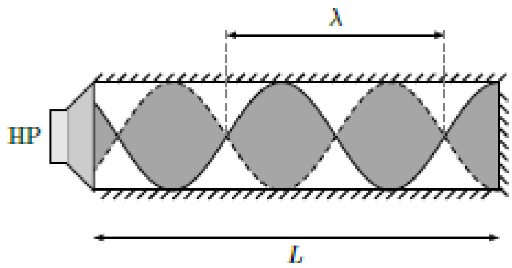
$$f_n = \frac{c}{2L} n \; ,$$

où n est entier.

Ce phénomène physique est appelé résonance.

Q 22. L'expérience en question est celle de la corde de Melde.

Q 23. On a le schéma suivant pour la surpression



Pour la vitesse, on aurait le même type de représentation graphique avec un nœud de vitesse en $x = L$. Aux nœuds de vitesse correspondent des ventres de pression, et aux ventres de vitesse correspondent des nœuds de pression.

Q 24. La distance entre deux nœuds consécutifs est $\lambda/2$.
Proposition de protocole:

- À l'aide d'un bain thermostaté, fixer une température de travail et attendre que l'air à l'intérieur du tube soit thermalisé. On vérifie cela à l'aide du capteur de température présent à l'extrémité de la canne, introduite à l'intérieur du tube.
- Alimenter le haut-parleur avec un GBF et choisir une fréquence de travail de manière à visualiser une résonance dans le tube via le microphone situé à l'extrémité de la canne.
- Relever la fréquence de résonance.
- Identifier les nœuds et mesurer la longueur d'onde.
- La célérité c est donnée par le produit λf. On obtient alors c à une température T donnée.
- Changer la consigne de température du bain thermique et répéter les opérations de mesure précédentes.