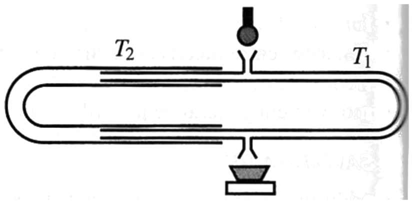
Ondes – chapitre 2

Correction du TD d'application

I Trombone de Kœnig

Le trombone de Kœnig est un dispositif de laboratoire permettant de faire interférer deux ondes sonores ayant suivi des chemins différents. Le haut-parleur, alimenté par un générateur de basses fréquences, émet un son de fréquence $f = (1500 \pm 1)\,\mathrm{Hz}$. On mesure le signal à la sortie avec un microphone branché sur un oscilloscope.



1) Exprimer en fonction de la distance d de coulissage de T_2 par rapport à T_1 le déphasage au niveau de la sortie entre l'onde sonore passée par T_2 et celle passée par T_1.

Réponse

$$\Delta\varphi_{2/1}(\mathrm{M}) = -k\Delta L_{2/1}(\mathrm{M}) = -k(\mathrm{OT}_2 - \mathrm{OT}_1)$$

Or, si on déplace T_2 par rapport à T_1 de d, l'onde passant dans T_2 doit parcourir $2d$ de plus, une fois pour chaque partie rectiligne ; ainsi

$$\boxed{\Delta\varphi_{2/1}(\mathrm{M}) = -2kd}$$

◇

2) En déplaçant la partie mobile T_2, on fait varier l'amplitude du signal observé. On observe que lorsqu'on déplace T_2 de $d = (11{,}5 \pm 0{,}2)\,\mathrm{cm}$, on passe d'un minimum d'amplitude à un autre. En déduire la valeur de la célérité du son dans l'air à 20 °C, température à laquelle l'expérience est faite.

Réponse

Cette observation traduit qu'un décalage de 11,5 cm fait passer d'une interférence destructive à celle qui la suit, donc augmente le déphasage de 2π ou la différence de marche de λ. On a donc

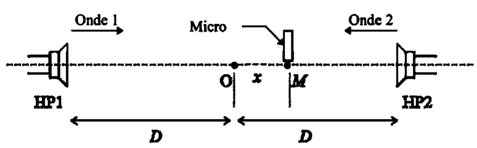
$$|\cancel{2}kd| = \cancel{2}\pi \Leftrightarrow \frac{2\cancel{\pi}}{\lambda}d = \cancel{\pi} \Leftrightarrow \boxed{2df = c} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} d = 11{,}5 \times 10^{-2}\,\mathrm{m} \\ f = 1500\,\mathrm{Hz} \end{cases}$$

$$\text{A.N. :} \quad \boxed{c = 345\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}}$$

◇

II Interférences de 2 ondes sonores frontales

Dans le montage ci-contre, les deux haut-parleurs, notés HP1 et HP2 et séparés de la distance $2D$, sont alimentés en parallèle par une même tension électrique : les deux sources sonores émettent donc des vibrations $p_1(t)$ et $p_2(t)$ de même pulsation ω, même phase à l'origine φ_0 et même amplitude P_0. Les deux ondes arrivent au point M d'abscisse x avec des phases différentes et donc interfèrent.



On considère que les ondes sonores se propagent sans déformation ni atténuation à la célérité c constante.

1) Exprimer le déphasage $\Delta\varphi$ au point M entre les ondes issues de HP1 et HP2.

Réponse

À partir de HP1, repéré par le point H_1, les ondes parcourent la distance $D+x$ pour arriver au micro. À partir de HP2, repéré par le point H_2, elles parcourent la distance $D-x$. Ainsi,

$$\begin{aligned}
\Delta\varphi_{1/2}(\mathrm{M}) &= -k\Delta L_{1/2}(\mathrm{M}) + \underbrace{\Delta\varphi_0(\mathrm{M})}_{=0 \text{ d'après l'énoncé}} \\
&= -k\left(|\mathrm{H_1M}| - |\mathrm{H_2M}|\right) \\
&= -k\left(\cancel{D} + x - (\cancel{D} - x)\right) \\
\Leftrightarrow \boxed{\Delta\varphi_{1/2}(\mathrm{M}) = -2kx}
\end{aligned}$$

◇

2) En déduire l'amplitude de l'onde sonore résultante au point M.

Réponse

Les ondes $p_1(\mathrm{M},t)$ et $p_2(\mathrm{M},t)$ étant de même amplitude P_0, on a que l'onde somme $p(\mathrm{M},t) = p_1(\mathrm{M},t) + p_2(\mathrm{M},t)$ est d'amplitude $P(\mathrm{M})$ telle que, après démonstration (cf. cours),

$$P(\mathrm{M}) = 2P_0\cos\left(\frac{\Delta\varphi(\mathrm{M})}{2}\right) \Leftrightarrow \boxed{P = 2P_0\cos(-kx)}$$

◇

3) Déterminer les positions x_n pour lesquelles il y a interférences constructives au point M. En déduire la distance d entre deux maximums successifs d'intensité sonore.

Réponse

On a interférences constructives si l'amplitude est maximale, ici pour $\cos(-kx_n) = \pm 1 \Leftrightarrow -kx_n = n\pi$. Or,

$$-kx_n = n\pi \Leftrightarrow -\frac{2\cancel{\pi}}{\lambda}x_n = n\cancel{\pi} \Leftrightarrow \boxed{x_n = n\frac{\lambda}{2}}$$

Les maximums se trouvent aux positions x_n. La distance entre deux maximums est donc

$$\boxed{d = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}}$$

◇

4) Expérimentalement on trouve $d = 21{,}2\,\mathrm{cm}$ pour une fréquence sonore $f = 800\,\mathrm{Hz}$. En déduire la valeur de la célérité du son dans l'air pour cette expérience.

Réponse

Étant donné que $\lambda = cT = c/f$, on trouve

$$\frac{\lambda}{2} = d \Leftrightarrow \frac{c}{2f} = d \Leftrightarrow \boxed{c = 2df} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} d = 21{,}2\times10^{-2}\,\mathrm{m} \\ f = 800\,\mathrm{Hz} \end{cases}$$

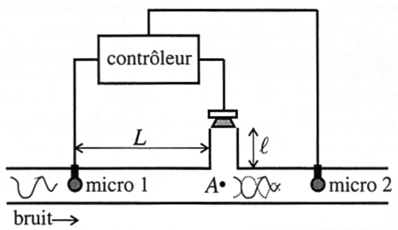
$$\text{A.N. :} \quad \boxed{c = 339\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}}$$

C'est la valeur usuelle de célérité du son dans l'air à 20 °C.

◇

III Contrôle actif du bruit en conduite

On s'intéresse à un système conçu pour l'élimination d'un bruit indésirable transporté par une conduite. Le bruit est détecté par un premier micro dont le signal est reçu par un contrôleur électronique. Le contrôleur, qui est le centre du système, envoie sur un haut-parleur la tension adéquate pour générer une onde de signal exactement opposé à celui du bruit de manière à ce que l'onde résultante au point A (voir figure ci-contre) et au-delà de A soit nulle.



1) Exprimer, en fonction de L, l et de la célérité c du son, le temps disponible pour le calcul du signal envoyé sur le haut-parleur.

Réponse

Entre l'instant où le signal est détecté par le micro 1 et l'instant où ce signal passe en A, il s'écoule un temps égal à L/c. Pendant ce temps, il faut que le contrôleur calcule et produise le signal qu'il envoie dans le haut-parleur, et que ce signal se propage jusqu'à A, ce qui prend le temps ℓ/c. Ainsi, le temps disponible pour le calcul est

$$\boxed{\frac{L-\ell}{c}}$$

◇

2) On suppose le bruit sinusoïdal de pulsation ω. On appelle φ_1 la phase initiale du signal détecté par le micro 1 et φ_{HP} la phase initiale du signal émis par le haut-parleur. Exprimer, en fonction de ω, c, L et l, la valeur que doit avoir $\Delta\varphi = \varphi_{\text{HP}} - \varphi_1$

Réponse

La phase du signal de bruit arrivant en A est

$$\varphi_{\text{bruit}} = \varphi_1 - kL$$

La phase du signal de correction arrivant en A est

$$\varphi_{\text{corr}} = \varphi_{\text{HP}} - k\ell$$

Pour avoir interférences destructives, il faut que $\varphi_{\text{corr}} = \varphi_{\text{bruit}} + \pi$, c'est-à-dire

$$\boxed{\Delta\varphi_{c/b}(\text{A}) = \varphi_{\text{HP}} - \varphi_1 = \frac{\omega}{c}(\ell - L) + \pi}$$

◇

3) L'onde émise par le haut-parleur se propage dans la conduite dans les deux sens à partir de A. Expliquer l'utilité du micro 2.

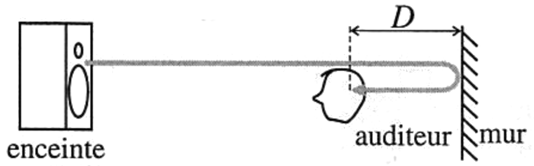
Réponse

Le micro 1 capte un signal qui est la superposition du bruit et du signal émis par le haut-parleur se propageant à partir de A vers l'amont. Le micro 2 donne un contrôle du résultat et permet la détermination du meilleur signal de correction.

◇

IV Interférences et écoute musicale

La qualité de l'écoute musicale que l'on obtient avec une chaîne hi-fi dépend de la manière dont les enceintes sont disposées par rapport à l'auditaire. On dit qu'il faut absolument éviter la configuration représentée sur la figure : présence d'un mur à une « petite » distance D derrière l'auditaire.



Comme représenté sur la figure, l'onde issue de l'enceinte se réfléchit sur le mur. On note $c = 342\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ la célérité du son dans l'air.

1) Exprimer le décalage temporel τ qui existe entre les deux ondes arrivant dans l'oreille de l'auditaire : l'onde arrivant directement et l'onde réfléchie.

En déduire le déphasage $\Delta\varphi$ de ces deux ondes supposées sinusoïdales de fréquence f. La réflexion sur le mur ne s'accompagne d'aucun déphasage pour la vibration acoustique.

Réponse

Chaque onde parcourt la distance enceinte – auditaire directement, mais l'onde réfléchie parcourt en plus $2D$ entre l'auditaire et le mur. Ainsi, la célérité étant notée c, on a

$$\tau = \frac{2D}{c}$$

La source étant similaire pour les deux ondes, la phase à l'origine des temps est la même ; de plus il est indiqué que la réflexion sur le mur n'implique pas de déphasage supplémentaire, donc le déphasage n'est dû qu'à la propagation. Ainsi, l'onde réfléchie a un déphasage

$$\Delta\varphi_{r/i}(\mathrm{M}) = \omega\tau = \frac{4\pi f D}{c}$$

◇

2) Expliquer pourquoi il y a risque d'atténuation de l'amplitude de l'onde pour certaines fréquences. Exprimer ces fréquences en fonction d'un entier n. Quelle condition devrait vérifier D pour qu'aucune de ces fréquences ne soit dans le domaine audible. Est-elle réalisable ?

Réponse

Il peut y avoir une atténuation de l'amplitude si les deux ondes sont en opposition de phase, et donc que les interférences sont destructives, c'est-à-dire

$$\Delta\varphi_{r/i}(\mathrm{M}) = (2n+1)\pi \Leftrightarrow \frac{4\cancel{\pi} f_n D}{c} = (2n+1)\cancel{\pi} \Leftrightarrow \boxed{f_n = (2n+1)\frac{c}{4D}}$$

avec $n \in \mathbb{N}$. Étant donné que le domaine audible s'étant de $[20\ ;\ 20\times10^3]\,\mathrm{Hz}$, il faudrait que la plus petite fréquence d'atténuation, celle avec $n = 0$, soit au-delà de $20\,\mathrm{kHz}$; autrement dit on cherche

$$f_{\max} < \frac{c}{4D} \Leftrightarrow \boxed{D < \frac{c}{4f_{\max}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c = 342\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}} \\ f_{\max} = 20\,\mathrm{kHz} \end{cases}$$

$$\text{A.N. :} \quad \boxed{D < 4{,}3\,\mathrm{mm}}$$

On est donc sûrx de ne pas avoir d'atténuation dans l'audible si on colle notre oreille au mur… ce qui est réalisable, mais correspond presque à ne pas avoir d'interférences du tout.

◇

3) Expliquer qualitativement pourquoi on évite l'effet nuisible en éloignant l'auditaire du mur.

Réponse

Quand D augmente, l'onde réfléchie par le mur finit par avoir une amplitude faible devant l'onde directe étant donné qu'une onde sphérique voit son amplitude diminuer avec le rayon : les interférences deviennent de plus en plus négligeables.

◇