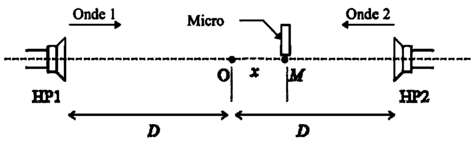
Ondes – chapitre 2

TD : Interférences à deux ondes

I Interférences de 2 ondes sonores frontales

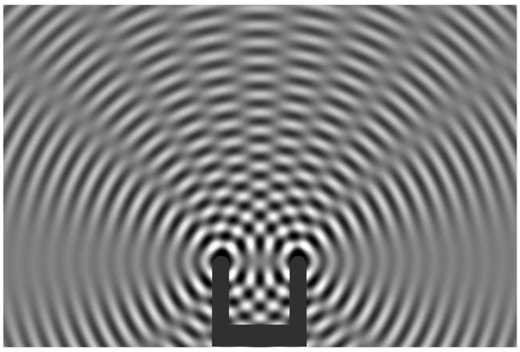
Dans le montage ci-contre, les deux haut-parleurs, notés HP1 et HP2 et séparés de la distance $2D$, sont alimentés en parallèle par une même tension électrique : les deux sources sonores émettent donc des vibrations p_1 et p_2 de même pulsation ω, même phase à l'origine φ_0 et même amplitude P_0. Les 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.

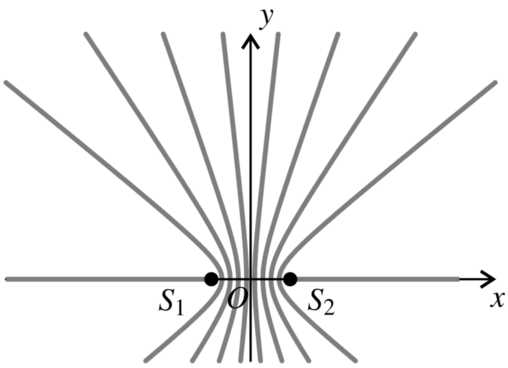


1) Exprimer le déphasage $\Delta\varphi$ au point M entre les ondes issues de HP1 et HP2.
2) En déduire l'amplitude de l'onde sonore résultante au point M.
3) Déterminer les positions x_n pour lesquelles il y a interférences constructives au point M.
4) Exprimer la distance d entre deux maximums successifs d'intensité sonore.
5) Expérimentalement on trouve $d = 21{,}2\,\text{cm}$ pour une fréquence sonore $f = 800\,\text{Hz}$. En déduire la valeur de la célérité du son dans l'air pour cette expérience.

II Interférences sur la cuve à ondes

La figure ci-dessous représente une cuve à ondes éclairée en éclairage stroboscopique. Deux pointes distantes de a frappent la surface de l'eau de manière synchrone (même fréquence et phase à l'origine), générant deux ondes qui interfèrent. La figure est claire là où la surface de l'eau est convexe et foncée là où elle est concave. L'amplitude d'oscillation est plus faible là où la figure est moins contrastée.

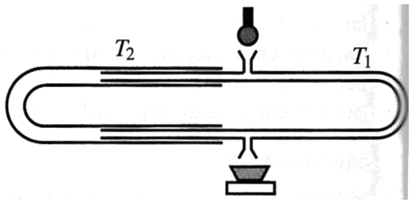




1) On suppose pour simplifier que des ondes sinusoïdales partent des deux points S_1 et S_2 où les pointes frappent la surface. En notant λ la longueur d'onde, donner la condition pour que l'interférence en un point M situé aux distances d_1 et d_2 respectivement de S_1 et S_2, soit destructrice. Cette condition fait intervenir un entier m.
2) Pour chaque entier m le lieu des points vérifiant cette condition est une courbe que l'on appelle dans la suite ligne de vibration minimale. Les lignes de vibration minimale sont représentées sur la figure de droite : ce sont des hyperboles. Les parties $x < -a/2$ et $x > a/2$ de l'axe (Ox) sont des lignes de vibration minimale. En déduire un renseignement sur a/λ.
3) Sur le segment S_1S_2, quel est l'intervalle de variation de $d_2 - d_1$? Déduire de la figure la valeur de a/λ.
4) Expliquer pourquoi l'image est bien contrastée au voisinage de l'axe (Oy).

III Trombone de KŒNIG

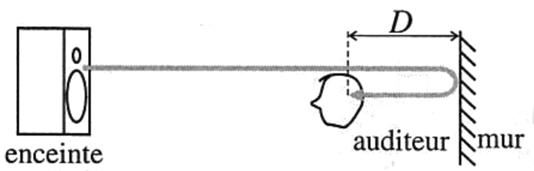
Le trombone de KŒNIG est un dispositif de laboratoire permettant de faire interférer deux ondes sonores ayant suivi des chemins différents. Le haut-parleur, alimenté par un générateur de basses fréquences, émet un son de fréquence $f = [1500 \pm 1]$ Hz. On mesure le signal à la sortie avec un microphone 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.
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 $d = [11{,}5 \pm 0{,}2]$ 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.

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.

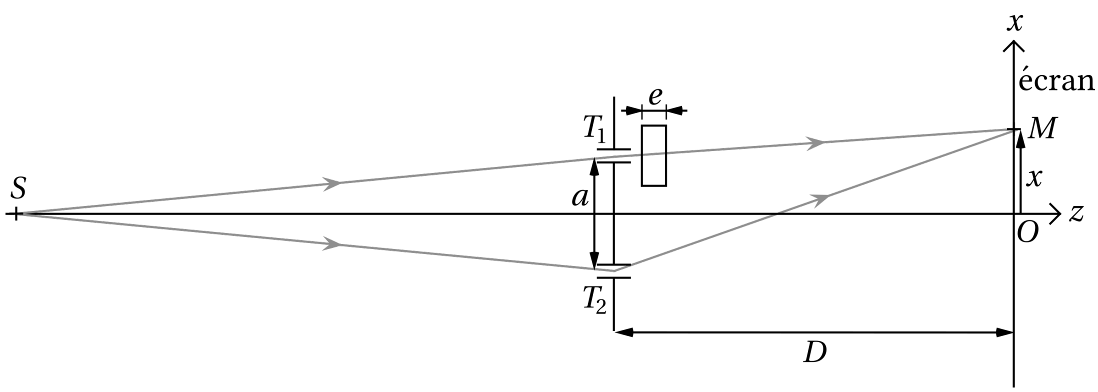


Comme représenté sur la figure, l'onde issue de l'enceinte se réfléchit sur le mur. On note $c = 342\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ la célérité du son dans l'air.

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.
2) 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.
3) 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 ?
4) Expliquer qualitativement pourquoi on évite l'effet nuisible en éloignant l'auditaire du mur.

V Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

On considère un dispositif de trous d'YOUNG composé de deux trous T_1 et T_2 séparés d'une distance $a = 100\,\mu\mathrm{m}$. Ce dispositif est éclairé par une source ponctuelle S monochromatique de longueur d'onde dans l'air $\lambda = 532$ nm située sur l'axe optique. La figure d'interférences est observée sur un écran situé à une distance $D = 1{,}00$ m du plan des trous. Une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur e inconnue et d'indice $n_v = 1{,}57$ est positionnée en sortie du trou T_1. L'indice optique de l'air est supposé égal à 1.



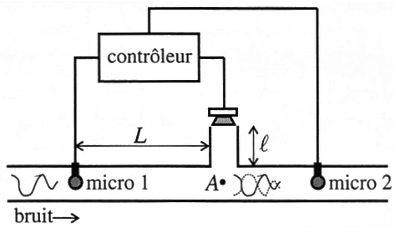
1) Montrer que la différence de marche $\delta(\mathrm{M})$ en un point M de l'écran s'écrit

$$\delta(\mathrm{M}) = \frac{ax}{D} + (n_v - 1)e$$

2) Déterminer la position x_c sur l'écran de la frange centrale correspondant à $\delta(\mathrm{M}) = 0$. De quelle distance s'est déplacée cette frange par rapport au cas où la lame est absente ?
3) Exprimer l'épaisseur e de la lame en fonction de x_c , a, n_v et D.
4) Calculer e pour $x_c = 28{,}5\,\mathrm{cm}$.
5) Expliquer pourquoi en réalité la position de la frange centrale ne peut être connue que modulo l'interfrange i. Qu'est-ce que cela implique sur e ? L'expérience vous paraît-elle réalisable ?

VI 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.
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 $\Delta\varphi = \varphi_{\mathrm{HP}} - \varphi_1$
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.

VII Mesure de la vitesse du son avec des trous d'Young

On considère un dispositif composé de deux trous d'Young percés dans un écran opaque et séparés d'une distance $a = 10{,}0\,\mathrm{cm}$. Une onde ultrasonore de fréquence $f = 40\,\mathrm{kHz}$ est envoyée en direction des trous. L'amplitude de l'onde en sortie des trous est mesurée en utilisant un récepteur qui peut être translaté suivant un axe $(\mathrm{O}x)$ parallèle à la direction des trous et situé à une distance $D = 50{,}0\,\mathrm{cm}$ du plan des trous. Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Par la suite, les valeurs de D et a sont supposées connues avec une précision de 1 mm et l'incertitude-type sur la valeur de f est supposée négligeable.

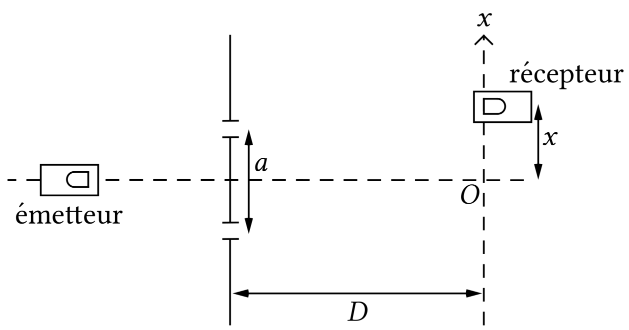


Fig. 1 – Expérience des trous de Young avec des ondes sonores.

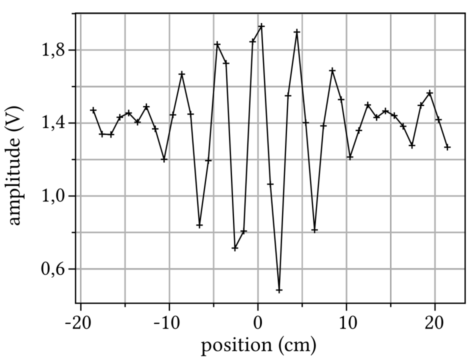


Fig. 2 – Tension délivrée par le détecteur en fonction de sa position sur l'axe Ox.

1) En supposant que la condition $D \gg a, x$ est vérifiée, donner l'expression de l'interfrange i correspondant à la distance sur l'axe $(\mathrm{O}x)$ entre deux interférences constructives.

Le résultat de la mesure de l'amplitude du signal électrique délivré par le récepteur en différentes positions sur l'axe (Ox) est représenté sur la figure 2.

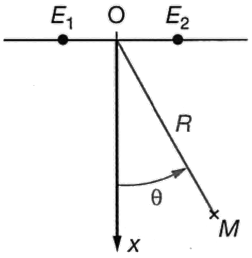
2) À partir de la figure 2, estimer la valeur de l'interfrange ainsi que son incertitude-type.
3) En déduire une estimation de la célérité c du son dans l'air ainsi que de son incertitude-type. On néglige toute incertitude sur la fréquence f.

Un phénomène de diffraction est observé lorsqu'une onde traverse un trou de rayon $r \approx \lambda$. Le faisceau en sortie du trou présente alors un demi-angle d'ouverture θ tel que $\sin(\theta) \approx \lambda/2r$.

4) À partir de la figure 2, estimer l'ordre de grandeur du rayon des trous utilisés dans l'expérience.

VIII Interférences ultrasonores sur un cercle

Deux émetteurs E_1 et E_2 émettent des ondes ultrasonores de même fréquence $f = 40\,\mathrm{kHz}$ (ce qui correspond à une longueur d'onde $\lambda = 8{,}5\,\mathrm{nm}$) et en phase. On note O le milieu du segment [E_1 E_2] de longueur $a = 4\,\mathrm{cm}$, et (Ox) l'axe situé sur la médiatrice de ce segment. On déplace le microphone sur un grand cercle de rayon $R = 0{,}5\,\mathrm{m}$ et on relève l'évolution de l'amplitude mesurée en fonction de l'angle θ que fait la direction $\overrightarrow{\mathrm{OM}}$ avec l'axe (Ox).



1) a – Faire une figure faisant apparaître les points O, E_1, E_2 et M, pour un petit angle θ non nul.
   b – Tracer l'arc de cercle de centre M passant par E_2. On note H son intersection avec la droite (E_1M). Que représente E_1H ?
   c – Puisque $R \gg a$, on peut assimiler H et le projeté orthogonal de E_2 sur (E_1M). En déduire une expression du déphasage entre les ondes reçues en M en fonction de θ, a et λ.
   d – Quelles sont, dans l'intervalle $[-30\ ;\ 30]^\circ$, les valeurs de θ où on observe un maximum d'amplitude ?
2) a – Sur l'intervalle précédent, quelles sont les positions où un minimum d'amplitude est attendu ?
   b – Si les ondes émises ont même amplitude, quelle est la valeur minimale d'amplitude pour le signal somme ?