Ondes

TD 17

Questions de cours

En vérifiant que vous savez répondre à ces questions, vous contrôlez votre apprentissage du cours.

- Comment s'exprime le déphasage $\Delta\varphi$ entre le signal reçu en un point d'abscisse x_1 et un point d'abscisse x_2 (donner deux expressions de $\Delta\varphi$) ? A quelle condition sur $d = x_2 - x_1$ les deux signaux seront-ils en phase, en opposition de phase ?
- Quelle est l'amplitude de l'onde résultante de la somme de deux ondes progressives sinusoïdales en un point M quelconque (la démonstration complète n'est pas toujours demandée ; par contre, il faut savoir poser le problème physique correctement, c'est-à-dire définir les deux ondes arrivant en M, dire que l'onde résultante est la somme des deux ondes et qu'on la cherche sous la forme d'une onde progressive sinusoïdale). Interpréter le résultat en termes d'interférences constructives et destructives.
- Pour le système des trous d'Young :
  - Établir le lien entre le déphasage entre les deux ondes et la différence de marche.
  - Établir l'expression de la différence de marche
  - Calculer l'interfrange en utilisant la formule de Fresnel (fournie)
  - Présenter qualitativement la figure d'interférences en présentant ses particularités

Savoir-faire

Ces exercices sont à savoir résoudre en priorité. Ne passez pas aux exercices suivants sans avoir compris la correction de ceux-ci.

Savoir-faire 1 - Conditions d'interférences constructives et destructives

On considère le dispositif suivant : deux émetteurs sont situés sur la même ligne. On suppose que l'émetteur 2 est de taille suffisamment petite pour ne pas avoir d'influence sur le signal émis par l'émetteur 1. Chaque émetteur envoie une onde progressive sinusoïdale de même fréquence et de phase à l'origine nulle dans la même direction x. Un microphone est situé à une distance x_0 de l'émetteur 1 et l'émetteur 2 est situé à une distance d.

1/ Rappeler les conditions d'interférence destructive et constructive en terme de déphasage entre les deux signaux.

2/ Lorsque $d = 0$, qu'enregistre-t-on au niveau du microphone ?

3/ On part de $d = 0$, et on augmente d jusqu'à ce que le signal enregistré soit nul. Ceci se produit pour $d = 6,0$ cm. Expliquer pourquoi il y a cette extinction. En déduire la longueur d'onde du son émis.

Savoir-faire 2 - Amplitude résultant d'interférences

On considère deux sources qui émettent deux ondes progressives sinusoïdales, de même pulsation ω. On note r_1 =distance S_1M et r_2 =distance S_2M.
Pour simplifier les calculs, on considère que les amplitudes de s_1 et s_2 sont identiques. On a donc, au point M :

$$s_1(M,t) = A_0\cos(\omega t - kr_1) \quad \text{et} \quad s_2(M,t) = A_0\cos(\omega t - kr_2)$$

On rappelle que $\cos p + \cos q = 2\cos\left(\frac{p+q}{2}\right)\cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$

1/ Exprimer le signal total $s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$ au point M.
On le mettra sous la forme $s(M,t) = Acos(\omega t + \varphi_0)$. On donnera l'expression de l'amplitude A obtenue, en fonction de A_0, λ et de $\delta = r_2 - r_1$.

2/ Retrouver alors la condition habituelle sur $\delta = r_2 - r_1$ pour que les interférences soient destructives.

3/ De même, retrouver la condition habituelle sur $r_2 - r_1$ pour que les interférences soient constructives.

Savoir-faire 3 - Trous d'Young

On considère le montage des trous d'Young. L'écran est situé à grande distance $D \gg x, y, z$ et le milieu est de l'air d'indice $n \sim 1$.
La source S est supposée monochromatique (laser rouge He-Ne de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm) et ponctuelle.
Les trous sont supposés écartés de $a = 0,30$ mm et à distance $D = 2,0$ m de l'écran.
On considère que chaque trou se comporte comme une source éclairant uniformément l'écran avec une intensité I_0.

1/ Donner l'expression de la différence de chemin optique $\delta(M)$ au point M, en fonction de a, x et D. On exploitera le fait que $D \gg x, a$.

2/ En déduire l'expression de l'intensité lumineuse au point M.

3/ Cette intensité est périodique. Donner l'expression de sa période spatiale (aussi appelée interfrange), notée i.

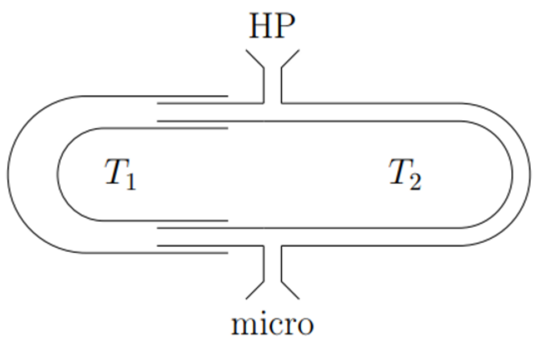
4/ Application numérique pour i.

5/ Comment est modifié l'interfrange si on augmente la distance entre les trous ? Si on augmente la longueur d'onde λ ? Et si on augmente la distance D ?

L'Incontournable

Exercice simple qui permet de vérifier si la phénoménologie est comprise.

Exercice 1 : Trombone de Kœnig



Le trombone de Kœnig est un dispositif de laboratoire permettant de faire interférer deux ondes sonores ayant suivi des chemins différents. Un haut-parleur, alimenté par un générateur basses fréquences, émet un son de fréquence $f = 1,5$ kHz.
Un microphone branché sur un oscilloscope enregistre le signal sonore en sortie.

En déplaçant la partie mobile du tuyau T_1, on fait varier l'amplitude du signal observé. Elle passe deux fois de suite par une valeur minimale lorsqu'on déplace T_1 de $d = 11,5$ cm.

1/ On note d_1 la distance entre le haut-parleur et le micro en passant par le tuyau T_1, et d_2 la distance en passant par le tuyau T_2.
De combien varie la différence de marche $\delta = d_1 - d_2$ lorsqu'on déplace la partie T_1 d'une distance d ?

2/ Déterminer la valeur de la longueur d'onde de l'onde sonore dans cette expérience.

3/ Déterminer la vitesse du son dans l'air à la température où l'expérience est réalisée.

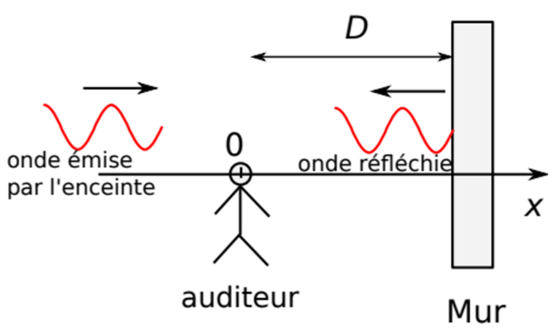
Pour s'Entraîner

On prend la même base et on accentue.

Exercice 2 : Interférences et acoustique

Une bonne installation acoustique doit prendre en compte de nombreux paramètres et effets. L'un d'entre eux est la possibilité d'interférences entre le son émis par les enceintes et celui réfléchi contre les murs.

Considérons la situation simplifiée schématisée ci-contre. L'onde sonore émise par l'enceinte se réfléchit contre le mur sans aucun déphasage pour la grandeur surpression, et arrive donc à nouveau sur l'auditeur.



On note $c = 340$ m/s la vitesse du son dans l'air. On prendra $D = 1,0$ m. On supposera que l'onde émise par l'enceinte est une onde plane progressive harmonique de fréquence f, d'amplitude s_0, de norme de vecteur d'onde k. Une expression possible pour cette onde est donc :

$$s(x,t) = s_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

1/ Rappeler le lien entre k et λ, puis entre f, λ et c.

2/ Par rapport à l'onde directe, quelle distance L supplémentaire l'onde réfléchie a-t-elle parcourue lorsqu'elle arrive au niveau de l'auditeur ?

3/ L'auditeur est en $x = 0$. Donner l'expression de l'onde $s(x = 0, t)$.

L'expression au niveau de l'auditeur de l'onde réfléchie s'obtient en considérant que l'onde a parcouru une distance L (sans ajout de déphasage à la réflexion). Elle est donc donnée par $s(x = L, t)$.

4/ Écrire cette expression.
En déduire que le déphasage entre onde directe et l'onde réfléchie s'écrit, au niveau de l'auditeur : $\Delta\varphi = \frac{4\pi D f}{c}$.

5/ Rappeler la condition sur le déphasage $\Delta\varphi$ entre deux ondes, pour qu'elles interfèrent de manière destructive. On fera apparaître un entier $n \in \mathbb{Z}$.

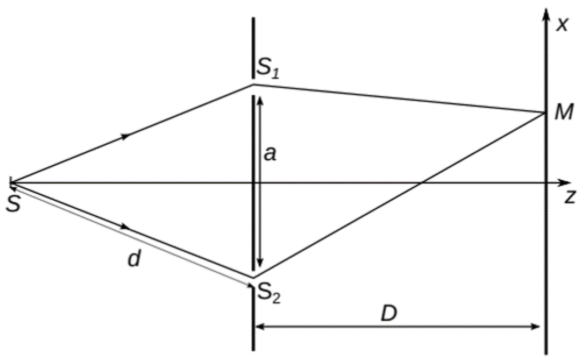
6/ En déduire l'expression des fréquences f_n pour lesquelles il y a interférences destructives (et donc un son d'amplitude minimale, ce qui n'est pas bon pour la qualité audio).

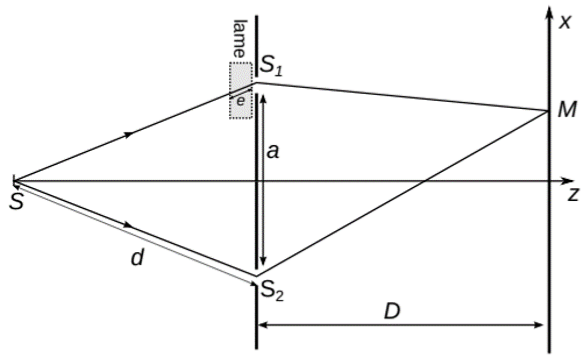
7/ Quelles sont les expressions des deux fréquences les plus petites pour lesquelles il y a interférences destructives ? Est-ce dans le domaine audible ? Aigu ou grave ?

Une solution pour éviter ce problème est d'éviter les réflexions sonores sur les murs à l'aide de revêtements spéciaux ou bien de les réorienter à l'aide d'irrégularités [1].

Exercice 3 : Mesure de l'épaisseur d'une lame à l'aide de trous d'Young

On considère un dispositif des trous d'Young, éclairé par une source quasi-monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 500$ nm. On note $a = 0,5$ mm la distance entre les deux trous, $D = 2,0$ m la distance écran-trous.





1/ On se place dans le cas de la figure de gauche. Établir les expressions de la différence de chemin optique $\delta(M)$ au point M sur l'écran, en fonction de x, a et D. On supposera a et x très petits devant D.
Donner ensuite l'expression de l'intensité lumineuse et de l'interfrange (période spatiale de la figure).

2/ La frange centrale est la frange brillante qui correspond à une différence de chemin optique nulle. En déduire sa position x sur l'écran.

On place maintenant une lame de verre d'indice $n = 1,4$ et d'épaisseur e devant S_1. On suppose que les rayons la traversant le font quasiment sans être inclinés : ils parcourent dans la lame une distance e (cf. schéma de droite).

3/ L'expression de $(S_1M) - (S_2M)$ a-t-elle changé par rapport au cas précédent ? Qu'est-ce qui se trouve modifié ?

4/ Exprimer la différence de chemin optique en fonction des mêmes grandeurs que précédemment mais également n et e.

5/ Quelle est la position de la frange centrale à présent ? Donner l'expression de son déplacement en termes de nombre d'interfranges.

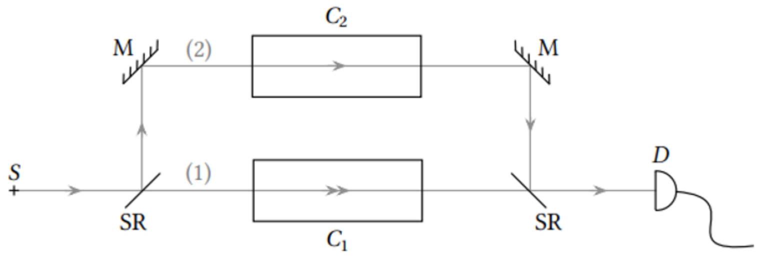
6/ Expérimentalement, on mesure un déplacement de 10 interfranges. Que vaut e ?

1. Vous pouvez en apprendre plus sur le site suivant : http://realtraps.com/rfz.htm.

Devoir-Maison : Mesure de l'Indice Optique de l'Air

Cet exercice est un premier pas vers le travail du devoir surveillé.

Un laser de longueur d'onde $\lambda = 532$ nm placé en S éclaire une lame séparatrice (SR) qui sépare le faisceau en deux de même intensité $I0$ (figure ci-dessous). Un des faisceaux suit le trajet (1), il est transmis par la lame et va directement au détecteur (D) en étant transmis par la seconde lame séparatrice. Le deuxième faisceau suit le trajet (2), il est réfléchi par la lame puis est guidé par deux miroirs plans (M) avant d'être réfléchi par une autre lame séparatrice et arrive au détecteur (D). Sur les trajets (1) et (2) sont placées deux cuves C_1 et C_2, de longueur $\ell = 20,00$ cm. L'expérience est réalisée dans l'air d'indice optique n_{air}.



Les cuves sont initialement remplies d'air à pression atmosphérique.

1/ On constate que l'intensité mesurée par le détecteur est maximale. Que peut-on dire des chemins optiques $(SD)_{1,\text{air}}$ et $(SD)_{2,\text{air}}$ correspondant respectivement aux trajets (1) et (2) ?

2/ En déduire la valeur modulo λ de la différence de marche $\delta_{\text{D,air}} = (SD)_{2,\text{air}} - (SD)_{1,\text{air}}$ entre les deux trajets lorsque les deux cuves sont remplies d'air.

On utilise une pompe pour faire le vide dans la cuve C_1.

3/ Exprimer la variation de chemin optique $(SD)_{1,0} - (SD)_{1,\text{air}}$ sur le chemin (1) dû à mise sous vide de C_1. L'indice « 0 » indique que la cuve C_1 est vide et l'indice « air » que la cuve C_1 est remplie d'air.

4/ En déduire l'expression de la différence de marche $\delta_{\text{D},0} = (SD)_{2,0} - (SD)_{1,0}$ en fonction de $\delta_{\text{D,air}}$ ℓ et n_{air}.

Lorsque la cuve C_1 est considérée comme vide, le détecteur a enregistré le défilement de $N = 102$ maxima d'intensité durant la phase de pompage et détecte une intensité nulle à la fin.

5/ En déduire une estimation de l'indice optique de l'air.