

CORRECTION TD - O5

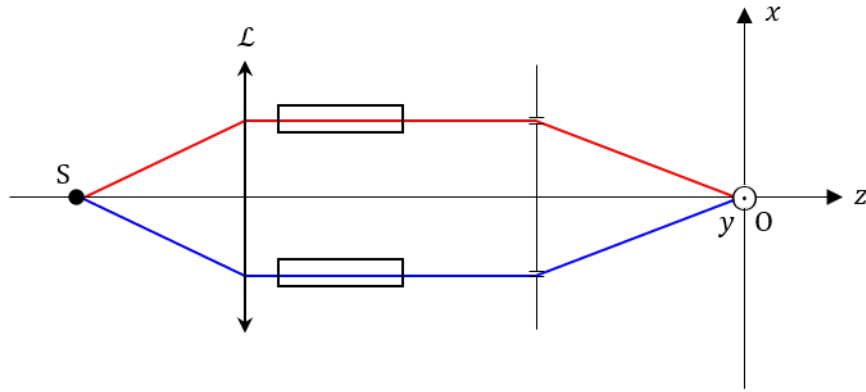
APPLICATIONS DIRECTES DU COURS

Ex. n°1 • Mesure de l'indice optique de l'air

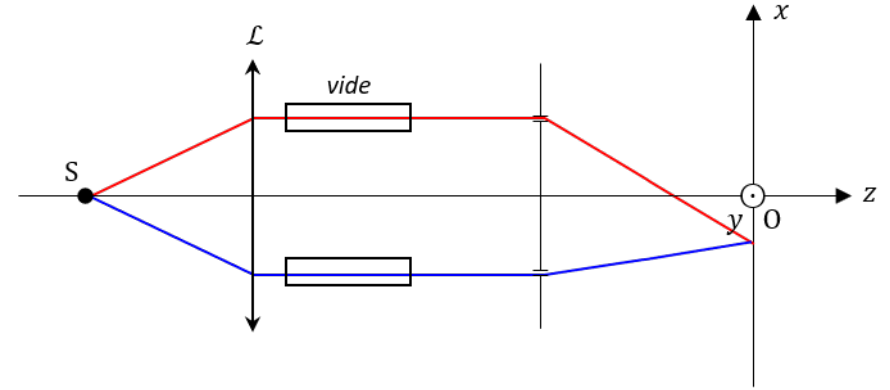


4062

1) On s'intéresse à la frange brillante correspondant à une différence de marche nulle entre deux rayons. Dans l'état initial, ce sont les deux rayons suivants qui possèdent une différence de marche nulle.



Après avoir fait le vide, le chemin optique du rayon rouge dans le tube T est plus court que celui du rayon bleu dans le tube T'. Il faut donc que le rayon rouge parcoure une plus grande distance après le tube pour arriver sur l'écran avec la même différence de marche que le rayon bleu.



Les franges se déplacent donc vers le bas.

2) Calculons la différence de marche :

$$\delta = (\text{bleu}) - (\text{rouge}) = \underbrace{(n-1)L}_{\text{Tubes}} + \underbrace{\frac{na x}{D}}_{\text{Trous d'Young}}$$

L'éclairement sur l'écran vaut :

$$E(x) = 2E_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \delta\right) \right]$$

L'interfrange correspond à la période de cette fonction :

$$i = \frac{\lambda_0 D}{na}$$

Avant de faire le vide, $\delta(x=0) = 0$ au niveau du point origine. Après avoir fait le vide, $\delta(x = -101,5 \times i) = 0$ à 101,5 interfranges vers le bas (101 franges, puis arrêt sur une frange sombre).

Ainsi, après avoir fait le vide :

$$\delta(x = -101,5 \times i) = 0 = (n-1)L + \frac{na}{D} \times \frac{-101,5 \times \lambda_0 D}{na}$$

On en déduit :

$$n = 1 + 101,5 \times \frac{\lambda_0}{L} = 1,000\,29$$

Ex. n°2 • La couche anti-reflet



4027

Les traitements antireflets les plus simples sont des traitements constitués d'une seule couche de matériau déposée à l'interface entre deux milieux, d'épaisseur $\frac{\lambda_0}{4n}$ et d'indice le plus proche possible de la moyenne géométrique des indices des deux milieux. Dans le cas d'un traitement monocouche, la longueur d'onde sélectionnée est $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$. Elle correspond à la longueur d'onde la plus sensible pour l'œil humain. Le revêtement devient ainsi efficace pour les longueurs d'onde du visible proches de cette valeur et perd de son utilité au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette valeur. C'est pour cette raison que nous pouvons observer une coloration violette ou verte sur les lentilles traitées de la sorte.

En effet, lorsque la lumière fait un aller-retour dans la couche antireflet, elle parcourt une différence de marche optique de $2ne = \frac{\lambda_0}{2}$ (si on suppose une incidence normale). Cette onde est donc en opposition de phase avec l'onde qui n'est pas passée par la couche. L'interférence est donc destructive.

Les traitements antireflets multicouches permettent justement d'éviter la perte des propriétés antireflet au voisinage des longueurs d'onde proches des infrarouges et des UV. En effet, c'est l'alternance de couches d'épaisseurs et d'indices différents qui va permettre d'étaler les propriétés antireflet sur toute la gamme du visible.

EXERCICES À MAÎTRISER

Ex. n°3 • Fibre optique à saut d'indice



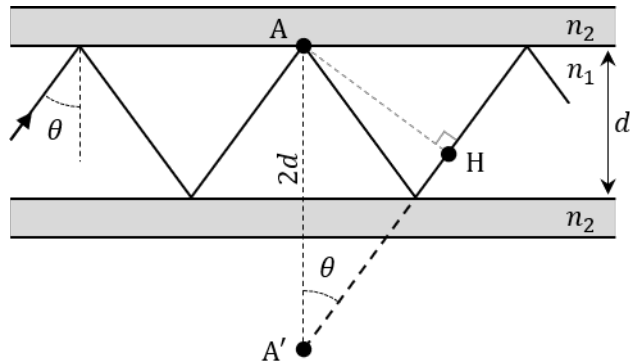
0209

1) La condition de réflexion totale s'écrit :

$$n_1 \sin(\theta) > n_2$$

2) Il faut avoir :

$$(AH) = k\lambda_0 \quad \text{avec : } k \in \mathbb{N}$$



En travaillant sur l'image du rayon (en pointillé sur le schéma) et en se plaçant dans le triangle AA'H, on en déduit :

$$(AH) = n_1 \times A'H = 2n_1 d \cos(\theta) \Rightarrow \cos(\theta) = \frac{k\lambda_0}{2n_1 d}$$

3) On réécrit la condition de réflexion totale en termes de cosinus :

$$\sin(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2(\theta)} > \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \cos(\theta) < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

On a donc :

$$0 < k < \frac{2n_1 d}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = 108$$

On trouve alors 108 modes possibles.

Ex. n°4 • Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre



2568

1) Détermination de la différence de marche δ .

$$\delta = (O_2M) - (O_1M)$$

avec :

$$\begin{aligned} (O_2M) &= \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} (O_1M) &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

Après simplification :

$$\delta = \frac{ax}{D}$$

Ainsi :

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda D}\right) \right]$$

2) On en déduit l'interfrange, c'est-à-dire la période de $I(x)$:

$$i = \frac{\lambda D}{a} = 0,780 \text{ mm}$$

La frange d'ordre 0 se situe au point $x = 0$.

3) Cette lame modifie la différence de marche. On a cette fois :

$$\delta = \left[(O_2M) + e \right] - \left[(O_1M) + ne \right] = e(1 - n) + \frac{ax}{D}$$

La nouvelle position de la frange d'ordre 0 est :

$$\delta = 0 \Rightarrow e(1 - n) + \frac{ax_0}{D} = 0 \Rightarrow x_0 = \frac{eD(n - 1)}{a} > 0$$

En termes d'interfrange :

$$x_0 = Ni \text{ avec : } N = \frac{e(n - 1)}{\lambda_0}$$

4) La position de x_0 ne dépend pas de la valeur de λ . Il faut donc chercher, dans les 3 figures, une frange brillante de même abscisse (et on sait que $x_0 > 0$). On trouve $x_0 = 4,8 \text{ mm}$. Avec la question précédente, il vient :

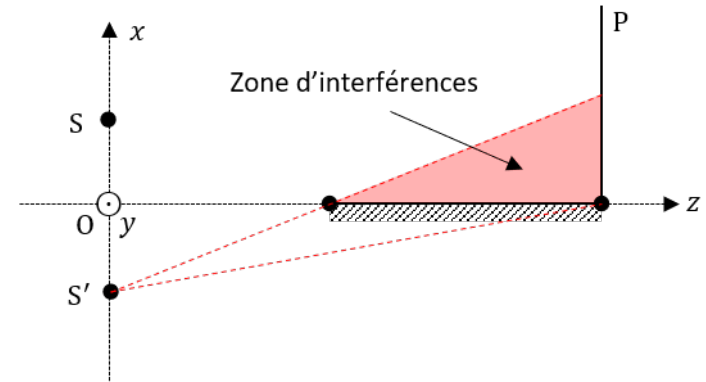
$$e = 8,0 \text{ } \mu\text{m}$$

Ex. n°5 • Miroir de Lloyd



4742

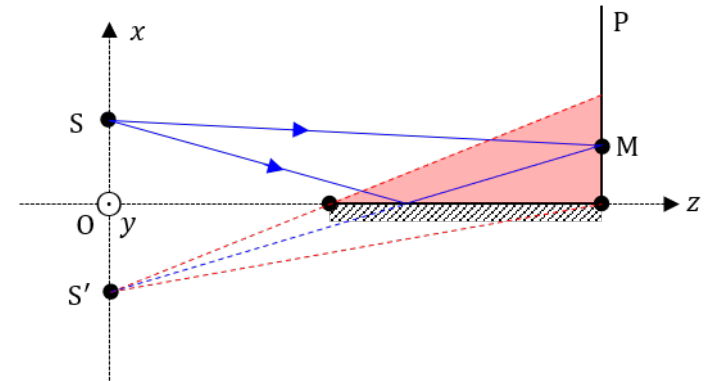
1) Il faut trouver les points de l'espace où deux rayons interfèrent : le rayon issu directement de la source et le rayon réfléchi. Pour trouver l'ensemble des rayons réfléchis, on trace S' , symétrique de S par rapport au plan du miroir, puis on trace les rayons issus de S' qui passent par les extrémités du miroir.



2) Détermination de la différence de marche δ .

$$\delta = (SM)_{\text{réfléchi}} - (SM)_{\text{direct}} = S'M - SM + \frac{\lambda}{2}$$

Le terme en π provient de la réflexion (cf. énoncé, déphasage de π , ce qui correspond à $\lambda/2$ en termes de différence de marche).



Avec :

$$\begin{aligned} S'M &= \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} \text{SM} &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

Après simplification :

$$\delta = \frac{ax}{D} + \frac{\lambda}{2}$$

3) Formule de Fresnel :

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{ax}{D} + \pi\right) \right] = 2I_0 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{ax}{D}\right) \right]$$

4) L'interfrange correspond à la période de l'éclairement.

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

Ex. n°6 • Homogénéité d'indice



3280

1) Détermination de la différence de marche δ .

$$\delta = (S_2M) - (S_1M)$$

avec :

$$\begin{aligned} (S_2M) &= \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + L^2} \\ &= L \sqrt{1 + \left(\frac{x + a/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} \\ &\simeq L \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + a/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} (S_1M) &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + L^2} \\ &= L \sqrt{1 + \left(\frac{x - a/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} \\ &\simeq L \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - a/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

Après simplification :

$$\delta = \frac{ax}{L}$$

Ainsi :

$$E(x) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{ax}{L}\right) \right]$$

On en déduit l'interfrange, la période de $E(x)$:

$$i = \frac{\lambda L}{a}$$

2) Cette lame modifie la différence de marche. On a cette fois :

$$\delta' = e(1 - n) + \frac{ax}{L}$$

L'ajout d'une différence de marche constante se traduit par un « déphasage spatial » de l'éclairement, c'est-à-dire un déplacement des franges d'interférences observées sur l'écran.

3) En faisant attention aux signes, les différences de marche extrêmes sont reliées aux valeurs extrêmes de l'indice par :

$$\delta'_{\max} = e(1 - n_{\min}) + \frac{ax}{L} \quad \text{et} \quad \delta'_{\min} = e(1 - n_{\max}) + \frac{ax}{L}$$

Par ailleurs, lorsque l'on voit défiler un interfrange, c'est que la différence de marche a varié de λ . Ainsi,

$$\delta'_{\max} = \delta'_{\min} + 4\lambda \quad \Rightarrow \quad \Delta n = \frac{4\lambda}{e} = 1,16 \times 10^{-3}$$

La variation relative d'indice vaut donc :

$$\frac{\Delta n}{n} = 7,25 \times 10^{-4}$$

Supposer la lame d'indice homogène est donc une excellente approximation dans la plupart des situations !

POUR ALLER PLUS LOIN

Ex. n°7 • Interférences et tâche centrale de diffraction



6266

1) Détermination de la différence de marche δ .

$$\delta = (O_2M) - (O_1M)$$

avec :

$$\begin{aligned} (O_2M) &= \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} (O_1M) &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \\ &= D \sqrt{1 + \left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2} \\ &\simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right] \end{aligned}$$

Après simplification :

$$\delta = \frac{ax}{D}$$

2) On a :

$$\tan(\theta) \simeq \theta = \frac{x}{D} \Rightarrow \delta = a\theta$$

3) Prenons le bord du haut, noté O_1 . On a :

$$\delta = (OM) - (O_1M)$$

avec :

$$(OM) = \sqrt{x^2 + y^2 + D^2} \simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right]$$

et :

$$(O_1M) = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - a/2}{D}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 \right] \right]$$

Après simplification :

$$\delta = \frac{ax}{2D} - \underbrace{\frac{(a/2)^2}{2D}}_{\text{ordre 2}} \simeq \frac{ax}{2D} = \boxed{\frac{a\theta}{2}}$$

4) Par définition de la première interférence destructive, α est défini par :

$$\frac{a\alpha}{2} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \alpha = \frac{\lambda}{a}$$

On retrouve l'expression classique vue au lycée.

Ex. n°8 • Mesure de l'indice optique du méthane



3245

1) Notons L_2 la longueur géométrique du bras contenant la cuve, et L_1 celle de l'autre bras. En négligeant l'effet des parois de la cuve, lorsque la cuve contient de l'air, la différence de marche des rayons reçus par la photodiode vaut :

$$\delta_{\text{air}} = n_{\text{air}}L_2 - n_{\text{air}}L_1$$

L'ordre de la frange perçue par la photodiode est donc :

$$p_{\text{air}} = \frac{\delta_{\text{air}}}{\lambda} = \frac{n_{\text{air}}L_2 - n_{\text{air}}L_1}{\lambda}$$

2) Lorsque la cuve contient du méthane, le chemin optique dans le bras 2 est modifié : la lumière parcourt une distance plus courte dans l'air et une distance plus longue dans le méthane. Ainsi,

$$\delta_{\text{CH}_4} = n_{\text{air}}(L_2 - \ell) + n_{\text{CH}_4}\ell - n_{\text{air}}L_1$$

d'où l'ordre :

$$p_{\text{CH}_4} = \frac{\delta_{\text{CH}_4}}{\lambda} = \frac{n_{\text{air}}(L_2 - \ell) + n_{\text{CH}_4}\ell - n_{\text{air}}L_1}{\lambda}$$

3) Comme la cuve est remplie progressivement, l'ordre change progressivement également, ce qui explique qu'on observe un défilement de franges (brillantes lorsque l'ordre est entier et sombres lorsqu'il est demi-entier). Puisque 32 franges défilent, alors

$$p_{\text{CH}_4} = p_{\text{air}} \pm 32$$

Puisque $n_{\text{CH}_4} > n_{\text{air}}$, alors on en déduit :

$$p_{\text{CH}_4} = p_{\text{air}} + 32$$

On peut constater que l'hypothèse consistant à négliger les parois de la cuve n'affecte pas le résultat final. Les prendre en compte rajouterait une différence de marche δ_{parois} qui serait la même avec et sans méthane, et qui se simplifierait dans le résultat final.

On en déduit :

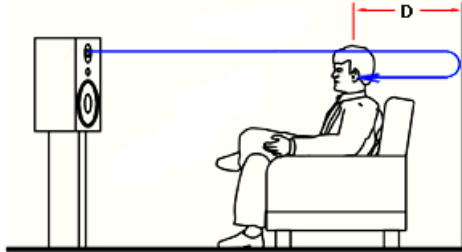
$$n_{\text{CH}_4} = n_{\text{air}} + \frac{32\lambda}{\ell} = 1 + 4,48 \times 10^{-4}$$

Ex. n°9 • Écoute musicale et interférences



6251

1)



En plus de la distance séparant l'enceinte de l'auditeur, l'onde réfléchi parcourt une distance $2D$ correspondant à un aller-retour entre l'auditeur et le mur. Cela se traduit par un retard

$$\tau = \frac{2D}{c} \Rightarrow \Delta\phi = 2\pi f\tau = \frac{4\pi fD}{c}$$

2) Il peut y avoir une diminution de l'amplitude si l'onde directement incidente et l'onde réfléchi sur le mur interfèrent destructivement. La condition d'interférences destructives se traduit par :

$$\Delta\phi = 2\pi \left(p + \frac{1}{2} \right) \quad \text{avec : } p \in \mathbb{Z} \Rightarrow f_p = \frac{(2p+1)c}{4D}$$

Les fréquences du domaine audible s'étendent de $f_{\text{min}} = 20 \text{ Hz}$ à $f_{\text{max}} = 20 \text{ kHz}$. Les fréquences pour lesquelles les interférences sont destructives augmentent avec p . Pour qu'aucune d'entre elles ne fasse partie du domaine audible, il faut donc que

$$f_{p=0} = \frac{c}{4D} > f_{\text{max}} \Rightarrow D < \frac{c}{4f_{\text{max}}} = 4,3 \text{ mm}$$

Il faudrait donc que les oreilles de l'auditeur soient presque collées au mur, ce qui est tout simplement impossible.

3) Les interférences ne sont parfaitement destructives que si les deux ondes ont la même amplitude, mais l'amplitude de l'onde émise par une enceinte décroît avec la distance qu'elle parcourt. Par conséquent, si l'auditeur est suffisamment loin du mur, l'onde réfléchi sur le mur a une amplitude suffisamment faible devant celle de l'onde directement incidente pour que l'effet des interférences ne soit pas perceptible. Un revêtement qui absorbe une partie de l'onde incidente sans la réfléchir aura le même résultat sur les interférences.

4) L'écart moyen entre deux fréquences pour lesquelles l'amplitude mesurée est minimale vaut $\Delta f = 0,84 \text{ kHz}$. D'après les questions précédentes,

$$\Delta f = f_{p+1} - f_p = \frac{c}{2D} \Rightarrow D = \frac{c}{2\Delta f} = 20 \text{ cm}$$

5) L'amplitude est maximale dans le cas d'interférences constructives, et vaut alors $2A_0$. Sa valeur en décibels vaut

$$\Delta I_{\text{dB}} = 20 \log \left(\frac{2A_0}{A_{\text{ref}}} \right) = 20 \log \left(\frac{A_0}{A_{\text{ref}}} \right) + \underbrace{20 \log(2)}_{= 6}$$

Comme la valeur maximale de la différence de niveau sonore est de l'ordre de 6 dB à une fréquence d'environ 5,65 kHz, on peut penser que les ingénieurs qui ont réalisé l'expérience ont choisi comme amplitude de référence celle d'une onde seule, en l'absence d'interférences.

Ex. n°10 • Interférences dans une cuve à ondes



8400

1) Au voisinage de l'axe (Oy), les interférences sont constructives. On a donc des minima et maxima prononcés : le contraste est élevé.

2) D'après le texte introductif, les deux pointes frappent « en même temps ». Les deux ondes générées possèdent donc la même phase à l'origine, que l'on prendra nulle (choix arbitraire de l'origine des temps). La phase de chaque onde en M vaut donc :

$$\phi_1 = \omega t - kd_1 = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \quad \phi_2 = \omega t - kd_2 = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} d_2$$

La différence de phase vaut :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (d_1 - d_2)$$

Pour que l'interférence soit destructive au point M, il faut que les ondes soient en opposition de phase. Ainsi :

$$\Delta\phi_{\text{dest.}} = \frac{2\pi}{\lambda} (d_1 - d_2) = 2\pi \left(p + \frac{1}{2} \right) \quad \text{avec : } p \in \mathbb{Z}$$

Donc :

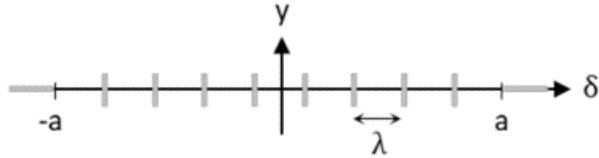
$$\delta = d_1 - d_2 = \lambda \left(p + \frac{1}{2} \right)$$

Il faut donc que la différence de marche δ soit un multiple demi-entier de la longueur d'onde.

3) Une onde issue de S_1 arrive sur S_2 en opposition de phase. Cette onde a donc parcouru une distance égale à un multiple demi-entier de la longueur d'onde.

$$a = \lambda \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad \text{avec : } n \in \mathbb{N}$$

4) Entre deux lignes de vibration minimale successives, la différence de marche δ varie d'une longueur d'onde. Ainsi, on obtient (attention, sur le graphique, l'axe des abscisses est gradué en différence de marche).



En comptant le nombre de lignes de vibration minimale, on en déduit que :

$$2a = 9\lambda \Rightarrow \frac{a}{\lambda} = \frac{9}{2}$$

Expression de l'onde émise par H_1 et H_2 :

$$s_1(x > -d/2, t) = A_0 \cos(\omega t - k(x + d/2))$$

$$s_1(x < -d/2, t) = A_0 \cos(\omega t + k(x + d/2))$$

$$s_2(x > d/2, t) = A_0 \cos(\omega t - k(x - d/2))$$

$$s_2(x < d/2, t) = A_0 \cos(\omega t + k(x - d/2))$$

On en déduit l'onde résultante reçue par le microphone :

$$s_{\text{tot}}(x < -d/2, t) = \underbrace{2A_0 \cos\left(\frac{kd}{2}\right)}_{\text{Amplitude}} \cos(\omega t + kx)$$

$$s_{\text{tot}}(x > d/2, t) = \underbrace{2A_0 \cos\left(\frac{kd}{2}\right)}_{\text{Amplitude}} \cos(\omega t - kx)$$

$$s_{\text{tot}}(-d/2 < x < d/2, t) = \underbrace{2A_0 \cos\left(\omega t - \frac{kd}{2}\right) \cos(kx)}_{\text{Onde stationnaire}}$$

2) On rappelle que : $k = 2\pi/\lambda$, donc $kd/2 = p\pi$. Ainsi :

$$s_{\text{tot}}(x < -d/2, t) = (-1)^p \times 2A_0 \cos(\omega t + kx)$$

$$s_{\text{tot}}(x > d/2, t) = (-1)^p \times 2A_0 \cos(\omega t - kx)$$

$$s_{\text{tot}}(-d/2 < x < d/2, t) = -2A_0 \cos(\omega t) \cos(kx)$$

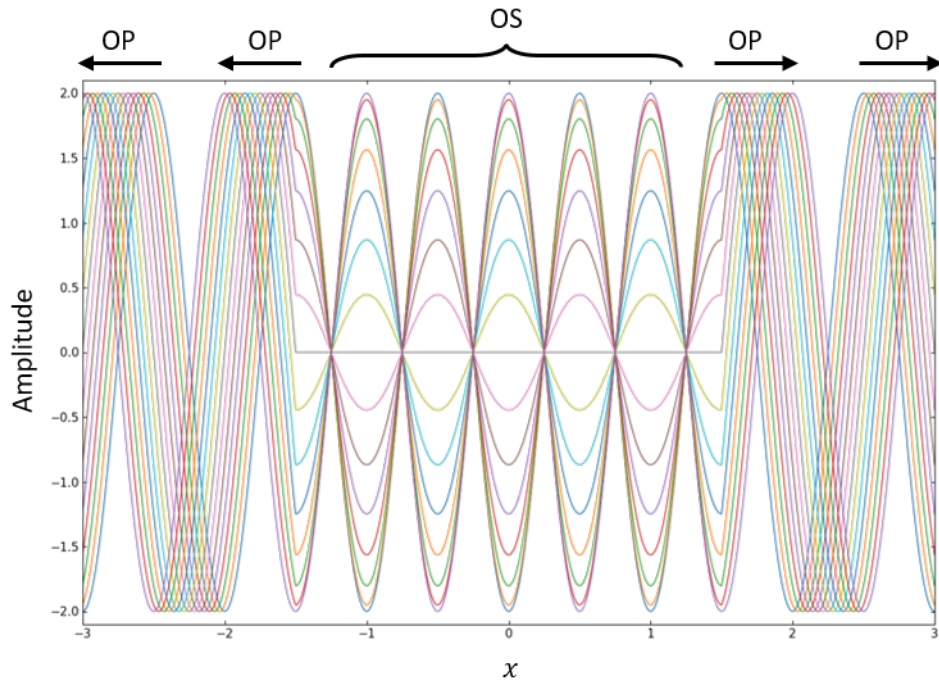
Graphique dans le cas où $d = 3\lambda$ avec différentes valeurs de t comprises entre 0 et $T/2$. On a des interférences constructives pour les OP ($x > d/2$ et $x < -d/2$). L'OS est une succession d'interférences constructives (les ventres, 7 visibles) et destructives (les nœuds, 6 visibles).

Ex. n°11 • Deux hauts-parleurs



6183

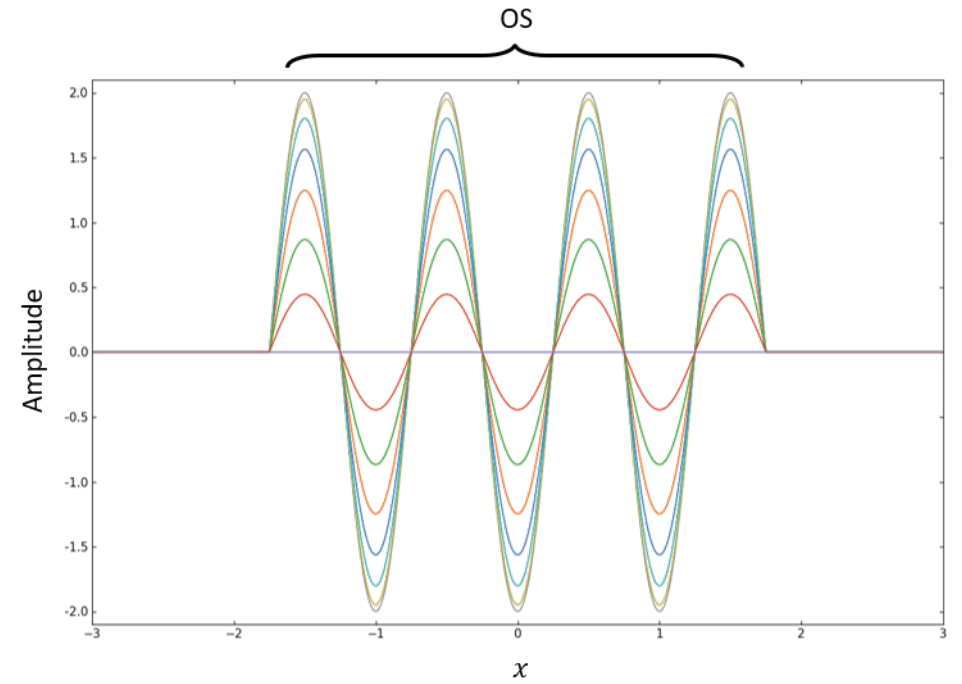
1) Comme les deux sources sont en phase, on choisit l'origine des temps pour que la phase de chacune soit nulle à $t = 0$ au point origine de chaque onde.



3) Cette fois, on a : $kd/2 = \left(p + \frac{1}{2}\right)\pi$. Ainsi :

$$\begin{aligned} s_{\text{tot}}(x < -d/2, t) &= 0 \\ s_{\text{tot}}(x > d/2, t) &= 0 \\ s_{\text{tot}}(-d/2 < x < d/2, t) &= -2A_0 \sin(\omega t) \cos(kx) \end{aligned}$$

Graphique dans le cas où $d = 3,5\lambda$ avec différentes valeurs de t comprises entre 0 et $T/2$. On a des interférences destructives pour les OP ($x > d/2$ et $x < -d/2$). L'OS est une succession d'interférences constructives (les ventres, 7 visibles) et destructives (les nœuds, 8 visibles).



4) Posons (choix arbitraire de l'origine des temps) la phase égale à $-\phi/2$ pour H_1 et la phase égale à $\phi/2$ pour H_2 . Dans ce cas :

$$\begin{aligned} s_1(x > -d/2, t) &= A_0 \cos(\omega t - k(x + d/2) - \phi/2) \\ s_2(x > d/2, t) &= A_0 \cos(\omega t - k(x - d/2) + \phi/2) \end{aligned}$$

On en déduit :

$$s_{\text{tot}}(x > d/2, t) = 2A_0 \cos\left(\frac{kd + \phi}{2}\right) \cos(\omega t - kx)$$

On cherche donc ϕ tel que :

$$0 = \cos\left(\frac{kd + \phi}{2}\right) = \cos\left(p\pi + \frac{\phi}{2}\right) \Rightarrow \boxed{\phi = \pi}$$

Les deux signaux doivent être en opposition de phase.