

Ex. 4 Trous d'Young éclairés par une source avec un spectre étendu

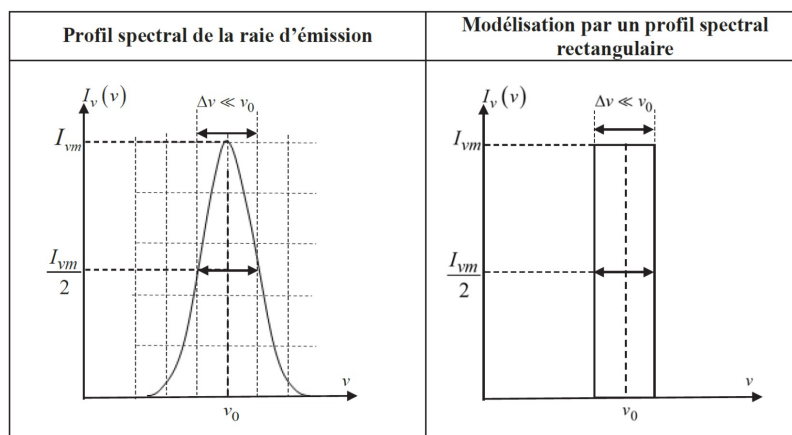
Aide à la résolution de l'exercice en bas de page⁴

On éclaire des trous d'Young, distants de a et situés le long d'un axe (Ox) , avec une source primaire ponctuelle. La source S est à une grande distance d des trous d'Young, sur la médiatrice des trous d'Young. L'objectif de l'exercice est de déterminer l'intensité lumineuse sur un écran situé à une grande distance D derrière les trous d'Young. L'air sera assimilé à du vide du point de vue optique.

Un formulaire est disponible en fin d'exercice.

1. Considérons, dans cette question uniquement, que la source est monochromatique de longueur d'onde λ .
 - (a) Donner l'ordre d'interférences sur l'écran.
 - (b) Décrire la forme des franges d'interférences et exprimer l'interfrange en fonction de a , D et λ .

On considère désormais le cas d'une source avec un spectre étendu. Appelons ν_0 la fréquence centrale et $\Delta\nu \ll \nu_0$ l'écart spectral. L'intensité spectrale de la source est représentée sur la figure ci-dessous.



Etude qualitative

2. Expliquer qualitativement pourquoi on pourrait observer un brouillage des franges sur l'écran.
3. Rappeler le critère semi-quantitatif de brouillage des franges. En déduire la valeur limite de la différence de chemins optiques $\delta(M)$ à partir de laquelle la figure d'interférences est brouillée. Qu'observe-t-on pour $\delta(M)$ supérieur à cette valeur limite ?

Calcul exact

Dans la suite, on souhaite vérifier quantitativement ce critère de brouillage, dans le cas d'une modélisation simplifiée. Pour ce faire, on suppose le profil spectral de la source comme rectangulaire entre $\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}$ et $\nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2}$.

4. Soit $dI(M)$ l'intensité lumineuse au point M sur l'écran associée aux ondes émises entre les fréquences ν et $\nu + d\nu$. On suppose que l'intensité lumineuse au niveau de la source correspondant à la plage de fréquences $[\nu, \nu + d\nu]$ vaut $\frac{I_0 d\nu}{\Delta\nu}$. Exprimer $dI(M)$ en fonction notamment de $\delta(M)$ et de ν .
5. En intégrant sur tout le spectre de la source, montrer que l'intensité lumineuse totale est :

$$I(M) = 2I_0 \left(1 + \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi \Delta\nu \delta(M)}{c} \right) \cos \left(\frac{2\pi \nu_0 \delta(M)}{c} \right) \right)$$

où la fonction sinus cardinal est définie comme $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$. Un formulaire donne le graphe de cette fonction.

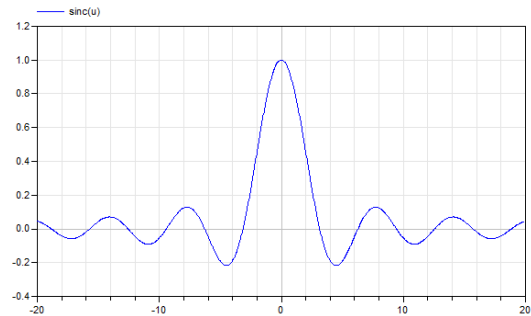
6. Identifier les termes variant rapidement et lentement avec la différence de chemins optiques et leur attribuer un sens physique.
7. En déduire le graphe de $I(\delta)$.

8. Retrouve-t-on la condition de brouillage établie à la question 3 ? Proposer une condition numérique portant sur $\delta(M)$ pour pouvoir considérer que le contraste reste correct sur la figure d'interférences.

Formulaire :

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

On définit la fonction "sinus cardinal" sur \mathbb{R} par $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$. On donne le graphe de cette fonction ci-contre.



Correction de l'exercice 4

- On donne l'ordre d'interférences $p(M) = \frac{ax}{\lambda D}$.
 - D'après l'ordre d'interférences, les franges sont rectilignes. L'interfrange i vérifie $\Delta p(\text{position sur écran}) = 1 = \frac{ai}{\lambda D} \Rightarrow i = \frac{\lambda D}{a}$.
- Les ondes émises à des longueurs d'onde différentes sont incohérentes entre elles : il y a additivité des intensités lumineuses des systèmes de franges à des longueurs d'onde distinctes. Or, l'interfrange i de chaque système de franges varie avec λ . Donc, hormis au centre de l'écran, les différents systèmes de franges ne seront pas en coïncidence : cela mène à un brouillage des franges loin du centre de l'écran.
- Critère semi-quantitatif de brouillage : il y a brouillage des franges si la différences d'ordre d'interférences en un même point M de l'écran $\Delta p(\text{demi-largeur spectrale de la source}) \geq \frac{1}{2}$. A la limite :

$$\Delta p(\text{demi-largeur spectrale de la source}) = \frac{\delta(M)}{c} \left(\nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2} - \nu_0 \right) = \frac{\delta(M)\Delta\nu}{2c} = \frac{1}{2} \Rightarrow \delta(M) = \frac{c}{\Delta\nu}$$

Remarque : Il s'agit du fameux critère de brouillage $\delta(M) = c\tau_c = \ell_c$ la longueur de cohérence temporelle de la source.

Pour $\delta(M) > \frac{c}{\Delta\nu}$, l'intensité lumineuse est uniforme sur l'écran : le contraste est nul et on ne distingue plus de frange.

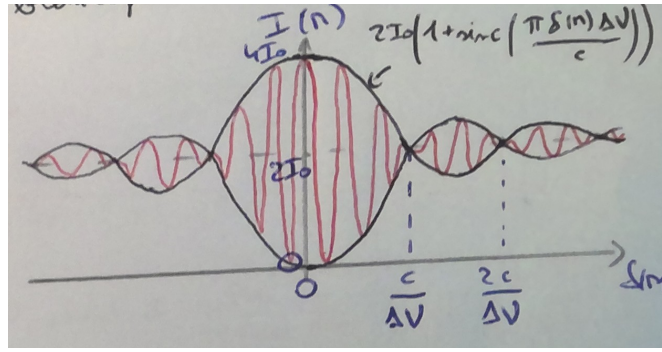
- Les ondes émises sur la plage infinitésimale de fréquences $[\nu, \nu + d\nu]$ sont cohérentes entre elles. D'après la formule de Fresnel :

$$dI(M) = \frac{2I_0}{\Delta\nu} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\nu}{c}\delta(M)\right) \right) d\nu$$

- D'après la Q.2, il y a additivité des intensités lumineuses :

$$\begin{aligned} I(M) &= \int_{\nu_0 + \Delta\nu/2}^{\nu_0 + \Delta\nu/2} \frac{2I_0}{\Delta\nu} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\nu}{c}\delta(M)\right) \right) d\nu \\ &= 2I_0 \left(1 + \frac{1}{\Delta\nu} \times \frac{c}{2\pi\delta(M)} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{c}(\nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2})\delta(M)\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{c}(\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2})\delta(M)\right) \right) \right) \\ &= 2I_0 \left(1 + \frac{c}{\pi\delta(M)\Delta\nu} \times \sin\left(\frac{\pi\delta(M)\Delta\nu}{c}\right) \cos\left(\frac{2\pi\delta(M)\nu_0}{c}\right) \right) \\ &= 2I_0 \left(1 + \text{sinc}\left(\frac{\pi\Delta\nu\delta(M)}{c}\right) \cos\left(\frac{2\pi\nu_0\delta(M)}{c}\right) \right) \end{aligned}$$

- Fonction de contraste : $\gamma(M) = \text{sinc}\left(\frac{\pi\Delta\nu\delta(M)}{c}\right)$, évoluant lentement. Cette fonction caractérise l'évolution du contraste sur l'écran (maximal au centre, puis diminuant quand on s'approche des bords de l'écran).
 $\cos\left(\frac{2\pi\nu_0\delta(M)}{c}\right)$ évoluant rapidement : il s'agit du terme d'interférences.



7.
8. 1ère annulation du contraste pour $\delta = \frac{c}{\Delta\nu}$: en accord avec le critère semi-quantitatif de la Q.3 !

Bon contraste revient à dire que la fonction de contraste doit rester plus grande que $\frac{1}{2}$ (critère que l'on pose).
Donc, en s'aidant du graphe fourni du sinc :

$$\frac{\pi \delta \Delta\nu}{c} \leq 2 \Rightarrow \delta \leq \frac{2}{\pi} \frac{c}{\Delta\nu} = 0.6 \frac{c}{\Delta\nu} = 0.6 \ell_c$$

Ex. 5 (Inspiré de Ecrit Centrale MPI 2023) Taille d'un pixel de l'écran d'un smartphone

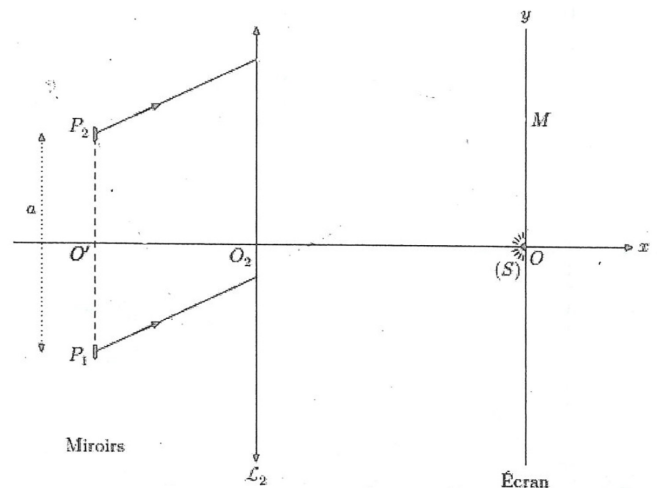
On souhaite concevoir une expérience qui permet de mesurer expérimentalement la distance qui sépare les pixels de l'écran d'un téléphone portable. L'idée est d'étudier les interférences observées par réflexion sur les pixels de l'écran. Ceux-ci sont modélisés dans la suite comme de petits miroirs.

Premier montage

On envisage tout d'abord le dispositif expérimental présenté ci-dessus. Une lampe spectrale, considérée monochromatique de longueur d'onde λ , éclaire l'écran percé d'un très petit trou. Celui-ci peut être considéré comme une source ponctuelle S qui est initialement placée sur l'axe optique, au point O .

Cette source S éclaire vers la gauche, les rayons qui en sont issus traversent la lentille \mathcal{L}_2 et arrivent en incidence normale sur deux pixels, considérés comme de petits miroirs positionnés parallèlement à l'axe (Oy).

Les rayons sont alors réfléchis et diffractés par les deux miroirs P_1 et P_2 , traversent à nouveau la lentille \mathcal{L}_2 et viennent interférer au point M : une figure d'interférence est visible sur l'écran. On note (y, z) les coordonnées du point M dans le plan Oyz formé par l'écran et on ne considère que les points voisins de l'axe : $|y| \ll f'_2$ et $|z| \ll f'_2$.



Aide : Les rayons lumineux cheminent donc d'abord de la droite vers la gauche entre la source et les pixels, puis de la gauche vers la droite entre les pixels et l'écran. Ce montage est donc équivalent au montage classique des trous d'Young en configuration de Fraunhofer avec une "première" lentille \mathcal{L}_2 , puis une "seconde" lentille \mathcal{L}_2 .

1. A quelle distance de la lentille \mathcal{L}_2 doit-on placer l'écran pour que les rayons issus de S ressortent parallèles entre eux après la lentille \mathcal{L}_2 ? Justifier alors que les rayons issus de P_1 et de P_2 et convergeant au point M sont parallèles entre eux avant d'atteindre la lentille \mathcal{L}_2 .
2. Recopier et compléter le trajet des deux rayons lumineux issus de S et interférant au point M placé sur l'écran. En le justifiant précisément, montrer tout d'abord que la différence de marche $\delta_{1/2}(M) = (SM)_1 - (SM)_2$ entre les deux ondes se ramène à $\delta_{1/2}(M) = (P_1M) - (P_2M)$, puis montrer qu'elle s'écrit $\delta_{1/2}(M) = \frac{ay}{f'_2}$.
3. En déduire l'ordre d'interférence $p(M)$ au point M . Décrire la figure d'interférence observée. Définir et exprimer l'interfrange i de cette figure d'interférence.

4. Donner l'expression de l'intensité lumineuse $I(y)$ sur l'écran en fonction de y , la coordonnée du point M sur l'axe (Oy) . On notera I_0 l'intensité que l'on obtiendrait avec un miroir seulement. Représenter graphiquement $I(y)$ et faire apparaître l'interfrange i .
5. Le point source S est déplacé dans le plan de l'écran, ses coordonnées deviennent (y_S, z_S) . En s'appuyant sur un schéma, déterminer l'expression de la différence de marche $\delta_{1/2}(M)$ au point M en fonction de a , y , y_S et f'_2 . Décrire le changement que le déplacement de la source S induit sur la figure d'interférence observée sur l'écran.

Pour obtenir une figure plus lumineuse, on souhaite remplacer le petit trou pratiqué dans l'écran par une fente de largeur c , parallèle à l'axe Oz . Cette fente est éclairée par la lampe spectrale. Dans un modèle simple, on peut considérer que chaque petit élément de surface de la fente se comporte comme une source ponctuelle, incohérente avec les autres éléments de la fente.

6. À l'aide d'un critère semi-quantitatif (à énoncer), basé sur l'ordre d'interférence au point M , déterminer l'expression de la largeur maximale c_{max} au-delà de laquelle la figure d'interférence sera brouillée. Calculer numériquement c_{max} dans le cas de la lampe à sodium en prenant $f'_2 = 45.5 \text{ cm}$, $a = 80 \mu\text{m}$ et une longueur d'onde $\lambda = 589 \text{ nm}$. Conclure.

Montage avec un laser

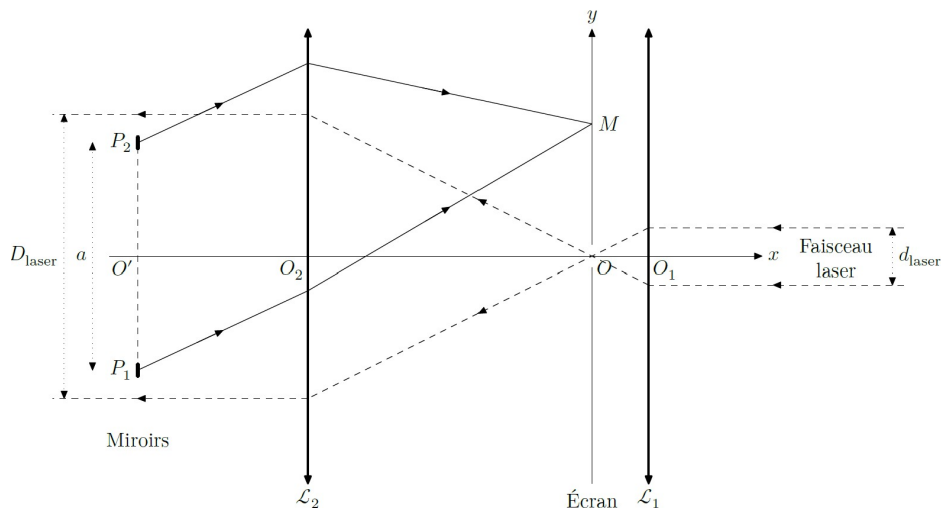


Figure 7 Deuxième montage : laser et miroirs

Afin d'éviter les problèmes inhérents à l'utilisation d'une lampe spectrale précédemment décrits, celle-ci est remplacée par un laser comme indiqué en figure 7. De plus, on insère une lentille \mathcal{L}_1 de distance focale $f'_1 = 10.5 \text{ cm}$ entre le laser et l'écran.

7. On souhaite élargir le diamètre du faisceau laser : soit d_{laser} son diamètre avant traversée de la lentille \mathcal{L}_1 et D_{laser} son diamètre après traversée de la lentille \mathcal{L}_2 . Préciser comment doit être disposée la lentille \mathcal{L}_1 par rapport à \mathcal{L}_2 pour qu'à la sortie de \mathcal{L}_2 , on obtienne un faisceau cylindrique de diamètre D_{laser} comme indiqué sur la figure 7. Exprimer le rapport D_{laser}/d_{laser} en fonction des paramètres du système. Faire l'application numérique.

On envisage à présent l'utilisation de $N = 4$ miroirs (représentant 4 pixels) disposés selon un carré de côté a (figure 8). Ces miroirs sont notés P_1 à P_4 . Les interférences sont observées en un point M de l'écran, de coordonnées (y, z) .

8. En utilisant les résultats de la question 5, exprimer sans calculs les différences de marches au point M , $\delta_{i/1}(M) = (SM)_i - (SM)_1$ avec $i = 2, 3, 4$, entre l'onde passant par le miroir P_i et celle passant par le miroir P_1 , en fonction de y , z , a et f'_2 . Déterminer les coordonnées des points de l'écran pour lesquels les ondes issues des 4 miroirs sont en phase. Montrer que ces maxima d'éclairement forment un réseau carré de points de coordonnées

$$\left(y_k = k\lambda \frac{f'_2}{a} ; \quad z_m = m\lambda \frac{f'_2}{a} \right)$$

où k et m sont deux nombres entiers.

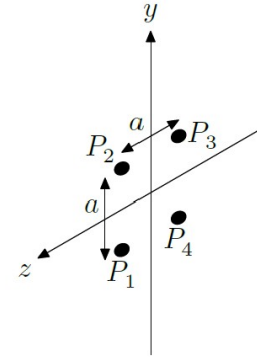


Figure 8 Disposition des 4 miroirs

On modélise l'écran du téléphone par un réseau carré de N pixels assimilés à de petits miroirs répartis périodiquement avec une période a selon y et selon z . Par un raisonnement similaire à celui effectué ci-avant, on montre qu'on observe sur l'écran un réseau carré de maxima d'éclairement aux points de coordonnées (y_k, z_m) .

Détermination de la taille d'un pixel



Figure 9 Dernier montage : détermination de la taille d'un pixel

Le réseau bidimensionnel de N miroirs considéré dans la section précédente modélise l'écran d'un téléphone comportant N pixels. Le montage est représenté sur la figure 9 et est réalisé comme suit.

- On place sur un banc optique, dans l'ordre de la droite vers la gauche, un laser, une lentille \mathcal{L}_1 , un écran troué en son centre, une lentille \mathcal{L}_2 et le téléphone.
- On s'assure du centrage du système, la tache du laser est visible sur l'écran du smartphone.
- Sur la face gauche de l'écran, une figure géométrique caractéristique d'un phénomène de diffraction est visible, cette figure est exploitée ci-après.
- Les distances focales utilisées sont $f'_1 = 10.5 \text{ cm}$ et $f'_2 = 45.5 \text{ cm}$. Leur incertitude-type vaut $u(f') = 0.30 \text{ cm}$.

La figure 10 présente une image obtenue au cours de cette expérience, avec un laser vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$ avec son incertitude-type $u(\lambda) = 10 \text{ nm}$). Le trou au centre est celui par lequel passe le laser, il possède un diamètre de 4.0 mm .

9. Déterminer la distance entre deux pixels avec une estimation de son incertitude-type.

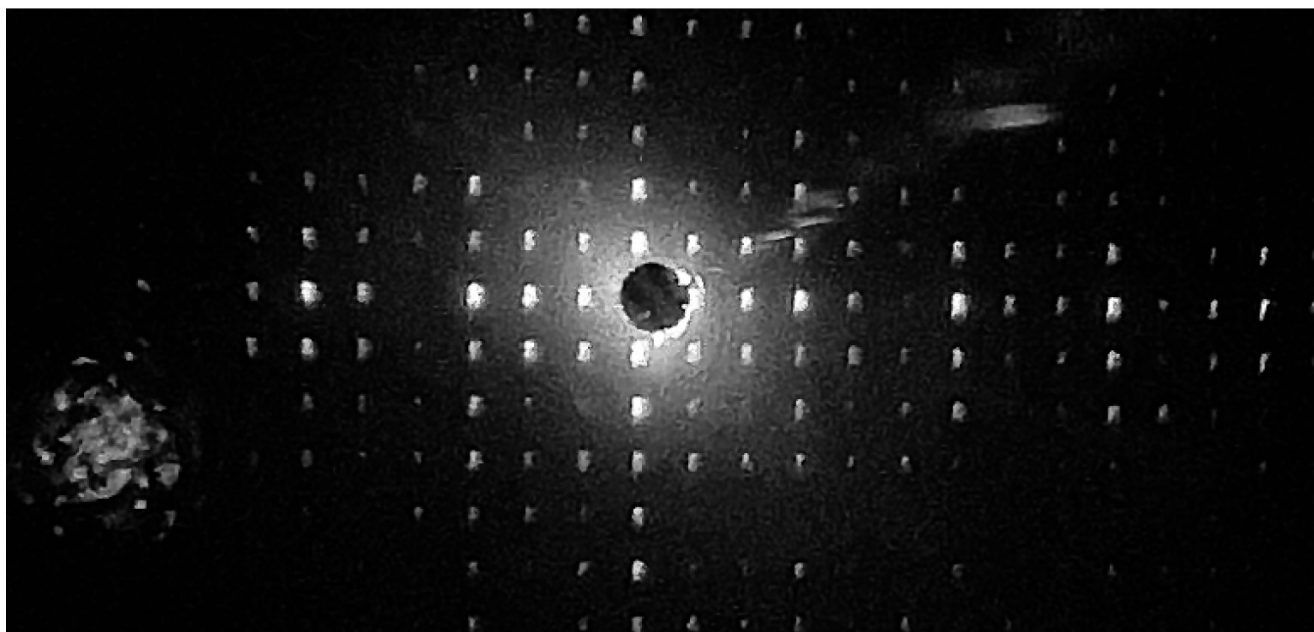


Figure 10 Image visible sur l'écran

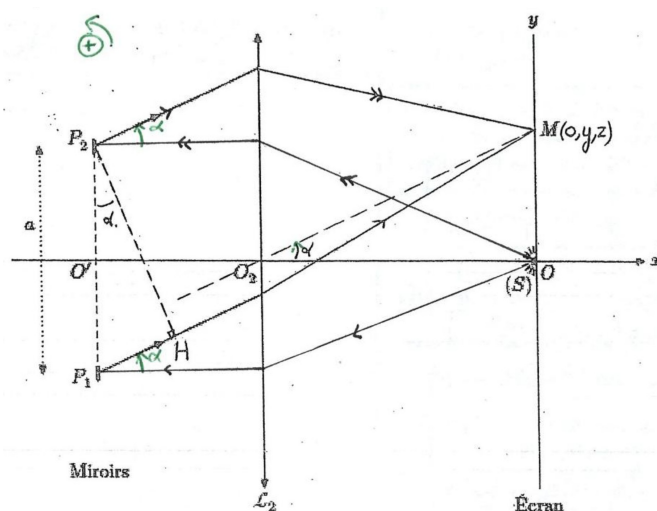
Correction de l'exercice 5

1. Les rayons issus de S ressortent parallèles entre eux après la lentille si S appartient au plan focal objet de \mathcal{L}_2 . Donc, la distance lentille \mathcal{L}_2 - écran doit être f'_2 .



En P_1 et en P_2 , un phénomène de diffraction se produit. Ce n'est donc pas parce que les rayons sont parallèles entre eux avant d'atteindre P_1 et P_2 qu'ils seront nécessairement parallèles entre eux après P_1 et P_2 .

Le point M appartient au plan focal image de \mathcal{L}_2 . Nécessairement, les rayons convergeant en M sont parallèles entre eux avant la lentille.



2. D'après le théorème de Malus, P_1 et P_2 appartiennent à la même surface d'onde relative à S . Donc, $(SP_1) = (SP_2)$. Ainsi, $\delta_{1/2} = (P_1M) - (P_2M)$.

D'après le théorème de Malus et le principe de retour inverse de la lumière, P_2 et H appartiennent à la même surface d'onde relative à M . Ainsi, $(P_2M) = (HM)$. Ainsi, $\delta_{1/2} = (P_1H) = P_1H$.

Géométriquement, $P_1H = a \sin(\alpha) \simeq a \tan(\alpha) = \frac{ay}{f'_2}$ d'après les conditions de Gauss ($|y| \ll f'_2$).

Donc, $\delta_{1/2} = \frac{ay}{f'_2}$.

3. Ainsi, l'ordre d'interférences est $p(M) = \frac{\delta_{1/2}(M)}{\lambda} = \frac{ay}{\lambda f'_2}$.

$p(M) = \text{cte} \Rightarrow y = \text{cte}$: les franges sont rectilignes d'équation $y = \text{cte}$.

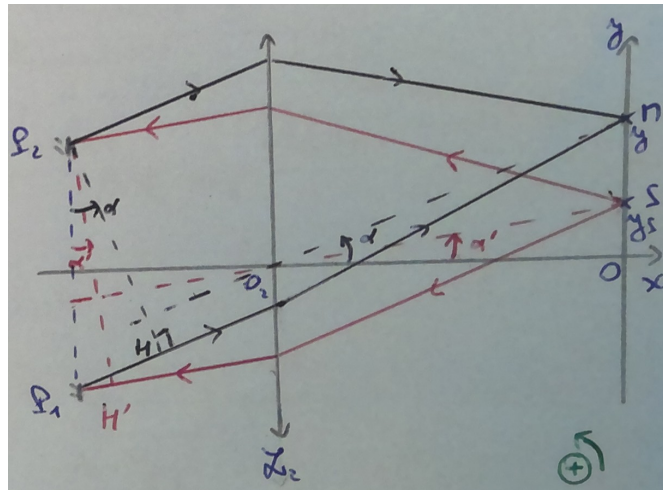
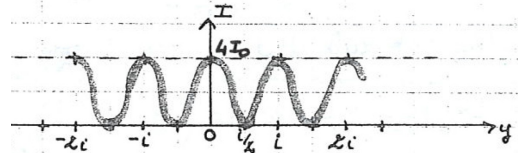
L'interfrange est la plus petite distance entre deux franges brillantes. On peut le déterminer via :

$$\Delta p(\text{position } M \text{ sur l'écran}) = 1 = \frac{ai}{\lambda f'_2} \Rightarrow i = \frac{\lambda f'_2}{a}$$

4. .

Les deux ondes arrivant en M étant cohérentes entre elles, la formule de Fresnel donne :

$$I(y) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{ay}{f'_2} \right) \right)$$



5. D'après le théorème de Malus, P_2 et H' appartiennent à la même surface d'onde relative à S : $(SP_2) = (SH')$.
Ainsi, $(SP_1) - (SP_2) = (H'P_1) = H'P_1 \simeq \frac{ay_S}{f'_2} > 0$ dans les conditions de Gauss.
En reprenant le raisonnement de la Q.2, on aboutit à :

$$\delta_{1/2}(M) = \frac{a}{f'_2} (y + y_S)$$

Le déplacement de la source S selon l'axe Oz ne change pas la différence de marche.

Effet du déplacement de S : L'ordre d'interférences devient donc $p(M) = \frac{ay}{\lambda f'_2} + \underbrace{\frac{ay_S}{\lambda f'_2}}_{\text{indépendant de } M}$. Ainsi, la

forme des franges est inchangée, l'interfrange est inchangé : le déplacement de S induit une translation de la figure d'interférences (vers les y décroissants si $y_S > 0$).

Je vous mets une correction manuscrite pour la fin de l'exercice. Les numéros des Q. ne sont pas respectés.

Q8. Avec une fente source de largeur c , les pixels P_1 et P_2 sont éclairés par des sources incohérentes spatialement entre elles, donnant chacune leur figure d'interférence. Ces figures se superposent au point M , entraînant un brouillage des franges d'interférences.

Critère : pour une source monochromatique, mais étendue spatialement, les franges sont non brouillées tant que $|\Delta \phi_M(\text{demi-étendue spatiale})| < \frac{1}{2}$.

Elles se brouillent dès que $|\Delta \phi_M(\text{étendue spatiale})| = \frac{1}{2}$.

• Cas $y_s = 0$: $P_M(y_s = 0) = \frac{ay}{\lambda f_1}$

• Cas $y_s = \frac{c}{2}$: $P_M(y_s = \frac{c}{2}) = \frac{a}{\lambda f_1} (\frac{c}{2} + y)$

• $\frac{a}{\lambda f_1} \frac{c}{2} = \frac{1}{2} \Rightarrow c_{max} = \frac{\lambda f_1}{a} = 3,35 \text{ mm}$

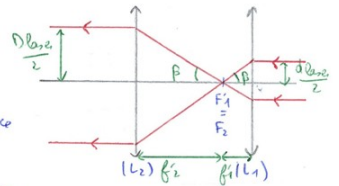
• A.N. $c_{max} = \frac{589 \cdot 10^{-9} \cdot 45,5 \cdot 10^{-2}}{80 \cdot 10^{-6}} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Il est très difficile d'obtenir une figure plus lumineuse avec un dispositif à division du front d'onde avec une source large, car dès qu'on ouvre la fente le brouillage apparaît pour moins de 4 mm de largeur.

II.B.3) Montage avec laser

22) Élargisseur de faisceau :

On souhaite créer un système $\{L_1\} + \{L_2\}$ afocal : il faut que le foyer image de L_1 coïncide avec le foyer objet de L_2 : $F_1 = F_2$. La distance $(L_1) - (L_2)$ doit donc être $f_1 + f_2$.



Géométriquement : $\tan(\theta) = \frac{d_{laser}/2}{f_1} = \frac{d_{laser}/2}{f_2}$

$\Rightarrow \frac{d_{laser}}{d_{laser}} = \frac{f_2}{f_1} = 4,33$

Q.23. Les pixels sont éclairés par le faisceau de lumière laser.

$\delta_{1,1}(M) = (S_M)_1 - (S_M)_1 = (P_1 M) - (P_1 M)$

* $\delta_{2,1}(M) = (P_2 M) - (P_1 M) = -\delta_{1,2}(M)$ fait à la question Q4.

$\delta_{2,1}(M) = -\frac{ay}{f_2}$

* $\delta_{3,1}(M) = (P_3 M) - (P_1 M) = +\frac{az}{f_2}$ face analogie

* $\delta_{3,1}(M) = (P_3 M) - (P_1 M) = \underbrace{(P_3 M) - (P_2 M)}_{+\frac{az}{f_2}} + \underbrace{(P_2 M) - (P_1 M)}_{-\frac{ay}{f_2}}$

$\delta_{3,1}(M) = \frac{a}{f_2} (z - y)$

* $\Delta \phi_{1,1}(M) = 2\pi \frac{\delta_{1,1}(M)}{\lambda} \Rightarrow$ les ondes sont en phase

si $\Delta \phi_{1,1}(M) = m \cdot 2\pi$, soit $\delta_{1,1}(M) = m \cdot \lambda$, $m \in \mathbb{Z}$

$\rightarrow \delta_{1,1}(M) = \frac{ay}{f_1} = k \cdot \lambda$, $k \in \mathbb{Z} \Rightarrow y_k = k \cdot \frac{\lambda f_1}{a}$, $k \in \mathbb{Z}$

$\rightarrow \delta_{2,1}(M) = \frac{az}{f_2} = m \cdot \lambda$, $m \in \mathbb{Z} \Rightarrow z_m = m \cdot \frac{\lambda f_2}{a}$, $m \in \mathbb{Z}$

$\rightarrow \delta_{3,1}(M) = \frac{az}{f_2} - \frac{ay}{f_1} = m \cdot \lambda - k \cdot \lambda = (m - k) \cdot \lambda$, $(m - k) \in \mathbb{Z}$

Si les ondes issues de P_1 , P_2 et P_3 sont en phase, alors celles issues de P_1 et P_3 sont aussi en phase : elles sont donc toutes en phase.

26) Échelle de l'image : Diamètre du trou : réel : $d = 4,0 \text{ mm}$

image : $d' = 8,5 \text{ mm}$

Distance entre deux maxima selon l'axe vertical (on voit clairement les maxima d'intensité) : $\Delta y = \frac{\lambda f_2}{2}$

On mesure sur l'image : $12 \Delta y' = 7,5 \text{ cm}$

Distance a entre 2 pixels :

$a = \frac{\lambda f_2}{\Delta y} = \frac{\lambda f_2}{12 \Delta y'} \times \frac{12 d'}{d}$ A.N. : $a = 82,3 \text{ } \mu\text{m}$

Incertitudes :

Grandeur	Source d'incertitude	Incertitude - type
d'	Précision de la règle	$u(d') = \frac{1 \text{ mm}}{2\sqrt{3}} = 0,29 \text{ mm}$
$12 \Delta y'$		$u(12 \Delta y') = 0,23 \text{ mm}$

On considère $u(d) = 0$.

On nous donne : $u(\lambda) = 10 \text{ nm}$; $u(f_2) = 0,30 \text{ cm}$.

Composition d'incertitude :

$u(a) = a \times \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(f_2)}{f_2}\right)^2 + \left(\frac{u(12 \Delta y')}{12 \Delta y'}\right)^2 + \left(\frac{u(d')}{d'}\right)^2}$

$= 3,3 \text{ } \mu\text{m}$

On arrondit à $4 \text{ } \mu\text{m}$.

Donc : $a = (82 \pm 4) \text{ } \mu\text{m}$