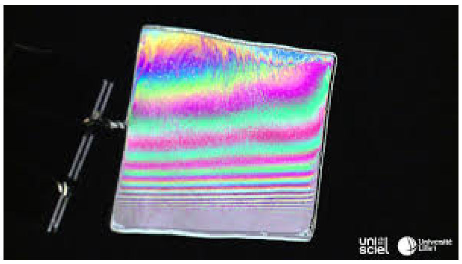
Exercices d'optique

Exercice 1 Couleurs d'une lame savonneuse



Une bulle d'eau savonneuse, d'épaisseur e et d'indice $n = 1{,}3$ est éclairée sous incidence normale. Le coefficient de réflexion est faible et les ondes issues de deux réflexions ou plus ont une intensité négligeable.

1. Quel déphasage présentent entre elles les deux ondes réfléchies ?
2. A quelle condition une lumière de longueur d'onde dans le vide λ_0 est-elle réfléchie avec une intensité maximale ?
3. Pourquoi la bulle, éclairée en lumière blanche prend-elle des reflets irisés lorsqu'elle devient très mince ? Donner un ordre de grandeur de l'épaisseur d'une bulle colorée.

Exercice 2 Mesure du temps de cohérence d'un Laser

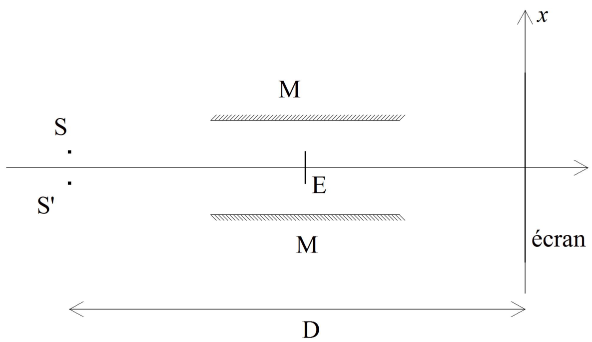
On considère deux faisceaux lumineux monochromatiques (issus par exemple de deux sources lasers). Les deux faisceaux sont de longueurs d'onde voisines et de pulsations respectives ω_1 et ω_2, avec $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$. Les ondes associées aux faisceaux sont caractérisées par leurs champs électriques (supposés colinéaires) $\overrightarrow{E}_1$ et $\overrightarrow{E}_2$ et elles éclairent un détecteur dont le temps de réponse est τ (avec $\tau \gg 1/\omega_1$ et $1/\omega_2$). On rappelle qu'un détecteur optique est sensible à l'intensité lumineuse reçue, proportionnelle à $< E^2 >$, où $\vec{E}$ est le champ électrique associé à l'onde reçue par le détecteur, et $< X >$ désigne la moyenne temporelle de X sur le temps caractéristique du détecteur.

1. Expliciter la dépendance temporelle des champs électriques.
2. En déduire la forme du champ électrique associé à l'onde résultante.
3. Écrire l'expression de l'intensité lumineuse mesurée par le détecteur et exprimer une condition sur le temps de réponse du détecteur pour qu'il puisse détecter le phénomène de battement.
   On considère l'application suivante : l'œil est un récepteur dont le temps de réponse est de l'ordre de 0,1 s.
4. Quelles ondes lumineuses l'œil est-il capable de distinguer ?
5. Deux ondes de fréquences légèrement différentes parviennent à l'œil. À quelle condition l'œil est-il susceptible de discerner des battements ?

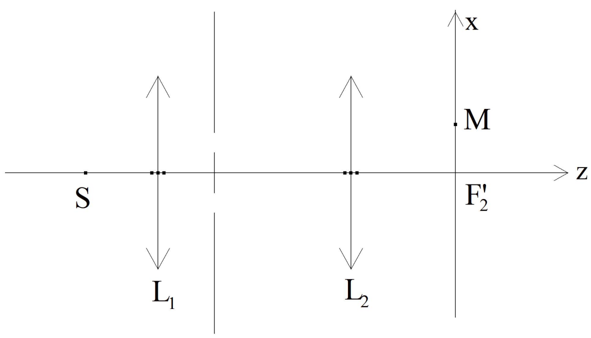
   On étudie les interférences produites par deux lasers identiques. On considère que ces deux sources émettent des trains d'ondes d'amplitude constante A_0, qui ont tous la même durée t_c, mais des pulsations ω_1 et ω_2 très légèrement différentes. Chaque onde est caractérisée par une intensité I_0. On utilise un détecteur ayant un temps de réponse t_R très supérieur à la période des ondes, mais très inférieur à la durée d'émission des trains d'ondes. On suppose également que la différence de pulsation $\omega_1 - \omega_2$ est très faible de sorte que $t_R \lll 1/(\omega_1 - \omega_2)$
6. Exprimer l'intensité $I(t)$ mesurée par le détecteur en fonction de I_0, t, ω_1, ω_2 et des phases aléatoires φ_1 et φ_2 des deux ondes. Quelle est la valeur moyenne calculée sur une durée grande devant t_c ?
7. En supposant que les deux trains d'ondes sont de même durée t_c, déterminer les valeurs moyennes (sur une durée grande devant t_c) :
   $$< \cos[\varphi(t+T) - \varphi(t)] > \quad \text{et} < \sin[\varphi(t+T) - \varphi(t)] >$$
   avec $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ le déphasage entre les deux ondes.
8. Le signal de sortie du détecteur $u(t)$ est traité par un système informatique qui détermine la fonction de corrélation $g(T)$ définie par :
   $$g(T) = \frac{< I(t)I(t+T) >}{< I >^2}$$
   (a) Calculer $g(T)$.
   (b) Tracer le graphe de $g(T)$.
   (c) En déduire une mesure de t_c.

Exercice 3 Interférences avec deux miroirs

On considère le montage représenté ci-dessous. M_1 et M_2 sont des miroirs plans distants de 2ℓ. S et S' sont des sources ponctuelles monochromatiques incohérentes, distantes de $2a$, de même longueur d'onde λ et de même intensité. L'écran opaque E supprime la lumière directe. Déterminer l'intensité lumineuse $I(x)$ sur l'écran, ainsi que le contraste des franges.

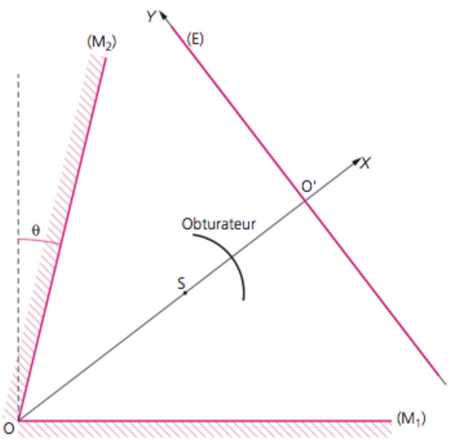


Exercice 4 Fentes d'Young



1. Deux fentes d'Young parallèles à Oy distantes de a, infiniment fines, sont placées derrière une lentille L_1 convergente de distance focale f_1. Une fente source est placée dans le plan focal objet de L_1, parallèlement à (Oy). La source est monochromatique. Exprimer l'éclairement sur un écran placé dans le plan focal image d'une deuxième lentille convergente L_2. Qu'observe-t-on sur l'écran ?
2. On éclaire maintenant en lumière blanche et on place la fente d'entrée d'un spectroscope dans le plan focal image de L_2 parallèlement à (Oy). On déplace la fente autour de F_2'. Qu'observe-t-on ? Comment choisir la largeur de la fente d'entrée du spectroscope ? Données : $f_2' = 1\text{m}$ et $a = 0{,}1\text{mm}$.
3. Quand on éclaire avec une lampe à vapeur de sodium ($\lambda_1 = 589{,}0\text{nm}$ et $\lambda_2 = 589{,}6\text{nm}$) calculer l'éclairement sur l'écran. Pour quel ordre d'interférence obtient-on le premier brouillage ? On veut un brouillage en $x = 0$. On ajoute une lame d'épaisseur e et d'indice n devant l'une des fentes d'Young. Calculer l'épaisseur e nécessaire avec $n = 1{,}5$.

Exercice 5 Dispositif interférentiel à deux miroirs inclinés



On considère deux miroirs plans M_1 et M_2 disposés comme indiqué ci-contre, avec un angle proche de $\pi/2$ (égal à $\pi/2 - \theta$ avec $\theta \ll 1$). On place dans le plan bissecteur du dièdre formé par les deux miroirs une source ponctuelle S émettant une onde monochromatique de longueur d'onde λ. La source S est à la distance d de l'arête du dièdre.

1. Montrer que la source primaire donne naissance, après une double réflexion des rayons lumineux sur les deux miroirs, à deux sources secondaires S_1 et S_2 qu'on caractérisera.

Les deux sources secondaires émettent des ondes cohérentes qui interfèrent. On observe ces interférences sur un écran $O'YZ$ placé perpendiculairement à la bissectrice des deux miroirs ; on note D la distance OO'. On a placé un obturateur de façon à bloquer la lumière issue de S susceptible d'atteindre directement l'écran d'observation.

2. Représenter la marche des deux rayons issus de S qui viennent interférer en un point M de l'écran. Représenter également la zone d'interférence. Le dispositif fonctionne-t-il par division du front d'onde ?
3. Monter que l'angle $\widehat{S_1OS_2} = 4\theta$ et que la distance entre les deux sources secondaires S_1 et S_2 est $a = 4d\theta$.
4. En déduire l'expression de l'interfrange i en fonction de λ, d, D et θ.
5. Donner l'expression de la largeur L du champ d'interférence intercepté par l'écran ainsi que le nombre N de franges brillantes observées.
6. Calculer i, a, L et N pour λ=0,60 μm, $\theta = 2,0 \times 10^{-3}$ rad, $d = 10$ cm et $D = 70$ cm.
7. La source primaire est maintenant étendue de façon symétrique autour de S : elle constitue un arc de cercle, centré en O et de largeur angulaire 2β. Déterminer la valeur maximale de β donnant des franges d'interférences visibles sur l'écran d'observation.
8. La source S, ponctuelle, émet maintenant une lumière contenant deux raies monochromatiques de longueur d'onde λ_1 et λ_2 telles que $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda \ll \lambda_m$ où $\lambda_m = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$. Donner l'expression de l'éclairement sur l'écran et déterminer le lieu des points où l'on observe un brouillage des franges d'interférence.

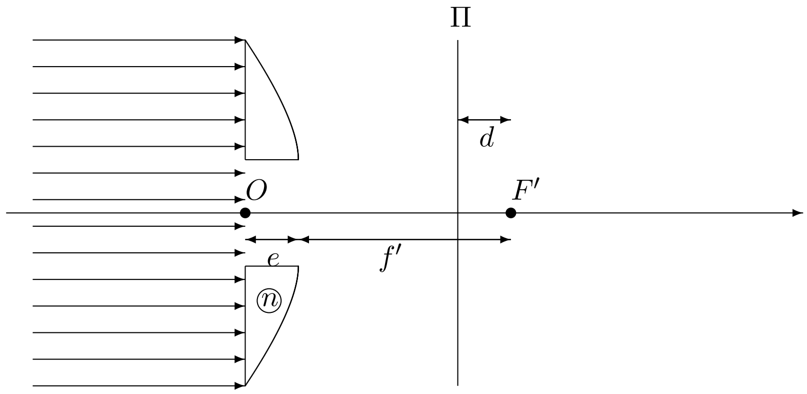
Exercice 6 Trous d'Young : figure d'interférences observée dans le plan focal ou à $2f'$

On réalise une expérience d'interférences avec deux fentes d'Young très fines distantes de a et éclairées sous incidence normale par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ. On place derrière les fentes une lentille de distance focale f'.

1. Déterminer l'interfrange i sur un écran placé à une distance $d = f'$ de la lentille.
2. à une distance $d = 2f'$ de la lentille.

Exercice 7 Lentille percée

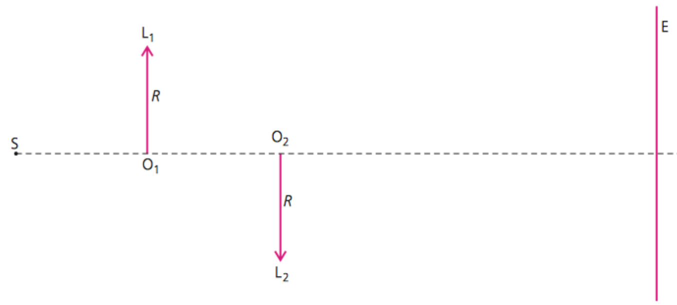
On considère le dispositif suivant : une lentille convergente plan convexe de focale f' est percée en son centre d'un trou circulaire. Elle est éclairée en incidence normale par un faisceau de lumière parallèle d'un laser He-Ne rouge.



1. Quelle est la longueur d'onde approximative de ce rayonnement ?
2. Reproduire le schéma et y représenter la zone d'interférence.
3. Décrire l'allure de la figure d'interférence observée dans le plan Π perpendiculaire à l'axe optique situé à la distance d en avant de F'.
4. Calculer la différence de marche $\delta(r)$ en un point M du plan Π situé à une distance r de l'axe optique, en fonction de n, e, d et r.
5. Calculer la valeur approchée de l'interfrange au voisinage de M, avec d=20 cm et r=6 mm.

Exercice 8 Bilentille de Meslin

Cette expérience permet de prouver expérimentalement qu'il se produit un déphasage de π (ou de façon équivalente une différence de marche de $\lambda/2$) au passage par un point de convergence, l'image d'un objet ponctuel par exemple. Comme dans le dispositif de la bilentille de Billet, on scie une lentille mince convergente selon un diamètre mais au lieu d'écarter latéralement les demi-lentilles, on les écarte longitudinalement. Soit S une source ponctuelle de lumière monochromatique de longueur d'onde λ ; soient $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ deux demi-lentilles convergentes de rayon R et de même distance focale f', placées comme indiqué sur la figure.

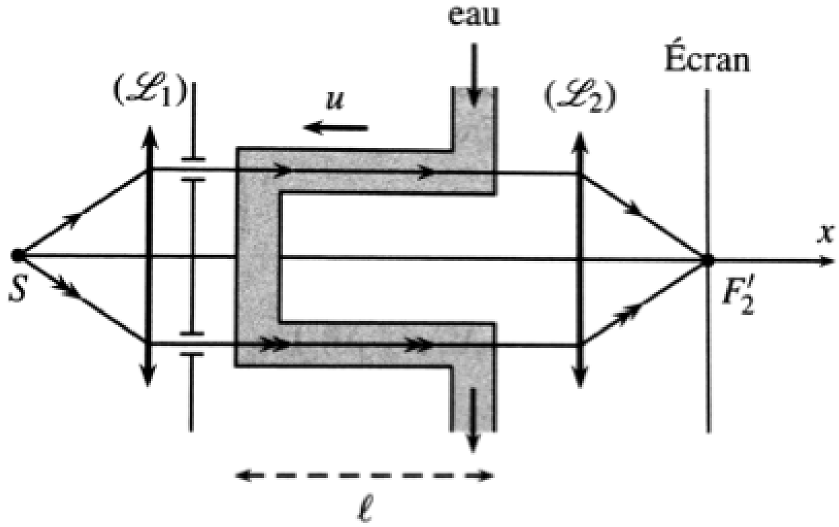


On suppose f'= 20 cm, O_1O_2= 10 cm, R= 2cm, SO_1= 30 cm et l'écran est placé à D= 85 cm de la source S.

1. Déterminer la zone d'interférence et décrire l'allure des franges d'interférence observées. On précisera si le centre est brillant ou sombre.
2. Déterminer le nombre de franges brillantes visibles dans le plan de l'écran E.

Exercice 9 Expérience de Fizeau

En 1851, Hyppolite Fizeau réalisa l'expérience d'interférométrie suivante afin de vérifier l'hypothèse émise par Fresnel selon laquelle la vitesse de la lumière mesurée dans un référentiel en mouvement par rapport à l'éther n'obéissait pas à la loi de composition des vitesses galiléennes.



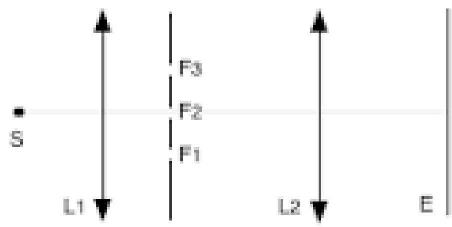
La source S ponctuelle est supposée monochromatique (λ_0=530 nm) même si Fizeau utilisa la lumière solaire. L'eau, initialement au repos est mise en mouvement avec une vitesse d'écoulement constante u. On notera $v = \frac{c}{n}$ la vitesse de la lumière dans l'eau.

1. Estimer la différence des temps de propagation entre les deux rayons qui interfèrent en F_2' et en déduire la différence de marche δ correspondante :
   — en utilisant la loi de composition des vitesse galiléenne : $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$, où $\vec{v}'$ est la vitesse mesurée dans le référentiel $\mathcal{R}'$ en translation à la vitesse $\vec{u} = u\vec{e}_x$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}$ où est mesurée $\vec{v}$.
   — en utilisant le loi de composition des vitesses relativiste (avec les mêmes notations) :

$$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}$$

2. L'expérience de Fizeau consiste à observer les franges d'interférences avec l'eau immobile (u=0) puis à mesurer le déplacement des franges quand on met l'eau en mouvement. Donner ce déplacement Δp exprimé en nombre de franges, dans les deux cas ci-dessus.
3. Les valeurs des différents paramètres correspondants à l'expérience historiques de Fizeau sont : n= 1,33, ℓ= 1,5 m et u= 7 m.s^{-1}.
   Quelle est la loi de composition des vitesses qui donne un résultat compatible avec l'expérience sachant que Fizeau mesura un décalage de 0,23 franges, doublant l'effet en inversant le sens du courant.

Exercice 10 Trois trous d'Young

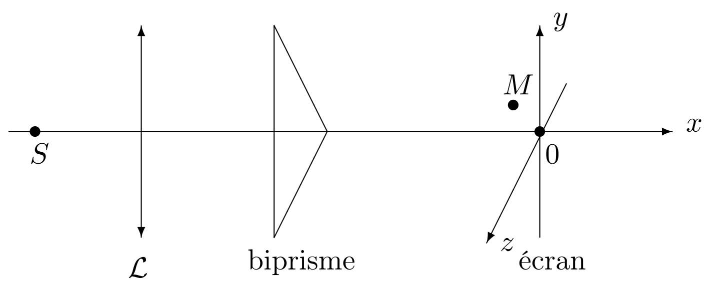


On réalise l'expérience des trous d'Young, utilisant deux lentilles convergentes, mais avec trois trous équidistants de a. Les deux lentilles sont identiques de focale f'. La source S, ponctuelle, monochromatique de longueur d'onde λ et l'écran sont respectivement placés aux foyers objet et image des deux lentilles.

1. Faire un schéma du dispositif expérimental. Quel est le rôle de chaque lentille ?
2. Evaluer la différence de marche δ entre les différents rayons interférant en un point M de l'écran.
3. Quelle est l'intensité lumineuse observée sur l'écran en fonction de $\cos\phi$, où $\phi = 2\pi\delta/\lambda$? On notera I_0 l'intensité en un point de l'écran quand un seul des trous d'Young laisse passer la lumière.
4. Représenter graphiquement l'allure de l'intensité sur l'écran. Expliquer l'annulation pour $\phi = 2\pi/3$.
5. Essayer de prédire l'allure pour N fentes (nombre de minima et de maxima secondaires entre deux maxima successifs, largeur des pics principaux).

Exercice 11 Biprisme de Fresnel

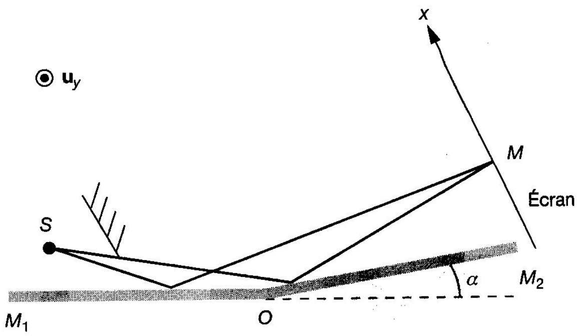
Soit S une source ponctuelle monochromatique de longueur d'onde λ placé au foyer objet d'une lentille convergente. Les prismes sont d'indice n et d'angle A faible.



1. Déterminer la zone d'interférences.
2. On place le point O au centre de la zone d'interférence. Soit M un point du plan (Oyz).
   (a) Evaluer la différence de marche δ_O en O.
   (b) Evaluer la différence de marche δ en M.
   (c) Décrire la figure d'interférences.
3. Calculer l'interfrange i et faire l'application numérique avec $A = 10^{-3}$ rad, $n = 1,5$ et $\lambda = 600$ nm. Commenter.

Exercice 12 Figure d'interférences des miroirs de Fresnel

Deux miroirs d'arête commune Oy font un angle $\alpha \ll 1$. Une source ponctuelle monochromatique S éclaire ces miroirs et on observe sur un écran éloigné faisant un angle de $\pi/2$ avec les miroirs. Un cache empêche la lumière d'atteindre directement l'écran.



Soit M un point de l'écran atteint par deux rayons, réfléchis sur chacun des miroirs.

1. D'où semblent provenir ces deux rayons ? En déduire graphiquement la zone où ont lieu les interférences.
2. Définir et préciser les positions des deux sources secondaires S_1 et S_2 pour ce dispositif. Sont-elles cohérents, en phase ? On n'oubliera pas que la réflexion sur un miroir introduit un déphasage de π pour l'amplitude.
3. Décrire la forme de la figure d'interférences sur l'écran.
4. Quelle est la différence de marche entre les rayons qui interfèrent en M ? On note $OS = d$ et la distance entre O et l'écran vaut ℓ.
5. En déduire l'expression de l'intensité sur l'écran.

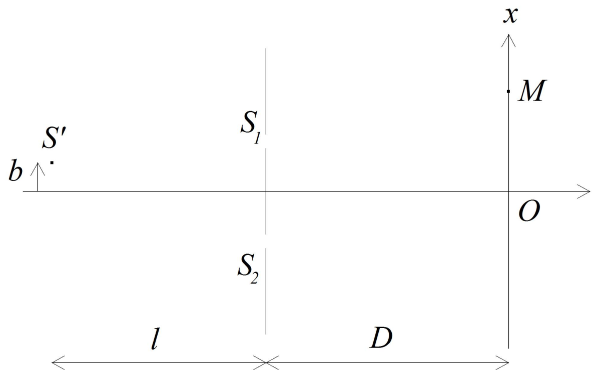
Exercice 13 Miroirs de Fresnel éclairés en lumière parallèle

On considère un dispositif des miroirs de Fresnel. Ils sont éclairés par une source monochromatique à l'infini (ie un faisceau de lumière parallèle) arrivant avec un angle d'incidence θ_i par rapport au miroir M_1. Tracer les rayons qui interfèrent en M après réflexion sur chacun des miroirs. Calculer le déphasage correspondant au point M en fonction de θ_i et α.

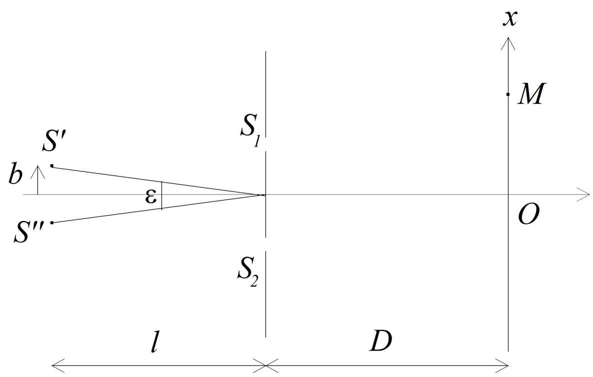
Exercice 14 Fentes d'Young éclairées par deux sources incohérentes

Une source monochromatique S' de longueur d'onde λ éclaire un dispositif classique de fentes d'Young distantes de a. La source S' n'est pas sur l'axe des fentes, mais à une distance b de celui-ci. On suppose $|x| \ll D$, $a \ll D$, $a \ll l$, $b \ll l$.

1. En tenant compte de ces approximations, exprimer la différence de chemin optique : $\delta' = (S'S_2M) - (S'S_1M)$ en fonction de x, a, b, D et l où x est l'abscisse de M.



2. Une seconde source, S'', identique à la précédente est placée symétriquement à S' par rapport à l'axe du dispositif de fentes. Les sources S' et S'' sont supposées incohérentes.

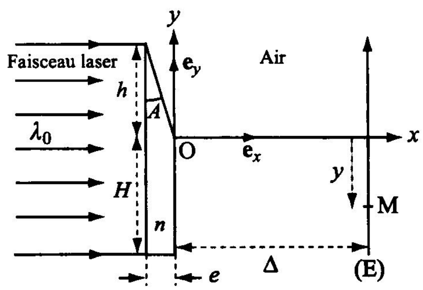


   Déterminer l'intensité totale $I(x)$ dans le plan de l'écran ; montrer que l'on obtient des franges dont on exprimera le contraste V en fonction de a, λ et de l'angle ϵ sous lequel sont vues les deux sources depuis les fentes. $\epsilon = 2b/l$.

3. On imagine qu'un dispositif adapté permet de faire varier a, les paramètres ϵ et λ restant fixes. Tracer la courbe donnant V en fonction de a. Montrer que cette courbe permet de déterminer ϵ.

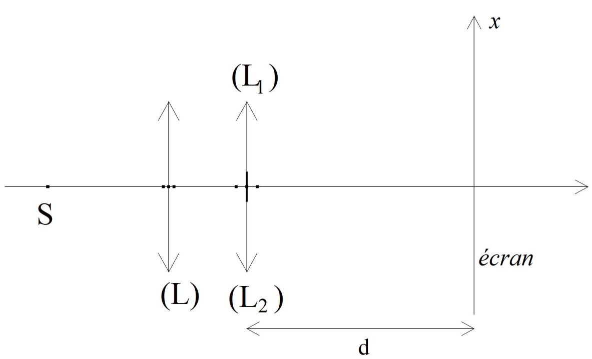
Exercice 15 Interférences d'ondes planes

Soit le prisme d'indice n dans l'air, de section droite représentée ci-dessous, d'angle A petit. Il est éclairé sous incidence normale par un faisceau laser de longueur d'onde dans le vide λ_0. On observe les interférences sur un écran (E), perpendiculaire à la direction du faisceau laser, situé à la distance Δ du prisme. Tracer les faisceaux qui interfèrent. Déterminer l'interfrange puis l'intensité résultante en fonction de y.



Exercice 16 Demi-lentilles de Billet

Un dispositif interférentiel est composé d'une source ponctuelle de lumière monochromatique de longueur d'onde λ au foyer d'une lentille L éclairant deux demi-lentilles L_1 et L_2 obtenues à partir d'une même lentille convergente de distance focale $f' = 20$ cm sciée suivant un diamètre et écartées symétriquement par rapport à l'axe optique du système d'une distance $2a = 2$ mm. Un cache opaque supprime la lumière directe. $\lambda = 0{,}6$ μm



1. On observe sur un écran à une distance $d = 40$ cm du plan des demi-lentilles. Décrire le phénomène d'interférence observé. Que se passe-t-il si l'on remplace S par un fil source perpendiculaire au plan de figure ?
2. Calculer l'intensité lumineuse et le nombre de franges observables.

Exercice 17 Film de savon

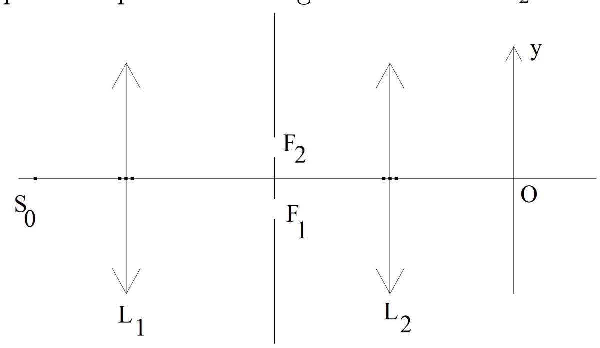
Une plaque percée d'un trou est plongée dans du savon liquide, il se forme un film mince à l'intérieur du trou. On fait tourner la plaque, maintenue horizontale, autour de l'axe vertical passant par le centre du trou. On éclaire la couche en lumière blanche et on observe un centre noir, des cercles colorés et une teinte blanche sur les bords. Interpréter.

Exercice 18 Elargissement des raies par effet Doppler

Un observateur est placé en O fixe. Un atome S émet un top toutes les T_0 secondes. On pose $f_0 = 1/T_0$. L'atome se déplace sur l'axe Ox à la vitesse constante v. A chaque top l'atome émet une vibration lumineuse qui se propage de façon isotrope à la vitesse de la lumière. Quelle est la fréquence d'arrivée en O des tops quand S se rapproche ou s'éloigne de O ? Calculer l'écart en fréquence qui en résulte : $\Delta f = f_{max} - f_{min}$. En pratique $v \ll c$. Simplifier Δf. On suppose que l'atome émetteur est un atome d'hydrogène traité comme un gaz parfait monoatomique, en équilibre thermodynamique à la température T. Calculer la largeur Doppler si $T = 2000$K.

Exercice 19 Effet d'une lame

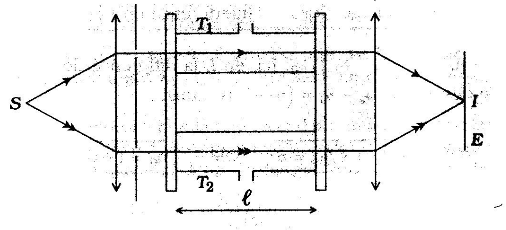
Le schéma ci-dessous représente le dispositif des fentes d'Young. S_0 est une source ponctuelle monochromatique au foyer objet de la lentille L_1. Les deux fentes F_1 et F_2 sont espacées de $2a$. L'écran d'observation est placé au plan focal image de la lentille L_2.



1. Calculer l'éclairement en tout point d'ordonnée y de l'écran.
2. Entre la lentille L_1 et la fente F_2, on introduit une lame de verre d'indice n et d'épaisseur e. En la considérant d'abord verticale, dire dans quel sens se déplace le système de franges et combien de franges défilent en O.
3. On incline maintenant la lame d'un petit angle α par rapport à la verticale. Dans quel sens défilent les franges par rapport à la situation 2. Combien de franges défilent en O. Quel angle minimal peut-on détecter sachant que l'on peut détecter au minimum une variation de $1/10$ d'ordre d'interférence.

Exercice 20 Interféromètre de Rayleigh, indice absolu de l'air

L'interféromètre de Rayleigh (dérivé du dispositif d'Young) est représenté ci-dessous.

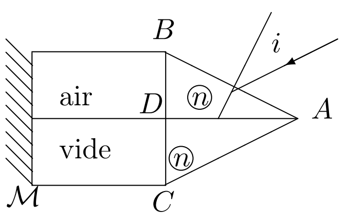


Lorsque les tubes T_1 et T_2 sont remplis d'air dans les conditions normales, le montage est symétrique et on observe une frange brillante au centre I de l'écran. La source S émet la radiation $\lambda = 577$ nm, la longueur commune des tubes est $\ell = 0{,}20$ m. T_2 étant toujours rempli d'air dans les conditions normales, on fait progressivement le vide dans T_1.

1. Dans quelle sens défilent les franges en I ?
2. Pendant le pompage, 101 franges brillantes défilent en I, lorsque la pression dans T_1 est quasi nulle, on observe en I une frange sombre. En déduire l'indice absolu n_0 de l'air dans les conditions normales.

Exercice 21 Mesure de l'indice de l'air

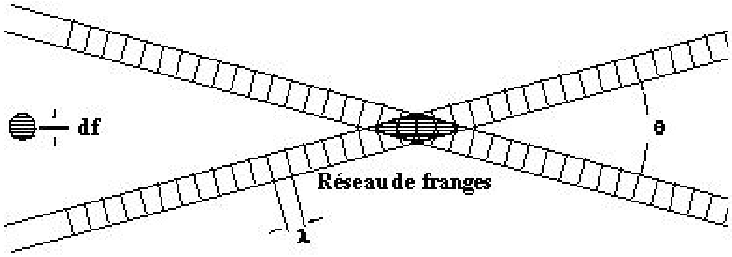
ABC est un triangle équilatéral formé de deux prismes d'indice n accolés avec entre les deux une lame semi-réfléchissante DA. Il y a au moins une réflexion sur une des faces du prisme.



1. Le rayon incident sur le miroir $\mathcal{M}$ doit être orthogonal à celui-ci. Calculer l'angle d'incidence i sur le prisme.
2. Tracer les rayons.
3. Derrière la face CD on fait progressivement le vide. La pression varie de façon quasi linéaire au cours du temps. L'indice de l'air est noté n_2 et on a $p(n) = k(n-1)$ où k est une constante et p la pression. De plus, les rayons sortants interfèrent à travers un système optique qui fournit une tension proportionnelle à l'intensité. Donner l'allure de la tension en fonction du temps.
4. Avec $l = 25$ cm, $\lambda = 500$ nm, on compte 10 variations de la tension lorsque le vide est établi derrière CD. Calculer l'indice n_2 de l'air.

Exercice 22 Vélocimétrie laser

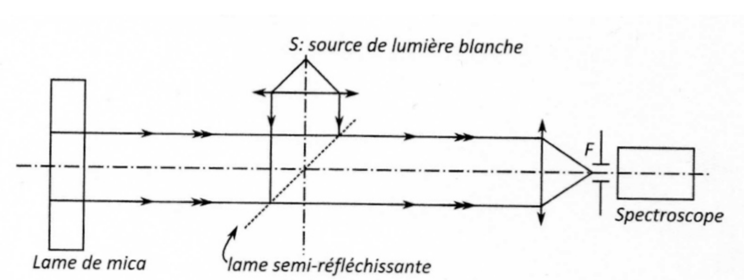
On considère deux OOPM dans le vide, polarisées rectilignement suivant $\overrightarrow{u}_z$, de même pulsation ω de vecteurs d'onde $\overrightarrow{k}_1$ et $\overrightarrow{k}_2$ faisant entre eux un angle θ et chacun un angle $\theta/2$ avec l'axe (Ox).



1. Exprimer les champs électriques $\overrightarrow{E}_1(M,t)$ et $\overrightarrow{E}_2(M,t)$ en notation complexe en supposant un déphasage nul en O à $t=0$. Donner les surfaces d'ondes pour $\overrightarrow{E}_1$ et $\overrightarrow{E}_2$. Calculer le champ total. Est-ce une OPPM ?
2. On envoie un fluide à la vitesse $\overrightarrow{v} = v\vec{u}_y$ avec des particules réfléchissantes (peu) et celui-ci est éclairé par un laser dont le faisceau est scindé en deux faisceau d'égale intensité et de largeur d. On enregistre à l'aide d'une photodiode une alternance de franges sombres et brillantes à la fréquence f.
   — Exprimer l'intensité I. Décrire la figure d'interférences et calculer l'interfrange i.
   — $\theta = 20°$, $\lambda = 633nm$. On relève $f = 1,34MHz$. Calculer la vitesses v. Quelle est la couleur du laser ?
3. En fait, l'analyse spectrale du signal révèle un étalement Δf bien que v soit uniforme. A quoi est-il dû ? Calculer $\Delta f/f$ en fonction de i et d. Quelle valeur de d faut il choisir pour avoir une incertitude relative sur la vitesse inférieure à $0,1\%$?
   éléments de réponse : $v = if$, $\Delta f/f = \Delta v/v = i/d$

Exercice 23 Mesure de l'épaisseur d'une lame de Mica

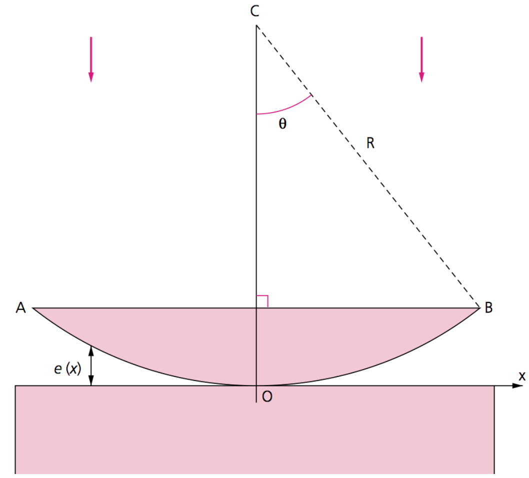
Le montage suivant permet d'obtenir des interférences à 2 ondes aboutissant en lumière blanche à la formation d'un spectre cannelé. L'étude de ce spectre permet alors de mesurer l'épaisseur d'une lame mince.



F est la fente d'un spectroscope fournissant à l'observateur le spectre de la lumière. Dans ce montage, les interférences se produisent entre les rayons qui sous incidence normale se réfléchissent d'une part sur la face avant de la lame de mica et d'autre part sur la face arrière de cette même lame. On désignera par n l'indice de cette lame supposé constant $n = 1{,}57$ et on notera e son épaisseur. Entre $\lambda_1 = 470$ nm et $\lambda_2 = 630$ nm, on observe $N = 40$ bandes sombres dans le spectre. En déduire l'épaisseur de la lame.

Exercice 24 Anneaux de Newton

On considère le dispositif des anneaux de Newton. On utilise pour cela une lentille plan convexe de rayon R et d'angle d'ouverture θ. La lentille repose par sa face courbe en O sur un plan de verre Ox. Il existe donc entre le plan et la lentille une lame d'air d'épaisseur $e(x)$ variable, avec $e(0)=0$. On suppose que e reste faible devant le rayon R de la face courbe. Une source monochromatique étendue éclaire la lentille en incidence normale.



1. Rappeler quelles ondes interférent et préciser le lieu de localisation des franges d'interférence.
2. Calculer la différence de marche $\delta(x)$ entre deux rayons susceptibles d'interférer.
3. Exprimer $e(x)$ en fonction de x ; décrire la figure d'interférence. Quel aspect a la frange centrale ?

Exercice 25 Franges du coin d'air

Un interféromètre de Michelson est constitué par une lame semi-réfléchissante, non-absorbante appelé séparatrice (Sp) dont les facteurs de transmission et de réflexion valent $1/2$ et de deux miroirs plans M_1 et M_2 perpendiculaires l'un à l'autre. La lame (Sp) est inclinée de 45° par rapport aux normales à M_1 et M_2. Le miroir M_1 est fixe, le miroir M_2 peut être déplacé parallèlement à lui-même grâce à un chariot sur lequel il est monté. La position du chariot est repérée par son abscisse x. Initialement l'interféromètre est réglé de façon à faire apparaître dans le champ quelques franges rectilignes. La frange brillante d'ordre zéro est au centre du champ pour $x = x_0$.

1. Préciser le type de franges que l'on observe. Où sont-elles localisées ? Peut-on les projeter ? Comment s'assurer que la frange brillante est d'ordre zéro ?
2. On introduit devant M_1 et parallèlement à celui-ci une lame de mica à faces parallèles d'indice n et d'épaisseur e et on opère ici en lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0. Quelle est la valeur x_1 de x pour laquelle l'ordre d'interférence est nul au centre du champ ?

Exercice 26 Franges d'égale inclinaison

Les miroirs M_1 et M_2 sont ici supposés réglés de façon à ce qu'ils soient rigoureusement perpendiculaires aux bras de l'interféromètre. L'image M_2' de M_2 est alors rigoureusement parallèle à M_1. On note ici x_0 la valeur particulière de x au contact optique. La position du chariot est repérée avec une précision δx de l'ordre de $1/500$ mm. L'ensemble est éclairé par une source S large, de façon à ce que des rayons de différentes inclinaisons pénètrent dans l'interféromètre. A la sortie, on dispose une lentille convergente et on enregistre l'intensité lumineuse grâce à un détecteur placé au foyer F' de cette lentille. L'entrée du détecteur est limitée par un diaphragme de très petite dimension.

1. Quel type de franges obtient-on avec ce réglage de l'interféromètre ?
2. Quelle est en fonction de x et x_0 la différence de marche δ des rayons qui interfèrent en F'.
3. La source S est monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ_0. On part de $x = x_0$ (l'intensité est alors maximale) et on augment progressivement x, l'intensité lumineuse en F' passe alors par des maxima et des minima.
   (a) Montrer que cette intensité se met sous la forme $I = I_0(1 + f(\delta))$ et expliciter $f(\delta)$.
   (b) La source S est une lampe à vapeur de mercure dont la raie verte est isolée grâce à un filtre. On a noté $x_0 = 30{,}255$ mm. En déplaçant le chariot jusqu'à $x_1 = 30{,}803$ mm, on voit apparaître successivement 2000 maxima lumineux en F' extrémités comprises. En déduire la longueur d'onde de cette raie verte et évaluer la précision de ce procédé. Comment pourrait-on l'augmenter ?

Exercice 27 Etude d'un doublet à l'aide de l'interféromètre de Michelson

On reprend le montage décrit à l'exercice précédent. La source S correspond maintenant à un doublet de deux raies de longueurs d'onde voisines λ_1 et $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda \ll \lambda_1$. Ces deux raies ont même intensité. Montrer que l'intensité en F' s'écrit : $I = I_0(1 + f(\delta))$ et expliciter $f(\delta)$. Montrer que l'expression de $f(\delta)$ fait apparaître deux périodes en δ que l'on notera a_1 et a_2 avec $a_1 \ll a_2$. Tracer l'allure de I en fonction de δ. Montrer que le contraste s'annule pour certaines valeurs x_m de x que l'on précisera. On opère avec le doublet jaune du mercure dont la longueur d'onde moyenne (déterminée par exemple par la méthode de l'exercice précédent) est 0,578 μm. La valeur x_0 correspondant à l'épaisseur nulle est $x_0 = 30{,}255$ mm. En déplaçant le chariot dans un sens ou dans l'autre à partir de x_0 on note les valeurs de x_m de x correspondant à un contraste nul. Les valeurs de x_m sont rassemblées dans le tableau suivant. En déduire l'écart $\Delta\lambda$ du doublet et évaluer la précision du procédé.

m	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
x(mm)	29,735	29,815	29,890	29,972	30,050	30,130	30,210

m	1	2	3	4	5	6	7
x(mm)	30,295	30,375	30,447	30,533	30,615	30,683	30,762

Exercice 28 Lame à faces parallèles d'indice n et différence de marche

Une lame à faces parallèles d'épaisseur e de d'indice n est plongée dans l'air dont on confondra l'indice avec 1. Cette lame est éclairée par un rayon d'incidence i correspondant à une lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ_0.

1. Montrer que les rayons réfléchis par les deux faces de la lame présentent entre eux une différence de marche $\delta = 2ne\cos r - \lambda_0/2$, où r est l'angle de réfraction.
2. Comment peut-on observer des interférences à l'infini avec une lame de ce type ? Proposer un montage. Montrer que l'on obtient des franges d'égale inclinaison.

Exercice 29 Le Michelson comme spectromètre

On éclaire un interféromètre de Michelson dont les deux miroirs sont symétriques par rapport à la séparatrice (en lame d'air à faces parallèles avec $e = 0$). On observe la figure d'interférences à l'infini dans le plan focal image d'une lentille convergente. On chariote à vitesse constante l'un des miroirs à l'aide d'un moteur, on a $x = vt$ où x est la distance entre les miroirs. On place au foyer de la lentille convergente un détecteur qui donne une tension image $s(t)$ proportionnelle à l'éclairement. Les deux voies reçoivent une intensité égale depuis la source. x peut varier de $-L_{max}$ à $+L_{max}$ avec L_{max}=10 cm.

1. (a) On éclaire avec une source monochromatique. Donner la formule de $s(t)$.
   (b) Donner la fréquence et la période du signal. Peut-on l'observer à l'oscilloscope ? à l'oeil nu ?

   On éclaire maintenant avec une source contenant deux nombres d'onde σ_1 et σ_2. On pose $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ et $\sigma_0 = \frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}$
2. (a) Donner l'éclairement $E(x)$ en fonction de σ_0 et $\Delta\sigma$. Le tracer. Pour quelles valeurs de x notées x_n a-t-on brouillage ?
   (b) Quelle est la valeur minimale de $\Delta\sigma$ qu'on peut mesurer ?
   (c) Application : peut-on mesurer avec cette méthode les deux longueurs d'onde du doublet du sodium ? (λ_1=589,6 nm et λ_2=589,0 nm). Combien de franges voit-on entre deux battements ?
3. On prend maintenant une source émettant un spectre rectangulaire uniforme entre $\sigma_0 - \frac{\Delta\sigma}{2}$ et $\sigma_0 + \frac{\Delta\sigma}{2}$. Calculer l'éclairement et donner les valeurs de x pour lesquelles on observe les premiers minima d'éclairement de part et d'autre du contact optique. Quelle est la valeur minimale de $\Delta\sigma$ qu'on peut mesurer avec cette méthode ?
   Que se passe-t-il si on observe un doublet de longueurs d'onde par deux raies "étendues" ?

Exercice 30 Profil spectral gaussien

Pour mesurer la largeur d'une raie centrée sur la longueur d'onde λ_0 émise par une lampe à vapeur de mercure, on utilise l'interféromètre de Michelson dans une configuration où les miroirs restent perpendiculaires. Un capteur situé au foyer image F' d'une lentille convergente fournit un courant $i(t)$ proportionnel à l'intensité lumineuse qu'il reçoit.À l'instant $t = 0$ l'appareil est réglé pour que la différence de marche en F' soit nulle. Un moteur permet de translater le miroir M_2 à la vitesse constante v_0. La source a ici un profil spectral donné par

$$I_o(\sigma) = I_0 \exp\left(-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{a}\right)^2\right)$$

où $\sigma = 1/\lambda$ est le nombre d'onde. On admet que pour une bande infinitésimale de nombres d'onde compris entre σ et $\sigma + d\sigma$, la source se comporte comme si elle était monochromatique de nombre d'onde σ et d'intensité $dI = I_0(\sigma)d\sigma$.

1. Définir et calculer la largeur spectrale de la raie.
2. Calculer l'éclairement au point F'. Représenter cette fonction.
3. Définir le contraste des franges et le calculer. Comment évolue-t-il ? En déduire une méthode de mesure de la largeur spectrale de la raie.
4. Retrouver le résultat des interférences en lumière monochromatique lorsque la largeur de la raie tend vers zéro.

Donnée :

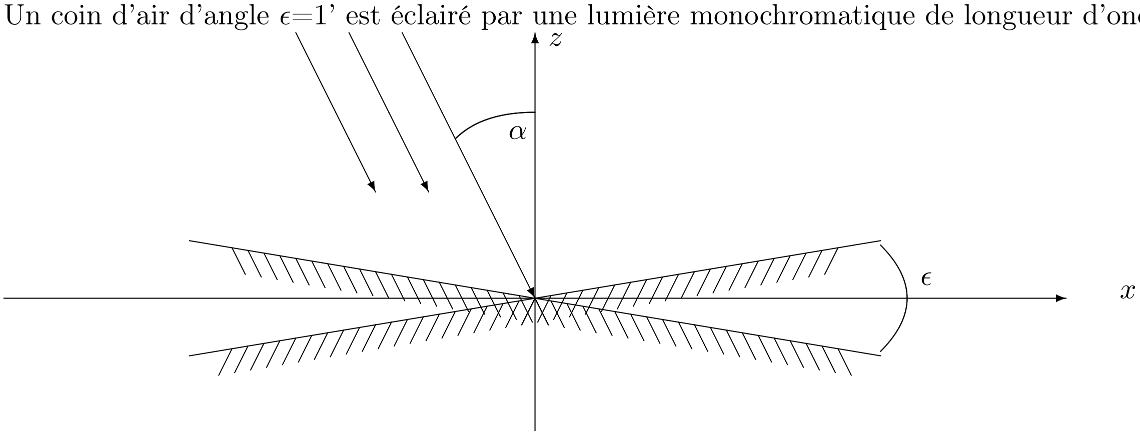
$$\sqrt{\pi} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2)dy$$

et

$$\int_0^{\infty} \cos(2\pi\sigma\delta) \exp(-(\frac{\sigma - \sigma_0}{a})^2)d\sigma \approx a\sqrt{\pi} \exp(-(\pi a\delta)^2) \cos(2\pi\sigma_0\delta)$$

Exercice 31 Coin d'air éclairé par un faisceau de lumière parallèle

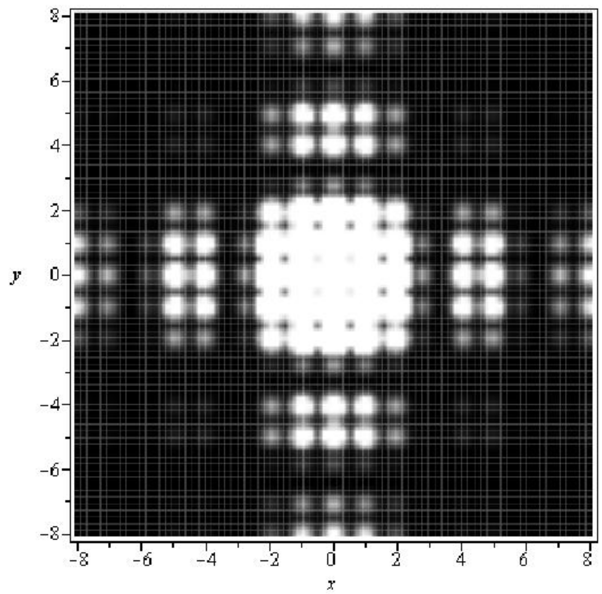
Un coin d'air d'angle ϵ=1' est éclairé par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0=0,5 μm.



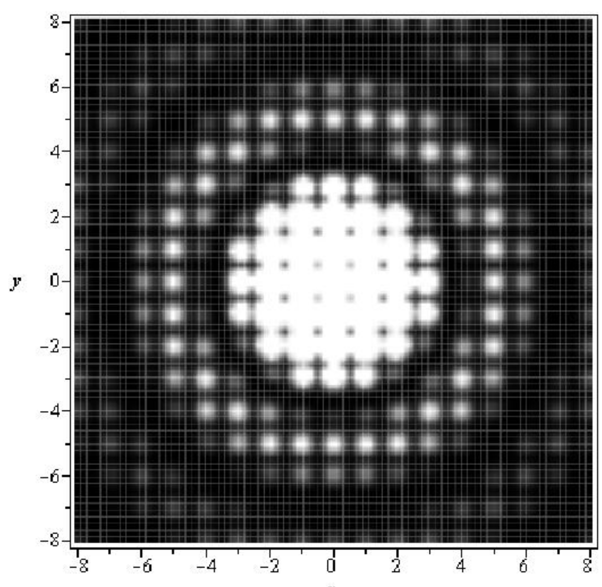
1. Le coin d'air est éclairé par une onde plane inclinée d'un angle α. Exprimer l'ordre d'interférence p au point $M(x, y, z)$ d'observation.
2. L'éclairage possède une ouverture angulaire $\Delta\alpha$ et une incidence moyenne nulle sur le coin d'air : $-\Delta\alpha/2 < \alpha < \Delta\alpha/2$. Les angles restants petits, estimer l'écart Δp des ordres d'interférence au point M pour les différentes inclinaisons de la lumière incidente.
3. Pour quelle valeur de Δp peut-on considérer que les franges données par les faisceaux d'incidences extrêmes sont complètement brouillées ? Estimer dans ces conditions, l'ouverture angulaire $\Delta\alpha$ tolérable pour observer convenablement les franges du coin d'air sur un écran placé à 1m, 10 cm, 1cm du coin d'air (parallèlement à (xOy)). Commenter les valeurs obtenues.
4. Où faut-il observer pour éliminer les difficultés précédentes ? Que vaut alors l'interfrange ?
5. Les miroirs de l'interféromètre de Michelson réalisant le coin d'air ont un rayon de R = 1cm et sont éclairés par un faisceau d'ouverture $\Delta\alpha = 20°$. Peut-on malgré tout craindre un brouillage des franges localisées observées à la question précédente ?

Exercice 32 Diffraction par quatre ouvertures identiques

On considère une pupille formée de 4 ouvertures carrées de cotés a, les centres de ces ouvertures formant un plus grand carré de côté $b > a$. La pupille est éclairée à l'aide d'une onde plane monochromatique en incidence normale. On observe la figure de diffraction dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale f'. On donne la simulation ci-dessous. Commenter et calculer le rapport b/a.



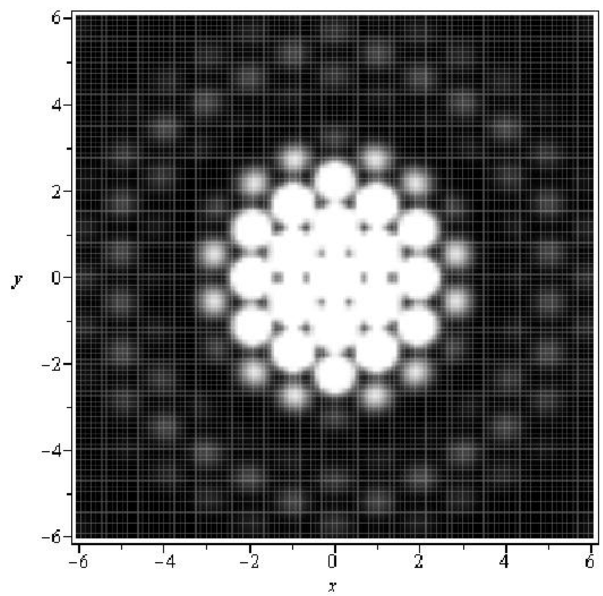
On donne la simulation suivante d'une figure de diffraction dans les conditions similaires à la précédente. Donner les caractéristiques de la pupille.



Exercice 33 Diffraction par trois ouvertures identiques

Une pupille formée de trois trous circulaires identiques disposé selon un triangle isocèle de base a et de hauteur $b = ha$ est éclairée en incidence normale par une source lumineuse monochromatique, de longueur d'onde λ= 633 nm. On étudie la figure de diffraction dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale $f' = 1$m.

1. On considérant tout d'abord les trous trois comme ponctuels, déterminer l'éclairement sur l'écran dans l'approximation des petits angles.
2. Que se passe-t-il si on considère des ouvertures circulaires de rayon R ? On rappelle que le rayon angulaire de la première annulation de la figure de diffraction d'une pupille circulaire vaut $\theta = 0,61\lambda/R$.
3. Qu'observe-t-on pour h =0 ?
4. Comment faut-il choisir h pour que la figure de diffraction soit invariante par une rotation d'angle $\pi/3$?
5. La figure présente une simulation de la figure de diffraction. La largeur de cette figure correspond à une largeur de 5 cm sur l'écran. Calculer R et a.

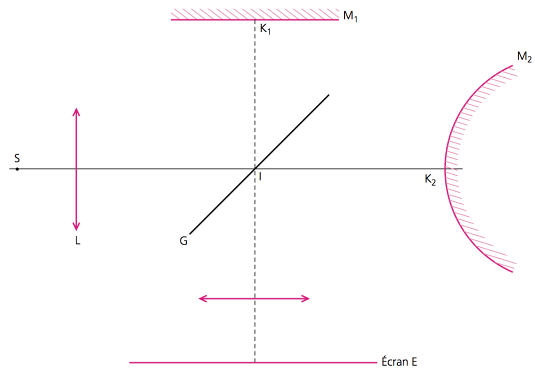


Exercice 34 Divergence d'un faisceau laser

A la sortie d'un laser hélium-néon, qui émet une onde quasi plane et monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 633$ nm, le faisceau a un diamètre D_0 évalué à 3 mm. Déterminer l'ordre de grandeur du diamètre D du faisceau à une distance $L = 150$ m.

Exercice 35 Interféromètre de Twyman

On considère l'interféromètre de la figure suivante où M_2 est un miroir sphérique (au lieu d'être plan). S est une source monochromatique (de longueur d'onde λ=546,1 nm) et ponctuelle située au foyer de la lentille L. On a : $IK_1 = IK_2$. Le rayon de M_2 est R=10 m. Le plan d'observation E est le conjugué de M_1 par le système optique (grandissement $|\gamma|$=1). On néglige tout déphasage.

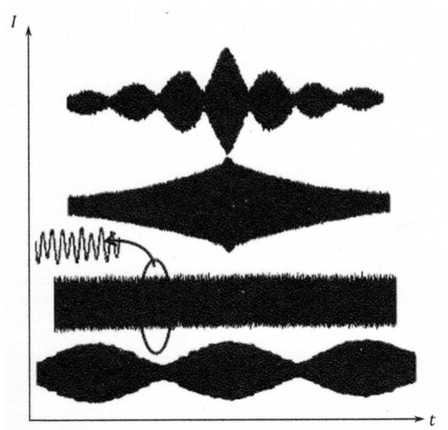


Calculer les rayons des trois premiers anneaux. Le résultat est-il le même pour un miroir convexe et un miroir concave ? Comment se déplacent les anneaux lorsqu'on translate M_2 le long de IK_2 ?

Exercice 36 Quel interférogramme pour quel spectre ?

A l'aide d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air à faces parallèles, on enregistre différents interférogrammes La figure suivante montre les enregistrements observés avec différentes sources lumineuses :

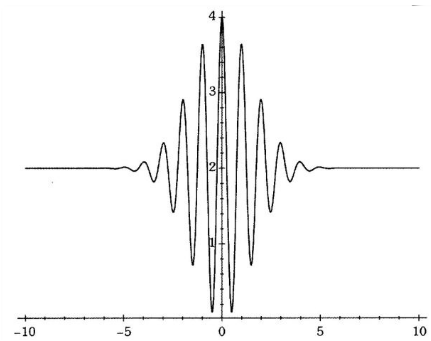
— laser ;
— lampe Mercure haute pression + filtre interférentiel isolant la raie verte ;
— lampe Mercure haute pression + filtre interférentiel isolant le doublet jaune ;
— lampe Sodium basse pression ;



Associer à chaque source son interférogramme. Que pouvez-vous dire de l'écart du doublet jaune du Mercure par rapport à celui du Sodium ?

Exercice 37 Mesure interférentielle de la bande passante d'un filtre

Un interféromètre de Michelson est monté en coin d'air et est éclairé par une source de lumière blanche étendue.
On intercale un filtre jaune laissant passer la lumière au voisinage de $\lambda = 580$ nm et de bande passante $\Delta\lambda$.
On projette la figure d'interférences obtenues sur un écran.
On translate un des miroirs à vitesse $v = 1{,}0$ μm.s^{-1} constante et on enregistre l'éclairement $E(t)$ au centre de la figure d'interférences.
On obtient le graphe ci-contre où l'unité de temps en abscisse est la seconde.

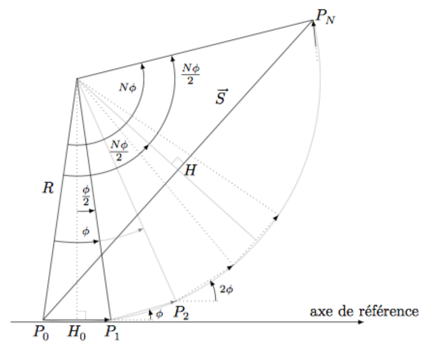


En déduire une mesure approchée de la longueur de cohérence L_c de la source de lumière jaune équivalente à la source blanche munie du filtre jaune. En déduire une valeur approchée de la bande passante $\Delta\lambda$ du filtre.

Exercice 38 Diagramme de Fresnel - Résolution d'un doublet

On éclaire un réseau de fentes considérées comme infiniment fines et distantes de $a = 10\ \mu$m, par une OPPM, de longueur d'onde λ, perpendiculaire à la pupille et de largeur $L = 1$ cm. On observe la figure de diffraction à l'infini dans la direction θ.

1. Déterminer le déphasage ϕ entre deux rayons lumineux successifs.
2. En utilisant les vecteurs de Fresnel :
   — Déterminer la position des maxima principaux et déterminer leur largeur.
   — Justifier, à l'aide de la construction géométrique suivante que l'intensité diffractée $I(\theta)$ dans la direction θ est de la forme :
   $$I = I_0 \left(\frac{\sin(N\phi/2)}{\sin(\phi/2)} \right)^2$$
   — Justifier alors que la condition pour obtenir des franges brillantes est très "stricte".



3. On souhaite étudier le spectre d'une lampe à vapeur de mercure en utilisant la diapositive précédente et plus précisément on souhaite vérifier l'écart entre les deux raies jaunes du mercure : $\lambda_1 = 579{,}1$ nm et $\lambda_1 = 577{,}0$ nm.

   En vous aidant de l'annexe, déterminer à partir de quel ordre il est possible de séparer les deux raies.

Annexe : Pouvoir de résolution d'un réseau

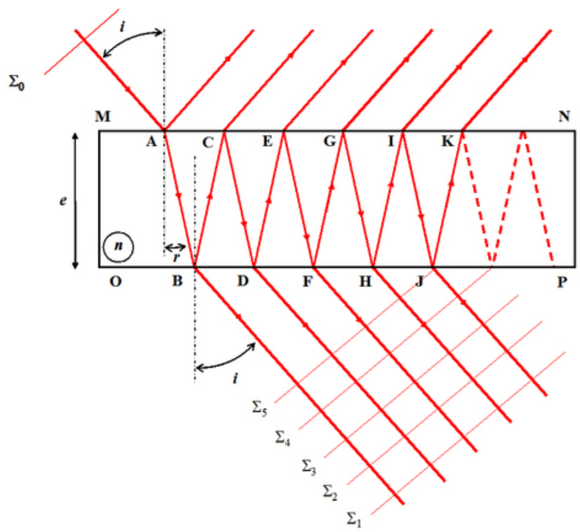
Le pouvoir de résolution d'un réseau est l'aptitude du réseau à séparer deux longueurs d'onde. Il est défini par le critère de Rayleigh qui considère que deux longueurs d'onde λ et $\lambda + \Delta\lambda$ sont séparables si le maximum de l'une $(\lambda + \Delta\lambda)$ est à la position du premier minimum nul de l'autre (λ). Le pouvoir de résolution vaut alors

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$$

où k est l'ordre et N est le nombre de traits éclairés.

Exercice 39 Filtre interférentiel

Un filtre interférentiel est une lame transparente d'indice n et d'épaisseur e dont les faces sont traitées. Elles réfléchissent la lumière avec un coefficient de réflexion en amplitude r très proche de 1 et le coefficient de transmission en amplitude est noté t. Pour un rayon arrivant sous l'incidence i ce dispositif donne une infinité de rayons lumineux transmis qui ont subi 0, 2, 4, 6, ... réflexions à l'intérieur de la lame. Ces réflexions n'introduisent aucun déphasage.

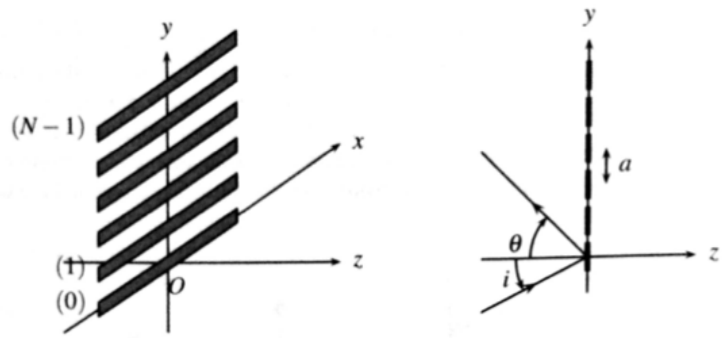


1. Incidence normale
   (a) Exprimer le déphasage entre deux rayons successifs.
   (b) Le nombre de vibrations qui interfèrent étant très élevé, l'intensité transmise ne sera importante que si les interférences entre toutes ces ondes sont constructives. On considère que le filtre ne laisse passer que les longueurs d'onde vérifiant cette condition. Quelle épaisseur doit avoir cette lame de verre d'indice n=1,5 pour que la seule radiation visible soit la raie verte du mercure λ=546 nm.

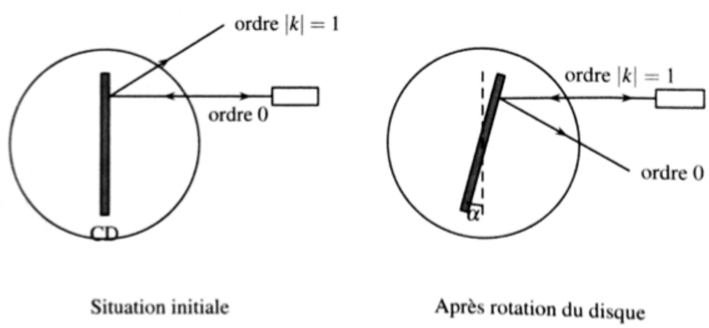
2. Incidence i non nulle
   (a) Exprimer le déphasage ϕ entre deux rayons successifs en fonction de l'angle r des rayons réfractés par rapport à la normale et de l'indice n.
   (b) De quelle couleur apparaît le filtre lorsqu'on le regarde sous une incidence i=$\pi/3$?
   (c) Etablir l'expression de l'éclairement transmis en fonction de ϕ et tracer cette fonction. Commenter.

Exercice 40 Capacité de stockage d'un CD

Sur la surface d'un disque compact (CD) est gravé une piste unique en forme de spirale de pas a. Cette surface peut être modélisée, localement par un ensemble de N miroirs parallèles identiques entre eux, régulièrement espacés d'une distance a (voir figure ci-dessous). L'indice de l'air est confondu avec celui du vide.



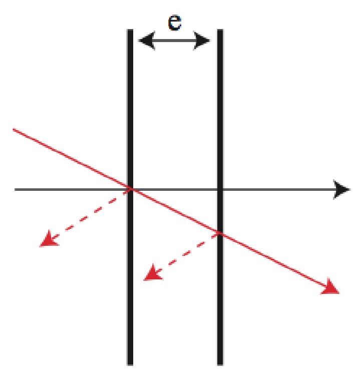
1. Seuls les faisceaux lumineux parallèles sont envisagés. La direction de la lumière incidente est contenue dans le plan (yOz). Les rayons lumineux réfléchis par le CD sont aussi contenus dans le plan (yOz). Le disque est éclairé sous une incidence i.
   (a) Par analogie avec le traitement effectué pour le réseau par transmission, déterminer l'expression de la différence de marche entre deux rayons réfléchis consécutifs.
   (b) Définir les directions θ_k, où k est un entier, dans lesquelles les ondes réfléchies par les miroirs interfèrent de façon totalement constructive.
2. On réalise l'expérience suivante. Le disque compact est éclairé en incidence normale. On tourne ensuite le disque d'un angle α afin que le faisceau diffracté par le disque dans l'ordre 1 soit dirigé dans la direction du faisceau lumineux incident.



   (a) Etablir la relation liant a, λ_0 et α.
   (b) Pour $\lambda_0 = 650{,}0$ nm, on mesure $\alpha = 12^o40$'. En déduire une valeur numérique de a. Est-il possible d'observer la spirale gravée sur le disque avec un microscope optique ?
   (c) La spirale est gravée depuis l'intérieur du disque (rayon 2,1 cm) vers l'extérieur (rayon 5,9 cm). estimer la longueur totale de cette spirale sur un CD.
   (d) Sur la spirale sont gravés des motifs (creux ou plat), d'une longueur voisine du micromètre. Chacun des motifs peut être associé à un bit de codage. En déduire une estimation de la capacité de stockage de ce CD en Mo, sachant qu'un Mo représente 10^6 octets et que chaque octet est un ensemble de 8 bits.

Exercice 41 Interféromètre de Fabry-Pérot

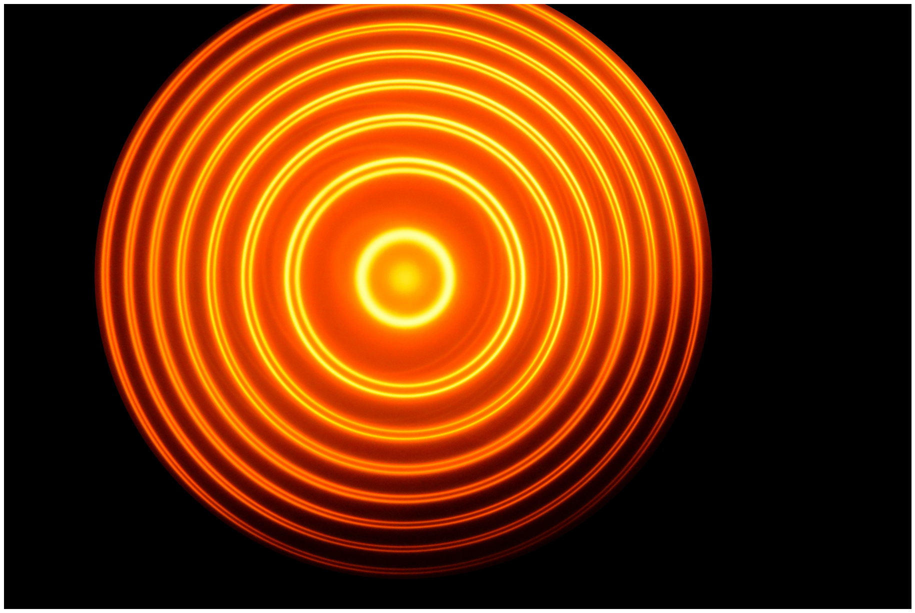
L'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux lames de verre dont les faces en regard sont séparées d'une épaisseur d'air e. Elles sont parallèles et traitées pour en augmenter le coefficient de réflexion. On ne tiendra pas compte de l'épaisseur des lames dans le raisonnement. Le coefficient de réflexion en amplitude sur les faces est noté r (supposé réel) et on notera $R = r^2$. L'observation se fait en transmission et à l'infini, c'est à dire dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale f'.



1. L'appareil est éclairé par une onde monochromatique de longueur d'onde λ sous une incidence i faible. Représenter le trajet des différents rayons. A-t-on affaire à un interféromètre à division d'amplitude ou à division du front d'onde ?
2. Montrer qu'il faut tenir compte de tous les rayons transmis dans l'écriture de l'amplitude du champ transmis sachant que R est très proche de 1. En négligeant l'absorption des lames de l'interféromètre, donner la relation entre les coefficients de réflexion et de transmission en puissance R et T.
3. Montrer que l'intensité obtenue en transmission est de la forme :
$$I = \frac{I_M}{1 + m\sin^2(\varphi/2)}$$
où m est un coefficient à expliciter et φ le déphasage entre deux rayons consécutifs qui interfèrent sur l'écran.
4. Tracer $I(\varphi)$. On définit $p = \varphi/2\pi$ comme l'ordre d'interférence. Caractériser les valeurs de p pour lesquelles l'éclairement est maximal.
5. On éclaire l'interféromètre par une source ponctuelle à distance finie et on observe les interférences à l'infini. Montrer que les franges d'interférences sont des anneaux. Quel est leur centre ?
6. On note ρ la distance d'un point de l'écran au centre de la figure. Soit p_0 l'ordre d'interférence au centre des anneaux. On suppose ici que l'épaisseur e est telle que p_0 est un entier. Montrer que l'anneau d'ordre $p = p_0 - k$, avec $k \in \mathbb{N}$ a un rayon proportionnel à $\sqrt{k}$. (on supposera i petit).
7. Peut-on utiliser une source étendue ?
8. On définit le contraste par :
$$C = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}$$
où I_m est l'intensité d'une frange sombre. Calculer le contraste et donner sa valeur pour $R = 0{,}5$; $0{,}7$; $0{,}9$ et $0{,}95$. Comment doit-on choisir R si l'on veut obtenir des anneaux lumineux sur fond noir.

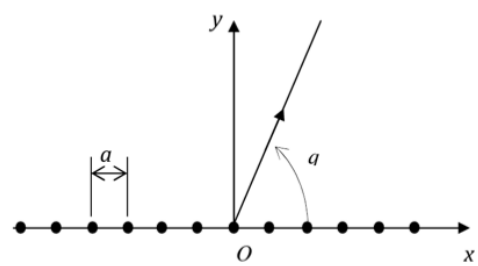
Exercice 42 Interféromètre de Fabry-Pérot (suite)

9. La figure ci-dessous a été obtenue avec une lampe à vapeur de sodium. Expliquer.



Exercice 43 Radar à balayage électronique

On considère N antennes constituées par des fils perpendiculaires au plan $(P) = (Oxy)$. Le intersections des fils avec le plan (P) se trouvent sur l'axe (Ox) ; sur cet axe, la distance entre deux antennes vaut la moitié de la longueur d'onde d'émission λ. Toutes les antennes émettent des ondes en phase. On s'intéresse à leur émission dans le plan (P) à très grande distance des antennes.



1. Dans quelle(s) direction(s) l'intensité émise est-elle maximale ?
2. Les antennes ne sont plus en phase mais celle de rang p est déphasée de $\phi = p\varphi$ par rapport à l'antenne de rang zéro. Comment choisir $\varphi(t)$ pour que la direction de puissance maximale tourne dans le plan (Oxy) à la vitesse angulaire constante ω ? Proposer une application.
3. Comment faudrait-il déphaser les antennes pour focaliser le rayonnement au point de l'axe Oy d'ordonnée y ?
4. On utilise cette fois le réseau d'antennes comme récepteur d'onde électromagnétiques provenant de l'infini, de longueur d'onde $\lambda = 2a$. Comment déterminer la direction de l'onde incidente ?