

# Feuille d'exercices numéro 11

Optique physique

PC, 9 janvier 2009

## Chemin optique

**Exercice 1 Interfrange à l'interface.** Deux sources ponctuelles cohérentes  $S_1$  et  $S_2$  sont distantes de  $d$ , à la surface de l'eau. L'indice de l'air (demi-espace  $z > 0$ ) est 1, l'indice de l'eau (demi-espace  $z < 0$ )  $n$ . Donner la forme géométrique des franges d'interférence. Calculer l'interfrange dans l'air juste au-dessus du segment  $S_1S_2$  et dans l'eau juste en dessous.

**Exercice 2 Traversée d'un prisme.** Un rayon de lumière monochromatique traverse un prisme d'angle au sommet  $\hat{A} = 60^\circ$ . Le rayon incident frappe la face de gauche en  $I$  avec un angle d'incidence  $i = 45^\circ$  et ressort par la face de droite en  $J$  avec  $AI = AJ = d = 5\text{cm}$ .

1. Justifier que  $i = i'$ ,  $i$  désignant l'angle d'incidence et  $i'$  l'angle d'émergence du prisme.
2. En déduire qu'on est au minimum de déviation.
3. Établir dans ce cas les relations entre les angles.
4. En déduire la valeur numérique du chemin optique ( $IJ$ ).

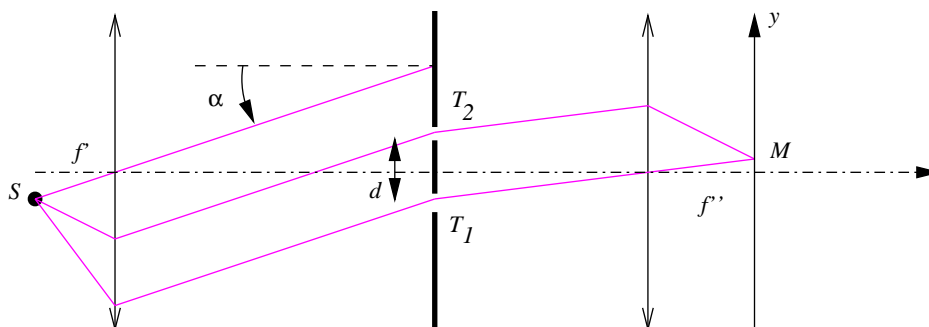
**Exercice 3 Formule de Fresnel.** Démontrer la formule de Fresnel donnant l'expression de l'éclairement  $\mathcal{E}$  pour la superposition de deux ondes cohérentes d'amplitudes quelconques, puis dans le cas où leurs amplitudes sont égales.

**Exercice 4 Limitation du champ d'interférences par la durée de cohérence.** Deux sources ponctuelles cohérentes  $S_1$  et  $S_2$  sont distantes de  $d$  dans un milieu homogène d'indice  $n$ . Les deux sources sont en phase, la lumière émise est monochromatique de fréquence  $f$  mais la durée moyenne des trains d'onde est  $\tau_c$ . Déterminer la forme du champ d'interférences.

## Trous d'Young

**Exercice 5 Cas de référence.** Deux sources ponctuelles cohérentes  $S_1$  et  $S_2$  sont distantes de  $d$  dans un milieu homogène d'indice  $n$ . Les deux sources sont en phase, la lumière émise est monochromatique de fréquence  $f$  mais la durée moyenne des trains d'onde est  $\tau_c$ . Déterminer la forme du champ d'interférences.

**Exercice 6** Le dispositif des trous de Young est éclairé par une source ponctuelle monochromatique  $S$  de longueur d'onde  $\lambda$  dans l'air, dans le plan focal objet d'une lentille convergente de distance focale  $f'$ ; le faisceau incident fait un angle  $\alpha$  avec l'axe de symétrie des trous. On place un écran dans le plan focal image d'une seconde lentille convergente de distance focale  $f''$ .



Déterminer la différence de marche en  $M$  repéré par  $y$  sur l'écran (on est dans les conditions de Gauss pour les deux lentilles). En déduire la figure d'interférences dans le plan de la figure et calculer l'interfrange.

**Exercice 7 Trous d'Young avec lame de verre.** Dans le dispositif des trous de Young, une source ponctuelle monochromatique  $S$  de longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide, est placée au foyer objet d'une lentille convergente de distance focale  $f'$ , les deux trous de Young  $T_1$  et  $T_2$  sont de très petite taille et distants de  $d$ , et on observe les interférences à l'infini en plaçant un écran dans le plan focal image d'une lentille convergente de même distance focale  $f'$ . On place devant l'un des trous (en amont) une lame de verre d'épaisseur  $e$  et d'indice  $n$ , perpendiculairement à l'axe optique.

1. Déterminer l'allure de la figure d'interférences dans le plan  $(S, T_1, T_2)$ , la position de la frange brillante centrale et l'interfrange.
2. Décrire qualitativement comment cette figure est modifiée dans les cas suivants : (a) on tourne légèrement la lame de verre et elle n'est plus perpendiculaire à l'axe ; (b) on injecte un gaz transparent d'indice  $n_0$  dans le demi-espace en amont des trous de Young ; (c) on injecte un gaz transparent d'indice  $n_0$  dans le demi-espace en aval des trous de Young.

## Interféromètre de Michelson

**Exercice 8 Coin d'air.** Déterminer l'interfrange pour les franges d'égale épaisseur en posant  $D$  la distance entre le centre de la lentille et le miroir  $M_1$  et  $f'$  sa distance focale. On note  $\alpha$  l'angle du coin d'air et  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide de la source monochromatique.

**Exercice 9 Lame d'air.** Démontrer l'expression de  $\delta$  pour les franges d'égale inclinaison. En supposant que la frange centrale ( $i = 0$ ) est brillante, déterminer le rayon des cercles brillants. En déduire les observations possibles quand on s'approche du contact optique.

**Exercice 10 Doublet spectral.** Une source de lumière possède un couple de deux raies d'émission d'amplitudes comparables et de fréquences, pulsations, longueurs d'onde dans le vide très proches :  $\lambda' = \lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}$  et  $\lambda'' = \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}$ . On éclaire un dispositif de lame d'air par une source ponctuelle possédant un doublet spectral. Déterminer l'éclairement résultant et le contraste  $C$ . Conclure.

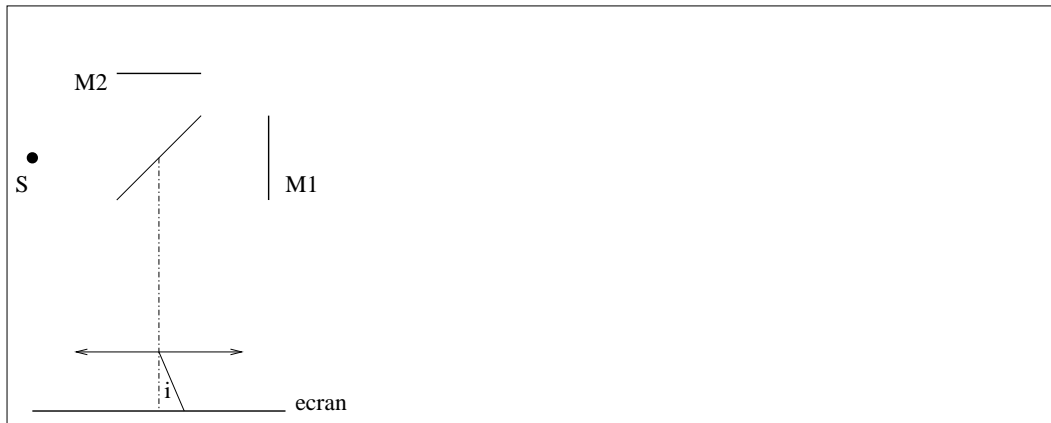
**Exercice 11 Élargissement Doppler.** Un gaz parfait monoatomique de masse molaire  $M$  dans une ampoule est porté à la température  $T$  et émet une radiation principale de fréquence  $f_0$  dans le référentiel de l'atome émissif. On trouvera au grand classique du chapitre Ondes sonores dans les fluides, une démonstration dans le domaine du son du résultat suivant. Soit  $f_0$  la fréquence (mesurée dans le référentiel de la source) d'une onde émise par une source en mouvement à la vitesse  $\vec{v}$  constante dans le référentiel  $\mathcal{R}$  ; soit  $c$  la célérité de l'onde dans ce référentiel. Un observateur fixe dans  $\mathcal{R}$  percevra une onde de fréquence  $f_a = \frac{f_0}{1-\frac{v}{c}}$  s'il est sur la trajectoire de la source et qu'elle s'approche de lui, à la fréquence  $f_e = \frac{f_0}{1+\frac{v}{c}}$  s'il est sur la trajectoire de la source et qu'elle s'éloigne de lui. Ce résultat est admis pour les ondes lumineuses.

1. Montrer que le profil spectral de la lumière n'est pas monochromatique et donner un ordre de grandeur de sa largeur spectrale à mi-hauteur  $\Delta\sigma$ .

**Exercice 12 Exemples d'utilisation de l'interféromètre de Michelson.** Expliciter la procédure et les mesures possibles pour les déterminations expérimentales suivantes à l'aide de l'interféromètre de Michelson :

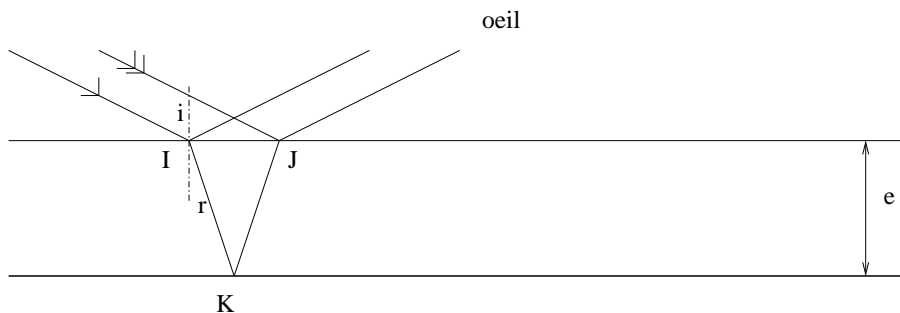
1. Mesure de l'épaisseur d'une lame de mica (utilisée dans les microscopes).
2. Mesure de l'indice d'un gaz.
3. Mesure de l'écart  $\Delta\lambda$  du doublet jaune du sodium (on renvoie aux résultats de l'exercice 10 relatif au doublet spectral).

**Exercice 13 Observation avec une source étendue.** On observe une lame d'air éclairée par une source ponctuelle : les deux miroirs du Michelson sont donc parfaitement perpendiculaire. On simplifie le dispositif en prenant en compte une seule lame séparatrice à  $45^\circ$ .



1. Faire le repliage du Michelson. Noter sur la figure l'épaisseur  $e$  de la lame d'air.
2. On observe un point  $M$  sur l'écran (dans le plan focal objet de la lentille), repéré par l'angle  $i$ . Déterminer  $\delta$ , différence de marche entre les deux rayons.
3. En déduire la forme et le nom des franges observées.
4. Montrer que dans ce dispositif, un élargissement de la source ne perturbe pas la figure.

**Exercice 14** **Lame d'huile.** À la surface de l'eau s'est déposée une très fine couche d'huile, plane, d'épaisseur  $e$ , d'indice  $n$ , éclairée par le Soleil source de lumière parallèle d'angle d'incidence  $i$ . On observe à l'infini (avec l'œil) la figure, selon l'angle d'émergence  $i$ .

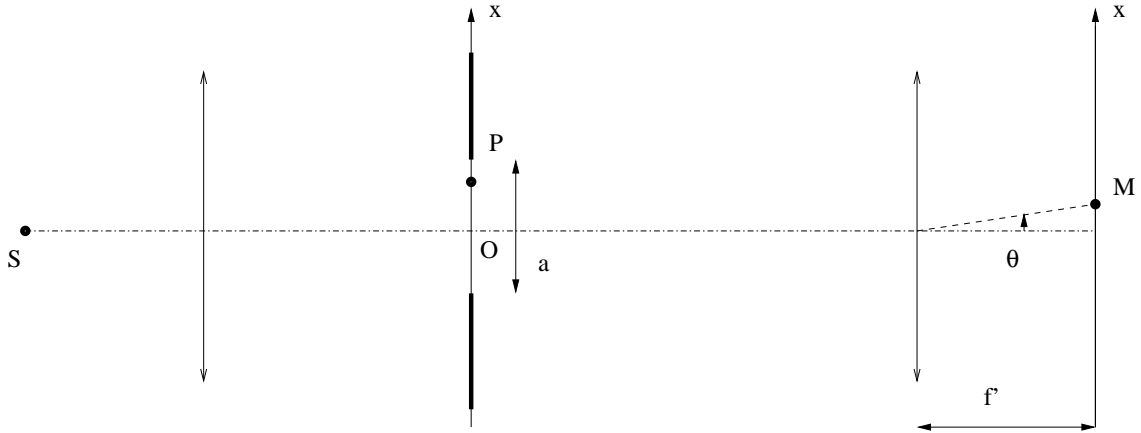


On admet qu'à la réflexion sur air-huile n'induit pas de déphasage, mais qu'à la réflexion huile-eau, apparaît un déphasage de  $\pi$ .

1. Quelle peut-être la cause de ce déphasage?
2. Construire les plans d'onde passant par I et par J.
3. Calculer la différence de marche  $\delta$  entre les deux rayons. On n'oubliera pas de rallonger le chemin passant par  $K$  pour tenir compte du déphasage de  $\pi$ .
4. En déduire la condition d'interférences destructives.
5. Expliquer l'irisation observée dans les ports lorsque l'eau est polluée par de l'huile (souvent du fuel) Montrer que les lignes isocouleur correspondent à des lignes d'égale épaisseur de la couche d'huile.

## Diffraction

**Exercice 15** **Diffraction par une pupille étroite.** On étudie la diffraction par une fente dans un modèle unidimensionnel : la fente est de largeur  $b$  grande devant  $\lambda$  (perpendiculaire au plan de la feuille) et de faible largeur  $a$  selon  $x$ . Un point  $P$  de la fente est donc repéré par son abscisse  $x$  et l'éclairement donné par une surface élémentaire autour de  $P$  est proportionnel à  $dS = b \cdot dx$ . La source ponctuelle est placée au foyer image d'une lentille convergente de distance focale  $f'$  et l'écran dans le plan focal objet d'une autre lentille convergente de même focale. Un point  $M$  de cet écran est repéré par son abscisse  $x_M$  ou par l'angle  $\theta$  petit.



La fonction vibratoire en  $S$  est  $\underline{a}(S, t) = A_0 e^{j\omega t}$ .

1. Tracer les rayons lumineux \* issu de  $S$  passant par  $O$  et frappant l'écran en  $M$ , et \* issu de  $S$  passant par  $P$  et frappant l'écran en  $M$ .
2. (Retour aux bases de l'optique physique) : ce qui se passe en  $P$  à la date  $t$  est ce qui s'est passé (avec un coefficient d'atténuation  $K$ ) en  $S$  à la date  $t - \delta t$ ; justifier que  $\delta t = \frac{(SP)}{c_0}$ .
3. En déduire que  $\underline{a}(P, t) = K A_0 e^{j\omega t} e^{-j \frac{2\pi(SP)}{\lambda}}$ .
4. En déduire enfin que la fonction d'onde résultante en  $M$  de la fraction d'onde passée à travers  $dS$  autour de  $P$  est

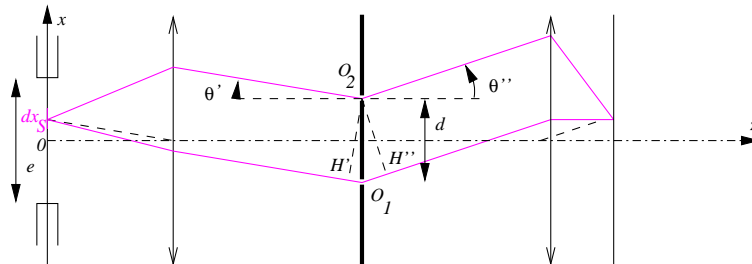
$$\underline{a}_P(M, t) = K A_0 e^{-j \frac{2\pi(SP)}{\lambda}} e^{j\omega(t - \frac{(PM)}{c_0})} b dx = K A_0 e^{j\omega t} e^{-j \frac{2\pi(SPM)}{\lambda}} b dx$$

5. Donner l'expression intégrale de  $\underline{a}(M, t)$ .
6. Montrer que  $(SPM) = (SOM) - x \sin \theta$ . et justifier que  $(SPM) = (SOM) - \frac{x_M}{f} x$ .
7. En déduire enfin l'expression intégrale

$$\underline{a}(M, t) = K A_0 b e^{j\omega t} e^{-j \frac{2\pi(SOM)}{\lambda}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{j \frac{2\pi x_M}{\lambda f} x} dx$$

8. Calculer cette intégrale et en déduire la fonction de diffraction en utilisant le sinus cardinal. Conclure.

**Exercice 16 Source non ponctuelle éclairant deux fentes d'Young fines.** Une fente-source large est formée d'une ampoule de grande taille derrière une fente peu large ( $e$ ) mais très haute. D'après le principe d'Huygens-Fresnel, chaque point de la fente source se comporte comme une source ponctuelle secondaire, à ceci-près que chacune de ces sources est incohérente avec les autres. Cette fente-source éclaire dans les conditions de Fraunhofer un système de deux fentes d'Young très étroites. On se place dans un plan horizontal de coupe : ã



Dans la largeur  $dx_S$  autour du point  $P$  de la fente-source (repéré par  $x_S > 0$  et donc  $\theta' < 0$ ), on a une source ponctuelle donnant en  $M$  (repéré par  $x_M > 0$  et donc  $\theta'' > 0$ ) un éclairage  $d\mathcal{E}(x_S)$  proportionnel d'amplitude  $\mathcal{E}_0 \cdot \frac{dx_S}{e}$ .

1. Relier  $\theta'$  et  $x_S$ ,  $\theta''$  et  $x_M$  (conditions de Gauss).
2. Déterminer  $\delta(x_S) = (PO_2M) - (PO_1M)$  en fonction de  $d$ ,  $x_M$ ,  $x_S$ ,  $f'$  et  $f''$ .
3. Donner l'expression complète de  $d\mathcal{E}(x_S)$ .
4. En déduire  $\mathcal{E}(M)$ .
5. Calculer le contraste  $C$  et conclure avec la condition de brouillage des franges.

**Exercice 17 Michelson éclairé par raie gaussienne.** Un profil gaussien est une fonction de densité lumineuse spectrale du type  $D(\sigma) = \frac{d\mathcal{E}_0}{d\sigma} = D_0 e^{-\left(\frac{\sigma-\sigma_0}{a}\right)^2}$  avec  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  et  $a \ll \sigma_0$ . On éclaire avec cette lumière un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air. Initialement, on est au contact optique et un moteur permet de charrioter le miroir  $M_1$  à vitesse constante. On fait les observations dans le plan focal image d'une lentille convergente.

1. Lorsque l'épaisseur de la lame vaut  $e$ , donner la différence de marche induite dans la direction  $\theta$  par rapport à l'axe optique de la lentille.
2. On observe maintenant au centre ( $\theta = 0$ ). Donner l'expression intégrale de l'éclairement résultant.
3. On donne  $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2} dy = \sqrt{\pi}$  et

$$\int_0^{+\infty} [\cos(2\pi\sigma\delta)] e^{-\left(\frac{\sigma-\sigma_0}{a}\right)^2} d\sigma \simeq a\sqrt{\pi} e^{-\pi^2 a^2 \delta^2} \cos(2\pi\sigma_0\delta)$$

On suppose que le moteur permet d'assurer une variation du type  $e = v_0 t$ . Montrer que l'évolution de l'éclairement dans le temps est du type

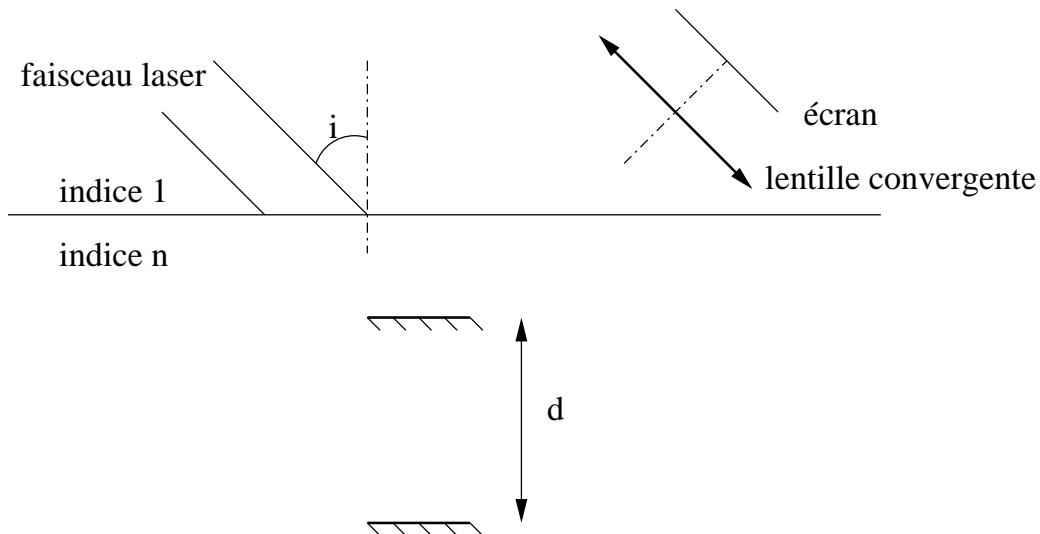
$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \left[ 1 + e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \cos\left(2\pi\frac{t}{T_0}\right) \right]$$

avec  $T_0 \ll \tau$ .

4. Tracer l'allure des variations de l'éclairement dans le temps.

## Réseaux

**Exercice 18 Cristaux liquides.** On assimile un cristal liquide à une paire de deux miroirs parallèles, horizontaux, distants de  $d$  et plongés dans un liquide d'indice  $n$ . On éclaire la surface du le liquide avec un laser (situé dans l'air d'indice 1) envoyant un faisceau cylindrique de lumière monochromatique rouge de longueur d'onde  $\lambda$  selon un angle d'incidence  $i$ .



On néglige tout phénomène de diffraction et on étudie les interférences entre les rayons émergents du liquide après réflexion sur l'un ou l'autre des miroirs. Pour cela, on place une lentille convergente de vergence  $C$  perpendiculairement aux rayons émergents et un écran dans le plan focal de cette lentille.

1. Calculer l'angle de réfraction des rayons à leur entrée dans le liquide. Tracer la marche complète des deux rayons représentés.
2. Dans cette question seulement, on masque l'un des miroirs. Quelle est la figure obtenue sur l'écran ?
3. Déterminer la différence de chemin optique  $\delta$  entre un rayon émergent après s'être réfléchi sur l'un des miroirs et un rayon s'étant réfléchi sur l'autre miroir.
4. Quelle est la figure obtenue sur l'écran ? Préciser la plus petite valeur de  $d$  conduisant à une extinction. On conserve cette valeur de  $d$  jusqu'à la fin de l'exercice.
5. Calculer la valeur de la longueur d'onde  $\lambda'$  la plus proche de  $\lambda$  qui serait elle-aussi éteinte. Qu'observerait-t-on sur l'écran si on remplaçait le faisceau laser par un faisceau de lumière blanche ? La distance  $d$  entre les miroirs est en fait la longueur d'une molécule hélicoïdale cholestérique, constitutive des cristaux liquides. Cette longueur varie fortement avec la température. Quelle application peut-on donner pour ce type de cristaux liquides ?

Données :  $i = 45^\circ$ ,  $n = 1,58$ ,  $\lambda = 700nm$ , lumière visible :  $[400nm, 800nm]$ .

**Exercice 19 Séparation des raies du doublet jaune du sodium.** Un réseau plan par transmission comporte  $n$  traits par millimètre. Il est éclairé par un faisceau de lumière parallèle issu d'une lampe à vapeur de sodium, avec un angle d'incidence  $i$  et on note  $\theta$  l'angle d'émergence des rayons observés à l'infini. Le doublet jaune du sodium comporte deux raies de longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

1. Quels sont les phénomènes physiques mis en jeu dans l'utilisation d'un réseau ?
2. Montrer qu'il existe des directions d'observation privilégiées  $\theta_p$ , caractérisées par un entier  $p$ , dans lesquelles on observe un maximum de lumière pour une longueur d'onde  $\lambda$  particulière. Exprimer la relation entre  $i$ ,  $\theta_p$ ,  $\lambda$ ,  $n$  et l'entier  $p$ . On pourra raisonner sur les rayons traversant deux fentes consécutives.
3. On éclaire le réseau sous incidence normale avec une lampe à vapeur de sodium dont le spectre contient deux raies très proches (le doublet jaune) de longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ . Quel est l'ordre  $p$  minimal sous lequel on peut observer les deux raies avec une séparation angulaire supérieure ou égale à  $\delta\theta = 0,1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-3}rad$  ?
4. Déterminer dans ce cas l'angle moyen de la direction dans laquelle on observera le doublet.
5. La largeur angulaire de chaque raie est de l'ordre de  $0,05^\circ$ . Que verra-t-on si on regarde dans la direction correspondant à l'ordre  $p = 1$  ?

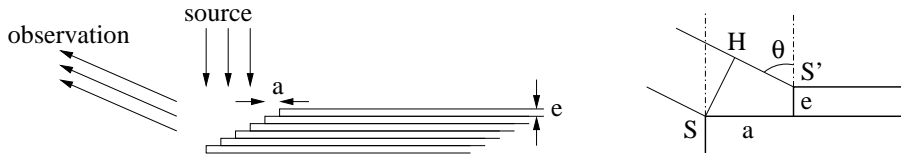
Données :  $n=750$  traits par millimètre,  $\lambda_1 = 588,995nm$  et  $\lambda_2 = 589,592nm$ .

**Exercice 20 Minimum de déviation d'un réseau par transmission.** Un réseau plan est éclairé par un faisceau de lumière parallèle monochromatique, de longueur d'onde  $\lambda$ , avec un angle d'incidence  $i$  et on note  $\theta$  l'angle d'émergence des rayons observés à l'infini.

1. Quels sont les phénomènes physiques mis en jeu dans l'utilisation d'un réseau ?
2. Montrer qu'il existe des directions d'observation privilégiées  $\theta_p$ , caractérisées par un entier  $p$ , dans lesquelles on observe un maximum de lumière pour une longueur d'onde  $\lambda$  particulière. Exprimer la relation entre  $i$ ,  $\theta_p$ ,  $\lambda$ ,  $n$  et l'entier  $p$ .
3. On appelle angle de déviation à l'ordre  $p$ ,  $D_p$ , l'angle entre le rayon incident s'il avait traversé le réseau sans être dévié et la direction émergente correspondant au maximum de déviation à l'ordre  $p$ . Exprimer  $D_p$  en fonction de  $i$  et  $\theta_p$ . Montrer que lorsque  $i$  varie, la déviation est minimale lorsque  $i = -\theta_p$ . En déduire l'expression de l'angle de déviation minimale  $D_m$  en fonction de  $p$ ,  $n$  et  $\lambda$ . Préciser comment on peut détecter expérimentalement, dans la lunette de visée du spectrogoniomètre, le minimum de déviation.
4. On remplace la source de lumière monochromatique par une lampe à dihydrogène. On mesure, à l'ordre  $p = 3$ ,  $D_m = D_{m0}$  pour la raie principale et on distingue une très faible raie (encore un peu plus déviée) distante de deux minutes d'angle de la principale. Déterminer la longueur d'onde  $\lambda_0$  de la raie principale et l'écart  $\delta\lambda$  séparant les deux raies. On ne connaît pas de doublet spectral au nucléide hydrogène ; comment peut-on interpréter la raie secondaire ?

Données :  $n=750$  traits par millimètre,  $D_{m0} = 95^\circ 08'$ .

**Exercice 21 Réseau de Michelson.** Un réseau de Michelson est constitué de l'empilement de de lames réfléchissantes très fines d'épaisseur  $e$ , décalées les unes des autres de  $a$ . Ce réseau est éclairé sous incidence normale par un faisceau de lumière parallèle issu d'une source ponctuelle monochromatique. On observe à l'infini les rayons réfléchis selon un angle  $\theta$ .

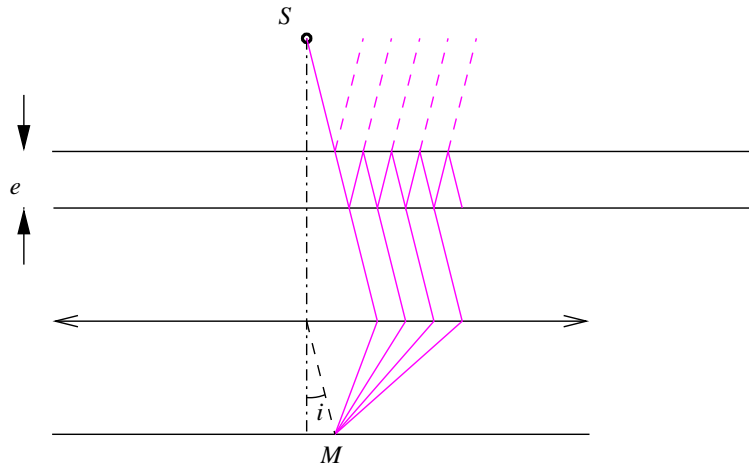


1. Pourquoi la première loi de Descartes, relative à la réflexion, est-elle apparemment contredite? Préciser l'ordre de grandeur de  $a$ .
2. Faire un schéma complet en indiquant par quels dispositifs on obtient le faisceau de lumière parallèle et on fait l'observation à l'infini.
3. On considère les interférences entre les rayons réfléchis par deux lames consécutives. Montrer que  $S'H = a \cos \theta - e \sin \theta$ . En déduire la différence de marche entre les deux rayons réfléchis interférant à l'infini.
4. Montrer qu'il existe des directions d'observation privilégiées  $\theta_p$ , caractérisées par un entier  $p$ , dans lesquelles on observe un maximum de lumière. Exprimer la relation entre  $\theta_p$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ,  $e$  et l'entier  $p$ .
5. On observe une raie lumineuse à l'ordre  $p = 0$  dans la direction  $\theta_0$ . En déduire l'épaisseur  $e$  des lames de verre.

Données :  $a = 2 \cdot 10^{-6}m$ ,  $\theta_0 = 60^\circ$ .

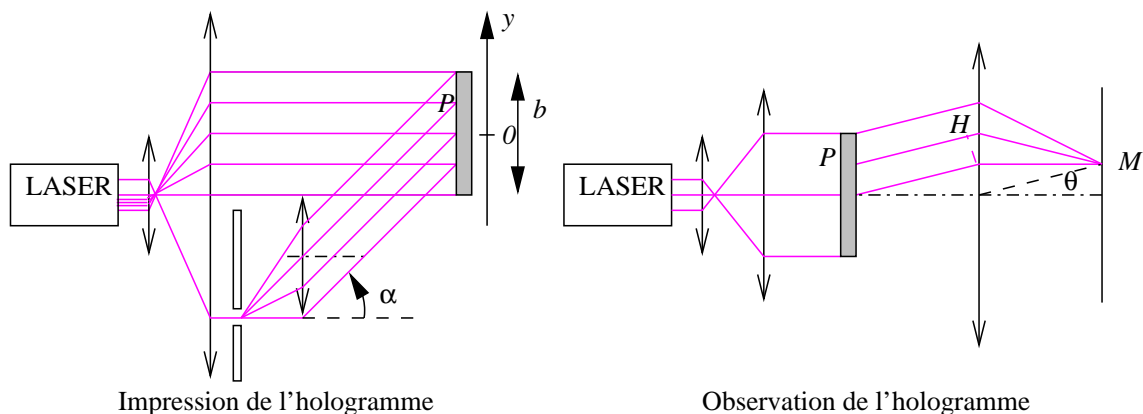
## Autres dispositifs

**Exercice 22 Interféromètre de Fabry-Pérot** Un interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux lames semi-réfléchissantes parallèles d'épaisseurs négligeables, distantes de  $e$  et entre lesquelles se trouve de l'air d'indice  $n = 1$ . Une source ponctuelle  $S$  de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide éclaire l'interféromètre face à l'une des deux lames et on observe la figure d'interférences à l'infini par transmission en plaçant un écran dans le plan focal image d'une lentille convergente parallèle à la seconde lame. On note  $R$  le coefficient de réflexion en énergie des lames semi-réfléchissantes et on néglige toutes les pertes. Déterminer l'éclairement  $\mathcal{E}(M)$  où  $M$  est un point de l'écran dans le plan de la figure contenant  $S$ , repéré par l'angle  $i$  (on supposera la largeur des lames suffisamment importante et  $i$  assez faible pour pouvoir supposer qu'il y a une infinité de réflexions).



On pose  $\varphi = \frac{4\pi e \cos i}{\lambda}$ . Tracer l'allure de  $\mathcal{E}(\varphi)$  en supposant  $R$  proche de 1.

**Exercice 23 Holographie** On réalise un hologramme en utilisant une plaque carrée, de côté  $b$ , sur laquelle se trouve un matériau photosensible devenant d'autant plus transparent que l'éclairement qu'il subit pendant la durée d'exposition est important. Cette plaque est placée dans le dispositif d'impression où interfèrent une onde plane monochromatique principale et une onde plane monochromatique secondaire cohérente obtenue en plaçant une pupille de très petite taille dans le plan focal objet d'une lentille convergente. L'onde secondaire est d'amplitude très faible devant la principale et sa direction de propagation fait un angle  $\alpha$  avec celle de l'onde principale. On repère un point  $M$  de la plaque dans le plan de la figure par son ordonnée  $y$  et on suppose pour alléger les calculs que l'ordre d'interférences en  $y = 0$  (milieu de la plaque) est nul. Après développement de la plaque, l'hologramme est observé dans le dispositif schématisé ci-dessous. On l'éclaire uniformément et les différences de transparence de la plaque se traduisent ainsi : soit  $\underline{a}(t)$  l'onde complexe frappant uniformément la face de gauche de la plaque et soit  $\mathcal{E}(P)$  l'éclairement reçu par  $P$  lors de l'impression ;  $P$  diffracte à droite une onde complexe  $\underline{a}_P(t) = \Lambda \mathcal{E}(P) \underline{a}(t)$ . On observe la figure de diffraction à l'infini et on ne fera pas ici l'approximation des petits angles.



1. Établir l'expression de l'éclairement  $\mathcal{E}(P)$  en fonction de l'ordonnée  $y$  de  $P$  en notant  $\mathcal{E}_1$  l'éclairement donné sur la plaque par l'onde principale seule et  $\mathcal{E}_2$  celui donné par l'onde secondaire seule.
2. En déduire l'expression complète de  $\underline{a}_P(t)$  et l'écrire sous la forme de la somme de trois ondes complexes en écrivant  $\cos u = \frac{1}{2}(e^{ju} + e^{-ju})$ .
3. Déterminer les figures de diffraction sur l'écran associées à ces trois ondes et montrer que l'une d'elles forme une tache fine qui semble provenir de la pupille à l'endroit où elle se trouvait lors du processus d'impression.
4. Le résultat précédent pour la pupille à l'infini se généralise : pour une pupille à distance finie, l'observateur de l'hologramme perçoit trois ondes diffractées dont l'une est la même que celle qui serait émise par une pupille à la même position et à la même distance derrière la plaque (la démonstration de ce résultat nécessite le recours aux fonctions de Bessel). Conclure.