

Chapitre C.3

Quelques dispositifs interférentiels à division du front d'onde...

Il s'agit dans ce chapitre d'étudier *quelques* dispositifs interférentiels, l'un des points clés étant de retenir les méthodes utilisées (entre autres résultats importants) et des points explicites du programme. Ces dispositifs seront à division du front d'onde ou utilisés de la sorte.

Dans tout ce chapitre, la source primaire est ponctuelle, monochromatique. On ne s'intéresse pas aux problèmes de cohérence et à la division d'amplitude qui seront l'objet du chapitre suivant.

Table des matières

| | |
|---|---|
| I - Dispositif des trous (puis fentes) de Young | 1 |
| 1/ Dispositif sans lentille de projection | 1 |
| a. Présentation | 1 |
| b. Simulation | 1 |
| c. Différence de marche, ordre d'interférences, interfrange | 2 |
| 2/ Dispositif avec lentille de projection | 2 |
| 3/ Effet du déplacement de la source | 3 |
| 4/ Fentes de Young | 4 |
| 5/ Mesure d'indice d'un gaz | 4 |
| II - Réseau optique | 5 |
| 1/ Qu'est-ce qu'un réseau ? Intérêt et réalisation pratique | 5 |
| a. Qu'est-ce qu'un réseau ? | 5 |
| b. Réalisation des réseaux | 5 |
| c. Principe de l'étude | 5 |
| 2/ Formule fondamentale des réseaux | 6 |
| 3/ Construction géométrique des ordres du réseau | 6 |
| 4/ Utilisation d'une fente source | 7 |
| 5/ Expression de l'intensité pour N ondes (HP) | 7 |
| III - Autres dispositifs interférentiels diviseurs du front d'onde . . . | 7 |

| | |
|---|----|
| 1/ Miroir de Lloyd | 8 |
| 2/ Miroirs de Fresnel | 8 |
| 3/ Bilentilles de Billet | 9 |
| 4/ Bilentilles de Meslin (et ellipsoïdes) | 10 |
| 5/ Biprisme de Fresnel (en faisceau parallèle) | 11 |
| a. Préliminaire sur le prisme | 11 |
| b. Étude du biprisme en faisceau parallèle | 11 |
| IV - Interféromètre de Michelson ; usage en diviseur du front d'onde | 12 |
| 1/ Un peu de culture | 12 |
| 2/ Description de l'interféromètre de Michelson | 12 |
| a. Schéma théorique (sans compensatrice) | 12 |
| b. Construction des trajets optiques | 13 |
| c. Propriété de phase | 14 |
| d. Schéma équivalent à deux miroirs fictifs | 14 |
| e. Nécessité pratique de la compensatrice | 15 |
| f. Autres aspects pratiques | 15 |
| 3/ Franges circulaires non localisées d'une lame d'air (HP) | 16 |
| a. Analyse préalable | 16 |
| b. Différence de marche approchée, ordre, rayons des anneaux | 16 |
| c. Conséquences pratiques | 17 |
| 4/ Franges rectilignes non localisées du coin d'air (HP) | 18 |
| a. Analyse préalable | 18 |
| b. Calcul approché de la différence de marche ; interfrange | 18 |
| Ann. 1 Rôle de la diffraction à l'infini par chaque motif (I-HP) | 19 |
| Ann. 2 Cap ou pas cap ? | 22 |

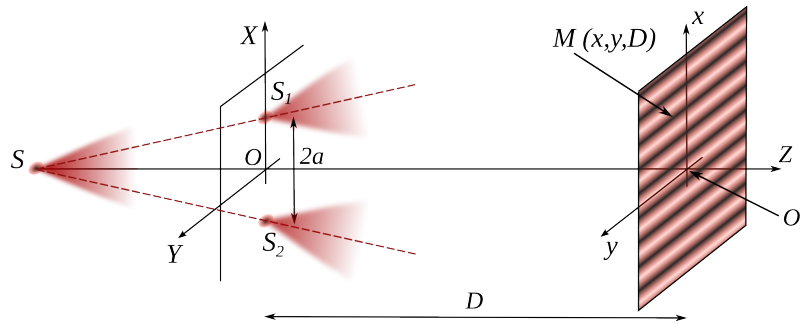
I - Dispositif des trous (puis fentes) de Young

1/ Dispositif sans lentille de projection

a. Présentation

Le plus ancien des dispositifs ayant été mis en place pour réaliser et étudier les interférences est celui de Young :

- la lumière est émise par une source S supposée ponctuelle et monochromatique ;
- un plan percé de deux trous S_1 et S_2 (équidistants de S) intercepte la lumière ;
- un écran, parallèle au plan précédent, recueille la lumière **diffractée**¹ par S_1 et S_2 et on observe dans la zone de recouvrement des interférences (on pose x et y les coordonnées d'un point M quelconque sur l'écran).



Pour se fixer les idées, les distances caractéristiques pratiques sont

$$S_1 S_2 = 2a \simeq 1 \text{ mm} \quad D = OO' \simeq 40 \text{ cm} \quad |x| \ll D \quad \text{et} \quad |y| \ll D$$

Ces distances sont choisies de sorte que l'écran intercepte effectivement le champ d'interférences² et que l'interfrange soit assez grand pour que l'on distingue les franges.

b. Simulation

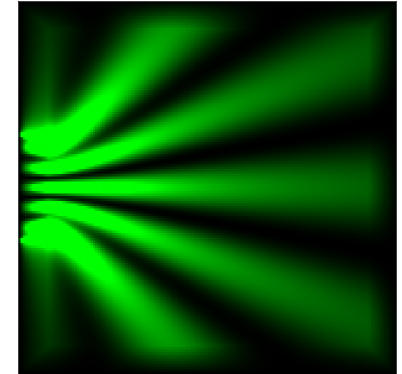
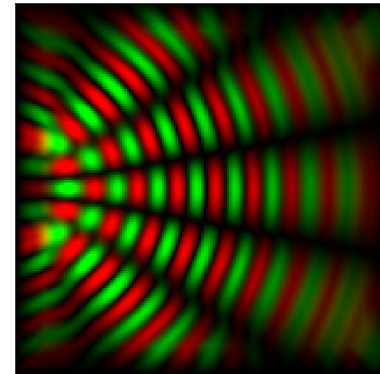
On peut reproduire la vision ondulatoire des interférences obtenues avec les deux trous de Young grâce à la simulation suivante :

<http://mpstarclem.free.fr/ScPhysDocs/ScPhysSimulations/wave2d.html>

La figure de gauche qui suit représente l'amplitude vibratoire totale pour les ondes issues des deux trous qui se trouvent à gauche et celle de droite représente l'intensité : les zones noires sont des zones sombres à obscures.

1. L'étude théorique précise de la diffraction est hors-programme. Il faut seulement savoir ici que le faisceau lumineux passant par un trou s'ouvre en cône autour de la direction de l'optique géométrique, avec un demi-angle au sommet θ d'autant plus grand que le trou est petit et la longueur d'onde est grande.

2. Ce qui est d'autant plus facile qu'il est loin du plan des trous... mais on perd en luminosité !



c. Différence de marche, ordre d'interférences, interfrange

Théorème 1

Pour le dispositif des trous de Young, la différence de marche, l'ordre d'interférences au point M et l'interfrange sont respectivement

$$\delta(M) \simeq \frac{2ax}{D} n$$

$$p(M) = \frac{2ax}{\lambda_0 D} n$$

et

$$i = \frac{\lambda_0 D}{2an}$$

où n est l'indice de l'air, λ_0 la longueur d'onde dans le vide (autres notations déjà définies). Les franges sont quasi-rectilignes avec pour direction celle orthogonale à $(S_1 S_2)$.

Démonstration (visible)

La démonstration a été vue au chapitre précédent ! Profitons-en pour rappeler que, dans la mesure où $D \gg (|x|, |y|, a)$, la différence de marche ne dépend que de x (de façon approchée) donc on observe dans le champ d'interférences des **franges quasi-rectilignes parallèles à $(O'y)$** ³ (direction indiquée sur la figure initiale).

Les faisceaux issus de chaque trou S_1 et S_2 ne sont pas de luminosité uniforme au niveau de l'écran donc on observe une figure du type ci-contre⁴.



3. Il ne faut surtout pas se tromper de sens !

4. L'allure générale dépend du phénomène de diffraction par les trous, donc de leur forme.

Comme déjà vu dans un exercice du chapitre précédent, l'interfrange est inférieur au millimètre pour les distances expérimentales typiques proposées ($2a = 1,0 \text{ mm}$, $D = 40 \text{ cm}$, $n = 1,0$ et $\lambda_0 = 0,60 \mu\text{m}$ conduisent à $i = 0,24 \text{ mm}$) et il est difficile de l'améliorer en jouant sur l'espacement des trous (déjà faible) et sur la distance D (perte de luminosité et réduction du champ d'interférences si on l'augmente trop...). L'observation et la mesure par viseur micrométrique est recommandée (en se basant sur plusieurs franges, du fait de la périodicité, pour réduire l'incertitude de mesure).

Exercice 1

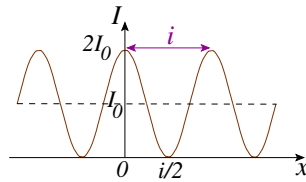
Pourquoi cherche-t-on en pratique à avoir des trous les plus identiques possibles et S sur la médiatrice de $[S_1S_2]$?

Réponse

De la sorte, le contraste des franges est optimal car, pour les intensités propres, $I_1 = I_2 = I_0/2$ (voir chapitre précédent)... La formule de Fresnel donne alors

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

et le tracé correspondant est ci-contre (franges sombres noires!).

**2/ Dispositif avec lentille de projection**

On peut élargir le champ d'interférences grâce à l'utilisation d'une lentille convergente placée après le plan percé des deux trous. L'observation se fait usuellement dans le plan focal image de la lentille, par exemple en y plaçant un écran.

Exercice 2

Faire un figure du dispositif et représenter les deux rayons produisant les interférences en un point M de l'écran choisi au préalable.

Calculer la différence de marche en un point de l'écran. En déduire l'interfrange et comparer les résultats obtenus par rapport au cas sans lentille.

Réponse

Le schéma attendu est donné sur la figure en fin de réponse en respectant les règles de l'optique géométrique. Il est important de tracer le rayon (fictif) passant par le centre de la lentille et non dévié : il est non seulement utile à la construction mais aussi au calcul !

Il est hors de question de mener un calcul en faisant comme si la lentille n'était pas présente ! Les rayons issus de S_1 et S_2 traversent a priori des épaisseurs de lentille différentes avant d'interférer au point M ! Comme on l'a vu au chapitre précédent, on

calcule la différence de marche en présence de la lentille comme suit : on imagine une source fictive au point M émettant les rayons en sens contraire. Alors, par théorème de Malus, (S_1H) est équiphase. De plus, pour le sens direct de la lumière, S_1 et S_2 sont en phase par symétrie du dispositif. Du coup, la différence de marche se lit directement avec (S_2H) :

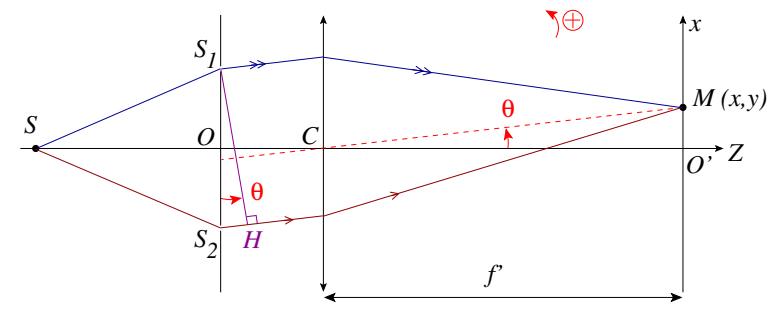
$$\delta(M) = n S_2H = 2a \sin \theta$$

Or, en utilisant le rayon fictif passant par le centre de la lentille, et compte tenu des conditions de Gauss ($|\theta| \ll 1$), il vient avec $\sin \theta \simeq \tan \theta = x/f'$

$$\delta(M) \simeq \frac{2ax}{f'} n$$

Il s'agit d'un résultat analogue au cas sans lentille, en remplaçant formellement D par f' . L'interfrange est alors

$$i = \frac{\lambda_0 f'}{2an}$$



Dans le dispositif précédent, on constate que le système lentille + écran placé dans son plan focal image permet d'observer à distance finie des interférences entre rayons parallèles avant la lentille (et qui auraient interféré entre eux à l'infini sans la lentille) : c'est un dispositif d'observation, ramenée à distance finie, d'interférences à l'infini.

3/ Effet du déplacement de la source**Exercice 3**

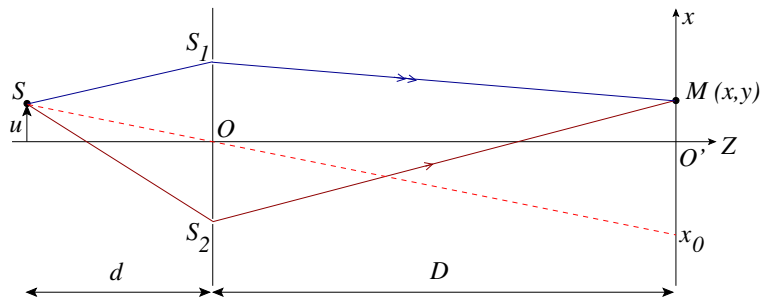
On reprend le dispositif des trous de Young sans lentille. Décrire la modification de la figure d'interférences dans les cas suivants (les déplacements étant modérés).

1. On rapproche (ou éloigne) la source primaire S du plan percé.
2. On décale la source primaire parallèlement à $(O'y)$.

3. On décale la source primaire parallèlement à (S_1S_2) . Dans ce dernier cas, on précisera au mieux le déplacement de la frange d'ordre 0.

Réponse

1. Dans ce premier cas, l'étendue du champ d'interférences change car on modifie l'orientation des cônes de diffraction. La luminosité générale de la figure change aussi car S_1 et S_2 sont éclairés avec une intensité différente. Enfin, les franges visibles ne changent pas puisque S_1 et S_2 sont toujours en phase...
2. Dans ce second cas, l'argumentation et les résultats sont exactement les mêmes que pour le premier cas.
3. Dans ce dernier cas, le champ d'interférences et la luminosité changent aussi mais le fait le plus notable est un déplacement des franges dans le sens contraire à celui de la source car la frange d'ordre zéro correspond à la différence de marche nulle : les chemins optiques des rayons supérieur et inférieur doivent être identiques...



On peut préciser la nouvelle différence de marche par le calcul suivant :

$$\delta(M) = (SS_2M) - (SS_1M) = n[SS_2 - SS_1] + n[S_2M - S_1M]$$

Le second terme a déjà été calculé précédemment et le premier se déduit par analogie (avec, en pratique, $|u|$ et a petits devant d !) :

$$\delta(M) = \frac{2au}{d}n + \frac{2ax}{D}n$$

La frange d'ordre zéro correspond à $\delta(x_0) = 0$, soit sa position

$$x_0 = -\frac{u}{d}D \quad \text{et} \quad \delta(M) = \frac{2an}{D}(x - x_0)$$

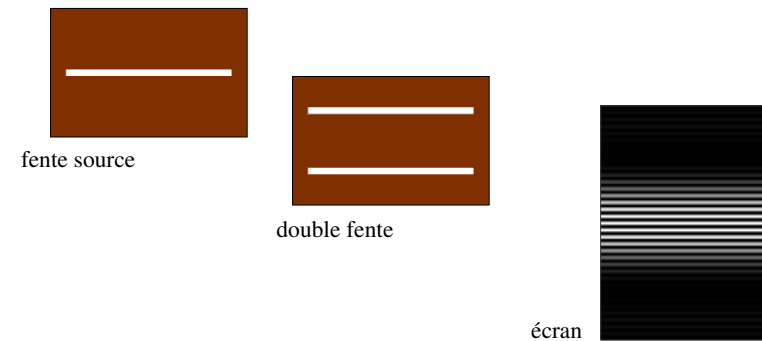
Les franges d'interférences sont translatées dans le champ d'interférences de la quantité x_0 . De plus, la frange d'ordre zéro reste alignée avec (SO)...

4/ Fentes de Young

L'expérience réalisée avec les trous de Young présente un inconvénient : le manque de lumière en raison de la petite taille des trous. On ne peut agrandir n'importe comment les trous car il peut se poser deux problèmes : une réduction du champ d'interférences et un problème de cohérence spatiale (phénomène étudié au chapitre suivant).

Il existe néanmoins une solution fonctionnelle expérimentalement : on peut utiliser un plan percé de deux fentes parallèles éclairé par une source en forme de fente parallèle à celles-ci. On arrive alors à obtenir des interférences plus lumineuses.

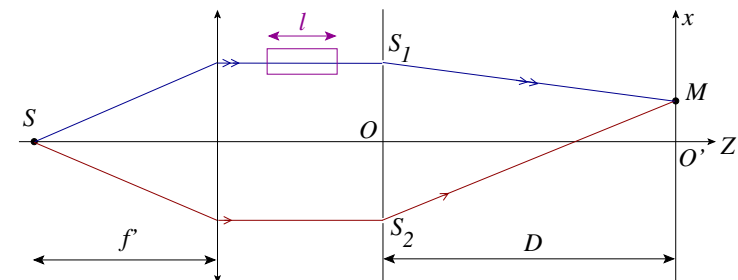
L'explication théorique de ce fait n'est pas aussi simple que pour les trous de Young car il ne s'agit plus d'interférences à deux ondes... **On retiendra que la figure d'interférences est identique en terme d'interfrange à celle obtenue dans le cas des trous de Young, avec une luminosité plus importante et répartie différemment.**



5/ Mesure d'indice d'un gaz

Exercice 4

Soit le dispositif représenté de trous de Young éclairés en incidence normale. Une cuve de longueur ℓ (dont on négligera l'épaisseur des faces) est disposée sur le trajet lumineux menant au trou S_1 .



Expliquer comment on peut, avec ce dispositif, mesurer l'indice d'un gaz.

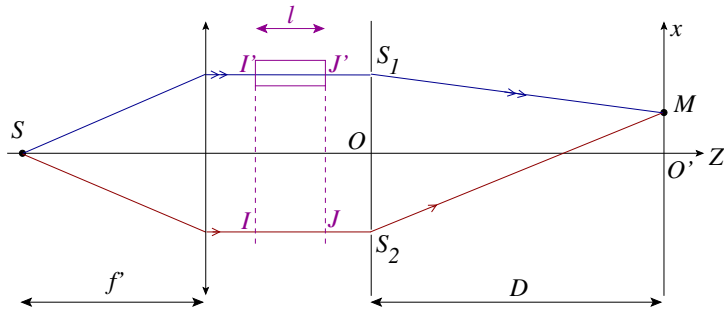
Réponse

Commençons par étudier le cas où la cuve serait remplie de gaz d'indice n et on prend pour l'air l'indice 1. Alors, la différence de marche en un point M de l'écran est

$$\delta(M) = (SIJS_2M) - (SI'J'S_1M)$$

En exploitant le théorème de Malus, il vient aisément (en prenant garde à ne pas se tromper de signe sur la contribution aval)

$$\delta(M) = (IJ) - (I'J') + (S_2M) - (S_1M) = (1 - n) \ell + \frac{2ax}{D}$$



On vérifie absolument deux choses :

- lorsqu'il n'y a pas la cuve ou lorsqu'elle est remplie d'air ($\ell = 0$ ou $n = 1$), on retrouve le résultat connu des trous de Young puisque S_1 et S_2 sont en phase ;
- la présence d'un gaz d'indice $n > 1$ translate les franges du côté de la lame ! En effet, on rallonge fictivement le chemin optique du côté du trou S_2 à cause de la lame donc le chemin optique par le trou S_1 doit s'allonger en conséquence (pour suivre la frange d'ordre zéro par exemple).

Précisons la position x_0 de la frange d'ordre zéro : elle est telle que la différence de marche est nulle, soit

$$x_0 = \frac{D}{2a} (n - 1) \ell$$

Cette position de la frange d'ordre zéro correspond à la distance de translation des franges quand on fait passer l'indice du contenu de la cuve de 1 à n . La méthode de mesure de l'indice du gaz est donc la suivante :

- on commence par la cuve remplie d'air et on note la position x_1 d'une frange \mathcal{F} quelconque (on ne sait pas en pratique quelle est la frange centrale en lumière monochromatique mais ce n'est pas grave ici !);
- ensuite, on fait le vide très progressivement dans la cuve et on la remplit très progressivement du gaz tout en suivant attentivement le déplacement de la frange \mathcal{F} précédente.

- on relève la position finale x'_1 de la frange \mathcal{F} et on en déduit la valeur de l'indice par

$$n = 1 + \frac{2a(x'_1 - x_1)}{D\ell}$$

Attention, on ne peut pratiquer une telle démarche pour mesurer l'indice d'une lame de verre (par exemple) car les franges sautent brusquement à son positionnement et on n'a aucune idée du décalage $x_0 = x'_1 - x_1$!

II - Réseau optique

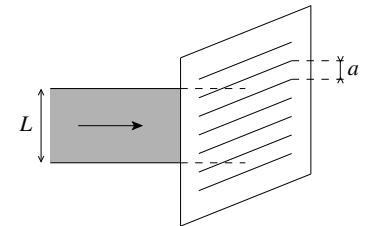
1/ Qu'est-ce qu'un réseau ? Intérêt et réalisation pratique

a. Qu'est-ce qu'un réseau ?

Le principe des réseaux a été découvert par Rittenhouse en 1785 mais la découverte n'attira pas l'attention⁵... Ce sont Young (1801) et Fraunhofer (1819) qui construisirent les premiers modèles et qui mirent en évidence le rôle exceptionnellement constructif de leur diffraction.

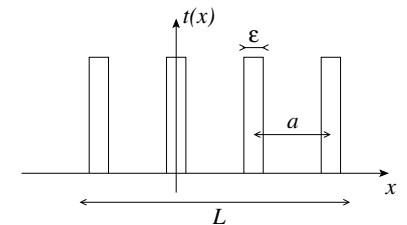
Définition

Un réseau (monodimensionnel) est un arrangement matériel régulier d'un motif élémentaire de diffraction caractérisé par sa période a , usuellement appelée **pas du réseau**.



Pour une largeur L éclairée du réseau, le nombre de motifs qui diffractent la lumière est $N = E[L/a]$.

Le motif le plus simple est une fente fine et on peut alors associer au réseau une fonction de transparence (ou transmittance) d'allure représentée ci-contre (chaque fente correspond à un « pic »). Si seuls deux motifs sont éclairés, alors on a un système de deux fentes de Young.



5. Battez-vous pour vos idées et communiquez !

b. Réalisation des réseaux

Les premiers réseaux *de qualité* ont été faits par Rowland (1882) en traçant des traits équidistants sur une lame de verre avec une pointe de diamant ! Cette opération était très difficile à réaliser. En effet, un bon réseau est obtenu si ses motifs sont nombreux, très resserrés (voir tableau suivant) et si la périodicité des motifs est la plus parfaite possible (sinon on obtient un effet gênant de raies fantômes de diffraction appelées « ghosts du réseau »).

| Qualité | n_t (traits/mm) | a (cm) | L (cm) | N | Réalisation |
|------------|-------------------|-------------------|--------|-------|--|
| Moyenne | 100 | 10^{-3} | 2 | 2000 | Diapositive d'interférences |
| Classique | 300 | $3 \cdot 10^{-4}$ | 3 | 10000 | Duplication à la résine d'un réseau performant |
| Performant | 1000 | 10^{-4} | 4 | 40000 | Gravure mécanique au diamant |

Attention !

Il arrive fréquemment dans les sujets que l'on confonde le pas a du réseau et le nombre n_t de traits par millimètre. Méfiez-vous si l'on vous dit que le pas du réseau est de 100 traits par millimètre (alors $a = 10 \mu\text{m}$) !

La gravure des réseaux performants est réalisée au nanomètre près, à raison d'une seconde par trait (soit près de 12 heures de travail pour chaque réseau...).

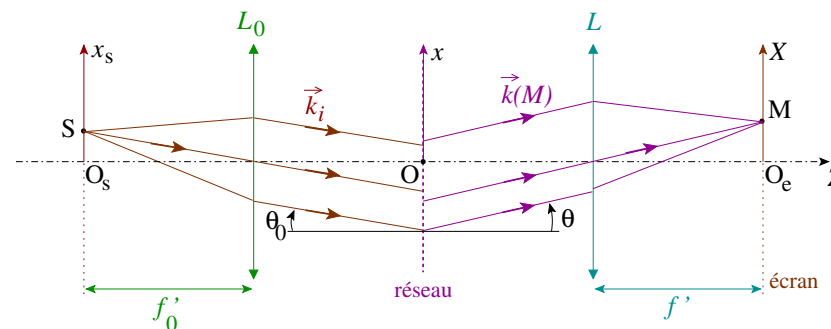
Les réseaux *gravés* sont utilisés **en réflexion** (et non en transmission comme pour les réseaux diapositives). Les mesures de spectroscopie à réseau (voir chapitre suivant) sont alors bien meilleures puisque la lumière, réfléchie en surface, ne pénètre pas le matériau du réseau source de nombreux effets parasites : réflexions internes multiples, diffusions, dispersions... Les traits de gravure correspondent alors aux minima de la « transmittance en réflexion » (réflectance...), ceux-ci éparpillant la lumière en tout sens !

c. Principe de l'étude

Tout comme les fentes de Young, chaque trait du réseau diffracte la lumière autour de la direction de l'optique géométrique. On utilise généralement un réseau en condition de diffraction à l'infini (montage de type goniomètre réglé), comme c'est le cas du montage de Fraunhofer de la figure suivante pour une utilisation en transmission⁶.

6. On se contente d'un dessin dans le plan, les traits du réseau diffractant comme des fentes fines essentiellement orthogonalement à leur direction.

Les angles sont **orientés** positivement dans le sens trigonométrique (sur la figure suivante, $\theta > 0$ et $\theta_0 < 0 \dots$).



L'étude est décomposable en deux parties, compte tenu du fait que le réseau est utilisé en condition de Fraunhofer :

- **Interférences de N ondes à l'infini** (*traitées dans le cours ; au programme*) :
On considère les rayons passant par chaque trait identique du réseau et qui interfèrent à l'infini (sans tenir compte de la non uniformité de la diffraction par le motif).
- **Diffraction à l'infini par les motifs** (*hors-programme ; voir annexe page 19*) :
On tient compte de la non uniformité de la diffraction par chaque motif.

2/ Formule fondamentale des réseaux

On cherche à avoir une information sur les angles θ pour lesquels l'intensité des interférences à N ondes est maximale...

Théorème 2

Soit un **réseau plan par transmission de pas a** utilisé en condition de Fraunhofer avec une source monochromatique (longueur d'onde λ_0) et dans un milieu⁷ d'indice n . Alors, les **maxima principaux d'intensité** des interférences à N ondes correspondent aux angles d'émergence θ_p vérifiant la **formule fondamentale des réseaux**

$$\sin \theta_p - \sin \theta_0 = p \frac{\lambda_0}{n a}$$

θ_0 est l'angle orienté d'incidence du faisceau parallèle sur le réseau. L'angle orienté θ_p indique l'**ordre p du réseau** ($p \in \mathbb{Z}$).

7. Généralement, le milieu est de l'air d'indice pris égal à 1 (ou bien on travaille avec la longueur d'onde $\lambda = \lambda_0/n$ par rapport au milieu).

Démonstration

Il est inutile de calculer l'intensité diffractée à l'infini par le réseau pour démontrer ce théorème (même si le calcul hors-programme, conduisant à la fonction réseau, a été vu au chapitre précédent).

La différence de marche entre deux rayons passant par deux traits successifs (en raisonnant sur un retard de O_{i+1} par rapport à O_i) est

$$\delta = (HO_{i+1}) + (O_{i+1}K)$$

en exploitant, par théorème de Malus, la surface d'onde $[O_iH]$ et celle $[O_iK]$ relative au retour inverse de la lumière. Par conséquent, en prenant garde aux signes des angles,

$$\delta = na(\sin \theta_0 - \sin \theta) \quad \text{soit} \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta = (\vec{k}_i - \vec{k}(M)) \cdot \vec{O_i O_{i+1}}$$

On recherche les angles θ_p d'interférences **constructives** (qui correspondent à des « maxima principaux » de l'intensité diffractée par le réseau). Pour ceux-ci, le déphasage φ est un multiple entier de 2π , soit $\delta = -p\lambda_0$ avec l'ordre $p \in \mathbb{Z}$ (le signe étant choisi pour avoir finalement la forme souhaitée...) et il vient bien

$$\sin \theta_p - \sin \theta_0 = p \frac{\lambda_0}{na}$$

Exercice 5

Comment écrire la relation fondamentale des réseaux pour un réseau plan de pas a utilisé **en réflexion** ?

Réponse

Pour un tel réseau, la démonstration précédente reste valide en notant que l'angle d'incidence est $i = \theta_0 + \pi$. Avec un tel angle (qui est celui que l'on a tendance à introduire naturellement dans ce cas),

$$\sin \theta_p + \sin i = p \frac{\lambda_0}{na}$$

3/ Construction géométrique des ordres du réseau

Il y a des fois où l'on a besoin de construire rapidement les ordres du réseau (sans avoir à jouer trop de la calculatrice et du rapporteur...). L'exercice propose une méthode géométrique de construction.

Exercice 6

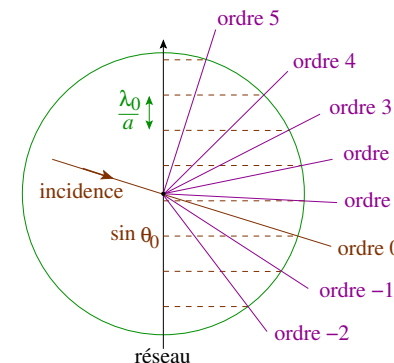
On considère un réseau plan par transmission utilisé dans l'air d'indice $n = 1$ et éclairé de sorte que $\lambda_0/a = 0,25$ et $\sin \theta_0 = -0,3$. En utilisant un cercle trigonométrique, construire les directions des ordres du réseau.

Réponse

Les directions des rayons émergents d'interférences constructives entre eux sont données par les intersections du cercle trigonométrique et des droites perpendiculaires au plan du réseau distantes de $\lambda_0/(na)$, l'une étant d'ordonnée $\sin \theta_0$. La construction est bien cohérente avec la formule fondamentale des réseaux

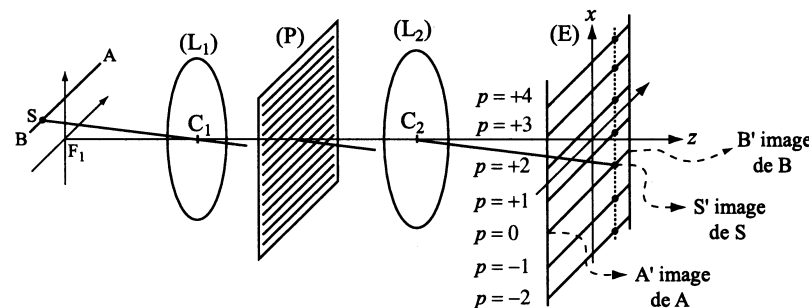
$$\sin \theta_p - \sin \theta_0 = p \frac{\lambda_0}{na}$$

L'ordre 0 correspond à la direction géométrique (comme si le réseau n'était pas là) et le nombre d'ordres du réseau visibles n'est pas infini (cf $|\sin \theta_p| \leq 1$) !

**4/ Utilisation d'une fente source**

Avec le réseau plan de diffraction étudié et éclairé par une source **ponctuelle** monochromatique, on obtient sur l'écran une **série de points très lumineux**, chacun d'eux correspondant à un ordre du réseau.

En pratique, on peut se permettre d'éclairer le réseau grâce à une **fente source incohérente de direction parallèle aux traits du réseau**. De la sorte, on observe sur l'écran **une raie lumineuse pour chaque ordre** (par superposition des intensités obtenues à partir de chaque point de la source incohérent avec les autres). La raie d'ordre 0 est sur l'image géométrique de la fente source.



5/ Expression de l'intensité pour N ondes (HP)

Les N rayons qui interfèrent en un point M du détecteur émergent du réseau parallèlement entre eux avec un retard de phase pour deux rayons consécutifs invariant

$$\varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M) = (\vec{k}_i - \vec{k}(M)) \cdot \overrightarrow{O_0 O_1}$$

en notant respectivement \vec{k}_i et $\vec{k}(M)$ les vecteurs d'onde incident sur le réseau et émergent. Dans le chapitre précédent, on a vu, puisqu'il s'agit d'interférences à N ondes synchrones cohérentes de retards de phase en progression arithmétique, que l'on en déduit l'intensité en fonction réseau

$$I_{\text{int.}}(M) = N^2 I_0 \left(\frac{\sin \left[\frac{N \varphi(M)}{2} \right]}{N \sin \left[\frac{\varphi(M)}{2} \right]} \right)^2$$

et on a déjà discuté les tracés correspondants...

Exercice 7

Expliquer le(s) rôle(s) du pas a et du nombre N de traits éclairés sur la figure d'interférences à N ondes.

Réponse

Le pas a joue sur les valeurs des angles θ_p des ordres du réseau, mais pas N qui joue, en ce qui le concerne, sur la finesse de chaque ordre (demi-largeur en phase de $2\pi/N$ pour chaque pic d'ordre). Ce dernier point est important pour la spectroscopie à réseau (voir chapitre suivant).

III - Autres dispositifs interférentiels diviseurs du front d'onde

On présente ici une série d'autres dispositifs interférentiels à deux ondes pour lesquels il est possible d'identifier les deux sources secondaires facilement⁸.

Point méthode

Il est important de procéder, autant que possible, avec la méthode suivante pour analyser les interférences par un dispositif donné :

1. Repérer le champ d'interférences par le tracé des **rayons marginaux** qui le délimitent.

8. Quand on sait comment s'y prendre bien sûr...

2. Tracer deux rayons interférant en un point M quelconque du champ d'interférences (en respectant les règles de l'optique...).
3. Repérer les sources secondaires (méthodes vues ensuite) et mener les calculs.
4. Vérifier et commenter les résultats obtenus (comme d'habitude).

1/ Miroir de Lloyd

Définition

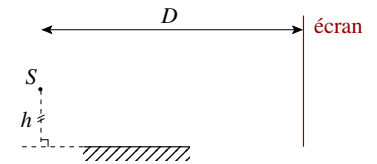
On appelle **frange centrale** la frange où la différence de marche **géométrique** est nulle.

Cette notion de frange centrale intervient particulièrement dans le miroir de Lloyd (où l'on va voir qu'elle ne correspond pas à une frange d'ordre zéro en raison de l'existence d'un déphasage supplémentaire...).

Exercice 8

Le dispositif du miroir de Lloyd (représenté) est éclairé par une source S supposée ponctuelle et monochromatique (longueur d'onde λ_0). On précise que $D \gg h$.

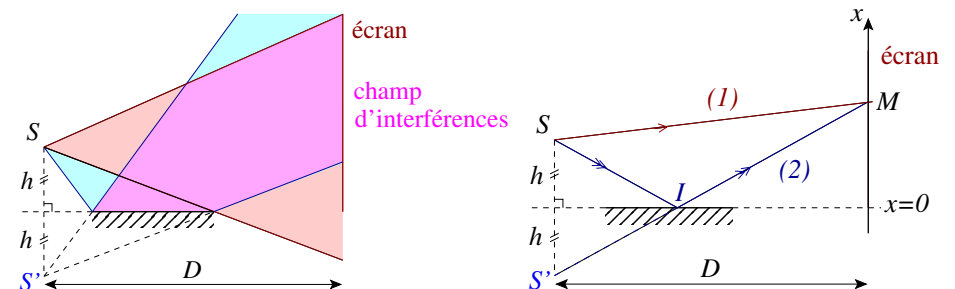
Étudier ce dispositif...



Réponse

On suit la démarche précisée en début de section...

1. On commence par tracer les rayons marginaux en utilisant l'image S' de S par le miroir plan (voir figure suivante de gauche). On en déduit le champ d'interférences.
2. Soit un point M quelconque sur l'écran. Les rayons qui y interfèrent proviennent (ou semblent provenir) de S et S' :



3. Les sources secondaires sont S et S' et sont en phase (au déphasage supplémentaire près !) par propriété déjà vue du miroir plan. Alors, avec l'indice unité pour l'air

$$\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1 = S'M - SM + \frac{\lambda_0}{2}$$

Les échelles pratiques sont telles que les distances x , y et h sont très petites devant D donc, par analogie avec les trous de Young, on trouve

$$\delta(M) = \frac{2hx}{D} + \frac{\lambda_0}{2}$$

et, en supposant le miroir idéal, les sources secondaires ont même luminosité donc la formule de Fresnel des interférences à deux ondes donne

$$I(M) = I_0 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{i} \right) \right] \quad \text{avec} \quad i = \frac{\lambda_0 D}{2h}$$

4. Le résultat obtenu est remarquable dans le sens où, si la frange centrale (en $x = 0$) était dans le champ d'interférences, elle serait noire !

Expérimentalement, avec une lumière polarisée orthogonalement au plan d'incidence, on peut repérer les franges et se rendre compte de ce fait, ce qui montre que ce n'est pas le champ magnétique qu'il faut considérer dans le calcul de l'intensité lumineuse mais le champ électrique (le champ magnétique n'est pas déphasé à la réflexion, contrairement au champ électrique).

Moralité

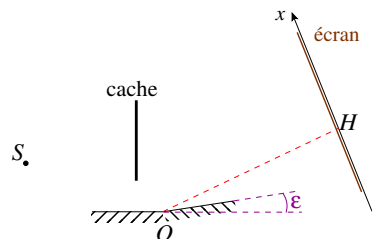
En présence d'un miroir plan, pensez à exploiter le point image par celui-ci qui est en phase avec le point objet (au déphasage supplémentaire ondulatoire près) !

2/ Miroirs de Fresnel

Exercice 9

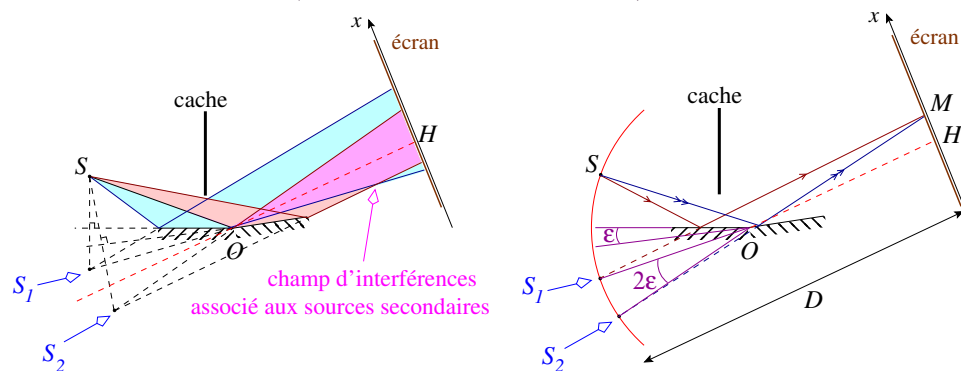
Le dispositif des miroirs de Fresnel est représenté sur la figure qui suit et est éclairé par une source ponctuelle monochromatique. L'étudier...

On pourra calculer l'interfrange dans le cas particulier $\varepsilon = 17'$ (minute d'arc), $\lambda_0 = 0,5 \mu\text{m}$ et $OS = OH$.



Réponse

- On commence par tracer les rayons marginaux en utilisant les images S_1 et S_2 de S par chaque miroir plan (voir figure suivante de gauche).
- Soit un point M quelconque sur l'écran. Les rayons qui y interfèrent semblent provenir de S_1 et S_2 (voir figure suivante de droite).



3. Les sources secondaires sont S_1 et S_2 et sont en phase ! Alors, avec l'indice unité pour l'air

$$\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1 = S_2M - S_1M$$

Les échelles pratiques sont telles que les distances x , y et S_1S_2 sont très petites devant D donc, par analogie avec les trous de Young, on trouve

$$\delta(M) = \frac{S_1S_2 x}{D}$$

et, en supposant les miroirs idéaux, les sources secondaires ont même luminosité donc la formule de Fresnel des interférences à deux ondes donne

$$I(M) = I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{i} \right) \right] \quad \text{avec} \quad i = \frac{\lambda_0 D}{S_1S_2}$$

Il reste à déterminer D et S_1S_2 ... Pour cela, on remarque que pour passer de S_1 à S_2 , on compose deux symétries planaires sécantes qui sont équivalentes à une rotation d'axe la droite commune et d'angle double de celui entre les plans, soit 2ε (voir l'encadré de moralité suivant). Du coup, S, S_1 et S_2 sont sur un même cercle de centre O et, avec $\varepsilon \ll 1$,

$$S_1S_2 = 2\varepsilon OS \quad \text{et} \quad D = OS + OH$$

4. L'interfrange est finalement, avec $\varepsilon = 17' = 5.10^{-3}$ rad,

$$i = \frac{\lambda_0}{\varepsilon} = 0,1 \text{ mm}$$

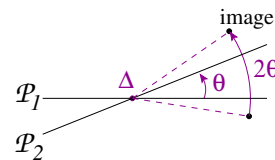
Encore une fois, un viseur micrométrique est recommandé pour la mesure de l'interfrange (en se basant sur plusieurs franges pour réduire l'incertitude bien sûr). On peut augmenter l'interfrange **en réduisant l'angle ε** !

Moralité

Les composées de symétries planaires peuvent être très utiles pour mener élégamment et sans souffrance les calculs de différence de marche ! Rappelons deux résultats **essentiels pour nous** du cours de mathématiques (MPSI) :

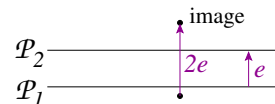
- Soient deux plans \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 sécants suivant une droite Δ et formant un angle θ entre eux (voir figure).

Alors, la composée des symétries orthogonales successives par \mathcal{P}_1 puis \mathcal{P}_2 est **une rotation d'axe Δ et d'angle 2θ** (voir orientations sur la figure).



- Soient deux plans \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 parallèles et distants de e (voir figure).

Alors, la composée des symétries orthogonales successives par \mathcal{P}_1 puis \mathcal{P}_2 est **une translation de la distance $2e$ suivant la normale aux plans** (voir orientation de la figure).

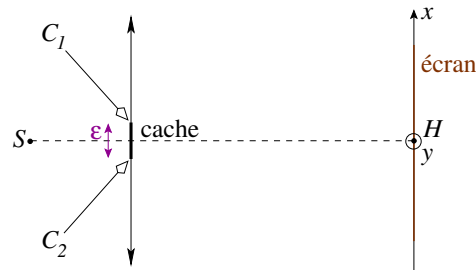


3/ Bilentilles de Billet

Exercice 10

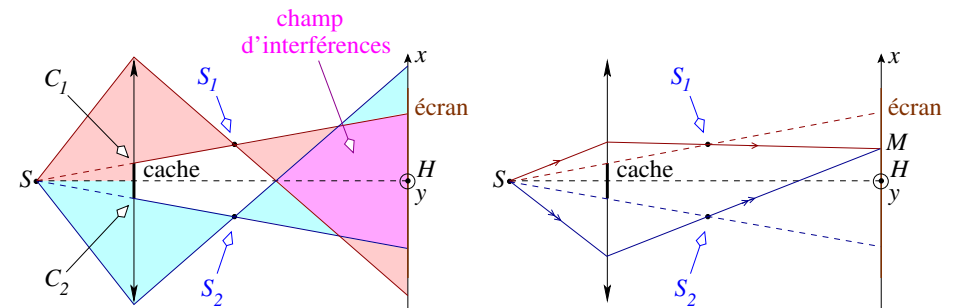
Le système des bilentilles de Billet est réalisé à partir d'une lentille convergente séparée selon l'un de ses diamètres en deux morceaux de centres optiques C_1 et C_2 (petite séparation ε). Un cache masque la lumière directe qui pourrait passer entre les deux morceaux de lentille. La source primaire est ponctuelle, monochromatique et n'est pas placée dans le plan focal objet des morceaux de lentille.

Préciser le champ d'interférences, ainsi que la position des sources secondaires et la nature des franges sur l'écran.



Réponse

1. Rayons marginaux et champ d'interférences sont précisés sur la figure de gauche, en faisant apparaître les points conjugués S_1 et S_2 de S par chaque bout de lentille.



2. Les points S_1 et S_2 se comportent comme des sources secondaires en phase par symétrie du dispositif. On note que tous les rayons passent bien par ces points dans les conditions de Gauss (stigmatisme approché). Les rayons interférant en un point M sont alors connus (voir figure précédente de droite).
3. On obtient sur l'écran des franges quasi-rectilignes suivant (Hy) (en songeant aux hyperboloïdes de révolution à deux nappes interceptés par cet écran parallèlement à leurs foyers S_1 et S_2).

Le calcul de la différence de marche (non fait ici) nécessite la détermination des positions des sources secondaires en exploitant les formules de conjugaison de Descartes. En pratique, l'interfrange est d'autant plus grand que la séparation ε est faible.

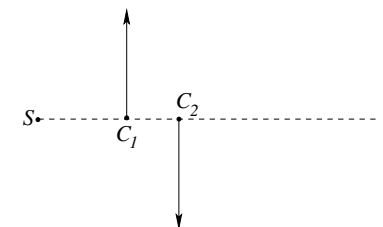
Moralité

Pensez aux symétries !

4/ Bilentilles de Meslin (et ellipsoïdes)

Exercice 11

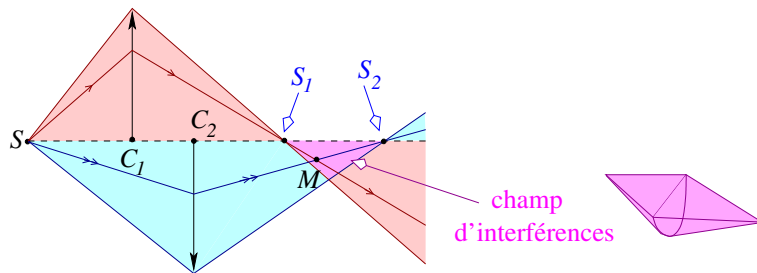
Le système des bilentilles de Meslin est réalisé à partir d'une lentille convergente séparée selon l'un de ses diamètres en deux morceaux qui sont disposés à des positions différentes sur l'axe optique. La source primaire est ponctuelle, monochromatique et n'est pas placée dans les plans focaux objets des morceaux de lentille.



Préciser le champ d'interférences, ainsi que la position des sources secondaires et la nature des franges sur un écran placé orthogonalement à l'axe optique dans ce champ.

Réponse

1. Le tracé des rayons marginaux et du champ d'interférences est le suivant, en faisant apparaître les points conjugués S_1 et S_2 de S par chaque morceau de lentille.



L'allure dans l'espace du champ d'interférences a été précisée à droite (ce sont deux demi-cônes de sommets S_1 et S_2 accolés par leur base).

2. Les points S_1 et S_2 se comportent comme des sources secondaires car, par stigmatisme approché, tous les rayons issus de S passent et arrivent en phase en S_1 ou S_2 . **Par contre, S_1 et S_2 ne sont pas en phase ! De plus, le positionnement de l'écran est tel que S_2 est virtuelle !**
3. La nature des franges s'obtient en considérant la différence de marche (indice unité pour l'air ; attention au déphasage supplémentaire par passage par le point image S_1) :

$$\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1 = (SS_2) - (SS_1) - S_1M - S_2M + \lambda_0/2$$

Par la condition de stigmatisme et en utilisant les rayons sur l'axe optique,

$$\delta(M) = S_1S_2 - S_1M - S_2M + \lambda_0/2$$

S_1S_2 est une constante déterminable connaissant les positions de S_1 et S_2 par les formules de conjugaison de Descartes. Par conséquent, les franges correspondent à $S_1M + S_2M = C^{te}$, ce qui est la formule bifocale d'**ellipsoïdes de révolution de foyers S_1 et S_2 !**

Finalement, par intersection avec l'écran, on voit que les franges sur celui-ci sont des demi-anneaux !

Moralité

Suivant la nature des sources secondaires, on se rend compte que l'on n'a pas forcément des franges dans l'espace correspondant à des hyperboloïdes de révolution à deux nappes !

De plus, les sources secondaires ne sont pas forcément toujours en phase ; ce qui compte, c'est que les rayons qui interfèrent semblent provenir de celles-ci avec une phase propre à chaque source décalée d'une constante (ou quasi-constante à l'échelle du temps de réponse du détecteur).

5/ Biprisme de Fresnel (en faisceau parallèle)

a. Préliminaire sur le prisme

L'étude du dispositif du biprisme de Fresnel nécessite l'utilisation d'un théorème particulier. Il faut toujours le redémontrer car il est hors-programme.

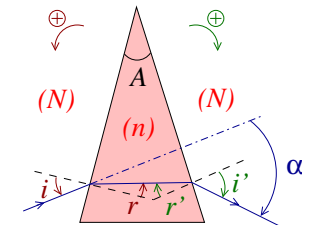
Théorème 3 (HP)

Soit un prisme d'indice n et d'angle au sommet $A \ll 1$ plongé dans un milieu d'indice N . Un rayon arrivant en incidence quasi-normale (angle d'incidence $i \ll 1$) est dévié **vers la base du prisme** de l'angle

$$\alpha \simeq \left(\frac{n}{N} - 1 \right) A$$

Démonstration

On choisit de travailler avec les angles orientés en sens contraire en entrée et sortie du prisme (ce qui donne des relations identiques à celles avec des angles absolus, mais avec l'avantage de l'algébrisation). La figure est faite dans le cas d'angles quelconques pour y voir quelque chose et déduire proprement la formule demandée !



Les formules du prisme (hors contenu du cours de MPSI...) s'écrivent dans ce cas (en exploitant la composition de Chasles des angles) :

$$\alpha = i' - r' - r + i \quad A = r + r' \quad N \sin i = n \sin r \quad n \sin r' = N \sin i'$$

Or i est petit donc la première relation de Descartes entraîne que r est petit aussi. Ensuite, la formule donnant A , avec $A \ll 1$, fournit r' petit et la seconde relation de Descartes donne enfin i' petit. Du coup, ces relations de Descartes s'écrivent

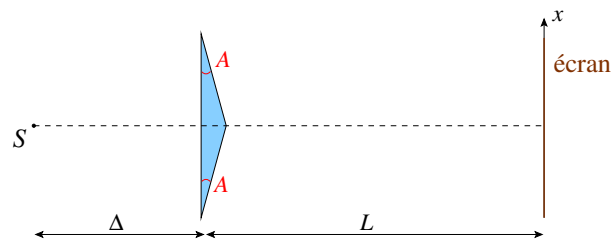
$$N i = n r \quad \text{et} \quad n r' = N i'$$

On élimine sans difficulté les angles i , i' , r et r' pour arriver au résultat escompté.

b. Étude du biprisme en faisceau parallèle

Exercice 12

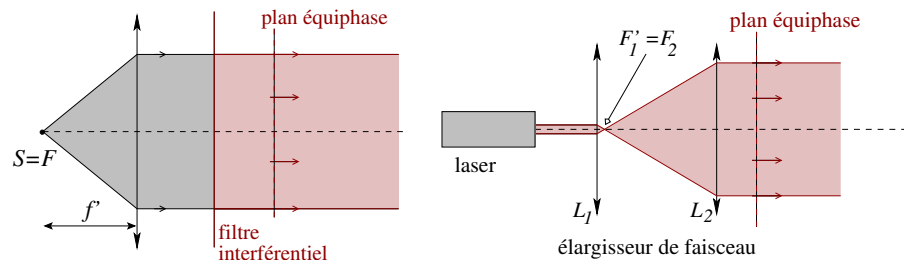
Le dispositif du biprisme de Fresnel est constitué de deux petits prismes d'angle au sommet $A \ll 1$ (voir figure).



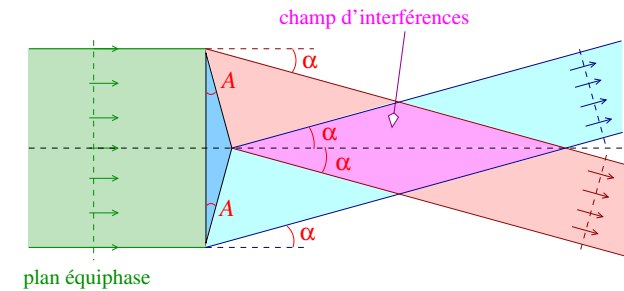
1. Préciser deux exemples différents de dispositifs pratiques permettant de réaliser un éclairage quasi-monochromatique cohérent en incidence normale sur toute la face de gauche du biprisme.
2. Où doit-on placer l'écran pour observer des interférences ? Caractériser celles-ci.

Réponse

1. Voici deux façons de faire classiques (où tout se passe comme si on avait une source ponctuelle quasi-monochromatique à l'infini) :



2. Le champ d'interférences est représenté sur la figure suivante : ce sont deux faisceaux parallèles qui interfèrent entre eux, avec l'axe de symétrie du biprisme qui est un lieu de déphasage nul entre eux (par symétrie).



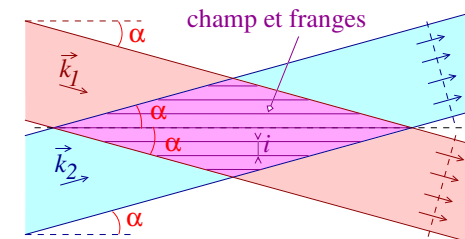
Le placement de l'écran doit être tel qu'il intercepte ce champ. Notons que tout se passe comme si les sources secondaires S_1 et S_2 , d'où semblent provenir les rayons, étaient rejetées à l'infini en amont du biprisme.

Comme on l'a vu précédemment, si l'indice de l'air est $N = 1$, $\alpha = (n - 1) A$. De plus, ce type d'interférences a été traité au chapitre précédent ! Le déphasage en un point M du champ d'interférences est

$$\Delta\varphi(M) = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{OM}$$

où interviennent les vecteurs d'onde des deux faisceaux et O est un point du plan de symétrie. Ce plan contient une frange brillante, les autres lui étant parallèles avec un espacement

$$i = \frac{\lambda_0}{2n \sin \alpha}$$

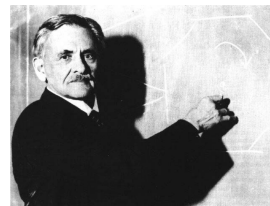
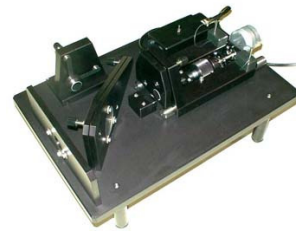


Moralité

Il faut penser à utiliser la méthode spécifique de traitement des interférences entre faisceaux parallèles non parallèles (hi hi...) pour être efficace (voir chapitre précédent pour les détails).

IV - Interféromètre de Michelson; usage en diviseur du front d'onde

On se propose à présent de réaliser une première partie de l'étude d'un autre interféromètre clé du programme (en plus de l'interféromètre à trous/fentes de Young) : l'interféromètre de Michelson. Il sera utilisé ici avec une source ponctuelle en diviseur du front d'ondes (HP) et l'étude en diviseur d'amplitude sera menée au chapitre suivant (au programme mais plus facile à comprendre avec ce qui va être fait ici!).



Albert Abraham Michelson
(1852-1931)
Prix Nobel de physique 1907

Attention !

La maîtrise de la théorie associée à l'interféromètre de Michelson est cruciale pour les concours, y compris pour les TP (où, même en connaissant la théorie et avec protocole, on peut avoir du mal à le régler...).

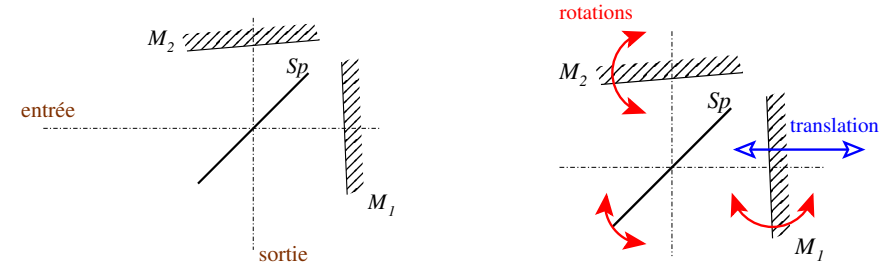
2/ Description de l'interféromètre de Michelson

a. Schéma théorique (sans compensatrice)

L'interféromètre *théorique* est constitué de deux miroirs plans (M_1) et (M_2) et d'une lame de verre (S_p) plane semi-réfléchissante appelée **séparatrice**. Celle-ci divise le faisceau incident (arrivant de l'entrée) en deux parts égales grâce à un traitement particulier de surface. Le but d'une telle division est de pouvoir produire des interférences à deux ondes avec le meilleur contraste possible avec observation côté sortie.

9. A. A. Michelson et E. W. Morley, "On the relative motion of the Earth and the Luminiferous Ether", *Am. J. Phys.*, **34** 333 (1887). Cet article est accessible à l'adresse

<http://www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf>



Les deux miroirs (M_1) et (M_2), ainsi que (S_p), sont **orientables par rotations bi-axes**. Le miroir (M_1) est **translatable** par une opération dite de **chariotage** (car il est monté sur un chariot).

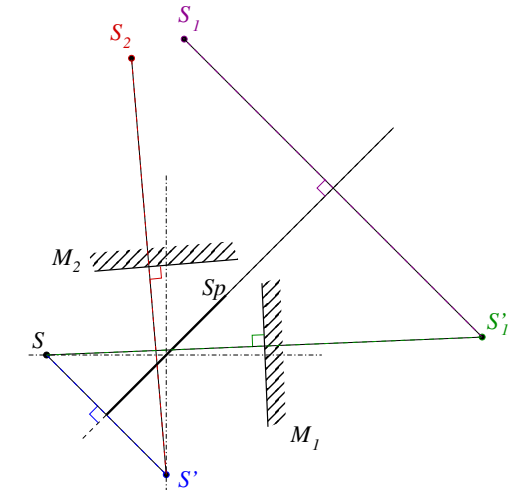
On suppose pour le moment que (S_p) est infiniment fine.

b. Construction des trajets optiques

On pourrait se dire que le trajet des rayons est compliqué à représenter dans un tel système *mais ce n'est pas le cas si l'on pense à exploiter les points images relatifs à chaque réflexion*.

Soit un point source S donné. Définissons alors des points issus de symétries planaires comme suit :

$$\begin{aligned} S'_1 &= \text{Sym}_{M_1}(S) \\ S_1 &= \text{Sym}_{S_p}(S'_1) \\ S' &= \text{Sym}_{S_p}(S) \\ S_2 &= \text{Sym}_{M_2}(S') \end{aligned}$$



Exercice 13

Préciser l'utilité de chacun des points S' , S'_1 , S_1 et S_2 .

Réponse

Le point S' permet de tracer le rayon réfléchi dû à un rayon incident depuis la source sur la séparatrice.

Le point S'_1 permet de tracer le rayon réfléchi dû à un rayon incident sur le miroir M_1 .

Le point S_1 permet de tracer le rayon réfléchi dû à un rayon incident issu du miroir M_1 sur la séparatrice.

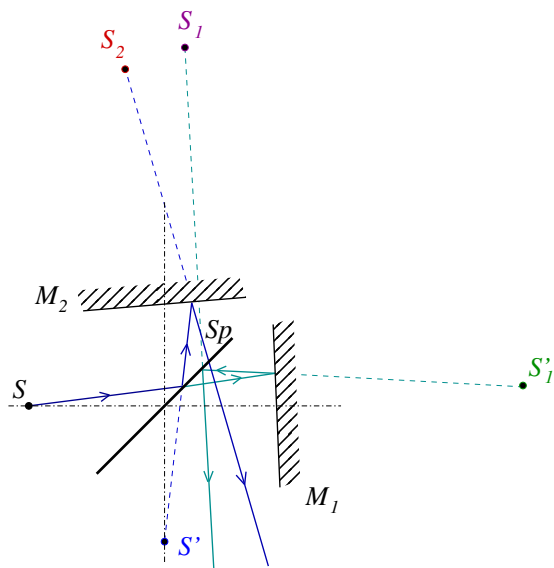
Le point S_2 permet de tracer le rayon réfléchi dû à un rayon incident sur le miroir M_2 .

Attention !

Pensez à laisser de la place autour de l'interféromètre pour pouvoir faire vos figures sans déborder de votre feuille (ou du tableau à l'oral). Une astuce pour ne pas être trop gêné consiste à placer le point source S assez près de l'interféromètre¹⁰.

Exercice 14

La figure suivante¹¹ précise un rayon incident dans l'interféromètre depuis une source ponctuelle S . Tracer les rayons sortant de l'interféromètre après parcours des deux bras (S_p, M_1, S_p) et (S_p, M_2, S_p) .

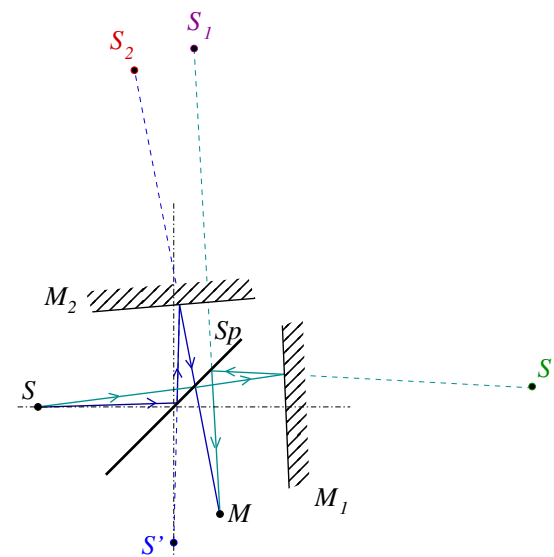
Réponse**Exercice 15**

Effectuer, sur la figure suivante, le tracé des deux rayons issus de S et qui interfèrent au point M après passage dans l'interféromètre¹².

10. Il ne faut pas pour autant mettre S dans l'interféromètre pour rester un minimum réaliste !

11. Les sources secondaires sont déjà précisées pour gagner du temps mais elles ne vous sont usuellement pas données !

12. Encore une fois, les sources secondaires sont déjà précisées pour gagner du temps mais elles ne sont généralement pas données !

Réponse

On peut bien entendu vous demander des tracés analogues en ajoutant une ou plusieurs lentilles au niveau de l'entrée et de la sortie ; il faut alors exploiter les points conjugués par ces lentilles.

Remarque

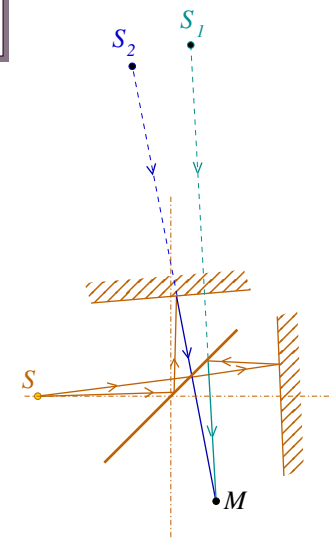
Aucun autre type de trajet optique dans l'interféromètre est considéré (réflexions supplémentaires ou multiples négligées...).

c. Propriété de phase

On se rend bien compte, avec les dessins précédent et ci-contre, de l'importance des points S_1 et S_2 : ils permettent de tracer directement les rayons sortants qui interfèrent au point M (quelque soit ce point). De plus, ils ont une propriété de phase intéressante...

Théorème 4

Les points S_1 et S_2 sont des sources secondaires en phase dans le modèle théorique simplifié de l'interféromètre de Michelson.



Démonstration

S_1 et S_2 sont des images de S après une double réflexion planaire. Par propriété connue pour chacune de ces réflexions, il vient le résultat annoncé.

Usuellement, sauf traitement particulier (surtout pour la séparatrice), chaque réflexion introduit un déphasage de π donc S , S_1 et S_2 sont en phase alors que S' et S'_1 sont en opposition de phase avec eux.

Exercice 16

Soit une source ponctuelle S monochromatique éclairant l'interféromètre de Michelson (aucune lentille n'étant ajoutée au dispositif). Expliciter la différence de marche en tout point M du champ d'interférences. Préciser la nature des franges d'interférences associées.

Réponse

La différence de marche est

$$\delta(M) = (SM)_1 - (SM)_2 = (SS_1) - (SS_2) + (S_1M) - (S_2M)$$

soit

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

On a déjà vu que dans ce cas, les franges obtenues sont les parties présentes dans le champ d'interférences d'**hyperboloïdes de révolution à deux nappes de foyers S_1 et S_2** .

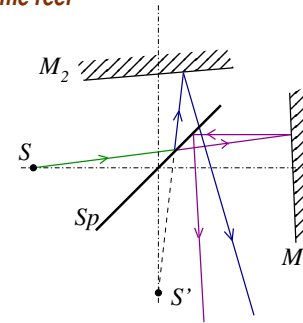
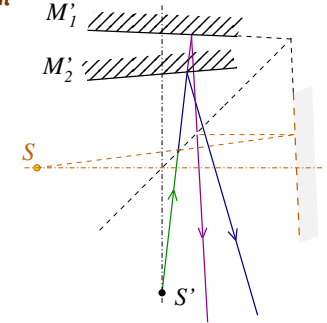
Suivant le positionnement d'un écran en sortie de l'interféromètre, on peut recueillir divers types de figures (franges quasi-rectilignes, anneaux...).

d. Schéma équivalent à deux miroirs fictifs

Les rayons dans l'interféromètre peuvent sembler compliqués en raison des cassures à chaque réflexion. Il y a moyen de réaliser un schéma fictif « plié » plus simple produisant les mêmes interférences dans le champ d'interférences d'origine :

- soit S' l'image de la source d'origine par la séparatrice ;
- soit M'_1 le miroir fictif image de M_1 par la séparatrice et transparent aux rayons du bras (2) ;
- soit M'_2 le miroir fictif correspondant à M_2 , transparent aux rayons du bras (1).

On a alors l'équivalence, du point de vue des rayons sortants, entre les deux dispositifs suivants :

Système réel**Système équivalent à deux miroirs****Définitions**

On dit que l'interféromètre de Michelson est en **lame d'air** (à faces parallèles) lorsque les miroirs fictifs M'_1 et M'_2 sont parallèles. Dans le cas contraire, l'interféromètre est dit en **coin d'air**.

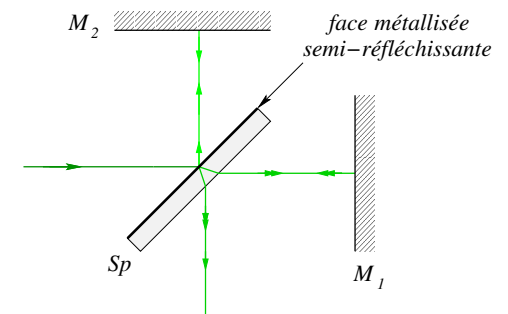
Ces deux configurations conduisent en pratique à des situations interférentielles très différentes comme on va le voir dans la suite du chapitre.

e. Nécessité pratique de la compensatrice

En pratique, la séparatrice n'est pas une lame d'épaisseur nulle ! C'est une lame de verre à faces parallèles dont l'une est rendue semi-réfléchissante par dépôt d'une mince couche métallique.

Exercice 17

Expliquer le plus simplement possible pourquoi la prise en compte de l'épaisseur de (S_p) introduit un décalage de différence de marche qui complique fortement l'analyse des interférences obtenues par l'interféromètre.

**Réponse**

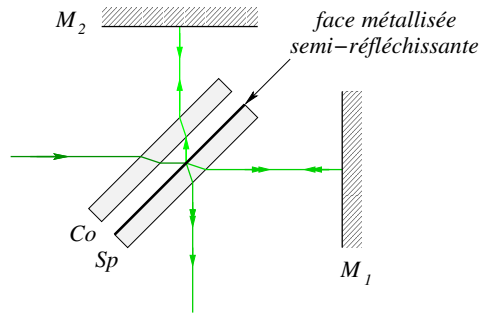
On voit sur la figure que le faisceau du bras (1) passe trois fois dans l'épaisseur de verre de la séparatrice tandis que le faisceau du bras (2) n'y passe qu'une seule fois !

L'existence de l'épaisseur de la séparatrice introduit donc une différence de marche qui dépend de l'indice du verre (qui dépend de la longueur d'onde !). Cela complique

franchement l'analyse des interférences (et produit par exemple en lumière blanche le phénomène de frange achromatique).

Définition

On appelle **compensatrice** (C_o) la lame de verre identique à la séparatrice (S_p) (mais sans couche semi-réfléchissante) placée dans l'interféromètre permettant de compenser au mieux¹³ le chemin optique dans (S_p). Pour cela, (C_o) et (S_p) doivent être parallèles.



On voit bien sur la figure que l'opération de compensation est bien réalisée (les chemins optiques dans les épaisseurs de verre sont identiques pour les bras (1) et (2)).

Remarque

Il peut rester un décalage supplémentaire de différence de marche de $\lambda_0/2$ entre les rayons issus des deux bras en raison des réflexions de nature différente au niveau de la face métallisée de (S_p). Cela dépend du modèle d'interféromètre...

Attention !

Dans toute la suite, on regroupe (S_p) et (C_o) en une unique lame séparatrice (S_p) idéale : son épaisseur est nulle et elle n'introduit aucune différence de marche supplémentaire particulière.

f. Autres aspects pratiques

Pour approcher le modèle de l'interféromètre idéal, il faut que les différentes pièces optiques qui composent l'appareil soient de qualité « interférométrique ». En effet, les miroirs et les lames ne doivent pas déformer les surfaces d'onde, ce qui impose **une planéité et un polissage très précis**, avec une tolérance meilleure que $\lambda/10$ pour les irrégularités résiduelles (pour les appareils usuels).

De même, la sensibilité des interférences lumineuses correspond à des déplacements qui sont inférieurs à une longueur d'onde du domaine optique, soit typiquement 100 nm.

13. La compensation n'est en fait parfaite que lorsque l'interféromètre est utilisé en lame d'air...

Il faut donc une **mécanique de précision**, qui permette de régler l'orientation des miroirs de façon à la fois sensible et stable. Il est également nécessaire que la translation (chariotage) du miroir soit très progressive et que le miroir conserve une orientation rigoureusement constante au cours de ce déplacement.

Il faut par ailleurs **éviter toute vibration intempestive**, qu'on pourrait par exemple créer en s'appuyant sur la table de manipulation et qui risquerait évidemment de perturber la figure d'interférences obtenue (voire la brouiller!).

L'ensemble de ces contraintes fait qu'un interféromètre de Michelson de bonne qualité est un **matériel coûteux**¹⁴ et **fragile**. Il faut donc le manipuler avec précaution, en prenant soin de ne pas abîmer les mouvements mécaniques et en ne touchant pas avec les doigts les pièces optiques (miroirs et lames).

3/ Franges circulaires non localisées d'une lame d'air (HP)

a. Analyse préalable

On considère une source ponctuelle¹⁵ S, monochromatique, à distance finie de l'interféromètre et avec un large angle d'ouverture.

Exercice 18

1. Comment réaliser en pratique du mieux possible une telle source ?
2. Prévoir la nature des franges d'interférences recueillies sur un écran en sortie de l'interféromètre.

Réponse

1. On peut prendre un laser et un objectif de microscope (ou une lentille de très courte focale). Ainsi, on assure la quasi-monochromaticité de la source avec une bonne luminosité et une bonne ouverture. La source ponctuelle S se trouve au foyer image de l'objectif.
2. Le dispositif interférentiel crée (comme déjà vu) deux sources secondaires synchrones et en phase S_1 et S_2 et les franges dans l'espace sont des hyperboloïdes de révolution à deux nappes de foyers S_1 et S_2 . Les franges recueillies sur un écran correspondent à l'intersection des hyperboloïdes avec celui-ci (supposé plan).

On obtiendra des **franges circulaires (ou anneaux)** dès que l'écran est orthogonal à l'axe focal (S_1S_2). Ce résultat est logique compte tenu de l'invariance de révolution, en termes de chemins optiques, par rapport à (S_1S_2).

Cette situation est bien différente de celle des trous de Young...

14. Ceux dont dispose le lycée coûtent environ 7000 € pièce...

15. Dans ce cas, on obtient des franges d'interférences dites « non localisées » contrairement au cas, au programme, d'une source étendue. Cette notion ne sera présentée qu'au chapitre suivant avec l'étude des problèmes de cohérence spatiale et de localisation.

b. Différence de marche approchée, ordre, rayons des anneaux

Exercice 19

La figure ci-contre précise les notations utiles pour la configuration en lame d'air de l'interféromètre avec un écran (E) et une source ponctuelle. L'indice de l'air est pris égal à l'unité.

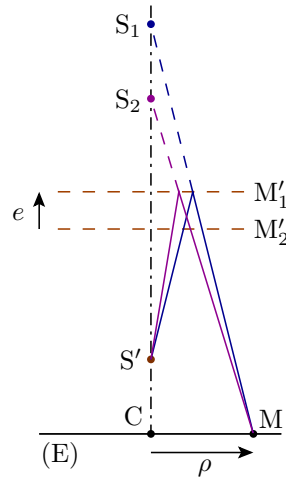
1. Quelle est la distance S_1S_2 ?
2. Montrer que, lorsque $D = S_2C \gg \rho = CM$, condition réalisée usuellement en pratique, la différence de marche au point M de l'écran vaut

$$\delta(M) \simeq 2e \left[1 - \frac{\rho^2}{2D(D+2e)} \right]$$

Comment se simplifie à l'ordre le plus bas ce résultat pour $e \ll D$? On conserve ce cadre pour la suite.

3. On considère le cas $e > 0$. Comment évolue l'ordre d'interférences quand ρ augmente ? Montrer que le rayon du q^e anneau brillant sur l'écran est, dans les conditions d'étude,

$$\rho_q = D \sqrt{\frac{2}{p_0} [p_0 - E(p_0) + q - 1]} \quad \text{où} \quad p_0 = \frac{2e}{\lambda_0}$$



Réponse

1. La composée des deux symétries planaires permettant de passer de S_2 à S_1 est une translation de $2e$, d'où

$$S_1S_2 = 2|e|$$

2. Comme déjà vu, la différence de marche est

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

Ensuite, on procède comme déjà vu au chapitre précédent... Par théorème de Pythagore,

$$S_1M = \sqrt{(D+2e)^2 + \rho^2} \quad \text{et} \quad S_2M = \sqrt{D^2 + \rho^2}$$

La différence de marche ne dépend que de ρ , ce qui est cohérent avec une figure d'interférences constituée d'anneaux de centre C.

Compte tenu de $D \gg \rho$, il vient

$$S_1M \simeq (D+2e) \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{(D+2e)^2} \right] \quad \text{et} \quad S_2M \simeq D \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{D^2} \right]$$

La soustraction de ces expressions donne, après simplifications élémentaires, le résultat annoncé :

$$\delta(M) \simeq 2e \left[1 - \frac{\rho^2}{2D(D+2e)} \right]$$

Lorsqu'on dispose en plus de la condition $D \gg e$, il vient

$$\delta(M) \simeq 2e \left[1 - \frac{\rho^2}{2D^2} \right]$$

3. L'ordre d'interférences $p(M) = \delta(M)/\lambda_0$ **diminue** quand ρ augmente pour $e > 0$ (il ne faut pas croire que l'ordre est nul au centre et augmente unité par unité en s'éloignant du centre C!).

Pour obtenir le rayon des anneaux brillants, on commence par déterminer les ordres correspondants. Comme l'ordre est maximal au centre et que le premier anneau brillant possède un ordre entier, celui-ci est

$$p_1 = E \left[\frac{2e}{\lambda_0} \right] = E(p_0)$$

Les ordres des anneaux brillants suivants sont les valeurs entières inférieures accessibles. Du coup, pour le q^e anneau, l'ordre est

$$p_q = p_1 - q + 1 = p_0 \left[1 - \frac{\rho_q^2}{2D^2} \right]$$

et l'isolement de ρ_q conduit bien au résultat annoncé (dans lequel intervient l'excédent fractionnaire de p_0 qui est nul si le centre est brillant...).

Il est manifeste que les anneaux sont de plus en plus resserrés dans le champ d'interférences intercepté par l'écran en s'éloignant du centre C.

c. Conséquences pratiques

Définition

On appelle **contact optique** de l'interféromètre de Michelson la situation où les miroirs fictifs sont **confondus** (lame d'air d'épaisseur nulle).

Au contact optique, la différence de marche est forcément nulle pour tout point du champ d'interférences !

Théorème 5 (HP)

Soit un interféromètre de Michelson en configuration lame d'air et éclairé par une source ponctuelle. Alors¹⁶,

- les anneaux observés **rentrent dans le centre** quand on se **rapproche** du contact optique (diminution de l'épaisseur $|e|$ de lame d'air) ;
- les anneaux visibles sur l'écran sont **plus grands et moins nombreux** quand on se **rapproche** du contact optique.

Démonstration

Considérons une épaisseur $e > 0$ de lame d'air (raisonnement symétrique pour $e < 0$, ce qui fait que l'on considère souvent e comme une grandeur absolue...). Alors, un anneau donné de rayon ρ et d'ordre p vérifie (dans le cadre des approximations $D \gg \rho$ et $D \gg e$)

$$p = \frac{2e}{\lambda_0} \left[1 - \frac{\rho^2}{2D^2} \right]$$

Suivons cet anneau (p fixé) lorsque e diminue. La relation précédente montre que ρ diminue : l'anneau évolue vers le centre pour y disparaître.

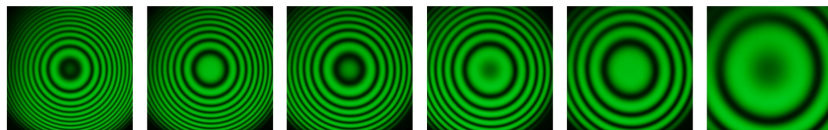
On a vu que lorsqu'on a un centre brillant, le rayon des anneaux vis suit la loi

$$\rho_q = D \sqrt{\frac{2}{p_0} [p_0 - E(p_0) + q - 1]} \quad \text{où} \quad p_0 = \frac{2e}{\lambda_0}$$

La diminution de e conduit à des figures successives avec les rayons d'anneaux visibles de plus en plus grands (et ces anneaux sont moins nombreux).

Exercice 20

Voici une succession de photos de franges circulaires de la configuration lame d'air prises lors d'une modification monotone de l'épaisseur e (absolue) :



Pour l'évolution observée de gauche à droite, préciser si l'épaisseur e augmente ou diminue. Préciser aussi dans quel sens bougent les anneaux. Qu'observe-t-on au contact optique ?

16. Ce théorème est hors programme car il concerne les franges non localisées mais on verra, au chapitre suivant, le même énoncé pour une source étendue et **il sera au programme !**

Réponse

Avec le théorème précédent, l'épaisseur e **diminue** et les anneaux **rentrent dans le centre**. Au contact optique, la différence de marche est nulle en tout point et on observe une teinte uniforme (verte).

4/ Franges rectilignes non localisées du coin d'air (HP)**a. Analyse préalable**

Les miroirs fictifs ne sont plus parallèles dans cette section : il s'agit de la configuration en coin d'air.

Soit une source ponctuelle S, monochromatique, à distance finie de l'interféromètre et avec un large angle d'ouverture.

Exercice 21

Prévoir la nature des franges d'interférences recueillies sur un écran en sortie de l'interféromètre.

Réponse

Le dispositif interférentiel crée (comme déjà vu) deux sources secondaires synchrones et en phase S_1 et S_2 et les franges dans l'espace sont des hyperboloïdes de révolution à deux nappes de foyers S_1 et S_2 . Les franges recueillies sur un écran correspondent à l'intersection des hyperboloïdes avec celui-ci (supposé plan).

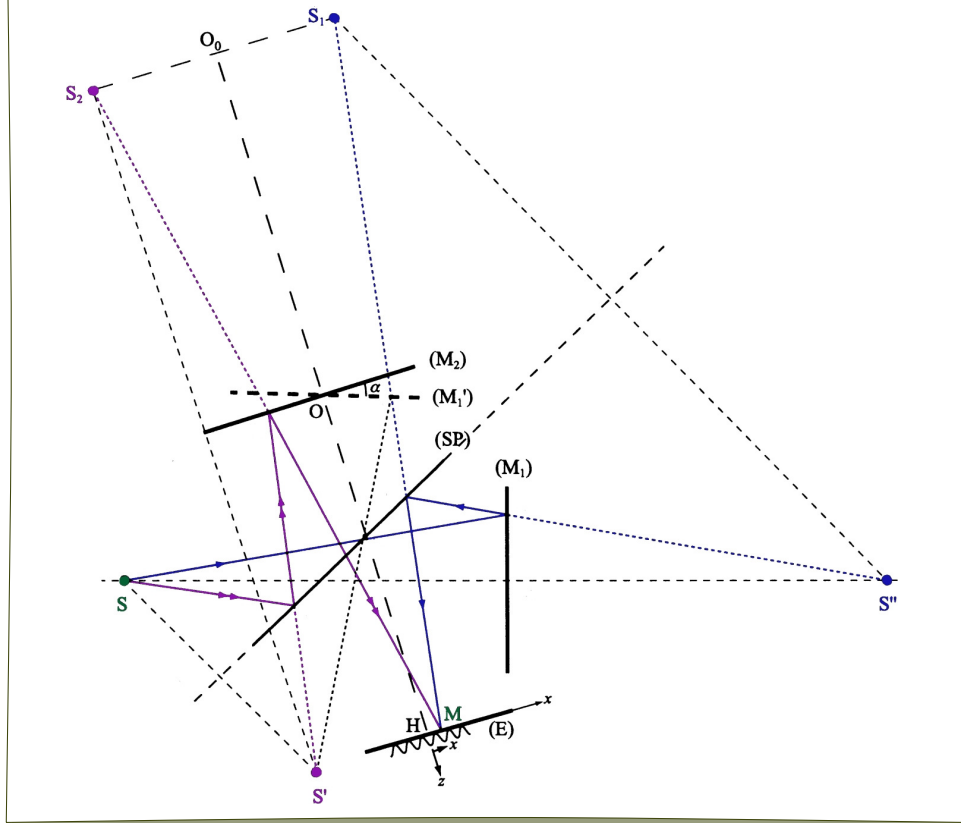
On obtiendra des **franges hyperboliques** mais les conditions pratiques font que l'on voit des **franges quasi-rectilignes**. Celles-ci sont **parallèles à l'arête du coin d'air**.

b. Calcul approché de la différence de marche ; interfrange**Exercice 22**

La figure en fin d'énoncé précise les notations utiles pour la configuration en coin d'air de l'interféromètre avec un écran (E). L'indice de l'air est pris égal à l'unité. L'angle α est orienté en sens trigonométrique et $|\alpha| \ll 1$.

1. Que vaut l'angle $\widehat{S_1OS_2}$?
2. Expliciter de façon approchée raisonnable la différence de marche au point M.
3. Que vaut l'interfrange en fonction de OO_0 , O_0H , α et λ_0 ?

4. Lorsque la source ponctuelle est à l'infini, vers quoi tend l'interfrange ? Commenter.
5. Pourquoi travaille-t-on avec $|\alpha|$ très faible en pratique ?



Réponse

1. Le passage de S_1 et S_2 se fait par composée de deux symétries planaires sécantes suivant l'arête du coin d'angle α . Par conséquent, il correspond dans le plan de la figure à une rotation d'angle 2α et de centre O , d'où

$$\widehat{S_1OS_2} = 2\alpha$$

2. En pratique, $O_0H \gg S_1S_2$, $O_0H \gg x$ et $O_0H \gg y$ (repérage du point M sur l'écran). Vu la position de l'écran, on se trouve dans une situation analogue à celle des trous de Young et il vient la différence de marche approchée

$$\delta(M) \simeq \frac{S_1S_2 x}{O_0H}$$

3. Toujours par analogie avec les trous de Young, il vient

$$i = \frac{\lambda_0 O_0H}{S_1S_2}$$

Or, $S_1S_2 \simeq 2\alpha O_0O$, d'où

$$i = \frac{\lambda_0 O_0H}{2\alpha O_0O}$$

4. Lorsque la source ponctuelle est à l'infini, cela revient à rejeter à l'infini les sources secondaires S_1 et S_2 de sorte que $O_0H \sim O_0O$. Ainsi,

$$i \rightarrow \frac{\lambda_0}{2\alpha}$$

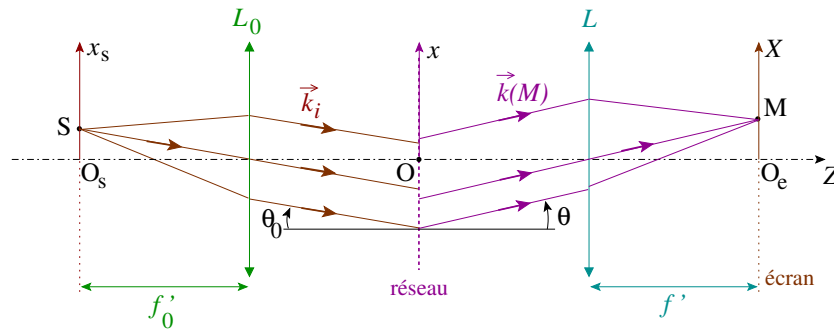
On retrouve la valeur de l'interfrange pour des interférences entre faisceaux de surfaces d'onde planes formant un angle 2α très faible entre eux, ce qui est logique !

5. On travaille avec $|\alpha| \ll 1$ en pratique car sinon, l'interfrange risque fort d'être bien trop faible pour que l'on puisse observer les franges d'interférences...

La première approche de l'interféromètre de Michelson, avec source ponctuelle (donc hors-programme...), se termine ici. Elle a permis de présenter l'interféromètre et d'introduire des définitions et notions utiles pour sa future rencontre dans le chapitre suivant avec une source étendue (donc au programme...).

Annexe I : Rôle de la diffraction à l'infini par chaque motif (HP)

C'est la diffraction par chaque motif d'un réseau (ce qui comprend le cas particulier des trous/fentes de Young...) qui permet l'obtention des interférences à N ondes sur un champ d'interférences assez large. Toutefois, cette diffraction n'est pas uniforme et on peut s'interroger sur les aspects quantitatifs associés dans le cas le plus simple de la diffraction à l'infini réalisée par le montage suivant¹⁷ (déjà présenté) :



Analysons le cas le plus simple où le motif est une fente fine¹⁸ de largeur ε ...

Première étape : diffraction à l'infini par une fente fine

Exercice 23

On considère le dispositif de diffraction à l'infini de la figure précédente mais avec pour objet diffractant une fente fine, de petit côté ε parallèle à l'axe (Ox) , de centre O (à la place du réseau). La source S est monochromatique ponctuelle et placée dans le plan $(O_S x_S Z)$. L'image géométrique de S, appelée S_{im} , a sur l'écran des coordonnées $(X_{im}, 0)$ et le point M des coordonnées (X, Y) .

1. La théorie de la diffraction d'Huygens-Fresnel en condition de Fraunhofer permet d'écrire dans ce cas l'expression de l'amplitude vibratoire de l'onde diffractée sous la forme suivante :

$$\underline{a}(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \int_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} e^{-j(k_{i,x} - k_x(M))x} dx$$

où le nombre $\delta_{Y,0}$ vaut 1 lorsque $Y = 0$ et 0 sinon.

Interpréter cette expression intégrale.

2. Déterminer l'intensité $I(X, Y)$ au point M sur l'écran, sachant que la lentille de projection L est utilisée dans les conditions de Gauss.
3. Représenter $I(X, 0)$ et commenter.

Réponse (visible)

1. L'amplitude vibratoire est nulle lorsque $Y \neq Y_{im} = 0$ (vu la position de S) en raison de la grande taille de fente suivant (Oy) relativement à la longueur d'onde (absence de diffraction suivant cette direction). Du coup, on peut raisonner dans le plan (OxZ) de la figure.

La source S permet de créer un faisceau parallèle monochromatique cohérent incident sur la fente donc on ne doit pas sommer les intensités mais les amplitudes vibratoires relatives aux rayons parvenant en M !

Considérons le pinceau infinitésimal de rayons arrivant en M et étant passé par une largeur dx de la fente en un point P (abscisse x sur l'axe (Ox)). Son amplitude vibratoire est proportionnelle à la largeur dx et conserve la même pulsation ω que celle de l'onde incidente. Il reste à considérer le retard de phase spatial en M.

La différence de marche en M entre deux rayons étant passés par O et P est

$$\delta = (HP) + (PK)$$

en exploitant, par théorème de Malus, la surface d'onde [OH] et celle [OK] relative au retour inverse de la lumière. Par conséquent, en prenant garde aux signes des angles et avec $n \simeq 1$,

$$\delta(M) = OP (\sin \theta_0 - \sin \theta) \quad \text{soit} \quad \varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta = (k_{i,x} - k_x(M)) x$$

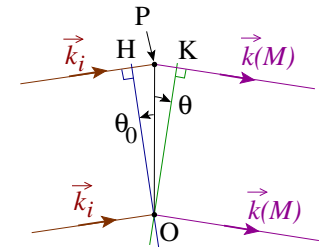
La formule intégrale de l'énoncé prend donc bien en compte la sommation des amplitudes vibratoires complexes des ondes cohérentes déphasées en M avec le retard de phase $\varphi(M)$...

2. On commence par effectuer le calcul de l'intégrale intervenant dans l'amplitude complexe vibratoire fournie à la question précédente. On pose, le temps du calcul, $\alpha = k_{i,x} - k_x(M)$. Alors,

$$\int_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} e^{-j\alpha x} dx = \left[\frac{e^{-j\alpha x}}{-j\alpha} \right]_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} = \frac{e^{j\alpha\varepsilon/2} - e^{-j\alpha\varepsilon/2}}{j\alpha} = \varepsilon \frac{\sin(\alpha\varepsilon/2)}{\alpha\varepsilon/2} = \varepsilon \operatorname{sinc}\left(\frac{\alpha\varepsilon}{2}\right)$$

en introduisant la fonction mathématique sinus cardinal telle que $\operatorname{sinc} x = \frac{\sin x}{x}$.

Du coup,
$$\underline{a}(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \varepsilon \operatorname{sinc}\left[(k_{i,x} - k_x(M)) \frac{\varepsilon}{2}\right]$$



17. Ces aspects sont devenus hors-programme en 2014...

18. Cela veut dire que le plus long côté de la fente est grand devant la longueur d'onde et n'entraîne pas d'écart à l'optique géométrique suivant sa direction (diffraction négligeable suivant la direction orthogonale).

Or, dans les conditions de Gauss (petits angles), le rayon passant par le centre de la lentille de projection L non dévié permet d'écrire

$$k_x(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \theta \simeq \frac{2\pi}{\lambda_0} \tan \theta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{X}{f'} \quad \text{et} \quad k_{i,x} \simeq \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{X_{im}}{f'}$$

compte-tenu de l'optique géométrique. Alors,

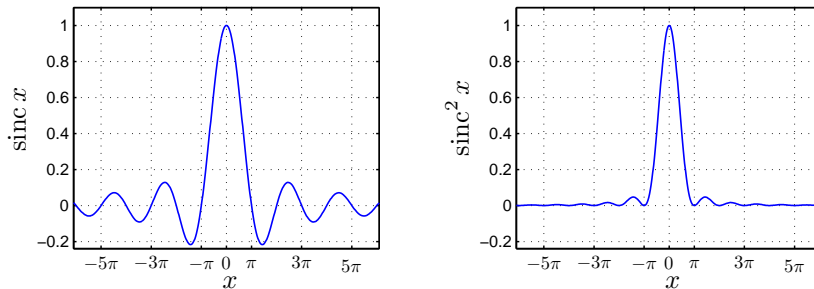
$$\underline{a}(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \varepsilon \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi \varepsilon (X - X_{im})}{\lambda_0 f'} \right]$$

Finalement, en en prenant le module au carré, on peut conclure que

$$I(X, Y) = I_0 \delta_{Y,0} \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{\pi \varepsilon (X - X_{im})}{\lambda_0 f'} \right]$$

où I_0 est une constante relativement au point M.

3. Les fonctions sinus cardinal et sinus cardinal au carré ont les allures suivantes :



Ces fonctions s'annulent pour chaque multiple entier non nul de π (annulation du sinus) et sont maximales de valeur 1 en $x = 0$. Il est à noter que les maxima secondaires de $\operatorname{sinc}^2(x)$ sont de faible valeur : 4,7% pour le premier, 1,6% pour le suivant... De plus, le pic central est deux fois plus large que les pics secondaires (associés aux maxima secondaires) et contient 92% de l'aire totale sous la courbe.

La courbe $I(X, 0)$ présente la même allure que celle de la fonction $\operatorname{sinc}^2 x$, avec le pic central à la position X_{im} et des annulations autour tous les multiples de $\lambda_0 f' / \varepsilon$. La figure de diffraction visualisable sur l'écran est ci-contre (**ouverture par diffraction dans une direction orthogonale à celle de la fente**, tache centrale deux fois plus large que les taches secondaires, **92%** de la puissance totale au niveau de la tache centrale).

Remarque

L'exercice précédent donne une ouverture angulaire θ de faisceau par diffraction en accord avec le résultat important (et à connaître) de MPSI : $\sin \theta \simeq \lambda/d$ pour une longueur d'onde λ dans le milieu de propagation et une ouverture de taille caractéristique d .

La limite de l'optique géométrique (donc sans diffraction) est $\lambda \rightarrow 0$.

Seconde étape : diffraction à l'infini par le réseau

Exercice 24

On remplace, dans le dispositif précédent, la fente fine par un réseau à N motifs, de pas a , dont chaque motif est une fente fine de largeur ε .

1. Montrer que l'intensité au point M (associé à une direction d'émergence d'angle θ) est

$$I(M) = N^2 I_0 \delta_{Y,0} F_{\text{int.}}(M) F_{\text{motif}}(M)$$

$$\text{avec} \quad F_{\text{motif}}(M) = \left[\operatorname{sinc} \left(\frac{\pi}{\lambda_0} \varepsilon (\sin \theta - \sin \theta_0) \right) \right]^2$$

$$\text{et} \quad F_{\text{int.}}(M) = \left(\frac{\sin \left[\frac{N \varphi(M)}{2} \right]}{N \sin \left[\frac{\varphi(M)}{2} \right]} \right)^2 \quad \text{où} \quad \varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} a (\sin \theta_0 - \sin \theta)$$

2. En déduire le tracé de l'intensité normalisée $I(M)/I_{\text{max}}$ en fonction de la variable $\sin \theta - \sin \theta_0$. Conclure à propos de l'effet de la diffraction sur la figure d'interférences à N ondes observée.

Réponse (visible)

1. On doit maintenant **sommer les amplitudes vibratoires** des ondes issues des N fentes fines en raison de leur cohérence. Pour la fente q centrée en O_q d'abscisse x_q , l'amplitude complexe s'écrit

$$\underline{a}_q(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \int_{x_q - \varepsilon/2}^{x_q + \varepsilon/2} e^{-j(k_{i,x} - k_x(M))x} dx$$

par les justifications rencontrées dans l'exercice précédent. Du coup, l'amplitude vibratoire complexe totale est

$$\underline{a}(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \left(\sum_{q=0}^{N-1} \int_{x_q - \varepsilon/2}^{x_q + \varepsilon/2} e^{-j(k_{i,x} - k_x(M))x} dx \right)$$

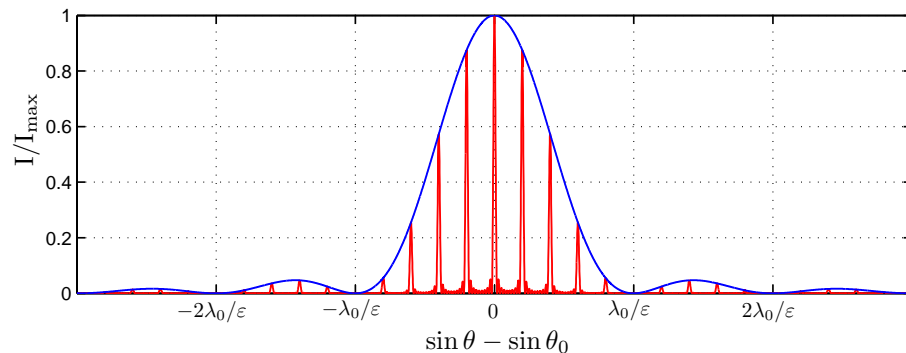
Par changement de variable dans chaque intégrale (décalage de $-x_q$), on se ramène à

$$\underline{a}(M, t) = C^{te} \delta_{Y,0} e^{j\omega t} \left(\sum_{q=0}^{N-1} e^{-j(k_{i,x} - k_x(M))x_q} \right) \int_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} e^{-j(k_{i,x} - k_x(M))x} dx$$

Chacun des terme est connu ! Le premier, avec la somme géométrique (en raison de la progression arithmétique de raison a de (x_q)), fournit un module au carré en fonction réseau et le second a été traité dans l'exercice précédent (diffraction à l'infini par un motif fente fine seul). On déduit bien le résultat annoncé compte tenu du fait que

$$k_{i,x} - k_x = \frac{2\pi}{\lambda_0} (\sin \theta_0 - \sin \theta)$$

2. La représentation de l'intensité normalisée (avec $N = 10$ et $a/\varepsilon = 5$) est la suivante, le terme de diffraction par un motif modulant le terme d'interférences en raison de l'extension des taches de diffraction plus grande que la périodicité de la fonction réseau :



On déduit de ce tracé que la diffraction entraîne des intensités lumineuses différentes pour les divers ordres du réseau. On ne peut considérer ces ordres équi-lumineux que lorsque λ_0/ε est suffisamment important (il doit être grand devant le diamètre angulaire d'observation à l'infini en sortie du réseau).

Annexe 2 : Cap ou pas cap ?

Voici une liste non exhaustive de « capacités » relatives à ce chapitre dont le but est de vous permettre de mieux cerner ce que l'on peut attendre de vous, en plus de la simple connaissance des définitions, théorèmes et bases du cours bien sûr ! Que pensez-vous savoir faire et ne pas savoir faire ?

Décrire le dispositif des trous de Young (ou autres dispositifs classiques) ; justifier physiquement les approximations associées.

Préciser sur une belle figure, grande et colorée, un champ d'interférences, deux rayons qui interfèrent en un point M quelconque de ce champ, d'éventuelles sources secondaires...

Respecter les lois de l'optique géométrique (hors diffraction).

Exploiter à bon escient un point image par un miroir plan (sur une figure, pour un calcul de différence de marche...).

Exploiter la composition de symétries planaires.

Obtenir la différence de marche (pour les trous de Young sans ou avec lentille(s), pour d'autres dispositifs, par des analogies justifiées...); obtenir l'interfrange.

Utiliser le théorème de Malus, le principe de retour inverse de la lumière, la condition de stigmatisme pour calculer certaines différences de marche (sans se faire piéger par les lentilles!)...

Étudier les interférences entre deux faisceaux parallèles cohérents (déphasage, interfrange...); donner un exemple de réalisation.

Penser aux propriétés de symétries et invariances.

Justifier la forme de franges d'interférences (si possible sans calculs ou, par exemple, à partir de la situation des hyperboloïdes si les conditions d'utilisation sont réunies).

Déterminer et représenter un profil d'intensité lumineuse.

Analyser l'effet sur une figure d'interférences de la modification d'un paramètre du dispositif (déplacement de source, changement de longueur d'onde...).

Décrire les changements lors du passage du dispositif des trous de Young à celui des fentes.

Dénombrer des franges brillantes ou sombres sur un domaine d'observation donné (sans se faire piéger par une « frange de centre »).

Effectuer des applications numériques (convertir des angles en minutes d'arc ou secondes d'arc en radians...).

Étudier la déviation d'un rayon par un prisme.

Travailler avec des grandeurs algébriques (attention aux angles orientés!).

Identifier/construire des sources secondaires et justifier leur éventuel synchronisme.

Lier un nombre de franges qui défilent à une variation d'ordre d'interférences.

Démontrer et appliquer la formule fondamentale des réseaux, aussi bien en transmission qu'en réflexion.

Construire géométriquement les ordres d'un réseau plan; dénombrer les ordres visibles.

Décrire les analogies et différences des figures obtenues pour un réseau plan éclairé par une source ponctuelle ou par une fente source (parallèle aux traits du réseau).

Analyser l'influence du nombre de traits éclairés d'un réseau sur le profil d'intensité.

Décrire les éléments essentiels et aspects pratiques de l'interféromètre de Michelson (mouvements, nécessité de la compensatrice...).

Construire soigneusement des trajets de rayons dans un interféromètre de Michelson (grande figure colorée, sans faire déborder quoique ce soit de la page!).

Positionner et exploiter des sources secondaires dans l'interféromètre de Michelson; justifier le passage au schéma équivalent à deux miroirs fictifs.

Définir le contact optique.

Donner un exemple de réalisation approchée d'une source ponctuelle monochromatique lumineuse.

Interpréter l'évolution de la figure d'interférences en cas de translation ou de rotation d'un miroir dans l'interféromètre de Michelson.

...