Programme d'interrogation orale

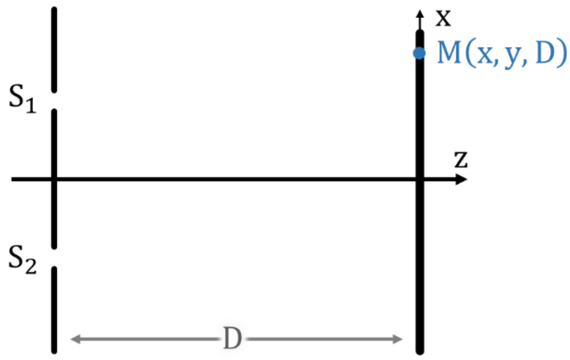
- Savoir établir parfaitement la différence de marche dans le cas des trous d'Young observés à grande distance.
- Savoir établir parfaitement la différence de marche dans le cas des trous d'Young observés dans le plan focal d'une lentille convergente (attention : cela nécessite d'utiliser le théorème de Malus et le principe de retour inverse de la lumière).
- Savoir établir la différence de marche quand la source est éloignée de l'axe optique, et savoir intégrer la formule de Fresnel pour obtenir l'intensité observée sur un écran lorsque la source est étendue.
- Connaitre l'effet d'un éclairement polychromatique sur les franges observées sur un écran. Savoir déterminer un ordre de grandeur de la zone où les franges sont non-brouillées (en fonction du spectre de la source).
- Savoir établir la formule des réseaux.

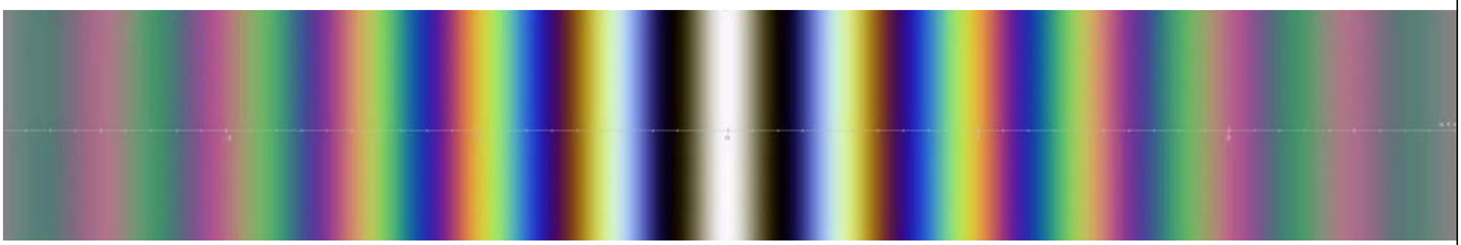
I – VARIATIONS AUTOUR DES TROUS D'YOUNG

Exercice 1 – Trous d'Young en lumière blanche — Difficile 1 – Original 1

On éclaire deux trous d'Young séparés de $a = 500\ \mu m$ par une source de lumière blanche (contenant donc toutes les longueurs d'onde du spectre visible). Un écran sur lequel on observe des interférences est placé à $D = 1\ m$ des trous.

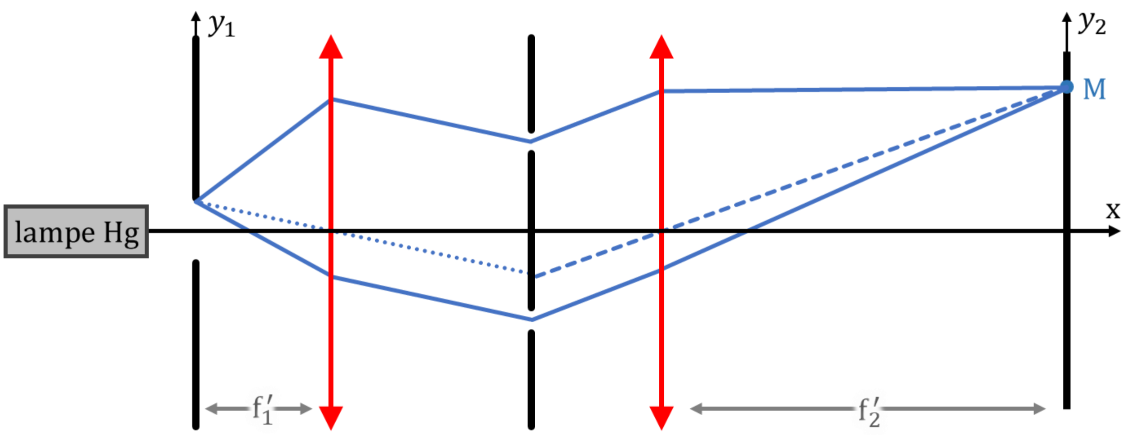
1. Rappeler ce que l'on observerait avec une source monochromatique : aspect des franges, interfrange, position de l'ordre $p = 0$.
2. Expliquer qualitativement ce qui est observé ici en $x = 0$, x proche de 0, x loin de 0. Déterminer l'ordre de grandeur x_b à partir duquel les franges sont brouillées.
3. On place une fibre optique reliée à l'entrée d'un spectromètre en $x = d = 4mm$. On observe des annulations dans le spectre obtenu, appelées **cannelures** : expliquer.
4. Trouver le nombre de cannelures et les longueurs d'ondes associées.





Exercice 2 – Fentes d'Young éclairées par une grande source — Difficile 1 – Original 1

On étudie le dispositif schématisé ci-dessous, dans lequel une lampe au mercure (suivie d'un filtre vert non-représenté) éclaire un dispositif de fentes d'Young (allongées selon la direction z). La taille apparente de la lampe source est imposée par une fente de largeur réglable l : l'ensemble lampe, filtre vert et fente source est équivalent à une source étendue monochromatique de longueur d'onde λ_0. Cette source est placée dans le plan focal objet d'une lentille L_1, ce qui permet d'éclairer les fentes d'Young en lumière parallèle. Les interférences sont observées dans le plan focal image d'une lentille L_2. Le dispositif est supposé invariant par translation le long de l'axe z. On définit deux axes y_1 dans le plan de la fente source et y_2 dans le plan de l'écran.



1. Tracer sur la figure la marche des deux rayons issus de l'extrémité haute de la source qui interfèrent au point M.
2. Montrer que l'ordre d'interférence pour les rayons issus d'un point d'ordonnée y_1 de la fente source et qui interfèrent au point d'ordonnée y_2 de l'écran vaut $p = \frac{a}{\lambda_0}\left(\frac{y_1}{f'_1} + \frac{y_2}{f'_2}\right)$.
3. En déduire l'expression de la largeur de cohérence spatiale de la fente source.

Exercice 3 – Fentes d'Young éclairées par un doublet spectral — Difficile 3 – Original 1

Considérons un dispositif de fentes d'Young éclairé par une lampe à vapeur de mercure assimilée à une source ponctuelle située sur l'axe optique du montage, dont on isole le doublet jaune par un filtre approprié. Ce doublet est formé de deux raies très rapprochées, modélisées par deux raies monochromatiques de même intensité I_m et de longueurs d'onde $\lambda_1 = 577$ nm et $\lambda_2 = 579$ nm.

Les fentes d'Young sont séparées d'une distance a et ont pour largeur $a/10$. Sur l'écran placé à la distance $D \gg a$ des fentes, on observe de longues franges rectilignes dans la direction (Oy) et réparties périodiquement le long de l'axe (Ox).

1. Pour une seule radiation monochromatique de longueur d'onde λ_0, rappeler sans démonstration l'expression de l'ordre d'interférences au point de l'écran d'abscisse x, puis celle de l'intensité. Définir l'interfrange. Pour laquelle des longueurs d'onde λ_1 ou λ_2 est-il le plus grand ?
2. Les ondes issues de la raie 1 et celles issues de la raie 2 interfèrent-elles ? Montrer que l'intensité totale se met sous la forme :

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

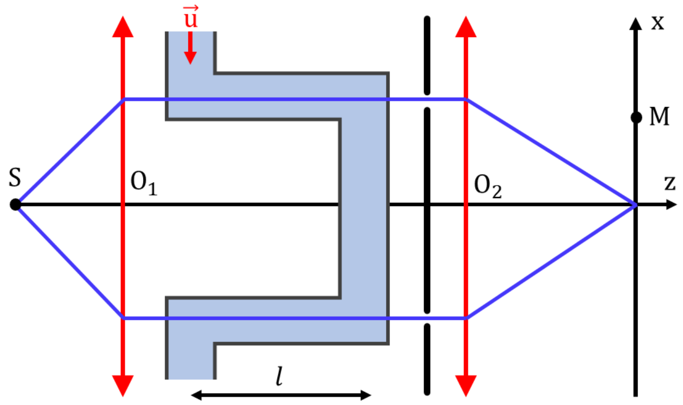
avec I_{moy} une constante de proportionnalité dépendant de l'intensité Im des raies ; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ la séparation du doublet et $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ sa longueur d'onde moyenne. Comme les deux longueurs d'onde sont très proches, on approximera $\lambda_1\lambda_2 \simeq \lambda^2$.
3. Déterminer la période spatiale des deux cosinus. En déduire que l'un d'eux s'interprète comme un terme d'interférences et l'autre comme un facteur de contraste dépendant du point d'observation. Représenter alors schématiquement l'allure de $I(x)$.
4. En utilisant la largeur $a/10$ des deux fentes d'Young, égale à la distance séparant les fentes, estimer la taille de la figure d'interférences sur l'écran et le nombre de franges observables. Qu'observe-t-on réellement sur l'écran ?

Exercice 4 – Expérience de Fizeau (1851) — Difficile 2 – Original 2

Le dispositif ci-dessous est constitué d'une source ponctuelle (S) monochromatique de longueur d'onde λ placée au foyer objet d'une lentille L_1, d'un tube coudé transparent contenant un liquide d'indice n initialement au repos, d'une plaque percée de deux trous distants de a, d'une lentille L_2 (de distance focale f'_2) et d'un écran (E).

1. À quelle distance doit-on placer l'écran (E) de la lentille L_2 pour y faire interférer des rayons issus des deux trous et inclinés d'un même angle ?
2. Construire deux rayons issus de (S) interférant en un point M placé sur l'écran (avec $M \neq O$).
3. Établir la différence de chemin optique entre les deux rayons et calculer l'interfrange i de la figure d'interférence observée.

Dans la suite, une pompe met en mouvement le liquide à la vitesse $u \ll c$ où c est la célérité de la lumière dans le liquide. On observe un déplacement du système de franges sur l'écran.



4. En adoptant la loi classique de composition des vitesses, exprimer les temps t_B et t_H mis par la lumière pour traverser les tubes bas et haut puis la différence Δt des temps de parcours entre les rayons interférant en O.
5. En déduire que la différence de chemin optique en ce point vaut $\delta_O = 2n^2 u\, l/c$
6. Dans quel sens défilent les franges sur l'écran ? Calculer le déplacement x_0 de la frange d'ordre 0.

Cette expérience, réalisée en 1851, a montré un déplacement inférieur à x_0 (elle a ensuite été refaite avec une plus grande précision, par Michelson et Morley). Ce résultat a contribué à monter l'insuffisance de la théorie galiléenne de la composition des mouvement, et à l'établissement de la téhorie de la relativité restreinte en 1905.

II - RÉSEAUX

Exercice 5 – Spectrométrie à réseaux — Difficile 1 – Original 1

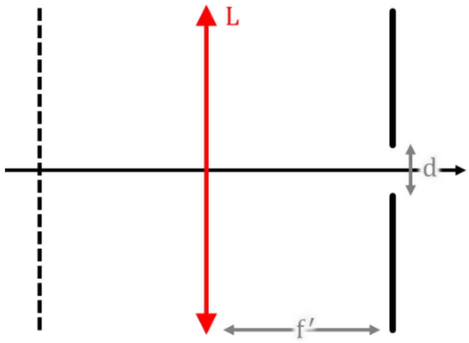
On souhaite déterminer la longueur d'onde λ de la raie du cadmium avec un réseau comptant $n = 500$ traits par millimètre.

1. Décrire un montage expérimental simple pour trouver cette longueur d'onde.
2. Établir la formule des réseaux (faisant intervenir les angles des rayons incidents et transmis, et des constantes).
3. On se place en incidence normale. On observe l'ordre -2 et l'ordre 2 séparés d'un angle $\alpha = 61°\,9'$, où une minute d'arc est $1' = 1/60\,°$. Déterminer λ.

Exercice 6 - Monochromateur à réseau — Difficile 2 – Original 2

Un monochromateur à réseau est un dispositif optique permettant de produire une radiation monochromatique de longueur d'onde λ_0 réglable à partir d'une radiation polychromatique. On les retrouve par exemple dans tous les spectromètres destinés à l'identification d'espèces chimiques.

Pour des raisons pratiques, la plupart des monochromateurs utilisent des réseaux par réflexion, qui maximisent l'intensité lumineuse en sortie. Nous allons en étudier le principe sur le modèle simplifié représenté ci-contre, reposant sur un réseau par transmission.



Un réseau en transmission à $n = 500$ traits par millimètre est éclairé en éclairage parallèle par une source de lumière blanche non représentée sur le schéma. Les rayons incidents et émergent forment respectivement des angles i_0 et i avec l'axe optique orthogonal au réseau. On cherche à isoler la longueur d'onde $\lambda_0 = 500\text{ nm}$.

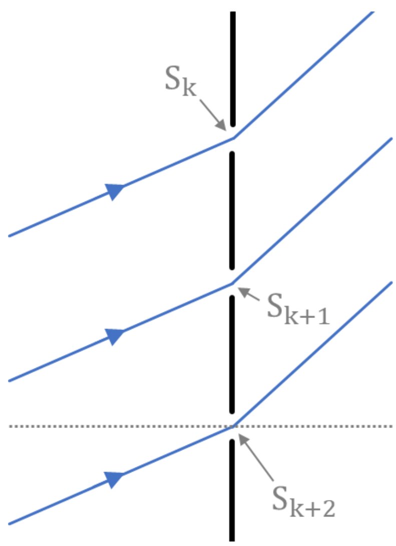
1. On souhaite observer l'ordre 2 sur l'axe optique pour la longueur d'onde λ_0 à isoler. En déduire l'inclinaison i_0 à donner au rayons issus de la source.
2. Considérons un rayon de longueur d'onde $\lambda_0 + \delta\lambda$ avec $\delta\lambda \ll \lambda_0$. Déterminer l'angle i avec lequel il émerge du réseau. En déduire la dispersion angulaire du réseau au voisinage de λ_0, qui s'exprime en $\mathrm{rad.nm^{-1}}$. En sortie du réseau se trouvent une lentille convergente et une fente de sortie de largeur d située dans le plan focal image de la lentille.
3. Déterminer les angles en sortie du réseau des rayons passant par les deux extrémités de la lentille. En déduire la résolution $\Delta\lambda$ du monochromateur, c'est-à-dire la largeur spectrale du faisceau de sortie.
4. Comment choisir la largeur de la fente de sortie pour obtenir la radiation la plus pure possible ? Expliquer pourquoi il est nécessaire de trouver un compromis.
5. Comment choisir la distance focale de la lentille pour obtenir la radiation la plus pure possible ?

Exercice 7 – Vers le réseau : interférences à N fentes — Difficile 3 – Original 2

On s'intéresse aux franges d'interférences obtenues en sortie d'un réseau, dans les mêmes conditions que celles du cours, mais dans le cas où le nombre de fentes n'est pas suffisant pour supposer que les franges sont définies à un angle précis.

On suppose donc un réseau constitué de N fentes, notées S_1 à S_N, émettant chacune une onde notée $\underline{s_k}(M,t)$ au point d'observation M (toujours situé dans le plan focal d'une lentille convergente place après le réseau). Compte-tenu du calcul réalisé dans le cours, l'onde réémise par S_{k+1} est en déphasage par rapport à l'onde réémise par S_k, de :

$$\Delta\phi_{k,k+1} = \frac{2\pi a}{\lambda}(\sin(\theta_t) - \sin(\theta_i)) \triangleq \Delta\phi$$



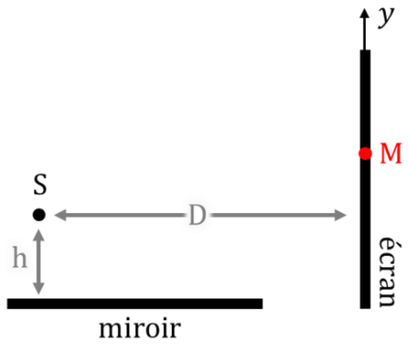
1. Exprimer l'onde au point M d'observation en fonction de $\underline{s_1}(M,t)$, l'amplitude au point M causée uniquement par la fente n°1, et du déphasage $\Delta\phi$.
2. En, déduire l'expression de l'intensité au point M. On appellera I_0 l'intensité causée un point M par la première frange, $I_0 = \underline{s_1} \cdot \underline{s_1}^*$.
3. Déterminer la position des pics l'intensité. En se plaçant à proximité d'un pic, montrer que leur largeur décroit avec le nombre N de fentes.

III - AUTRES DISPOSITIFS INTERFÉROMÉTRIQUES

Exercice 8 – Miroir de Lloyd — Difficile 1 – Original 1

Le dispositif de Lloyd permet d'obtenir des interférences à deux ondes. Il consiste en un miroir plan et un écran, éclairés par une source S supposée ponctuelle et monochromatique de longueur d'onde λ placée très proche du miroir. On indique que la réflexion sur le miroir entraîne un déphasage de π de l'onde réfléchie, ou de façon équivalente augmente le chemin optique de $\lambda/2$.

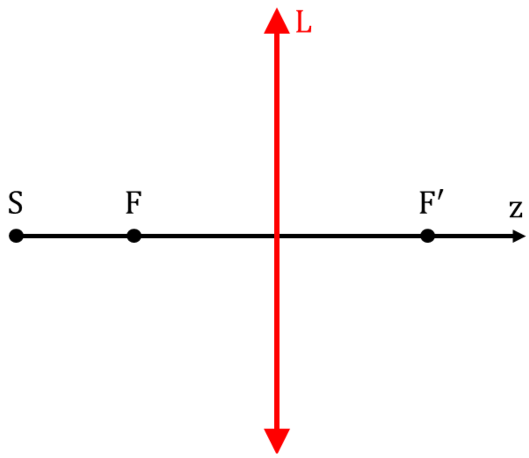
1. Montrer que le dispositif est équivalent à des trous d'Young. On pourra faire intervenir l'image S' de la source S par le miroir.
2. Déterminer au point M la différence de marche, l'ordre d'interférences et l'intensité. En déduire l'interfrange i.
3. Dans cette question, la hauteur h n'étant pas connue précisément, on décale la source de Δh et on mesure un nouvel interfrange $i' = 1{,}5\ i$. Exprimer la longueur d'onde λ en fonction des données du problème.
4. On remplace la source ponctuelle par une fente. Que devient la figure d'interférences ?

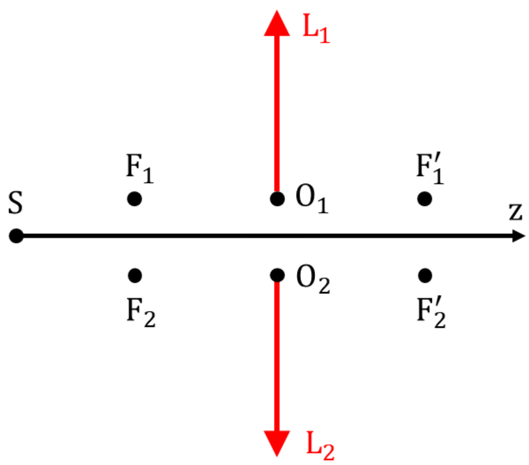


Exercice 9 – Bi-lentille de Billet — Difficile 3 – Original 3

Le dispositif des bi-lentilles de Billet est élaboré à partir d'une lentille convergente L de centre O, d'axe optique (Oz), de rayon R et de distance focale f' (image du dessus).

Cette lentille est coupée en deux dans le plan (Oyz), formant ainsi deux demi-lentilles L_1 et L_2 (image du dessous). Chaque demi-lentille se comporte exactement comme une lentille ayant son propre centre optique et ses propres foyers. Les demi-lentilles sont translatées symétriquement suivant (Ox) pour les séparer d'une distance Δ. Dans le repère (Oxyz), les centres optiques O_1 et O_2 ont alors pour coordonnées $(\pm\Delta/2, 0, 0)$. Ce dispositif est éclairé par une source monochromatique ponctuelle S située à distance $L = 2f'$ de O. Des caches opaques, non représentés sur la figure, permettent de bloquer la lumière ne passant pas par les demi-lentilles (entre O_1 et O_2).





1. Construire les deux images S_1 et S_2 de S par les lentilles L_1 et L_2.
2. Exprimer les positions de S_1 et S_2, c'est-à-dire la distance a entre S_1 et S_2 et la distance d entre la droite (S_1S_2) et le plan contenant L_1 et L_2.
3. Justifier que S_1 et S_2 se comportent comme deux sources secondaires à même de générer une figure d'interférences. Construire alors sur le schéma le champ d'interférences.
4. Calculer la distance minimale D_{min} à laquelle il faut placer un écran d'observation pour observer des interférences. Cette distance sera comptée à partir des demi-lentilles.
5. L'écran est placé à distance $D > D_{min}$ des demi-lentilles. Déterminer l'interfrange puis le nombre de franges visibles sur l'écran.

Données : le centre optique de la lentille est noté O, son foyer principal objet est noté F et son foyer principal image F'. La lentille a une distance focale image f'. A est un point de l'axe optique et A son image par la lentille.

Le relation de Descartes est (à connaitre) : $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$