TD7

Division du front d'onde

Questions de cours

- Dessiner le montage des trous d'Young
- Montrer que l'état d'interférence ne dépend que de la direction
- Calculer la différence de chemin optique en M
- En déduire la différence de phase et l'ordre des franges au point M
- Déterminer l'interfrange
- Dessiner le montage de Fraunhofer
- Retrouver les nouveaux δ, $\Delta\varphi$, p, i
- Retrouver δ dans la cas d'une source qui n'est pas à égale distance de S_1 et S_2.
- Qu'est ce que la longueur de cohérence spatiale ? Expliquer pourquoi les franges peuvent se brouiller avec une source large
- Qu'est ce que la longueur de cohérence temporelle ? Expliquer pourquoi les franges peuvent se brouiller avec une source de largeur spectrale non nulle.
- Expliquer la figure obtenue en lumière blanche
- Démontrer la formule des réseaux
- Comment évolue la figure d'interférence avec N

Applications directes du cours

Exercice 1 - Trous d'Young - ♥♥♥ / ★

1. On réalise une expérience d'interférences avec deux trous d'Young dans l'air. On obtient un interfrange $i_0 = 2,0\ mm$. Le dispositif est alors immergé totalement dans l'eau, d'indice $n = 1,33$.
   Quelle est la nouvelle valeur de l'interfrange ?
2. On considère le dispositif des trous d'Young. Les deux trous sont identiques mais l'un des deux trous est recouvert d'une lame qui ne laisse passer que 50 % de l'intensité incidente, mais qui n'introduit aucune différence de marche notable.
   Qu'y a-t-il de changé par rapport à la situation où les deux trous sont identiques ?

Exercice 2 - Epaisseur d'une lame - ♥♥♥ / ★

On considère le dispositif des trous d'Young, éclairé en incidence normale par une source ponctuelle de lumière blanche, suivie d'un filtre coloré permettant de sélectionner finement une composante spectrale de longueur d'onde $\lambda_0 = 500\ nm$ (qu'on supposera monochromatique). La distance entre les trous S_1 et S_2 est $a = 2,0\ mm$ et l'écran d'observation se trouve à distance $D = 3\ m$ du plan contenant les deux trous. L'ensemble du dispositif est placé dans l'air, dont on suppose l'indice égal à 1. Un point M de l'écran est repéré par ses coordonnées (x, y), l'axe (Ox) étant dans la direction des deux trous et le point O, origine des coordonnées, situé à égale distance des deux trous.

1. Quelle est l'expression de la différence de marche $\delta = (S_2M) - (S_1M)$ entre les ondes interférant en un point M de l'écran ? En déduire l'allure de la figure d'interférences observée sur l'écran. Calculer la valeur numérique de l'interfrange. Où se situe la frange d'ordre $p = 0$, correspondant à $\delta = 0$?
2. On rajoute devant le trou S_1 une lame d'indice $n = 1,4$ et d'épaisseur constante e. On considère que la lumière traverse cette lame en incidence normale et on néglige toute réflexion de la lumière sur ses faces. Exprimer la nouvelle différence de marche en M.
3. Où se situe maintenant la frange d'ordre $p = 0$? Exprimer son déplacement en unité d'interfrange. Vérifier que cela revient à exprimer la variation Δp de l'ordre d'interférences p due à l'introduction de la lame.
4. On retire à présent le filtre coloré pour éclairer en lumière blanche. On observe sur l'écran des franges irisées. Expliquer pourquoi. Justifier l'intérêt d'utiliser momentanément une source de lumière blanche dans cette expérience.
5. On estime le décalage de la frange d'ordre $p = 0$ égal à 6 interfranges, l'interfrange étant mesuré en présence du filtre coloré, donc en lumière monochromatique à $\lambda_0 = 500\ nm$. En déduire une mesure de l'épaisseur e de la lame.

Exercice 3 - Réseau - ♥♥ / ★

1. On éclaire un réseau ayant 500 traits par millimètre par un faisceau parallèle d'incidence normale ($\theta_0 = 0$) et de longueur d'onde $\lambda_0 = 600\ nm$.

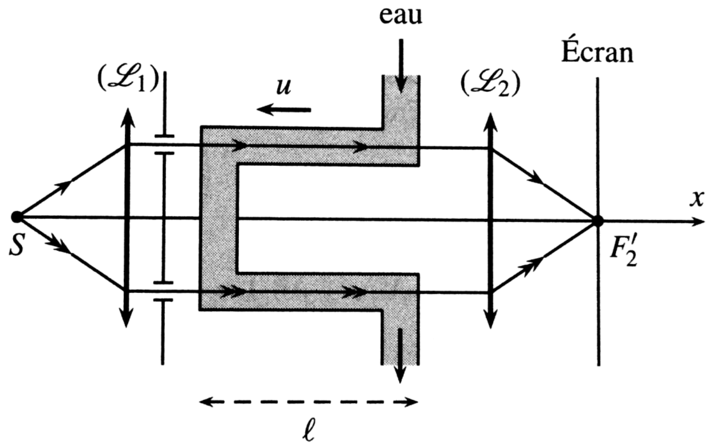
   Combien de pics de diffraction peut-on observer au maximum ?
2. *Choix d'un réseau* : Un réseau optique doit être tel que, pour toute longueur d'onde du domaine visible
   - on puisse observer au moins un ordre de diffraction non nul en incidence normale,
   - l'angle entre les directions des lumières diffractées dans deux ordres consécutifs soit au moins égal à $0,1\ rad$.

   Comment doit-on choisir le pas du réseau ?

Approfondissement

Exercice 4 - Expérience de Fizeau - ♥ / ★★★

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

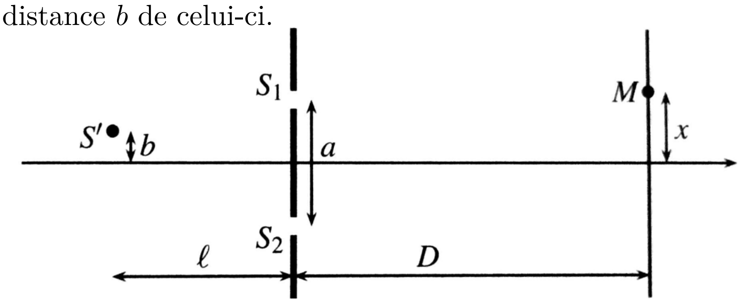


La source ponctuelle S est supposée monochromatique ($\lambda_0 = 530\ nm$) même si Fizeau utilisa la lumière solaire. L'eau, initialement au repos, est mise en mouvement avec une vitesse d'écoulement constante u. On notera $v = \dfrac{c}{n}$ la vitesse de la lumière dans l'eau.

1. Estimer la différence de temps de propagation entre les deux rayons qui interfèrent en F_2' et en déduire la différence de marche δ correspondante :
   (a) en utilisant la loi de composition des vitesse galiléenne : $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$, où $\vec{v}'$ est la vitesse mesurée dans le référentiel $\mathcal{R}'$ en translation à la vitesse $\vec{u} = y\vec{e}_x$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}$ où est mesurée $\vec{v}$.
   (b) en utilisant la loi de composition des vitesses relativiste (avec les mêmes notations) :
   $$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \dfrac{uv_x}{c^2}}$$
2. L'expérience de Fizeau consiste à observer les franges d'interférences avec l'eau immobile ($u = 0$) puis à mesurer le déplacement des franges quand on met l'eau en mouvement.
   Donner ce déplacement Δp, exprimé en nombre de franges, dans les deux cas ci-dessus (galiléen et relativiste).
3. Les valeurs des différents paramètres correspondant à l'expérience historique de Fizeau sont $n = 1,33$, $\ell = 1,5\ m$ et $u = 7\ m.s^{-1}$.
   Quelle est la loi de composition des vitesses qui donne un résultat théorique compatible avec l'expérience sachant que Fizeau mesura un décalage de $0,23$ frange, doublant l'effet en inversant le sens du courant ?

Exercice 5 - Méthode de Michelson et Pease - ♥♥ / ★★

Une source monochromatique S' de longueur d'onde λ éclaire un dispositif classique de trous d'Young. Les notations sont précisées sur la figure suivante. La source S' n'est pas sur l'axe des fentes mais à une distance b de celui-ci.



On suppose $|x| \ll D$, $a \ll D$, $a \ll \ell$ et $b \ll \ell$.

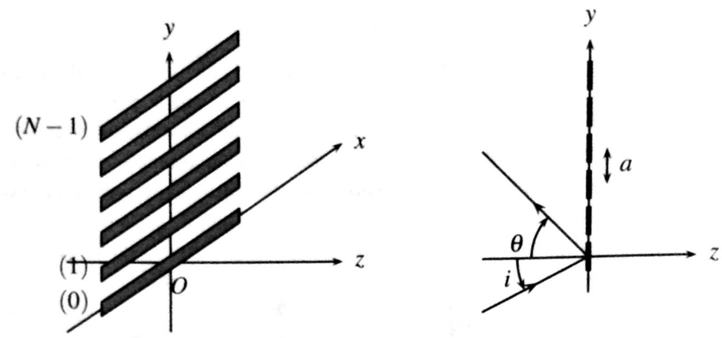
1. En tenant compte de ces approximations, exprimer l'ordre d'interférences $p(M)$ en fonction de x, a, b, D, λ_0 et ℓ, où x représente l'abscisse du point M.
2. (a) Une seconde source S'', identique à la précédente, est placée symétriquement à S' par rapport à l'axe du dispositif de fentes. Les sources S' et S'' sont supposées incohérentes. Une dispositif adapté permet de faire varier a, les paramètres $\varepsilon = \dfrac{2b}{\ell}$ et λ_0 restant fixes.

   Déterminer les valeurs de a qui correspondent à une annulation de la visibilité des franges d'interférences au point M.

   (b) *Application* : Les deux sources S' et S'' sont les deux composantes d'une étoile double. Dans le cas de Capella, pour $\lambda_0 = 635\ nm$, on trouve que la plus petite valeur de a annulant la visibilité des franges vaut $a_0 = 116,5\ cm$. En déduire la valeur de ε (par souci de simplicité, on supposera que l'indice des milieux traversé est égal à 1).

Exercice 6 - Capacité de stockage d'un CD - ♥♥ / ★★

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



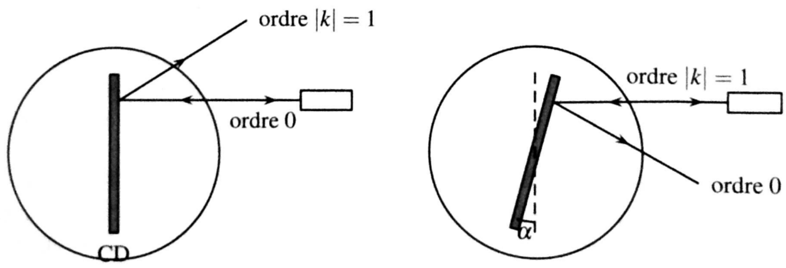
Attention, les angles sont ici algébriques : $i > 0$ et $\theta < 0$

1. Seuls des faisceaux lumineux parallèles sont envisagés. La direction de la lumière incidente est contenue dans le plan (yOz). Les rayons lumineux réfléchis par le CD sont aussi contenus dans le plan (yOz). Le disque est éclairé sous un angle d'incidence i.

   (a) Par analogie avec le traitement effectué pour le réseau par transmission, déterminer l'expression de la différence de marche entre deux rayons réfléchis consécutifs.

   (b) Définir les directions θ_k, où k est un nombre entier, appelé ordre d'interférence, dans lesquelles les ondes réfléchies par les miroirs interfèrent de façon totalement constructive.

2. On réalise l'expérience suivante. Le disque compact est éclairé en incidence normale. On tourne ensuite le disque d'un angle α afin que le faisceau diffracté par le disque dans l'ordre $|k| = 1$ soit dirigé dans la direction du faisceau lumineux incident (voir figure suivante)



Situation initiale

Après rotation du disque

(a) Établir la relation liant a, λ_0 et α.

(b) Pour $\lambda_0 = 650,0\ nm$, on mesure $\alpha = 12°40'$. En déduire une valeur numérique de a. Est-il possible d'observer la spirale gravée sur le disque à l'aide d'un microscope optique ?

(c) La spirale est gravée depuis l'intérieur du disque (rayon égal à $2,1\ cm$) vers l'extérieur (rayon égal à $5,9\ cm$). Estimer la longueur de cette spirale sur un CD.

(d) Sur la spirale sont gravés des motifs (creux ou plats), d'une longueur voisine du micromètre. Chacun de ces motifs peut être associé à un bit de codage. En déduire une estimation de la capacité de ce CD en Mo, sachant qu'un Mo représente 10^6 octets et que chaque octet est un ensemble de 8 bits.

Élements de réponse

Ex 1. $i_1 = \dfrac{n_0}{n_1} i_0 = 1,5\ mm$; $C = \dfrac{2\sqrt{2}}{3}$, i inchangé.

Ex 2.
1. $i = \dfrac{\lambda_0 D}{a} = 0,750\ mm$.
2. $\delta = \dfrac{ax}{D} - (n-1)e$.
3. $\dfrac{x}{i} = (n-1)\dfrac{e}{\lambda_0}$.
4. En lumière polychromatique on reconnaît plus facilement la frange centrale ($p = 0$) puisqu'elle est blanche.
5. $e = 7,5 \mu m$.

Ex 3.
1. On observe 7 pics de diffraction au maximum.
2. Il faut $\lambda_0 < a < 10\lambda_0$ soit $a \in [0,750\mu m ; 4\mu m]$.

Ex 4. $p(M) = \dfrac{nax}{\lambda_0 D} + \dfrac{nab}{\lambda_0 \ell}$; $a_m = m\dfrac{\lambda_0}{n\varepsilon} - \dfrac{\lambda_0}{2n\varepsilon}$ avec $m \in N^*$; $\varepsilon = \dfrac{\lambda_0}{2a_1} = 2,7.10^{-7}$.

Ex 5.
1. $\Delta t_c = \dfrac{2n^2 u\ell}{c^2}$ et $\delta_c = \dfrac{2n^2 u\ell}{c}$; $\Delta t_r \simeq \dfrac{2u\ell}{v^2}\left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)$ et $\delta_r = \dfrac{2u\ell}{c}(n^2-1)$.
2. $\Delta p_c = \dfrac{2n^2 u\ell}{\lambda_0 c}$ et $\Delta p_r = \dfrac{2u\ell}{\lambda_0 c}(n^2-1)$.
3. $\Delta p_c = 0,23$ et $\Delta p_r = 0,10$.

Ex 6.
1. $\delta_{m+1/m} = a(\sin\theta + \sin i)$; $\sin\theta_k = k\dfrac{\lambda_0}{a} - \sin i$.
2. $a = \dfrac{\lambda_0}{2\sin\alpha}$; $a = 1,48\mu m$, à la limite de la résolution d'un microscope optique. Longueur de la spirale : $L = \dfrac{\pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{a} = 6,5\ km$! ; Capacité de 800 Mo.