

SESSION 2010

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES
Option B : CHIMIE**

COMPOSITION DE PHYSIQUE

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

Ce sujet aborde les principes physiques de différentes techniques de spectroscopie couramment utilisées en laboratoire : spectroscopie IR, UV visible, et RMN.

Les trois parties du sujet sont très largement indépendantes.

La longueur du sujet ne doit pas décourager les candidats : l'indépendance de ses trois parties, la progressivité de chacune d'entre elles, la diversité des thèmes abordés permettront à chacun, en évitant d'éventuels blocages, de révéler sa compréhension de la Physique dans des domaines variés. Toutefois, il doit rester clair qu'un traitement superficiel de quelques questions dans chaque partie sera peu valorisé.

La plus grande importance sera donnée à la qualité de la rédaction et de la présentation .

Notations et données numériques :

Constante de Boltzmann : $k_B = 1,381.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055.10^{-34} \text{ J.s}$

Charge élémentaire : $e = 1,602.10^{-19} \text{ C}$

Masse du proton : $m_p = 1,673.10^{-27} \text{ kg}$

PARTIE I

Spectroscopie Infrarouge par Transformée de Fourier

Dans cette partie, on étudie le principe de la Spectroscopie Infrarouge par Transformée de Fourier (IRTF). Bien que le principe en soit connu depuis Rayleigh et Michelson qui l'utilisa pour déterminer des largeurs de raies optiques (1892), l'essor de cette technique dans le proche Infrarouge date des années 1960. Elle repose en particulier sur les travaux de J. et P. Connes, et sur le développement de l'algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT) inventé en 1965 par Cooley et Tuckey. Un des grands avantages de cette technique est « l'avantage multiplexe » ou de Fellgett : l'acquisition simultanée de toutes les fréquences du signal se déroule pendant toute la prise de mesure, ce qui permet de réduire l'erreur aléatoire sur les fluctuations de la source de façon importante. La méthode a été largement utilisée en astronomie avant d'être pratiquée de façon courante en analyse chimique.

Dans cette partie et la suivante, on utilisera le modèle scalaire de la lumière, et les notations complexes usuelles pour les grandeurs vibratoires. La lumière est représentée par une vibration scalaire complexe $\psi(\vec{r},t) = a(\vec{r},t)e^{j\varphi(\vec{r},t)}$ (avec $j^2 = -1$), où $a(\vec{r},t)$, amplitude réelle de l'onde, varie lentement avec la position et le temps, et la phase en un point $\varphi(\vec{r},t)$ varie sur des échelles de temps de l'ordre de 10^{-12} s. En raison de la linéarité des équations de Maxwell décrivant la propagation de la lumière, la vibration lumineuse en un point est la somme des vibrations dues aux différentes sources de lumière. L'intensité lumineuse détectée par tout appareil de mesure est alors proportionnelle à $\langle |\psi(\vec{r},t)|^2 \rangle = \langle a(\vec{r},t)^2 \rangle$, où

$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ représente la moyenne temporelle sur le temps de réponse $T \sim 10^{-4}$ s du détecteur.

I-A Interférences à deux ondes

On considère deux sources de lumière monochromatiques S_1 et S_2 , de fréquence $\nu = \omega / 2\pi$, de longueur d'onde dans le vide notée λ_0 , cohérentes et en phase, et d'amplitudes notées a_1 et a_2 : $\psi_{S_1} = a_1 e^{j\omega t}$ et $\psi_{S_2} = a_2 e^{j\omega t}$. Ces vibrations lumineuses se propagent dans un milieu d'indice n uniforme, jusqu'au point P (Cf. figure I-1).

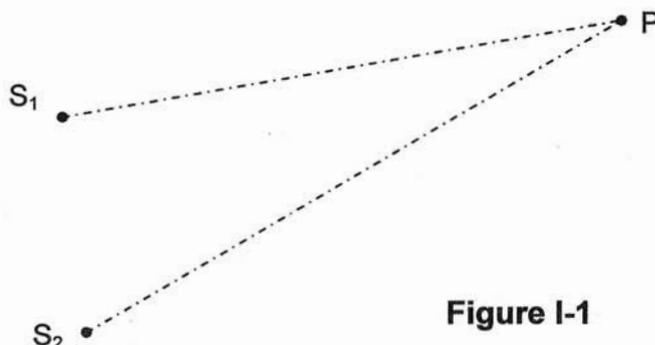


Figure I-1

I-A-1) Définir le chemin optique (S_1P), et le retard de phase de l'onde entre S_1 et P.

I-A-2) On considère que l'atténuation de l'onde est négligeable sur le trajet S_1P . Donner l'expression de la vibration lumineuse ψ_{P_1} en P lorsque la source S_1 est seule présente.

I-A-3) En déduire la valeur de l'intensité lumineuse I_1 en P lorsque la source S_1 est seule présente.

I-A-4) On considère alors l'action des deux sources. Montrer que dans ce cas, l'intensité lumineuse en P vaut :

$$I_P = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\sigma \delta_P)$$

où le nombre d'onde est défini par $\sigma = \omega / 2\pi c = 1/\lambda_0$. Donner l'expression de la différence de marche δ_P au point P en fonction des chemins optiques. Qu'appelle-t-on « terme d'interférence » ?

I-A-5) Représenter sur un graphe les variations de l'intensité I_P en fonction de δ_P , en indiquant en particulier la valeur et la position des maxima et des minima d'intensité.

I-A-6) On définit le facteur de contraste C par : $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$. Donner la valeur de C en

fonction de I_1 et I_2 . A quelle condition C est il maximum ? Quelle est la valeur de ce maximum ?

I-A-7) La présentation de ce paragraphe laisse penser qu'il est très simple d'obtenir des interférences en superposant la lumière de deux lampes spectrales convenablement filtrées, comme on peut le faire pour des ondes sonores. Que vaut, en fait, l'intensité lumineuse au point P lorsque les sources sont incohérentes ?

Expliquer pourquoi il est nécessaire que les ondes 1 et 2 soient obtenues par division d'une onde issue d'une source unique S. Que représente le temps de cohérence ?

Nous étudierons au paragraphe suivant une méthode pour réaliser cette division.

I-B Interféromètre de Michelson

Le schéma de principe d'un interféromètre de Michelson est donné ci-dessous (figure I-2) :

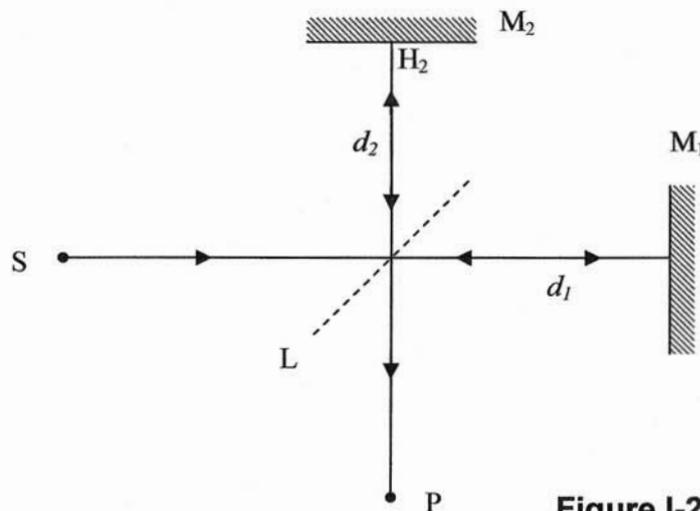


Figure I-2

L'air est assimilé à un milieu d'indice $n = 1$. La lumière issue de la source S est divisée en deux faisceaux par la séparatrice L, lame de verre placée à 45° du faisceau incident issu de S, et dont la face d'entrée est traitée de façon à obtenir des facteurs de réflexion et de transmission en intensité égaux à 0,5 pour cette incidence. Deux miroirs plans M_1 et M_2 , supposés parfaits, et situés à distances d_1 et d_2 de L réfléchissent la lumière des deux faisceaux vers L. Ces deux faisceaux se recombinent après réflexion ou transmission sur L, et sont reçus par un détecteur P, supposé pour l'instant ponctuel.

Dans notre schéma simplificateur, L ne crée pas d'atténuation à la traversée, et n'introduit pas de déphasage dans les vibrations lumineuses. On peut donc l'assimiler à une lame semi-réfléchissante idéale d'épaisseur nulle (l'étude du dispositif pratique permettant une telle simplification n'est pas demandée ici).

I-B-1) L'intensité de la source S est notée I_0 . On néglige l'atténuation de la vibration lumineuse au cours de sa propagation. Quelles sont les intensités en P, I_1 et I_2 , de chacun des deux faisceaux provenant de chacune des deux voies de l'interféromètre ? Où va l'énergie lumineuse qui ne parvient pas en P ?

I-B-2) Afin de simplifier au maximum l'étude de ce dispositif, on se ramène à l'étude d'un système centré d'axe PH_2 orthogonal à M_2 . On fera la figure dans le cas $d_1 > d_2$.

- a) Pour cela, placer soigneusement sur un schéma
 - la source S,
 - le miroir M_2 ,
 - l'image M'_1 du miroir M_1 à travers la séparatrice L,
 - l'image S' de la source S à travers la séparatrice L.
 - Enfin, placer les images S_1 et S_2 de S' à travers le miroir M_2 et M'_1 .
- b) Que vaut la distance, notée dans la suite e , entre M_2 et M'_1 ?
- c) En déduire la distance entre les deux sources virtuelles S_1 et S_2 .

On admettra que, pour l'étude du Michelson, le déphasage en P est le même que celui que l'on observerait en P entre les vibrations issues des deux sources synchrones S_1 et S_2 , en l'absence de l'interféromètre.

I-B-3) La source S est supposée monochromatique de fréquence $\nu = \omega / 2\pi = c\sigma$, d'intensité I_0 . Déduire de ce qui précède que l'intensité détectée en un point P situé sur l'axe optique vaut :

$$I_P = \frac{I_0}{2}(1 + \cos(2\pi\sigma 2e))$$

Dans quelle configuration obtient-on une différence de marche nulle ? Que vaut alors l'intensité détectée ? Lever la contradiction apparente avec la dernière réponse du I-B-1).

I-B-4) Le miroir M_1 peut être translaté perpendiculairement à son plan, de façon à faire varier d_1 de quelques centimètres de part et d'autre de d_2 . En utilisant un laser He-Ne de longueur d'onde $\lambda_0 = 632,8$ nm, le signal détecté en P, encore supposé ponctuel, permet le contrôle de la position de M_1 . Pour une telle source laser :

- a) tracer la courbe de I_P en fonction de d_1 , de part et d'autre de d_2 .
- b) Quelle distance ε faut-il faire parcourir à M_1 entre deux maxima de lumière consécutifs ? Donner la valeur numérique de ε .
- c) Sachant qu'un photorécepteur standard peut détecter des variations de I_P de l'ordre de $0,01 I_0$, quel est le déplacement de M_1 observable (on notera δd_1 sa valeur) ? Pour quelle(s) différence(s) de marche δd_1 est-il le plus petit ? Déterminer puis calculer cette valeur minimale du déplacement observable.

I-B-5) Pour l'utilisation de l'interféromètre en IR, on place le détecteur P « à l'infini », c'est-à-dire dans le plan focal image d'une lentille convergente F de distance focale f' . Le détecteur possède une pupille d'entrée de diamètre ϕ (voir figure I-3).

a) En reprenant le schéma obtenu au I-B-2-a) montrer que la différence de marche entre deux faisceaux provenant de S_1 et S_2 et atteignant P sous un angle θ vaut $\delta_\theta = 2e \cos(\theta)$.

b) En déduire l'expression de l'intensité I_θ recueillie à une incidence θ .

c) On veut que sur toute la plage d'utilisation de l'interféromètre (donc pour toute valeur de e entre $-e_{max}$ et e_{max}), la variation d'un point à l'autre du détecteur P de l'ordre d'interférence $\rho = \sigma \cdot \delta$ reste inférieure à 0,5. Donner l'expression de la valeur maximale ϕ_{max} du diamètre ϕ de la pupille d'entrée du détecteur pour qu'il en soit ainsi.

d) A.N. on donne $\sigma = 2000 \text{ cm}^{-1}$, $e_{max} = 5 \text{ cm}$, $f' = 30 \text{ cm}$. Calculer ϕ_{max} .

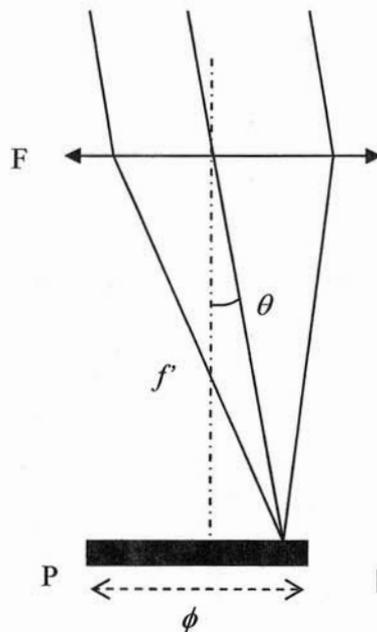


Figure I-3

I-B-6) Dans la configuration du I-B-5) que se passe-t-il si la source ponctuelle S est placée en dehors de l'axe optique ? On pourra considérer les sources secondaires S_1 et S_2 associées à cette source ponctuelle décalée, et on donnera la différence de marche δ'_θ au point P, associé à l'incidence θ . En déduire quel peut être le grand avantage de cette utilisation de l'interféromètre de Michelson, dans le cas où la source est étendue (et spatialement incohérente).

I-C Spectrométrie de Fourier

Dans toute la suite de cette partie, on supposera l'ouverture du détecteur suffisamment faible pour ne tenir compte que de l'incidence normale $\theta = 0$, correspondant au schéma de la

figure I-3. Par contre, la source S est supposée polychromatique ; pour des valeurs du nombre d'onde comprises entre σ et $\sigma + d\sigma$, son intensité vaut $I_1(\sigma) d\sigma$.

I-C-1) Justifier physiquement, mais sans calcul, le fait que l'intensité totale détectée en P soit la somme des intensités correspondant à chaque fréquence de la source :

$$I_P^{total} = \int_0^{\infty} \frac{I_1(\sigma)}{2} (1 + \cos(2\pi\sigma 2e)) d\sigma$$

I-C-2) En déduire que l'intensité enregistrée en P en fonction de la différence de marche δ s'écrit comme la somme de deux termes :

$$I_P(\delta) = \bar{I}_P + \frac{1}{2} V(\delta)$$

où $V(\delta) = \int_0^{\infty} I_1(\sigma) \cos(2\pi\sigma\delta) d\sigma$. Donner l'expression de \bar{I}_P . Que représente ce terme ?

Par la suite, on ne s'intéressera qu'à $V(\delta)$, la partie du signal qui varie avec δ . On voit qu'il s'agit de la *transformée de Fourier* (TF) en cosinus de la densité spectrale $I_1(\sigma)$ de la source. L'enregistrement de $V(\delta)$ permet donc d'espérer remonter à $I_1(\sigma)$. En effet, on montre (**théorème d'inversion de Fourier**) que :

$$I_1(\sigma) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} V(\delta) e^{-2j\pi\sigma\delta} d\delta$$

formule que l'on utilisera sans démonstration.

I-C-3) En réalité, il est impossible de réaliser l'enregistrement de $V(\delta)$ pour $-\infty \leq \delta \leq \infty$. On se limite en pratique à une plage finie de différences de marche $-a \leq \delta \leq a$, et on souhaite étudier l'influence de cette restriction.

- Donner, sans nouveau calcul, l'expression de $V(\delta)$ pour une source monochromatique d'intensité I_0 , de nombre d'onde σ_0 .
- Donner, sous la forme d'une intégrale, l'expression correspondante de la fonction, notée $I_2(\sigma)$, obtenue par inversion de Fourier tronquée dans l'intervalle $-a \leq \delta \leq a$.
- Déterminer l'expression de $I_2(\sigma)$, et montrer que l'on obtient :

$$I_2(\sigma) = 2a.I_0 \left[\frac{\sin(2\pi a(\sigma - \sigma_0))}{2\pi a(\sigma - \sigma_0)} + \frac{\sin(2\pi a(\sigma + \sigma_0))}{2\pi a(\sigma + \sigma_0)} \right]$$

- Tracer le graphe de $I_2(\sigma)$, pour les nombres d'onde $\sigma > 0$, de part et d'autre de σ_0 (on négligera pour cela le deuxième terme de la somme ci-dessus). Donner la demi-largeur $\Delta\sigma_2$ de la raie centrale du spectre $I_2(\sigma)$ ainsi obtenu. En déduire une estimation de la limite de résolution de la méthode de spectrométrie par Fourier en fonction de a . Comment varie cette résolution avec la position de la raie σ_0 ?

I-C-4) Traitement du signal, apodisation

Un des inconvénients de la troncature brutale réalisée au I-C-3) est l'apparition d'oscillations dans le spectre reconstruit $I_2(\sigma)$, qui en rendent la lecture et l'interprétation difficile. Une façon de limiter ce problème consiste à réaliser une troncature plus « douce » du signal $V(\delta)$, en le multipliant par une fonction fenêtre $A(\delta)$ schématisée ci-dessous (figure I-4), avant d'appliquer l'inversion de Fourier.

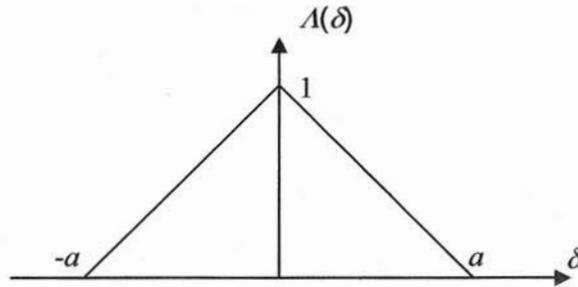


Figure I-4

$$A(\delta) = 1 - |\delta|/a \quad \text{si } -a \leq \delta \leq a$$

$$A(\delta) = 0 \quad \text{sinon}$$

a) Montrer que dans ce cas la fonction, notée $I_3(\sigma)$, obtenue par inversion de Fourier, toujours dans le cas d'une source monochromatique d'intensité I_0 et de nombre d'onde σ_0 , peut s'écrire :

$$I_3(\sigma) = 2I_0 \int_0^a \left(1 - \frac{\delta}{a}\right) [\cos(2\pi\delta(\sigma - \sigma_0)) + \cos(2\pi\delta(\sigma + \sigma_0))] d\delta$$

b) On admet l'expression suivante, obtenue à l'aide d'une intégration par parties :

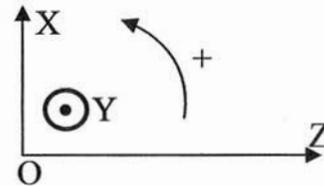
$$I_3(\sigma) = aI_0 \left[\left(\frac{\sin(\pi a(\sigma - \sigma_0))}{\pi a(\sigma - \sigma_0)} \right)^2 + \left(\frac{\sin(\pi a(\sigma + \sigma_0))}{\pi a(\sigma + \sigma_0)} \right)^2 \right]$$

Tracer le graphe de $I_3(\sigma)$ pour $\sigma > 0$, au voisinage de $\sigma \approx \sigma_0$ (on négligera pour cela le deuxième terme de la somme ci-dessus). Montrer que l'on a bien réduit les oscillations par rapport au I-C-3-d). Donner la demi-largeur $\Delta\sigma_3$ de la raie centrale du spectre $I_3(\sigma)$ ainsi obtenu, et comparer cette valeur à $\Delta\sigma_2$. En déduire les limites de ce genre de traitement sur la limite de résolution de la méthode de spectrométrie de Fourier.

PARTIE II

Spectroscopie à réseau

Dans toute cette partie, OXYZ désigne un trièdre orthogonal direct. Dans le plan ZOY, la convention angulaire est trigonométrique.



II-A Interférences par division du front d'onde

Dans toute cette partie, on utilisera le modèle scalaire de la lumière, présenté dans le préambule de la partie I du sujet problème. De plus, on pourra utiliser sans démonstration les résultats établis au cours de la partie I-A, en particulier la formule établie au I -A - 4). L'air est assimilé à un milieu d'indice $n = 1$.

II -A-1) Donner un exemple d'obtention de sources cohérentes par division du front d'onde.

II -A-2) On perce dans un plan opaque XOY deux fentes fines identiques de largeur négligeable, et de grande longueur L . La grande dimension L est parallèle à OY, le petit coté est parallèle à OX. Les centres des fentes, notés O_1 et O_2 , sont alignés sur OX. La distance O_1O_2 est notée $2a$. Le plan XOY est éclairé par une onde plane et monochromatique, supposée illimitée, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 550 \text{ nm}$; son vecteur d'onde, situé dans le plan XOZ, fait avec OZ l'angle d'incidence $i = 5^\circ$. On étudie les interférences à l'infini entre les 2 fentes.

- comment peut-on observer ces interférences à l'infini ?
- à quelle couleur correspond la longueur d'onde de 550 nm ?
- exprimer le déphasage entre les vibrations perçues en O_1 et O_2 , en fonction de i , a et λ .

II -A-3) a) Déterminer, en fonction de a , i , et α la différence de marche à l'infini entre les ondes dans une direction du plan XOZ faisant l'angle α avec OZ. En déduire l'interfrange angulaire, dans le cas des petits angles.

b) AN : $a = 0,25 \text{ mm}$: calculer l'interfrange angulaire et la position angulaire du centre de l'image d'interférences.

c) Si on place un écran dans le plan focal image d'une lentille mince convergente placée perpendiculairement à l'axe OZ, derrière le dispositif des fentes, pourra-t-on voir ces franges sachant que la distance focale de la lentille est de 1 m ?

II -A-4) Quel est le principal phénomène qui limite le nombre de franges observables sur l'écran ?

II-B Interférences à N ondes. Réseau par transmission

On suppose maintenant que le plan opaque XOY contient N fentes (au lieu de deux), ces N fentes, de largeur négligeable, étant toutes identiques et régulièrement espacées, disposées parallèlement les unes aux autres comme les 2 précédentes. On suppose $N \gg 1$. La distance, ou « pas », entre 2 fentes consécutives est noté $2a$. L'ensemble est toujours éclairé par la même onde plane et monochromatique, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 550 \text{ nm}$, l'angle d'incidence restant égal à : $i = 5^\circ$. On étudie les interférences entre les N ondes, à l'infini dans le plan XOZ.

II -B-1) Quelle est la différence de marche entre 2 fentes consécutives (séparées par la distance $2a$) pour l'onde émergente, en un point à l'infini dans la direction faisant l'angle α avec OZ ?

II -B-2) En déduire les directions angulaires suivant lesquelles on obtient un maximum de lumière. On fera intervenir un entier k dans la relation trouvée.

II -B-3) Calculer l'amplitude complexe \underline{s}_p diffractée à l'infini dans la direction α , par la $p^{\text{ème}}$ fente éclairée. En déduire l'amplitude complexe totale diffractée par les N fentes. Calculer ensuite l'intensité observable dans la direction α . On rappelle les relations

$$1 + z + z^2 + z^3 + \dots + z^{N-1} = \frac{1 - z^N}{1 - z} \quad \text{et} \quad \frac{e^{j\phi} - e^{-j\phi}}{2j} = \sin(\phi), \quad \text{avec } j^2 = -1,$$

valables pour tout nombre complexe z différent de 1, et pour tout nombre réel ϕ .

II -B-4) AN : $a = 1 \mu\text{m}$, $i = 5^\circ$ déterminer le nombre d'ordres observables (c'est-à-dire le nombre de valeurs entières possibles de l'entier k introduit à la question II-B-2). Dans la pratique tous ces ordres ont-ils la même luminosité ? Pourquoi ?

II-C Interférences entre N miroirs. Réseau par réflexion

Les N fentes sont remplacées par N miroirs très fins ayant la forme des fentes c'est-à-dire des bandes réfléchissantes parallèles et identiques, de pas $2a$. L'ensemble est toujours éclairé par la même onde plane et monochromatique, supposée illimitée, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 550 \text{ nm}$, et d'angle d'incidence $i = 5^\circ$. On étudie, à l'infini, l'onde réfléchie dans la direction faisant, dans XOZ , l'angle α avec OZ' . On rappelle ici que, pour i comme pour α , la convention de signe est trigonométrique ; les valeurs possibles de l'angle α sont comprises entre -90° et $+90^\circ$.

II -C-1) Quelle est la nouvelle différence de marche entre 2 miroirs consécutifs ?

II -C-2) En déduire les directions angulaires suivant lesquelles on obtient un maximum de lumière. On fera intervenir à nouveau un entier k dans la relation trouvée. Commenter.

II -C-3) En déduire **sans nouveau calcul** l'amplitude complexe, puis l'intensité observable dans la direction α .

II -C-4) AN : avec $a = 1 \mu\text{m}$, $i = 5^\circ$, déterminer la position des maxima d'ordres $+1$, -1 . Commenter.

Cet ensemble constitue un réseau par réflexion, élément disperseur d'un grand nombre de spectromètres dans le visible et les proches UV et IR.

II-D Utilisation du réseau par réflexion

On s'intéresse maintenant à un monochromateur à réseau, c'est-à-dire à un dispositif permettant d'obtenir une onde quasi monochromatique à partir d'une source de lumière blanche. Le réseau a 500 bandes réfléchissantes (ou traits) par mm et $N = 10000$ traits au total. Il est éclairé sous l'incidence i . Une lentille convergente mince de distance focale image $f' = 1 \text{ m}$, a son axe normal au plan du réseau et une fente fine se trouve centrée au foyer image de la lentille F_0 (voir la figure II-1).

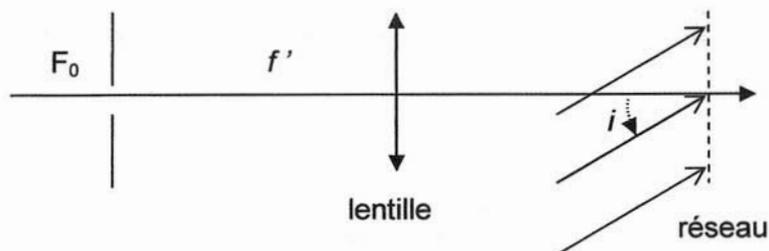


Figure II-1

- II -D-1) Quelle valeur doit prendre l'incidence i pour que la radiation de longueur d'onde $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ soit obtenue en F_0 dans le spectre d'ordre 2 ? On conservera cette incidence pour la suite.
- II -D-2) Pour une longueur d'onde λ un peu différente de λ_0 les rayons diffractés par le réseau dans l'ordre 2 convergent en un foyer secondaire image de la lentille d'abscisse x ; donner une expression approchée de x en fonction de $\lambda - \lambda_0$ si l'on ne considère que les longueurs d'onde voisines de λ_0 .
- II -D-3) La fente placée au foyer de la lentille a une largeur $b = 0,1 \text{ mm}$ et ne laisse donc passer que les radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre $\lambda_0 - \Delta\lambda / 2$ et $\lambda_0 + \Delta\lambda / 2$; calculer l'intervalle $\Delta\lambda$. Caractériser la bande passante du monochromateur. Commenter.