

DS3 de Physique du 19/10/25

Durée 4h

Calculatrices interdites

Rappel des consignes :

Présentation de la copie :

- **Laisser une marge à gauche pour la notation et quelques lignes en début de copie pour l'appréciation et les remarques.**
- *Encadrer ou souligner les résultats.*
- *Donner le numéro complet de la question à laquelle vous répondez.*

Rédaction :

- *Répondre précisément aux questions posées*
- *Respecter les notations de l'énoncé.*
- *Ne pas utiliser d'abréviations (sauf si elles ont été définies)*
- *Justifier tous les résultats.*
- *Rédiger de façon claire, précise et concise.*
- *Citer le nom des lois utilisées.*
- *Toujours donner un résultat littéral (avant de faire éventuellement l'application numérique), sans application numérique intermédiaire, sans mélanger littéral et numérique.*
- *Contrôler l'homogénéité du résultat.*

Applications numériques :

- *Donner un nombre raisonnable de chiffres significatifs.*
- ~~*Arrondir correctement la valeur donnée par la calculatrice.*~~
- *Ne jamais oublier les unités.*
- *Contrôler que l'ordre de grandeur est raisonnable.*
- *Ne jamais réutiliser le résultat arrondi d'une application numérique précédente (pour éviter les erreurs d'arrondis)*

La notation prendra en compte le respect de ces consignes (aucun point pour un résultat non homogène, des points de rédaction...)

PROBLEME 1 : La recherche d'exoplanètes

Puisque les calculatrices sont interdites pour ce DS, les applications numériques de ce problème seront faites avec un seul chiffre significatif.

Alors que la Terre est actuellement la seule planète connue pour abriter la vie, les astrophysiciens ont découvert une exoplanète bleue, nommée Isis.

On se propose dans cette partie d'analyser une technique de détection d'exoplanètes faisant appel à l'interférométrie puis d'examiner l'atmosphère d'Isis pour déterminer si, du fait de sa couleur bleue, cela en fait une bonne candidate pour abriter la vie.

Comme notre planète, Isis orbite autour d'une étoile.

L'observation du couple étoile – exoplanète est réalisée à une longueur d'onde λ (généralement située dans l'infrarouge).

Dans un premier temps, on considère uniquement l'étoile. On l'assimile à une source plane monochromatique de longueur d'onde λ se propageant suivant l'axe horizontal (Oz) à la célérité c . Perpendiculairement à cet axe, on dispose un écran opaque percé de deux trous d'Young écartés d'une distance a . On note S_1 et S_2 les centres des deux trous d'Young (voir figure 12 ci-dessous). L'observation est effectuée sur un écran situé dans le plan focal d'une lentille convergente de focale f' .

On s'intéresse à l'onde lumineuse $s(M, t)$ en un point $M(x, y)$ de l'écran, résultante de la superposition des ondes provenant de S_1 et S_2 . On note A l'amplitude de ces deux ondes et on suppose que leur déphasage à l'origine est nul.

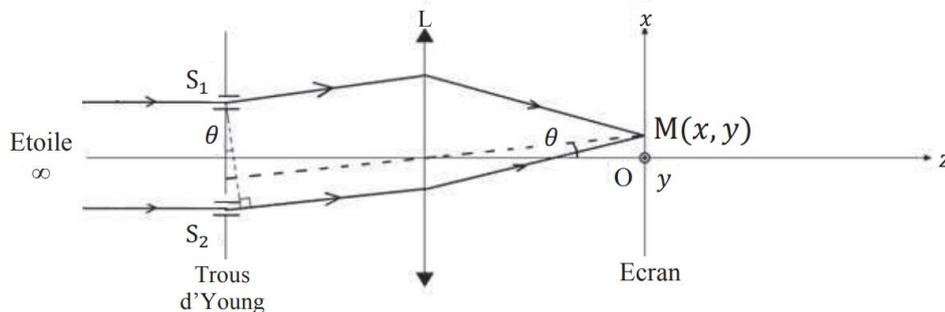


Figure 12 - Dispositif des trous d'Young

47. On rappelle que les capteurs optiques quadratiques fournissent un signal proportionnel à l'intensité lumineuse, c'est-à-dire proportionnel à la moyenne du carré du signal notée $\langle s^2(M, t) \rangle$.

On note $I_0 = \frac{A^2}{2}$ l'intensité lumineuse de chacune des ondes.

On donne la formule de linéarisation suivante :

$$\cos a \times \cos b = \frac{1}{2} \times (\cos(a - b) + \cos(a + b)).$$

Exprimer l'intensité lumineuse $I(M, t) = \langle s^2(M, t) \rangle$ au point M en fonction de I_0 et de la différence de marche δ entre les deux chemins optiques. et aussi de λ . La démonstration n'est pas attendue.

48. Rappeler les conditions principales pour que le phénomène d'interférences apparaisse. Ces conditions sont-elles réunies ici ?

49. Déterminer la valeur du contraste.

L'utilisation d'une lentille impose d'être dans les conditions de Gauss.

50. Énoncer les conditions de Gauss.

51. On suppose les conditions de Gauss vérifiées. L'angle θ défini sur le schéma de la figure 12 est tel que :

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta .$$

L'indice optique de l'air est pris égal à 1.

Exprimer la différence de marche δ .

En déduire l'expression de l'interfrange i .

52. Quelle est la forme des franges observées ? Sont-elles localisées ? Justifier.

On considère dans un second temps l'étoile et son exoplanète comme deux sources incohérentes planes monochromatiques de longueur d'onde λ se propageant suivant l'axe (Oz) à la célérité c .

53. Pour quelle raison ce dispositif ne permet-il pas de déterminer la présence d'une exoplanète ?

Pour mettre en évidence la présence d'une exoplanète, on utilise deux télescopes. En recombinant les faisceaux issus des deux télescopes sur une recombinaison optique située au milieu des deux télescopes, ces faisceaux seront en phase et l'on obtiendra des interférences constructives. Ainsi dans l'interférométrie classique, les signaux des deux télescopes se combinent pour construire une frange centrale d'intensité maximale sur la ligne de visée, c'est-à-dire dans la direction de l'étoile observée. Cependant à l'aide d'un principe ingénieux, l'interféromètre de Bracewell (voir figure 13 ci-dessous), il est possible d'introduire sur le faisceau de l'un des télescopes un déphaseur achromatique de π , de sorte que les interférences deviennent destructives dans la direction de l'étoile. On « éteint » ainsi le flux de l'étoile : c'est ce qu'on appelle l'interférométrie à frange noire.

Dans la direction de la planète qui fait un angle α par rapport à la direction de l'étoile, on introduit une différence de marche supplémentaire de $D \times \sin \alpha$ où D est la distance entre les deux télescopes. Si on adapte D , on peut s'arranger pour qu'à la longueur d'onde d'observation, la différence de marche supplémentaire compense exactement le déphasage π introduit par le déphaseur. On réalise alors dans la direction de la planète des interférences constructives.

Toute source sur l'axe (ici l'étoile), donc sur la frange sombre, est éteinte de manière très efficace. Une source hors-axe (ici l'exoplanète), sur une frange claire, n'est pas ou peu affectée et est donc détectée avec un bien meilleur contraste.

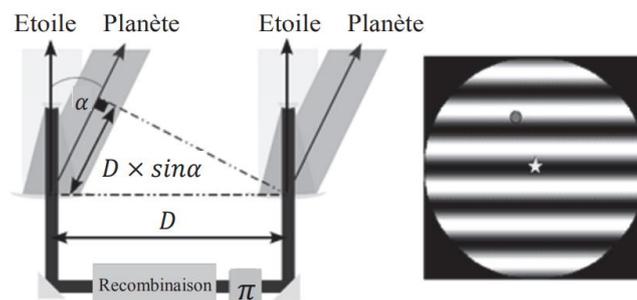


Figure 13 - Principe de fonctionnement de l'interféromètre de Bracewell

Pour comprendre le principe de fonctionnement de l'interféromètre de Bracewell, on se ramène à l'expérience des trous d'Young en considérant la direction de l'étoile suivant l'axe (Oz) et la direction de la planète inclinée d'un angle α par rapport à la direction de l'étoile. Un déphaseur est introduit avant la lentille et la recombinaison est associée au point O de l'écran (cf. figure 14).

La distance entre les trous d'Young est notée D .

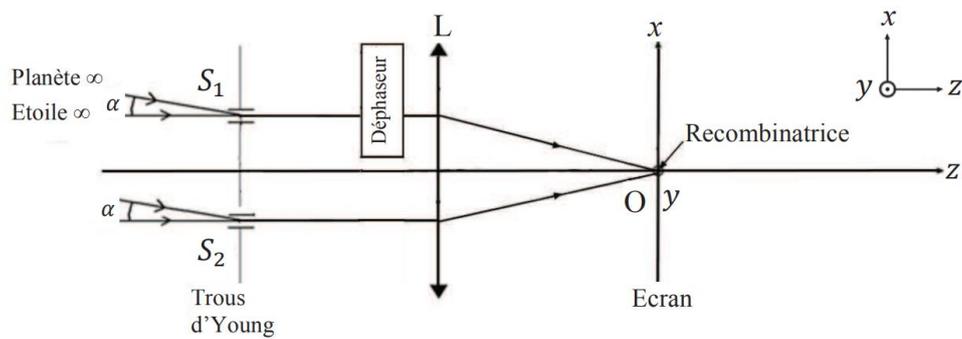


Figure 14 - Dispositif des trous d'Young pour une planète vue sous un angle α

54. Lorsque l'interféromètre de Bracewell pointe en direction de l'étoile, quelle est l'expression de l'intensité lumineuse due uniquement à l'étoile en un point de la recombinaison ?

Quelle est l'expression de l'ordre d'interférences dans un tel cas ?

(On attend ici une expression de l'intensité lumineuse due à l'étoile I_* et de l'ordre d'interférence associé p_* en fonction entre autres de la position x sur l'écran)

55. Lorsque l'interféromètre de Bracewell pointe en direction de l'étoile, quelle est l'expression de l'intensité lumineuse due uniquement à l'exoplanète en un point de la recombinaison pour un réglage optimal ?

56. Justifier que l'interféromètre de Bracewell permet de mettre en évidence la présence d'une exoplanète.

57. La planète Isis est située à 0,031 ua (unités astronomiques) de son étoile. Son étoile est à 63 al (années lumières) du Soleil. Une année lumière équivaut à 63242 unités astronomiques.

L'observation se fait dans l'infrarouge à la longueur d'onde $\lambda = 10 \mu\text{m}$.

Quelle serait la distance minimale D entre deux télescopes pour détecter Isis par l'interféromètre de Bracewell ? Conclure.

Les applications numériques de ce problème seront faites sans calculatrice avec un seul chiffre significatif.

Problème 2 : Principe de la tomographie par cohérence optique (OCT)

Un formulaire est donné en fin d'énoncé. Les parties IB, ID et IE sont indépendantes.

Il est rappelé que les expressions littérales doivent être données en fonction des notations de l'énoncé et qu'il faut toujours donner l'expression littérale avant de faire l'application numérique (avec le bon nombre de chiffres significatifs malgré l'absence de calculatrice).

La tomographie par cohérence optique (OCT) est un procédé interférométrique non destructif permettant de réaliser des images en coupe de tissus biologiques avec une résolution de l'ordre du micromètre. On se propose d'en illustrer le principe.

La base de l'appareil est un interféromètre de Michelson. On raisonnera pour simplifier sur l'interféromètre « théorique », uniquement constitué de deux miroirs (M_1) et (M_2) et d'une lame séparatrice (SP) idéale, c'est-à-dire infiniment mince et séparant un faisceau lumineux incident en deux faisceaux d'égale intensité. L'appareil est réglé en lame d'air, c'est-à-dire que (M_2) et l'image (M'_1) du miroir (M_1) par la séparatrice sont parallèles. Les positions de (M'_1) et (M_2) sont repérées sur l'axe Oz (voir figure 1). (M'_1) est en z , (M_2) en z_0 . La lumière se propage dans l'air dont l'indice sera pris égal à 1.

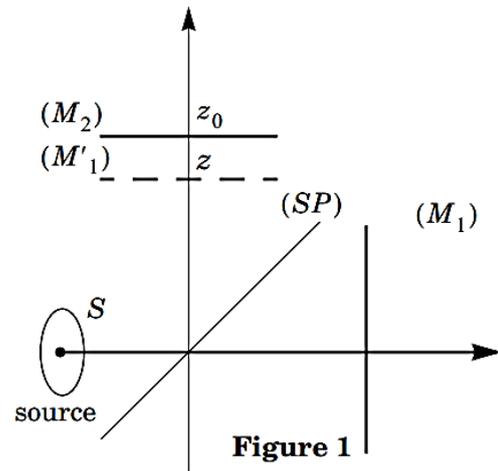


Figure 1

I.A – Préliminaire

I.A.1) Décrire le dispositif réel qui permet de réaliser cette lame séparatrice idéalisée (SP).

I.A.2) Qu'est-ce qu'une onde monochromatique ? Donner deux exemples de dispositifs permettant, au laboratoire, de produire une onde quasi-monochromatique.

I.A.3) L'interféromètre, réglé en configuration lame d'air, est éclairé par une source quasi-monochromatique ponctuelle située à distance finie.

a) Comment réaliser concrètement une source (quasi) ponctuelle à distance finie à partir des dispositifs du I.A.2. ?

b) On observe les franges d'interférences sur un écran parallèle à (M_2). Où peut-on placer l'écran ? Décrire en quelques mots la figure d'interférence.

c) On remplace la source ponctuelle par une source monochromatique étendue autour du point S . Comment évolue la figure d'interférence ? Où peut-on voir des franges ? Comment les nomme-t-on ?

I.A.4) La source étant toujours étendue, on place l'écran dans le plan focal image d'une lentille convergente (L) de distance focale f' , dont l'axe optique est perpendiculaire à (M_2).

a) Etablir l'expression de la différence de marche δ_M en un point M de l'écran en fonction de la distance $r = F'M$ (avec F' le foyer image de (L)), de f' , et de l'épaisseur e de la lame d'air. On supposera que les rayons lumineux font des angles faibles avec l'axe optique et on donnera une expression approchée de δ_M à l'ordre 2 en r/f' .

b) Application numérique : La longueur d'onde de la lampe est de $\lambda_0 = 500,00 \text{ nm}$. L'épaisseur de la lame d'air est $e = 250,10 \text{ }\mu\text{m}$. Quels sont les ordres d'interférence des 2 premiers anneaux brillants ?

I.B – OCT – Domaine temporel

L'interféromètre, réglé en lame d'air et décrit par la figure 1, est éclairé par une source étendue. L'écran est placé dans le plan focal image d'une lentille convergente (L) de distance focale f' dont l'axe optique est perpendiculaire à (M_2).

I.B.1) Comment nomme-t-on la position particulière $z = z_0$? Que voit-on alors sur l'écran ?

I.B.2) Lorsqu'on translate (M_1), on fait les observations suivantes :

- avec une source de lumière blanche, l'éclairement sur l'écran cesse de varier et devient uniforme après un déplacement de quelques micromètres ;
- avec une lampe à vapeur de mercure équipée d'un filtre interférentiel sélectionnant la raie verte, le même phénomène se produit pour un déplacement de quelques millimètres ;
- avec un laser hélium-néon, le phénomène n'est pas observé.

Interpréter qualitativement ces observations. On introduira les notions de contraste et de longueur de cohérence que l'on définira.

I.B.3) On place au foyer image F' de (L), un photodétecteur quasi ponctuel. La source primaire est une source monochromatique de longueur λ_0 . On appelle nombre d'onde la quantité $\sigma = 1/\lambda$ ($\sigma = \nu/c$ est donc proportionnel à la fréquence ν de la radiation lumineuse). Donner l'expression de l'intensité lumineuse $I(z)$ reçue par le photodétecteur, en fonction de z , z_0 , σ_0 et de l'intensité lumineuse I_0 , qu'il recevrait si l'on masquait le miroir (M_2).

I.B.4) La source primaire n'est plus monochromatique. L'intensité que produirait l'interféromètre en F' dans l'intervalle de nombres d'onde $[\sigma, \sigma + d\sigma]$ si l'on masquait l'un des deux miroirs est $G(\sigma)d\sigma$, où $G(\sigma)$ est une fonction proportionnelle à l'intensité spectrale de la source.

a) Chaque intervalle spectral élémentaire $[\sigma, \sigma + d\sigma]$ pouvant être assimilé à une source monochromatique, que dire de deux intervalles spectraux différents ? En déduire en la justifiant, sous forme d'une intégrale sur σ , la nouvelle expression de l'intensité $I(z)$ en fonction de z , z_0 et $G(\sigma)$.

b) Calculer explicitement $I(z)$ dans le cas d'une source à profil spectral rectangulaire de largeur $\Delta\sigma$:

$$\begin{cases} G(\sigma) = G_0 & \text{si } \sigma \in [\sigma_0 - \Delta\sigma/2, \sigma_0 + \Delta\sigma/2] \\ G(\sigma) = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On exprimera le résultat sous la forme : $I(z) = C[1 + V \cos(4\pi\sigma_0(z - z_0))]$ où C est une constante et V le facteur de visibilité (fonction de $z - z_0$), grandeurs que l'on déterminera en fonction de G_0 , $\Delta\sigma$, $(z - z_0)$ et en utilisant la fonction sinus cardinal.

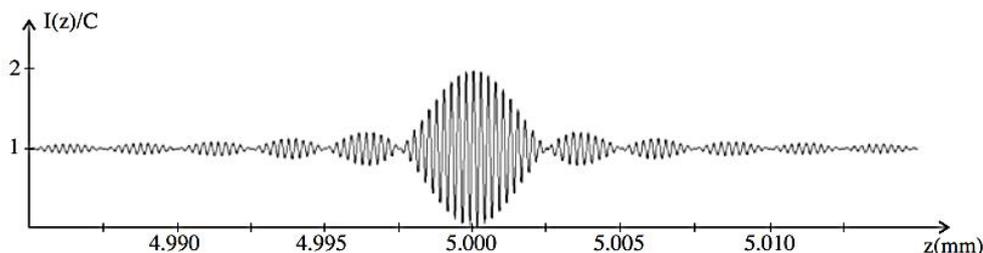


Figure 2

c) La figure 2 donne le graphe de $I(z)$. Déterminer z_0 , σ_0 et $\Delta\sigma$ en précisant la méthode utilisée.

d) Cette modélisation permet-elle d'expliquer les observations expérimentales du I.B.2. ? Donner les ordres de grandeur des largeurs spectrales $\Delta\sigma$ des différentes sources. Préciser la relation qui lie $\Delta\sigma$ à la longueur de cohérence.

I.B.5) Le miroir (M_2) est remplacé par une surface plane partiellement réfléchissante de coefficient de réflexion pour l'amplitude ρ réel. On ne tiendra pas compte d'un éventuel déphasage lié à la réflexion de l'onde sur (M_1) ou sur la surface plane. On suppose la source monochromatique de nombre d'onde σ_0 . Comment est modifiée l'expression de I du I.B.3 ? Comment est modifiée la figure d'interférence ? (Donner la nouvelle expression de l'intensité lumineuse I).

Indication : le coefficient de réflexion pour l'intensité lumineuse est ρ^2 .

I.B.6) (M_2) est maintenant remplacé par N surfaces partiellement réfléchissantes de positions

$z_1 < z_2 < \dots < z_N$ et de coefficients de réflexion pour l'amplitude $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ tous réels (figure 3). On pourra considérer que les coefficients ρ_i sont tous des infiniment petits de même ordre ($|\rho_i| \ll 1$) de sorte que les coefficients de transmission pour l'amplitude sont tous égaux à 1. On limitera les calculs au premier ordre.

a) Dans le cas de la source monochromatique de nombre d'onde σ_0 , montrer que :

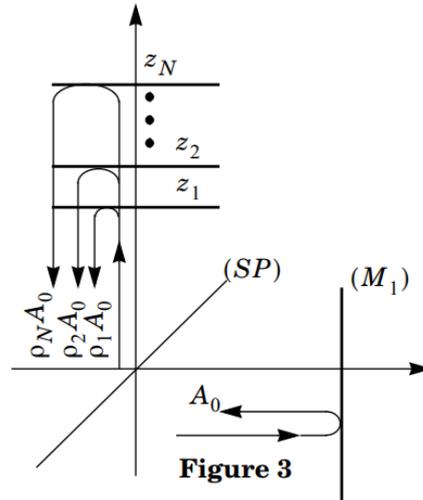
$$I(z) = I_0 \left(1 + 2 \sum_{i=1}^N \rho_i \cos \varphi_i \right),$$

en précisant l'expression des φ_i en fonction de z , z_i et σ_0 .

b) L'appareil est maintenant éclairé avec la source de profil spectral rectangulaire du I.B.4. Calculer $I(z)$. On fera apparaître dans son expression le facteur de visibilité V du I.B.4-b).

c) En partant du graphe de la figure 2, tracer $I(z)$ dans le cas $N = 2$ avec $\rho_1 = 4 \cdot 10^{-2}$, $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-2}$, $z_1 = z_0$, $z_2 = z_0 + 5/\Delta\sigma$.

d) Dans le cas général, montrer que la mesure de $I(z)$ permet de déterminer tous les couples (z_i, ρ_i) à condition que les quantités $z_{i+1} - z_i$ soient supérieures à une certaine valeur que l'on exprimera à partir de la largeur spectrale de la source, puis de sa longueur de cohérence. Quelle source choisir pour avoir la meilleure résolution possible ?



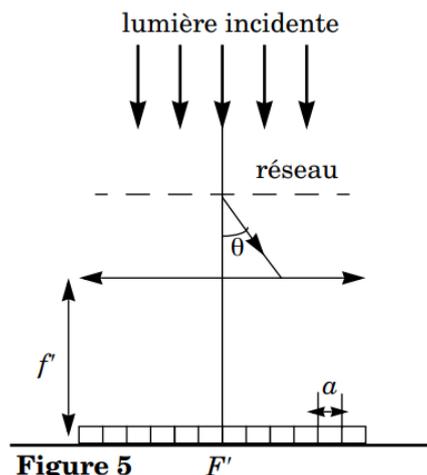
NB : La formule à démontrer est une approximation au premier ordre en ρ_i

I.D – Mesure du spectre avec un réseau

Pour l'analyse spectrale on utilise un réseau par transmission de largeur utile L , comportant n traits par unité de longueur, éclairé en incidence normale.

I.D.1) À quelle condition sur les nL ondes diffractées par le réseau observe-t-on un maximum d'intensité lumineuse ? En déduire la formule des réseaux donnant les directions d'émergence θ correspondant aux pics d'intensité. Définir l'ordre d'un pic. Il sera noté p .

I.D.2) Le détecteur est une barrette CCD constituée d'un alignement de cellules photosensibles identiques, de largeur a , délivrant une tension proportionnelle à l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. Il est placé dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale f' , traversée par le faisceau émergent du réseau (figure 5). On prend :



$f' = 10 \text{ cm}$; $a = 100 \mu\text{m}$; $n = 500 \text{ traits} \cdot \text{mm}^{-1}$; $L = 2 \text{ cm}$. Pour la radiation de longueur d'onde λ , la largeur angulaire d'un pic du réseau est donnée par : $\Delta(\sin\theta) = 2\lambda/L$. Calculer la largeur sur le détecteur de la tache associée à la radiation rouge $\lambda = 750 \text{ nm}$. Conclure. En pratique, la taille de la tache est plus grande que la valeur trouvée. Pourquoi ?

I.D.3) Déterminer la largeur $\delta\lambda$ de l'intervalle $[\lambda, \lambda + \delta\lambda]$ des radiations reçues par une des cellules du capteur en fonction de a , n , f' et de l'ordre p .

En déduire la largeur correspondante en nombre d'onde $\delta\sigma$ en fonction de a , n , f' , λ et de l'ordre p .

I.E – Mise en œuvre – Réglage de l'interféromètre

Une des implémentations de l'OCT fait appel à un interféromètre de Linnik. Il s'agit d'un interféromètre de Michelson sur les deux bras duquel on a placé des objectifs de microscope identiques (figure 6), que l'on assimilera dans toute la suite à deux lentilles minces convergentes (L_1) et (L_2) de distance focale f' .

L'interféromètre est éclairé par une source de lumière blanche spatialement étendue placée dans le plan focal objet d'une lentille d'éclairage (L_E) . La figure d'interférence est enregistrée par un capteur CCD plan situé en sortie de l'instrument dans le plan focal image d'une lentille achromatique (L_P) de distance focale f'_P . L'un

des bras de l'interféromètre comporte le miroir (M_1) , l'autre la lame semi-réfléchissante (L) dont on veut mesurer la position et le coefficient de réflexion. Elle sera assimilée ici au miroir (M_2) . Un des intérêts de ce dispositif est d'améliorer la résolution sur la mesure de la position.

On s'intéressera uniquement ici au réglage de l'instrument. Dans un premier temps, on retire les objectifs et on règle l'interféromètre au contact optique.

I.E.1) On place ensuite un objectif devant (M_1) , puis, après avoir occulté (M_2) , on règle la position de l'objectif de façon à obtenir l'image de (M_1) sur le capteur CCD . On procède de la même manière pour le second objectif (occultation de (M_1) et image de (M_2) sur le capteur). Quelles sont alors les positions des deux objectifs par rapport aux miroirs ?

I.E.2) Que devrait-on observer sur le détecteur lorsque les deux miroirs sont démasqués ? (les deux objectifs sont supposés rigoureusement identiques).

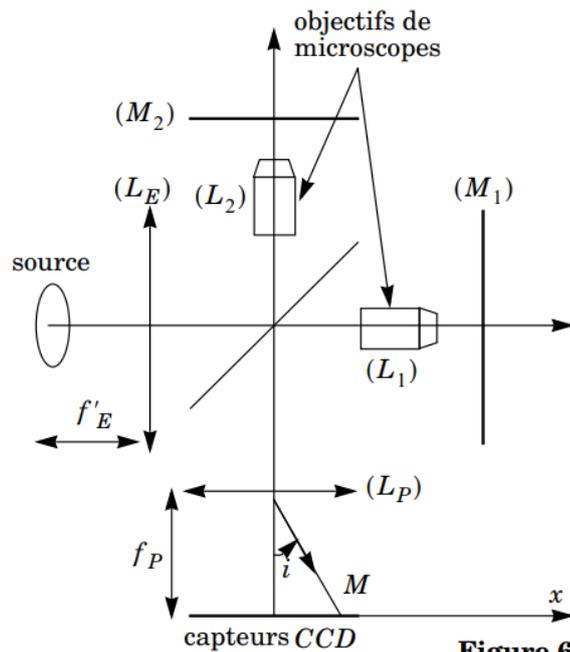


Figure 6

I.E.3) En pratique, on observe des franges rectilignes dont le contraste diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du centre de la figure d'interférence. On veut montrer que ce phénomène peut s'expliquer par un défaut d'alignement latéral des axes optiques des objectifs. On considère pour cela le schéma équivalent du dispositif dans lequel (L_1) et (M_1) ont été remplacés par leurs symétriques (L'_1) et (M'_1) par rapport à la séparatrice (SP) (figure 7). On note d la distance des deux axes optiques supposés parallèles. Pour des raisons de clarté de la figure, la distance d a été exagérée.

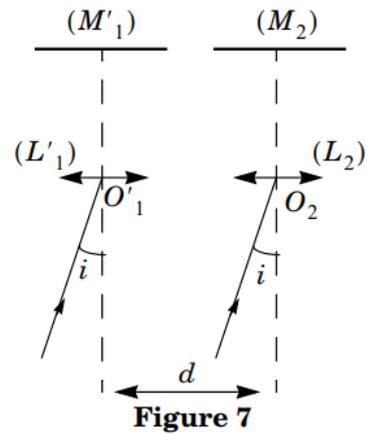


Figure 7

a) Reproduire le schéma et tracer le cheminement, dans chacune des voies, de deux rayons lumineux interférant au point M d'abscisse $x = f'_P i$ (voir figure 6) sur le détecteur et passant par les centres O'_1 et O_2 de (L'_1) et (L_2) . On suppose que l'angle i reste faible et on se place dans l'approximation de Gauss.

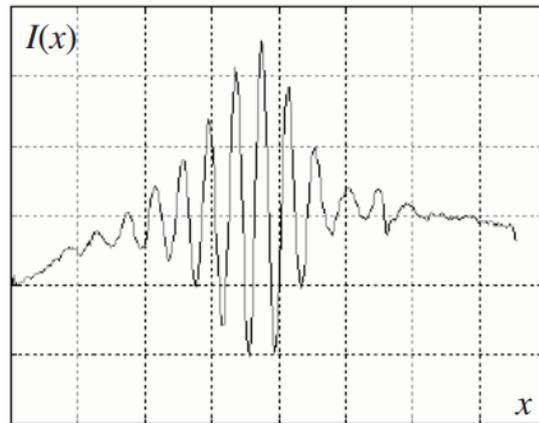


Figure 8

b) En utilisant le théorème de Malus

établir soigneusement l'expression de la différence de marche δ_M en M .

Montrer que l'interfrange est $\Delta x = \frac{\lambda f'_P}{2d}$

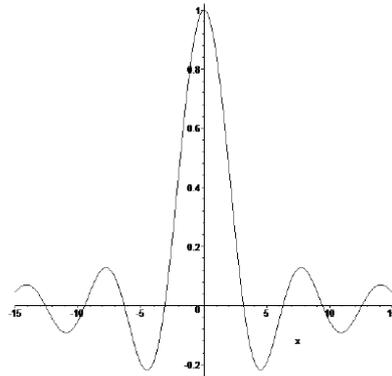
Comment doit-on procéder pour réaliser l'alignement des axes ?

I.E.4) La figure 8 montre un enregistrement de l'intensité $I(x)$ obtenue sur le capteur CCD à partir d'une source de lumière blanche. L'échelle des abscisses a été volontairement omise.

La largeur de l'interférogramme, c'est-à-dire l'intervalle des valeurs de x pour lesquelles on peut voir des franges est de 0,6 mm. Évaluer d . On prendra : $f'_P = 20$ cm et $\lambda = 750$ nm.

Formulaire :

$sinc(x) = \frac{\sin(x)}{x}$; l'allure de cette fonction est la suivante :



On donne les formules de trigonométrie suivantes :

$$\cos p + \cos q = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) ; \cos p - \cos q = -2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \sin\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

$$\sin p + \sin q = 2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) ; \sin p - \sin q = 2 \sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \cos\left(\frac{p+q}{2}\right)$$

Problème 3 : Contrôle d'épaisseur d'un dépôt métallique

On éclaire une lame de verre semi-réfléchissante, supposée infiniment fine, et formant un angle $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$ avec une plaque réfléchissant totalement la lumière sur laquelle un dépôt métallique (*métallique donc totalement réfléchissant*) a été effectué. Le dépôt est assimilable à un parallélépipède métallique opaque d'épaisseur constante posé au contact de la lame réfléchissante. L'éclairement est assuré sous incidence quasi-normale par une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ nm}$.

L'ensemble est représenté sur la partie gauche de la figure 6.

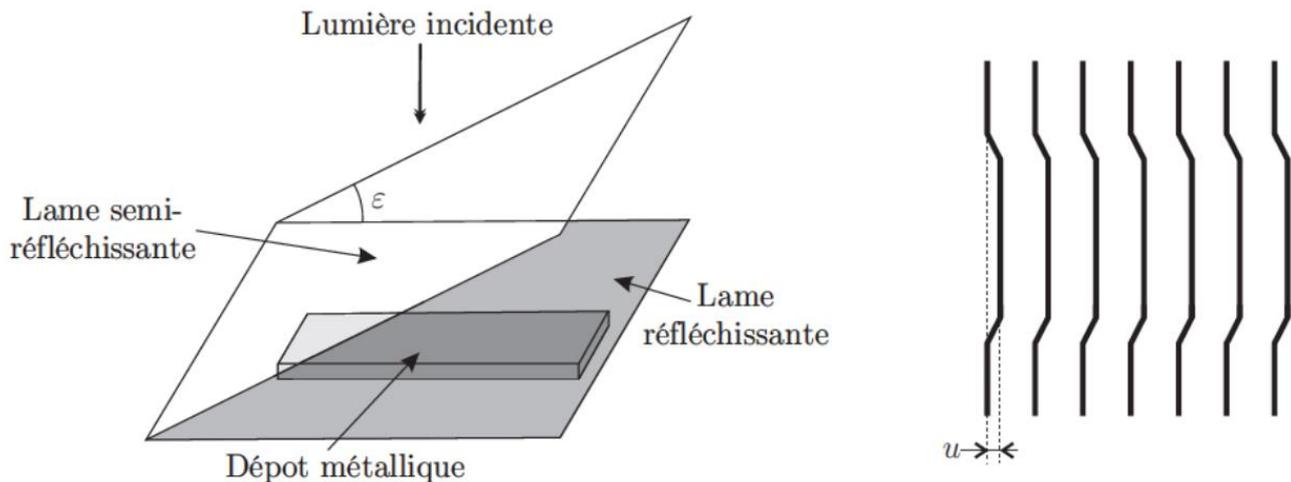


FIGURE 6 – Dispositif optique et franges observées sur l'écran (échelle non respectée)

Au voisinage des lames, on observe des franges non rectilignes, on dit qu'elles sont « décrochées ». Ces franges sont observées sur un écran placé à une distance $D' = 50 \text{ cm}$ d'une lentille convergente de distance focale $f' = 5 \text{ cm}$. Elles sont représentées sur la partie droite de la figure 6.

Le grandissement de la lentille sera noté γ . L'axe optique de la lentille est perpendiculaire à la lame réfléchissante (et au dépôt).

On mesure sur l'écran le décalage $u = 0,6 \text{ mm}$.

- Q1.** Faire un schéma du dispositif incluant la lentille d'observation et l'écran. Proposer une solution technique pour éclairer et observer du même côté du dispositif.
- Q2.** Déterminer l'expression de l'interfrange $i_{\text{écran}}$ observé sur l'écran dans la zone où le dépôt est absent. On exprimera $i_{\text{écran}}$ en fonction de λ , ε , et γ puis en fonction de λ , ε , D' et f' . On calculera sa valeur numérique.
- Q3.** Expliquer la présence du décroché observé et montrer que l'épaisseur e du dépôt métallique dépend de la valeur u du décroché mesurée sur l'écran (partie droite de la figure 6). On explicitera la relation entre e , u et d'autres paramètres utiles de l'expérience. On mesure $u = 0,6 \text{ mm}$ sur l'écran, calculer la valeur numérique de l'épaisseur e du dépôt. On commentera le résultat.