

BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR GENIE OPTIQUE
OPTION PHOTONIQUE

PHYSIQUE APPLIQUEE (partie optique : EPREUVE U42)

Session 2001

Durée : 2h30 Coefficient : 2,5

Les questions sont indépendantes les unes des autres, mais il est conseillé de les traiter dans l'ordre pour une meilleure compréhension du sujet.

***MESURE DE DEPLACEMENTS PAR INTERFEROMETRIE DE SPECKLE A
ECLAIRAGES SYMETRIQUES.***

Notion de speckle

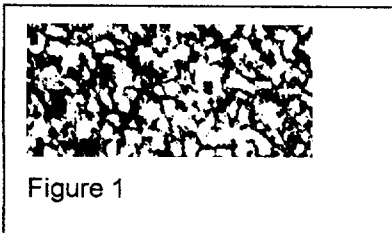


Figure 1

Lorsqu'on éclaire un objet avec un laser, on observe une figure granulaire appelée « figure de speckle » : un exemple d'un tel phénomène est donné sur la figure 1. Puisqu'un phénomène de ce genre n'est pas observable avec la lumière d'une source ordinaire, il provient d'une propriété propre à la lumière laser : sa cohérence.

La figure de speckle est vue nette par focalisation sur n'importe quel endroit de l'espace, et ceci pour la raison suivante : la lumière diffusée par la surface rugueuse de l'objet crée dans l'espace un champ d'onde stationnaire de structure complexe, constitué d'une superposition de champs d'amplitudes aléatoires, provenant des différents points de l'objet. Le speckle est donc un phénomène statistique d'interférences à ondes multiples.

1. TAILLE DES GRAINS DE SPECKLE (6 points)

1.1. Etude du speckle sans système de projection

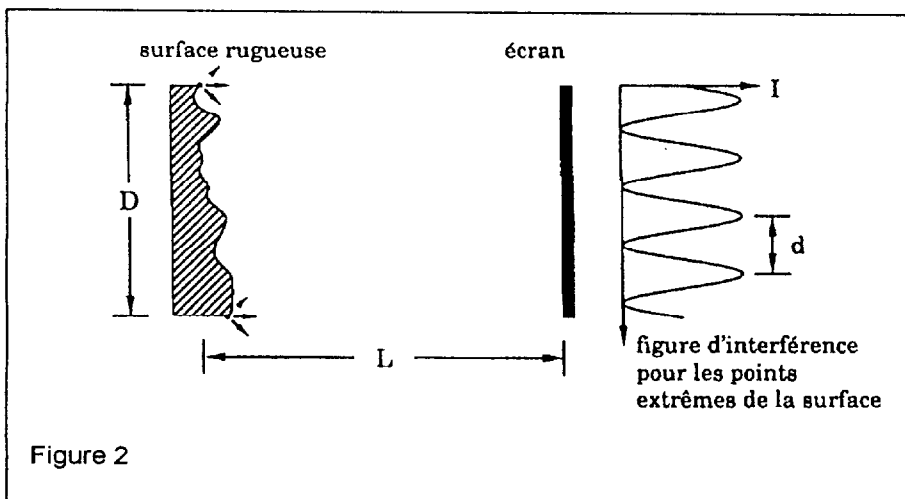
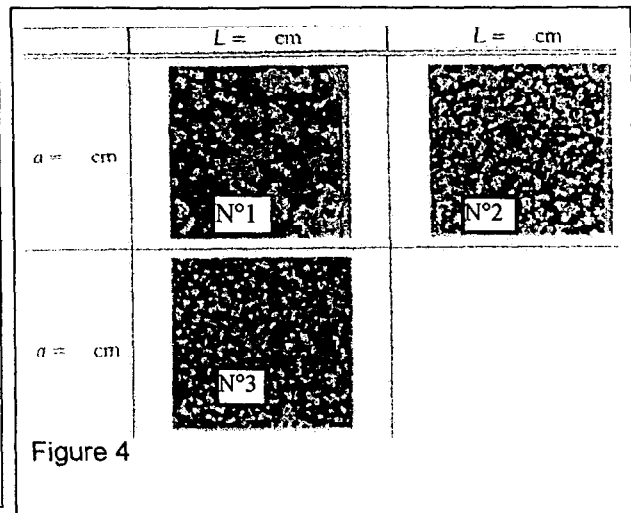
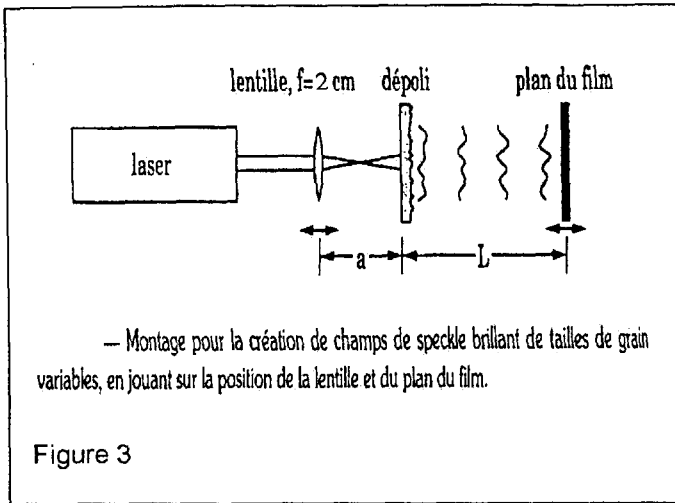


Figure 2

Un objet rugueux est éclairé sur une surface circulaire de diamètre D , la distance surface - écran d'observation est L , et l'interfrange est d (figure 2).

La taille caractéristique des grains de speckle peut être estimée simplement en faisant référence à l'expérience des trous d'Young. On considère deux points extrêmes de la surface illuminée distants de D : ces 2 points se comportent comme des trous d'Young.

- 1.1.1. Donner (sans démonstration) l'expression littérale de la distance d entre les franges d'interférences créées par ce couple de points.



1.1.2. On donne $\lambda = 633 \text{ nm}$ et $L = 40 \text{ cm}$. Tracer l'allure du graphe $d = f(D)$ pour D variant entre 4,0 cm et 20 cm en faisant apparaître les valeurs extrêmes sur le graphe.

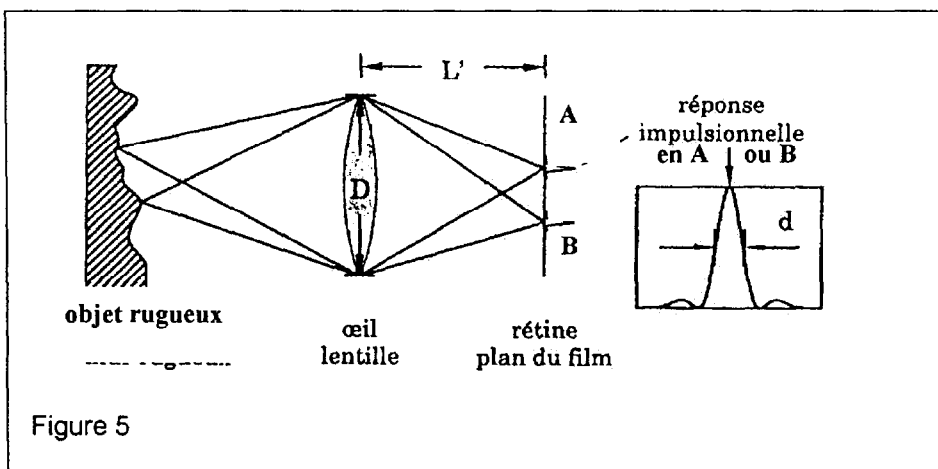
1.1.3. Une relation plus exacte est : $d = \frac{1,22 \lambda L}{D}$. A quel phénomène optique cette expression fait-elle penser ?

1.1.4. Pour montrer que la taille des grains de speckle dépend des conditions géométriques, on se sert du montage de la figure 3. À l'aide d'un verre dépoli transparent, un champ de speckle intense est créé dans l'espace et il impressionne directement un film photographique. Pour cela, on utilise un appareil photographique sans objectif, qui peut se déplacer le long de l'axe optique (variation du paramètre L). Pour changer la taille de la surface diffusante du dépoli (variation du paramètre D), on se sert d'une lentille de courte focale, également mobile le long de l'axe optique.

La figure 4 montre trois figures de speckle qui ont été obtenues avec ce dispositif, pour $a = 11 \text{ cm}$ et 16 cm , et $L = 33 \text{ cm}$ et 84 cm . Identifier les différentes images en complétant la figure 4 par les valeurs de a et L trouvées puis répondre sur votre feuille à l'aide d'un tableau :

| | | |
|------------------|------------------|------------------|
| | $L = \text{ cm}$ | $L = \text{ cm}$ |
| $a = \text{ cm}$ | N°1 | N°2 |
| $a = \text{ cm}$ | N°3 | |

1.2. Etude du speckle avec système de projection



L'observation du speckle peut aussi être faite en utilisant l'œil, une lentille ou un objectif (voir figure 5). Dans ce cas, on montre que la taille d du grain de speckle dans le plan conjugué de l'objet rugueux est donnée par la relation : $d = \frac{1,22 \lambda L'}{D}$

La valeur de d est fonction de la distance p (en valeur absolue) entre l'objet et la lentille et des caractéristiques de l'objectif.

1.2.1. En utilisant les formules de conjugaison, calculer L' . Avec la relation donnant d , calculer la taille d du grain. On donne : $\lambda = 633 \text{ nm}$, $p = 200 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ mm}$ et $D = 12,5 \text{ mm}$.

1.2.2. Vers quelle valeur limite tend d si l'on éloigne l'objet sans changer l'objectif ?

2. ECLAIREMENT D'UN OBJET PAR UN FAISCEAU EMIS PAR LE LASER (10 points)

Un faisceau incident gaussien de longueur d'onde $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$, de divergence caractérisée par un angle total

d'ouverture $\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0}$ et un diamètre $2w = 2w_0 \sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right)}$ où :

- w_0 est le rayon dans la section minimale (waist). On donne $2w_0 = 0,60 \text{ mm}$
- z est la distance du point considéré par rapport à la position du waist choisi comme origine de l'axe des distances.
- z_R est la longueur de Rayleigh égale à $\frac{\pi w_0^2}{\lambda}$.

2.1. Coupe longitudinale du faisceau.

Faire une représentation en coupe longitudinale du faisceau sur laquelle figureront les grandeurs : z , w , w_0 et θ .

2.2. Calcul du diamètre du faisceau arrivant sur l'objectif.

Ce faisceau passe à travers l'objectif de microscope d'un filtre spatial L_1 . La face d'entrée de l'objectif est située à la distance $z = 0,56 \text{ m}$ du waist du laser.

- 2.2.1. Peut-on considérer z très supérieur à z_R ?
- 2.2.2. Calculer la valeur de $2w$, diamètre du faisceau arrivant sur l'objectif.

2.3. Calcul du diamètre de la tache de focalisation. Taille du trou (pinhole).

L'objectif de microscope du filtre spatial a une distance focale f de $8,0 \text{ mm}$ et est assimilé à une lentille mince.

- 2.3.1. Comparer z et f . En déduire la position du waist image.
- 2.3.2. A l'aide d'un schéma, déterminer la divergence θ' du faisceau émergent. Calculer sa valeur. En déduire la valeur approchée du diamètre du waist image.
- 2.3.3. Un pinhole de diamètre $15 \mu\text{m}$ est-il bien adapté à la fonction filtrage spatial ?

2.4. Eclairage moyen de l'objet

Après passage dans le filtre spatial, le faisceau éclaire l'objet.

On cherche un ordre de grandeur et on donnera les valeurs numériques avec un maximum de 2 chiffres significatifs.

L'angle total de divergence du faisceau issu du filtre spatial est de $\theta_1' = 0,12 \text{ rad}$ et la distance de Rayleigh correspondante z_R' est de l'ordre de $60 \mu\text{m}$.

- 2.4.1. Calculer le diamètre ϕ du faisceau dans le plan de l'objet situé perpendiculairement à l'axe optique à 84 cm du pinhole.
- 2.4.2. La puissance issue du pinhole vaut $8,0 \text{ mW}$. Calculer l'éclairage moyen de l'objet.

2.5. Egalité des chemins optiques. Influence de la monochromaticité de la source.

- 2.5.1. On considère que l'on fait interférer sur l'objet 2 ondes planes monochromatiques, de même fréquence ν , de même amplitude a et que leur déphasage est dû uniquement à la différence δ des chemins optiques des deux trajets. On notera c la vitesse de la lumière dans le vide. L'expression de l'intensité $I(\nu)$ de la vibration résultante en fonction de a , ν et δ .

$$I = 2 a^2 \left(1 + \cos \frac{2\pi \cdot \nu \cdot \delta}{c} \right)$$

Calculer les valeurs maximales et minimales I_{\max} et I_{\min} de I .

Que vaut le contraste des franges défini par $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$?

- 2.5.2. En réalité la source n'est pas parfaitement monochromatique mais elle a une répartition spectrale rectangulaire donnée par la figure 6. La contribution de chaque bande de fréquence ν , de largeur $d\nu$, à l'intensité de la vibration résultante vaut :

$$\rightarrow 0 \quad \text{si } \nu < (\nu_0 - \Delta\nu/2) \quad \text{et si } \nu > (\nu_0 + \Delta\nu/2)$$

$$\rightarrow dI = I(\nu) d\nu \quad \text{si } (\nu_0 - \Delta\nu/2) < \nu < (\nu_0 + \Delta\nu/2)$$

où $I(\nu)$ est la fonction obtenue au 2.5.1

On montre que l'intensité I , somme de toutes les contributions, se met sous la forme :

$$I = K \left(1 + \gamma \cdot \cos \frac{2\pi \cdot \nu_0 \cdot \delta}{c} \right) \quad \text{avec } K \text{ constant et } \gamma = \frac{\sin \frac{\pi \cdot \Delta\nu \cdot \delta}{c}}{\frac{\pi \cdot \Delta\nu \cdot \delta}{c}}$$

Exprimer le nouveau contraste des franges en fonction de γ .

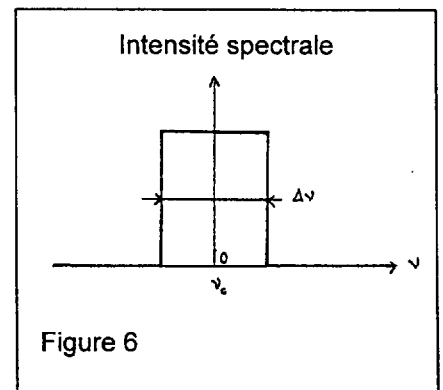


Figure 6

- 2.5.3. Pour quelle valeur minimale de $|\delta|$ notée L_c , obtient-on $\gamma = 0$?

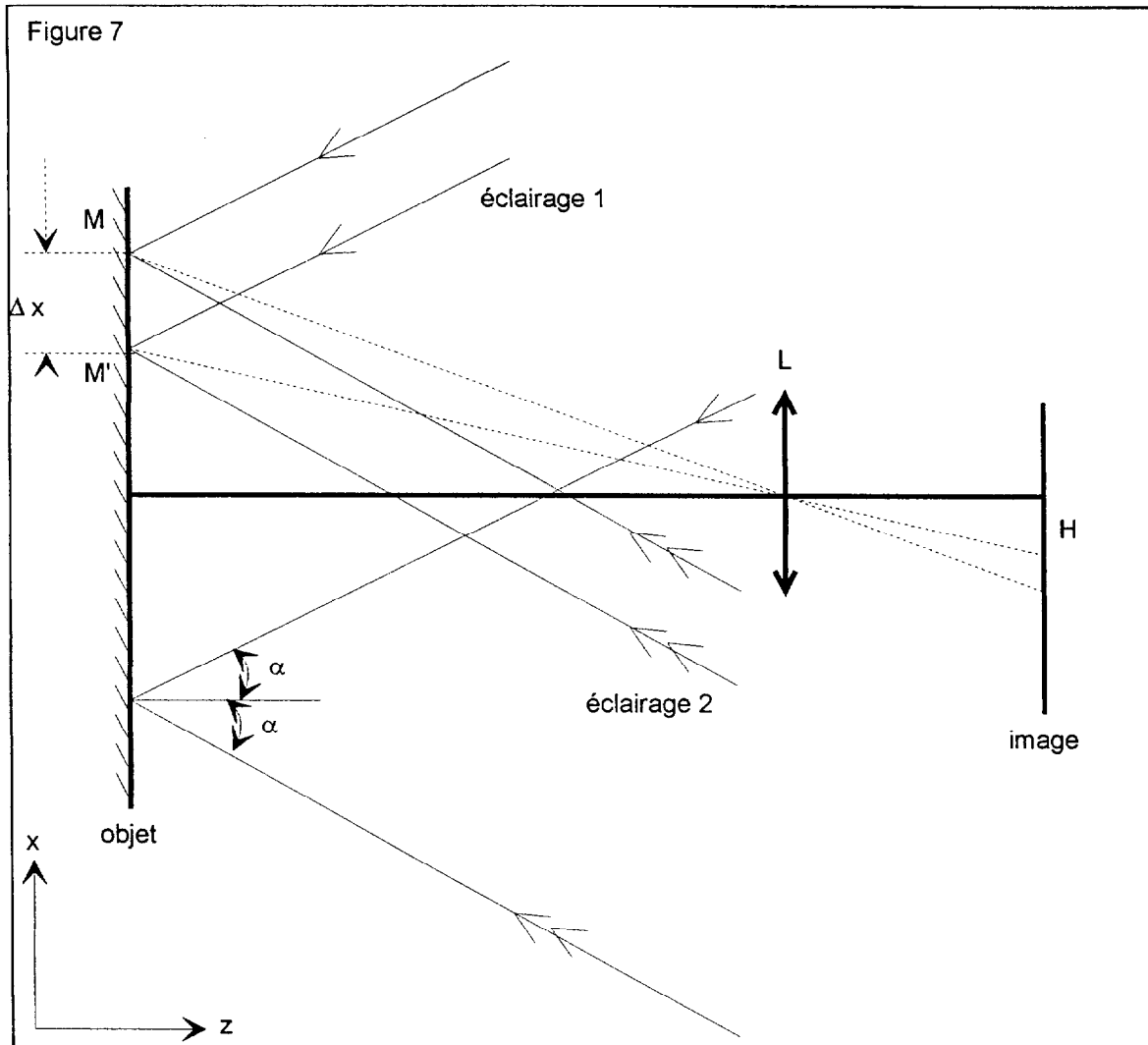
- 2.5.4. Application numérique : calculer la longueur de cohérence L_c .

On donne : $\Delta\nu = 1,4 \cdot 10^9$ Hz ainsi que la célérité de la lumière dans le vide, $c = 3,0 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.

3. MESURE DE DEPLACEMENT D'UN POINT M PAR INTERFEROMETRIE DE SPECKLE A ECLAIRAGES SYMETRIQUES (DOUBLE EXPOSITION) (4 points)

Cette méthode est utilisée dans l'industrie pour mesurer des déplacements dans le plan de l'objet. Si l'on éclaire l'objet avec le faisceau 1, on observe un speckle déterminé. Si l'on éclaire l'objet avec le faisceau 2, on observe un autre speckle. Si l'on éclaire l'objet avec les deux faisceaux cohérents, les deux figures de speckle interfèrent : elles sont superposées en l'absence de déplacement de l'objet.

On réalise dans le plan image deux enregistrements : le premier est l'image de l'objet au repos, le deuxième est l'image de l'objet soumis à une contrainte. On superpose ces deux images. En présence d'un petit déplacement Δx (inférieur à 100 μm) du point M dans le plan de l'objet (voir figure 7), les grains de speckle des deux images sont encore superposés et interfèrent. On considère que les faisceaux 1 et 2 sont des faisceaux tous les deux parallèles. Chacun d'eux fait un angle α avec l'axe de symétrie.



- 3.1. En vous aidant de la figure 7, montrer que le chemin optique correspondant au déplacement Δx du point M dans le faisceau 1 augmente de la quantité : $\delta_1 = \Delta x \cdot \sin \alpha$
- 3.2. Quelle est la variation de chemin optique correspondant au déplacement Δx du point M dans le faisceau 2 ?
- 3.3. L'objet est maintenant sous contrainte et le point M est translaté de Δx . On détermine la variation de phase $\Delta\varphi$ du point M.
Relier Δx à λ , α et $\Delta\varphi$.
- 3.4. Application numérique : $\Delta\varphi = 45 \text{ rad}$, $\lambda = 633 \text{ nm}$, $\alpha = 30^\circ$. Calculer Δx .