

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

1. Objectifs

Dans un premier temps, on analysera l'origine physique et les propriétés du speckle (*tavelures* en français). Ensuite, on utilisera le speckle dans un montage de Michelson pour mesurer la déformation micrométrique d'une poutre par deux méthodes d'interférométrie de speckle: la double exposition (mesure en temps réel) et celle des images phasées.

On comparera ensuite les deux méthodes.

2. Introduction

Le speckle est cette granularité particulière à la lumière laser lorsqu'elle est diffusée par une surface rugueuse. Il provient de l'interférence des rayons diffusés par tous les points éclairés vers le point d'observation (figure 2). Ces interférences sont constructives en certains endroits, et destructives en d'autres, donnant cet aspect granulaire (figure 1). La taille des grains est inversement proportionnelle à la taille de la surface éclairée (tache de diffraction par cette surface). Ils sont observables en plaçant un écran ou une caméra sans objectif à proximité de l'objet diffusant : c'est le

speckle objectif.

Lorsqu'on fait l'image des grains de speckle par un système optique, la taille de l'image des grains dépend entre autre de l'ouverture de ce système. Dans le montage destiné à mesurer la déformation d'une poutre, on fera l'image des grains de speckle avec une caméra munie d'un objectif : la taille des grains dépendra de la distance focale et de l'ouverture numérique de cet objectif : c'est le **speckle subjectif** (car il dépend de la façon dont on l'observe).

2.1 Observation du speckle objectif

Réaliser le montage de la figure 3, avec une lentille de focale 100 mm et un dépoli. Placer au départ la lentille à 70 cm du dépoli. Observer dans l'obscurité les grains de speckle sur un écran placé à différents endroits.

Rapprocher la dépoli de la lentille : comment varie la taille des grains de speckle avec la surface éclairée ?

Rechercher la position du dépoli qui donne la taille maximum pour les grains de speckle.

Expliquer comment on peut utiliser cette observation pour repérer le foyer d'une lentille.

2.2 Speckle subjectif : dimensions des grains

Le diamètre d de l'image d'un grain de speckle (figure 4) par un objectif est, lorsque l'objet diffusant est situé à grande distance de l'objectif, $d = 1,22 \cdot \lambda \cdot NO$, où NO est l'ouverture numérique de l'objectif $NO = f' / D$ avec f' la focale et D le diamètre d'ouverture de l'objectif. A focale fixée, on voit que les grains sont d'autant plus larges que D est petit.

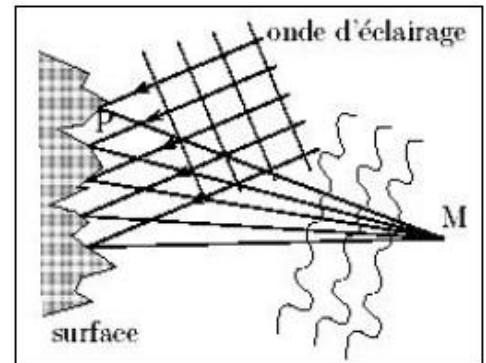


Figure 1 : Diffusion de la lumière par la rugosité d'une surface et interférences

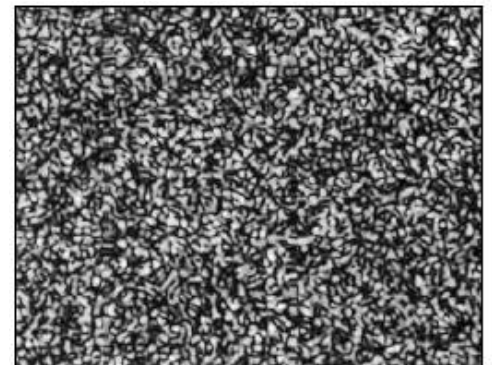


Figure 2 : Figure de speckle

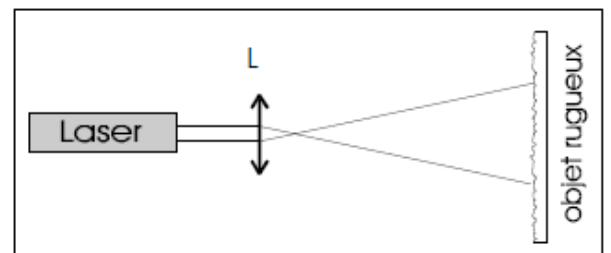


Figure 3 : Montage pour visualiser le speckle objectif

La taille des grains doit être supérieure à celle des pixels du CCD (10 μm). Quelle doit être la valeur minimale de NO ?

Les valeurs de NO pour un objectif sont indiquées sur une bague : les valeurs usuelles sont 1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16 et 32. Laquelle choisir ?

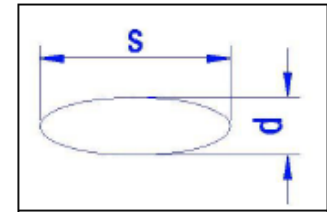


Figure 4 : Grain de speckle

La longueur ou épaisseur s d'un grain de speckle est aussi un paramètre important pour nous : elle limite la valeur du déplacement ou de la déformation décelable par l'interférométrie de speckle (les interférences doivent se faire à l'intérieur d'un même grain de speckle, car il y a perte de cohérence en passant d'un grain à l'autre).

On admettra que $s = 8 \cdot \lambda \cdot (NO)^2$.

Calculer la valeur de s avec la valeur de NO trouvée précédemment.

3. Principe de l'interférométrie de speckle

Pour chaque état de l'objet étudié, l'image enregistrée par la caméra CCD est une matrice de pixels.

L'éclairement de chaque pixel résulte de la superposition des grains de speckle subjectif de la plaque de référence et de la poutre objet (figure 5).

C'est une figure d'interférence entre :

- Le faisceau d'intensité I_{OBJ} diffusé par un point de la poutre que l'on va mettre en flexion.
- Le faisceau d'intensité I_{REF} diffusé par un point de la plaque de référence.

Chaque pixel reçoit une intensité de la forme

$$I = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ})$$

où φ_{REF} et φ_{OBJ} sont des phases aléatoires entre 0 et 2π .

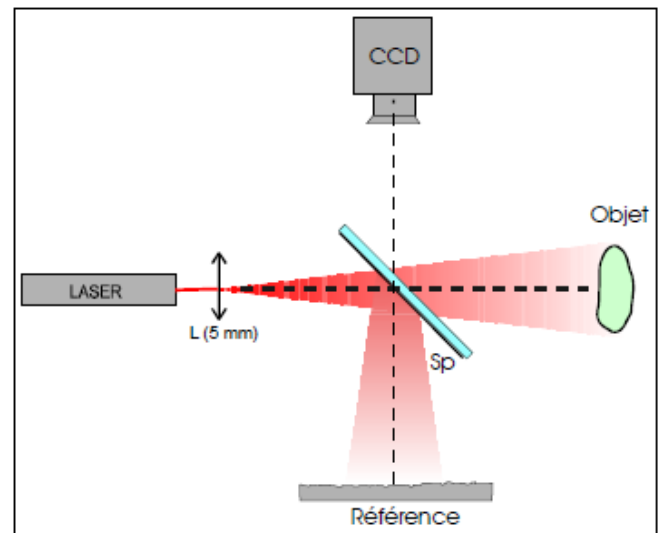


Figure 5 : Interférométrie de speckle

3.1 Double exposition

Dans la méthode de double exposition, on enregistre deux images : l'une avec la poutre à mesurer dans l'état 1, et l'autre avec la même poutre dans l'état 2. On réalise ensuite la soustraction des deux images.

Lorsqu'on met la poutre dans l'état 1, la hauteur d'un point d'abscisse x de cette poutre est z_1 . Le chemin optique de la lumière dans le bras de mesure varie alors de $2z_1$ et il y a un déphasage supplémentaire : $4\pi z_1 / \lambda$.

On enregistre sur le pixel correspondant l'intensité $I_1 = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + 4\pi z_1 / \lambda) = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\Phi_1)$.

Si on déforme l'objet dans le toucher la référence (ce qui suppose la déformation plus petite que la profondeur s d'un grain de speckle), la deuxième image est celle de la poutre dans l'état 2. Le même pixel reçoit une intensité $I_2 = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + \frac{4\pi}{\lambda} z_2) = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\Phi_2)$.

On peut ensuite prendre la valeur absolue de la différence de ces deux intensités pixel par pixel :

$$|I_2 - I_1| = \left| 4\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \sin(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} - \frac{2\pi}{\lambda}(z_2 + z_1)) \sin(\frac{2\pi}{\lambda}(z_2 - z_1)) \right| \quad (1)$$

- Développer le calcul de $I_2 - I_1$ pour démontrer la formule (1). On pourra utiliser la formule de trigonométrie : $\cos(a) - \cos(b) = -2\sin((a+b)/2)\sin((a-b)/2)$.

- Montrer que $I_2 - I_1 = 0$ (pixel noir) si $z_2 - z_1 = p\lambda/2$ avec p entier.
- Montrer que $I_2 - I_1$ est aléatoire pour les autres valeurs de $z_2 - z_1$.

Lorsque $I_2 \approx I_1$, la soustraction donne du noir. Sur l'image, l'ensemble des pixels noirs forme des franges sombres dites « franges de corrélation d'intensité ».

Frangé sombre => déformation $z = p\lambda/2$ (p entier)

3.2 Images phasées

Avec cette méthode, on prend quatre images de la poutre objet dans chacun des états 1 et 2. Ces images sont déphasées de $\pi/2$, le déphasage est réalisé en déplaçant la séparatrice.

A partir des 4 images de l'état 1, on obtient la phase Φ_1 intervenant dans l'intensité I_1 de l'état 1 (même méthode que pour le TP MO Moiré).

De même, on obtient la phase Φ_2 .

On peut alors calculer la différence de phase $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$.

- Montrer que Φ_1 et Φ_2 sont aléatoires.
- Montrer que $\Phi = 4\pi(z_2 - z_1)/\lambda$.
- Expliquer brièvement comment déterminer la déformation à partir de Φ .

4. Mesure d'une déformation par double exposition

On réalise un montage de Michelson en remplaçant les miroirs par des objets diffusants : une poutre d'étude (celle sur ses deux appuis) et une plaque de référence. La séparatrice sera une plaque de verre (figure 6).

- S'assurer que les deux bras font environ 50 cm et sont égaux au cm près.
- Elargir le faisceau laser avec une lentille de focale 5 mm.
- On observe les interférences avec une caméra CCD munie d'un objectif de 25 mm.
- Ouvrir le logiciel VisulmLV2, sélectionner la caméra Météor (n°1) et se placer en mode Live. Vérifier la netteté de l'image.
- Appliquer avec le micromètre une précontrainte à la poutre (état 1).

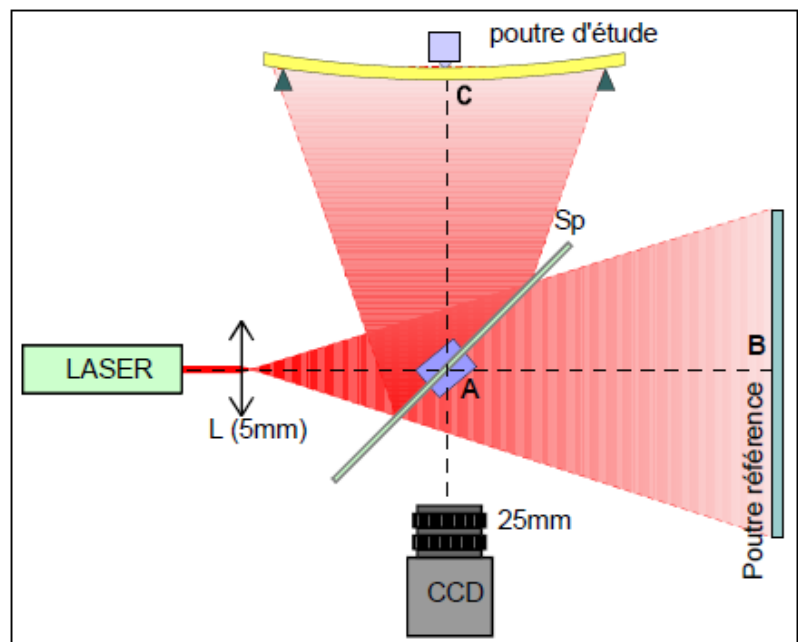


Figure 6 : Schéma du montage de double exposition

- Superposer l'image de la poutre et de l'objet de référence à travers la séparatrice. Assurez-vous qu'au moins un point d'appui se trouve dans le champ de la caméra.
 - Modifier l'ouverture de l'objectif et le temps d'intégration de la caméra. Constatez leur action sur la luminosité de l'image et la taille des grains de speckle. On cherche à avoir l'ouverture la plus petite possible pour avoir de gros grains de speckle, et on ajuste le temps d'intégration pour que l'éclairement soit suffisant sans saturer la caméra.
- Pour cela, on fait une acquisition en fausses couleurs. On doit obtenir une dominante verte, et pas de blanc sauf éventuellement une toute petite tache au centre.

- Se placer dans le mode d'acquisition Temps Réel. Fermer les portes du box pour éviter tout courant d'air et ne pas toucher le marbre. Cliquer sur Référence. Si le montage est stable, l'image reste uniformément noire.
- Relever l'indication du micromètre, puis agir très délicatement sur celui-ci en l'effleurant. La poutre doit apparaître à l'écran avec les franges de corrélation. Relever la nouvelle indication du micromètre (le dernier chiffre a dû changer de quelques unités, ce dernier chiffre est en μm).
- Refaire plusieurs fois la manipulation pour vous familiariser avec la méthode et optimiser vos résultats.

Montrer votre montage

Sauvegarder votre meilleure image sous Temps_Réel.jpg.

Cette image sera exploitée au 6., après la mesure par la méthode des images phasées.

5. Méthode des images phasées

5.1 Montage

Le montage est similaire à celui de la double exposition, mais la lame séparatrice est placée sur une platine munie d'un translateur piézo-électrique. La direction de translation fait un angle d'environ 5° avec celle de la séparatrice : ce réglage est fait, ne pas y toucher. Voir figure 7. Le cristal piézo-électrique est alimenté par une alimentation réglable en tension 0 – 100 V.

Connecter cette alimentation au port série de l'ordinateur.

On pilote le tout avec VisulmLV2. Dans le menu *Déplacement manuel / Piezo alimentation 0 – 100 ou 500V*, vérifier le choix du port série.

Vérifier que l'interrupteur de l'alimentation est bien sur Line et que le pilotage fonctionne correctement.

5.2 Détermination de la tension de déphasage

Lorsque la platine se déplace, une différence de marche se crée entre le bras de référence et le bras de mesure.

On recherche la variation de tension ΔV nécessaire pour obtenir un déphasage de 2π (c'est-à-dire une différence de marche de λ).

Cliquer sur *Tracer la courbe de luminance*.

Cliquer sur un pixel non saturé, mais sur la poutre et dans le tiers supérieur de l'image.

On voit apparaître une courbe s'allure sinusoïdale. Avec les curseurs, déterminer la valeur de ΔV entre deux maximums ou minimums. Pour un déphasage de $\pi/2$, il faut une tension $\Delta V/4$.

Pour acquérir une image phasée de la poutre dans l'état 1 (état actuel), aller dans le menu *Images / Capturer 4 images* (choisir une tension de début supérieure à 40 V).

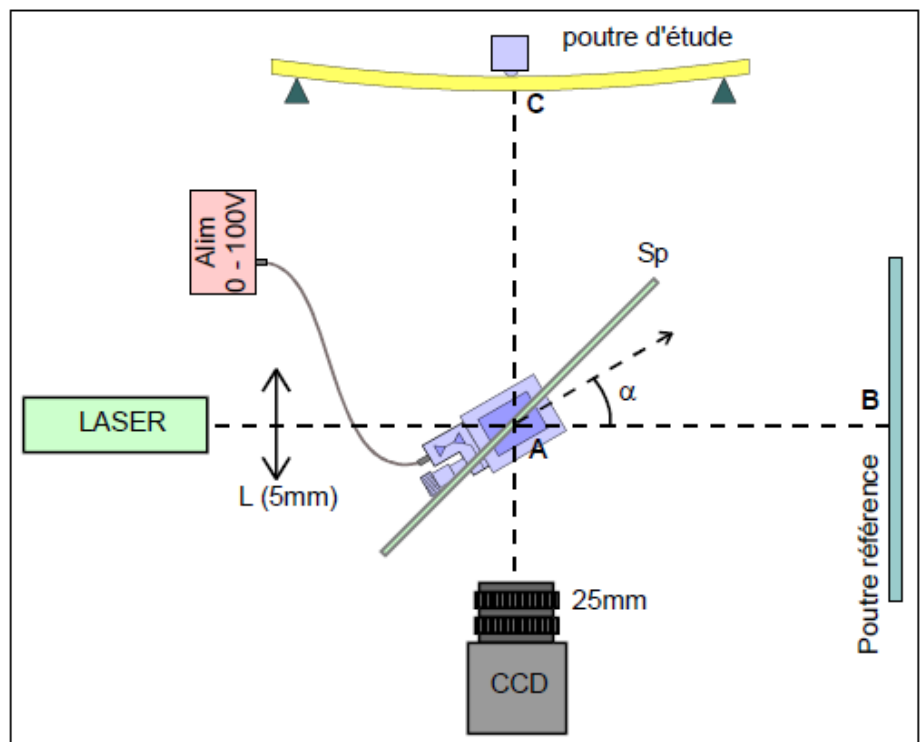


Figure 7 : Schéma du montage des images phasées

Puis aller dans *Images / Calculer l'image phasée automatiquement*. Conserver l'image phasée et fermer les 4 images capturées.

Effleurer le micromètre pour donner une déformation à la poutre (relever la variation de l'indicateur du micromètre).

Enregistrer une deuxième image phasée dans l'état 2. Fermer à nouveau les 4 images capturées.

Soustraire les deux images phasées avec le menu *Opérations sur les images / Opérations mathématiques / Soustraction modulo 256*. Soustraire l'image 2 à l'image 1. On obtient une image représentant la phase Φ modulo 2π .

Avec *Opérations sur les images / Créer un masque pour la démodulation*, créer un masque aux dimensions de la poutre.

Démoduler l'image phasée avec le masque grâce au menu *Opérations sur les images / Démoduler*.

Etalonner l'image en z avec le menu *Opérations sur les images / Etalonner / en Z*. Choisir l'option speckle et rentrer la longueur d'onde du laser (attentions à l'unité demandée).

Tracer un profil de l'image obtenue. Sauvegarder les images phasées modulée et démodulée, ainsi que le profil. Relever la valeur de la déformation maximale, et la comparer à la valeur (imprécise) mesurée au micromètre.

6. Exploitation de la mesure en double exposition

- Ouvrir l'image **Temps_Réel.jpg** avec VisulmLV2.
- Mesurer le nombre de pixels sur la largeur de la poutre.
- Mesurer avec un mètre la largeur de la poutre.
- Déduire de ces deux mesures l'échelle de l'image en mm/pixel.
- Repérer le point d'appui de la poutre sur l'image. Il doit y avoir une frange noire, qui est celle d'ordre 0 (déformation nulle). Si elle est nettement visible, s'en servir comme origine des coordonnées. Sinon, on prendra la frange d'ordre 1 (celle immédiatement après le point d'appui) comme origine.
- Dans le fichier Excel **Calcul_deformee.xls** (à ouvrir en lecture seule), rentrer l'échelle en mm/pixel, puis pour chaque frange noire son abscisse en pixel à partir de l'origine et son numéro d'ordre. Lorsqu'on franchit le centre de la poutre, la position continue de croître, mais l'ordre des franges décroît. Par exemple, si on a la frange d'ordre 8 juste avant le centre, la frange suivante sera aussi d'ordre 8 (symétrique à la précédente par rapport au centre) et celle d'après sera d'ordre 7. La courbe expérimentale représentant la déformation se trace point par point.
- Entrer la valeur de la flèche (la variation de l'indication du micromètre lors de la mesure en double exposition). La courbe théorique de la déformation s'affiche.
- Ajuster le décalage d et la flèche f pour que les résultats théorique et expérimental coïncident au mieux. En déduire une valeur plus précise de la flèche et la noter (la valeur du micromètre est assez imprécise). Enregistrer le fichier Excel dans votre répertoire.

7. Comparaison des deux méthodes

On vient de voir que les deux méthodes de double exposition et des images phasées permettent de trouver la valeur d'une déformation par interférométrie de speckle.

Pour donner aussi le sens de la déformation (vers l'avant ou l'arrière), il faut que la méthode donne accès au signe de $z_2 - z_1$.

- A partir de l'équation (1) du 3.1, expliquer pourquoi la double exposition ne peut pas donner le sens de la déformation.
- A partir du 3.2, expliquer pourquoi les images phasées permettent de déterminer le sens de la déformation.

NOMS :

DATE :

.....

.....

FEUILLE A RENDRE EN FIN DE SEANCE

§	Travail à faire	A noter sur place	A noter à l'écrit
2	Introduction Speckle objectif Speckle subjectif	____ / 1	____ / 1
3	Principes Double exposition Images phasées		____ / 2 ____ / 2
4	Mesure : double exposition Montage Image en temps réel	____ / 3 ____ / 1	
5	Mesure : images phasées Montage, détermination de ΔV Images phasées, profil, valeur de la déformation	____ / 3	____ / 2
6	Exploitation double expo Fichier Excel, graphe, valeur de f		____ / 3
7	Comparaison des deux méthodes		____ / 2

TOTAL : _____ / 20**Les comptes-rendus sont à rendre une semaine après le TP, le même jour de la semaine.****Un jour de retard : -2 points****Deux jours de retard : note / 2****Au-delà : points sur place / 2**