

MESURE DE LA DÉFORMATION PAR INTERFEROMÉTRIE DE SPECKLE

U51. ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTÈME

1.1. Éléments à votre disposition

1.1.1. Matériel

Voir cadre 1.

1.1.2. Documentation

Voir cadre 2.

1.1.3. Logiciels

Voir cadre 3.

Liste du matériel

Poutre encastrée dans support
Éléments mécaniques de liaison (noix, blocs magnétiques, ...)
Micromètre digital
Laser He-Ne $\lambda = 632.8 \text{ nm}$
Lame séparatrice ou lame de verre
Miroir piezo-électrique
Alimentation pour piezo avec liaison série
Caméra CCD (ou CMOS) avec objectif
Micro-ordinateur
Carte d'imagerie Matrox Meteor II
Ou
Imprimante

Liste de la documentation

Dossier technique

cadre 2.

Liste des logiciels

LabView : VisuimLV2
Speckle
Excel

cadre 3.

cadre 1.

1.2. Introduction - Problématique

Il existe de nombreux exemples de systèmes industriels fonctionnant sur le principe de l'interférométrie de speckle : on peut citer parmi les applications possibles : la mesure de microdéplacements d'un objet, la visualisation de contraintes dans un matériau, la détermination des modes de vibration d'une pièce ...

Dans le système étudié, la mesure de déplacements micrométriques est réalisée à l'aide d'un montage optique du type interféromètre de Michelson (voir cadre 4).

On utilise un faisceau laser éclaté par une lentille de courte focale. Ce faisceau est séparé en deux parties à l'aide d'une lame semi-réfléchissante. Une partie, appelée **faisceau objet**, éclaire l'objet à étudier (poutre) ; la lumière diffusée par l'objet à étudier revient vers la séparatrice. L'autre partie, appelée **faisceau de référence**, éclaire un objet de référence (son état de surface est si possible de même nature) ; la lumière diffusée par l'objet de référence revient vers la séparatrice. Les 2 objets sont observés à travers la lame semi-réfléchissante par une caméra CCD munie d'un objectif.

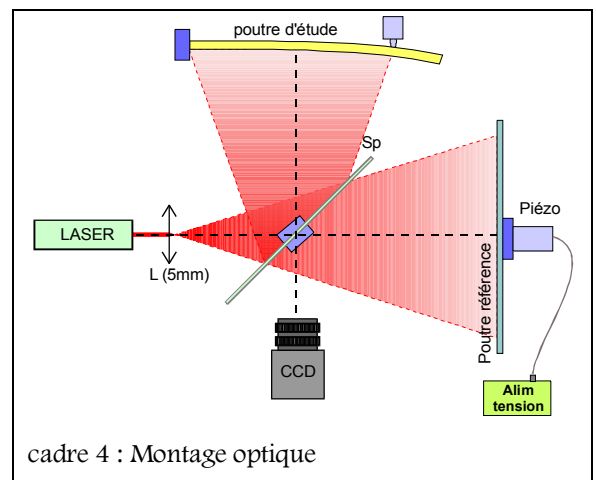
Le logiciel LabVIEW permet l'acquisition et le traitement des images. Il permet également de quantifier la déformation.

En U51, on analysera les principes mis en œuvre et on se familiarisera avec le logiciel de traitement d'images.

En U52, on réalisera le montage de base qui permet de faire de l'interférométrie en temps réel. Puis on fera évoluer le montage en faisant varier légèrement l'un des chemins optiques. Cette variation sera obtenue en déplaçant de manière maîtrisée l'objet de référence à l'aide d'une cellule piézo-électrique pilotée par logiciel. On obtiendra alors l'image phasée de la déformation.

En U53, on analysera le principe de fonctionnement de l'interférométrie en temps réel en traitant les images prises en double exposition et en étudiant les paramètres qui améliorent la qualité de l'image résultante. Puis on étalonnera et on exploitera les images. On validera le système en comparant les résultats obtenus au modèle par éléments finis. On évaluera la sensibilité du système d'analyse et on cherchera à déterminer quels sont les paramètres qui limitent les performances du système.

Peut-on détecter, avec cette méthode sans contact, de très faibles déformations de l'ordre du micron ? (réponse à donner en fin d'U53)



1.3. Travail demandé

1.3.1. Principes fondamentaux

1.3.1.1. Interféromètre de Michelson

En quoi le montage proposé cadre 4 diffère-t-il du montage habituel de Michelson ?

Quelle condition, relative à la longueur des bras et à la longueur de cohérence de la source, permet d'obtenir des interférences sur la caméra ?

1.3.1.2. Granularité speckle et limite de la déformation mesurable

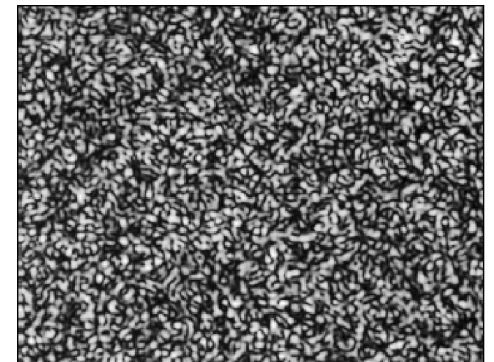
Lorsqu'on éclaire un objet **diffusant** avec un laser, on observe une image granulaire appelée «figure de speckle» (cadre 5).

Le cadre 6 représente une coupe transversale de ces grains de speckle (comparables à des grains de riz) qui sont allongés dans le sens perpendiculaire à la figure.

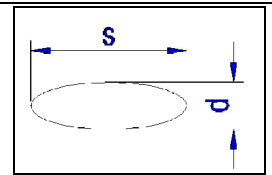
Sur la caméra on monte un objectif de distance focale f' dont on peut faire varier le nombre d'ouverture ; la valeur du NO est indiquée sur la bague d'ouverture du diaphragme. Dans le cas du speckle subjectif, la théorie montre que la taille d du grain de speckle dans le plan conjugué de l'objet rugueux est donnée par la relation : $d = 1,22(1 + |G_t|) \cdot \lambda \cdot \text{NO}$. La valeur de d est donc fonction :

- du grandissement transversal G_t (en valeur absolue : $|G_t| = \left| \frac{p'}{p} \right| \approx \left| \frac{f'}{p} \right|$), donc de la distance p entre l'objet et l'objectif ;
- du nombre d'ouverture NO défini par : $\text{NO} = \frac{f'}{D}$, donc du diamètre d'ouverture D de l'objectif.

Montrer que la valeur limite vers laquelle tend d si l'on éloigne l'objet sans changer l'ouverture de l'objectif est $\varnothing = 1,22 \cdot \lambda \cdot \text{NO}$.



cadre 5 : Figure de speckle



cadre 6 : forme des grains de speckle

La théorie montre que la longueur s du grain de speckle vaut : $s = 8 \cdot \lambda \cdot (\text{NO})^2$.

- Calculer la valeur de s avec la valeur de $\text{NO} = 4$. ($\lambda = 633 \text{ nm}$)
- s limite la valeur du déplacement transversal (ou de la déformation) décelable par interférométrie de speckle. L'image est de bonne luminosité mais on veut augmenter le déplacement mesurable. Faut-il ouvrir ou fermer le diaphragme ? Sur quel autre paramètre faut-il agir pour avoir la même luminosité ?

1.3.1.3. Interférométrie de speckle en temps réel ou en double exposition

Pour chaque état de l'objet, l'image enregistrée par le CCD est une matrice de pixels. L'éclairement de chaque pixel résulte de la superposition des grains de speckle de la poutre de référence et de la poutre objet. C'est une figure d'interférences entre :

- le faisceau d'intensité I_{REF} diffusé par un point (élément de surface) de la poutre que l'on va mettre en flexion;
- le faisceau d'intensité I_{OBJ} diffusé par un point (élément de surface) de la poutre de référence.

Chaque pixel reçoit un flux (ou intensité) du type $I = I_{\text{REF}} + I_{\text{OBJ}} + 2 \cdot \sqrt{I_{\text{REF}} \cdot I_{\text{OBJ}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{REF}} - \varphi_{\text{OBJ}})$ où φ_{OBJ} et φ_{REF} sont à considérer comme des phases aléatoires (entre 0 et 2π).

On suppose que l'on réalise un enregistrement en double exposition d'une poutre fléchie. On produit une déformation initiale de la poutre. La première image est celle de la poutre dans l'état 1 : la déformée z_1 (par rapport à la poutre de référence) du point d'abscisse x diminue de $2z_1$ le trajet de la lumière dans le bras de mesure et induit un déphasage supplémentaire : $\varphi_{z1} = 4\pi z_1 / \lambda$. L'intensité enregistrée sur le pixel d'abscisse x est :

$$I_1 = I_{\text{REF}} + I_{\text{OBJ}} + 2 \cdot \sqrt{I_{\text{REF}} \cdot I_{\text{OBJ}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{REF}} - \varphi_{\text{OBJ}} - \varphi_{z1})$$

Sans changer la référence, on produit alors une déformation supplémentaire (d'une valeur plus faible que la longueur s des grains de speckle) ; soit z_2 la déformée du point d'abscisse x . La deuxième image est celle de la poutre dans l'état 2. Le même pixel reçoit une intensité : $I_2 = I_{\text{REF}} + I_{\text{OBJ}} + 2 \cdot \sqrt{I_{\text{REF}} \cdot I_{\text{OBJ}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{REF}} - \varphi_{\text{OBJ}} - \varphi_{z2})$ avec $\varphi_{z2} = 4\pi z_2 / \lambda$.

Le traitement d'image permet de réaliser des opérations mathématiques pixel par pixel entre les intensités lumineuses restituées. Si on effectue la différence $I_2 - I_1$ et qu'on en prend la valeur absolue, on obtient :

$$|I_2 - I_1| = 4 \cdot \sqrt{I_{REF} \cdot I_{OBJ}} \cdot \sin\left(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} - \frac{(\varphi_{z2} + \varphi_{z1})}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{z2} - \varphi_{z1}}{2}\right)$$

- Justifier que $|I_2 - I_1|$ devient nulle (frange sombre dite de corrélation d'intensité) lorsque $(\varphi_{z2} - \varphi_{z1})/2 = k\pi$
- En déduire que l'espacement entre 2 franges sombres correspond à une déformation supplémentaire de $\lambda/2$.
- Peut-on connaître le sens de la déformation d'un objet en observant ces franges ?

1.3.1.4. Principe des images phasées.

En fin de U52, on utilise la méthode du décalage de phase. Au lieu d'enregistrer 1 image de la poutre dans un état donné, on enregistre 4 images déphasées de $\frac{\pi}{2}$ (en déplaçant l'objet de référence à l'aide d'une cellule piézo-électrique pilotée par le micro-ordinateur) pour avoir accès à la valeur de $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{4\pi y}{\lambda}$ en chaque point P de l'image. Le déphasage est obtenu par déplacement de l'objet de référence à l'aide du piézo.

En P, les intensités successives s'écrivent :

$$I_1 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi))$$

$$I_2 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{\pi}{2})) \text{ soit } I_2 = I(1 - m \cdot \sin(\varphi))$$

$$I_3 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \pi)) \text{ soit } I_3 = I(1 - m \cdot \cos(\varphi))$$

$$I_4 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{3\pi}{2})) \text{ soit } I_4 = I(1 + m \cdot \sin(\varphi))$$

Montrer que l'on obtient φ (à $k\pi$ près) par : $\varphi = \text{Arc tan} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$.

Justifier que φ est déterminé à $2k\pi$ près si l'on tient compte en plus du signe de $\sin(\varphi)$

1.3.2. Initiation au traitement d'image et principe des images phasées.

En fin de U52, on utilise la méthode du décalage de phase. Au lieu d'enregistrer 1 image de la poutre dans un état donné, on enregistre 4 images déphasées de $\frac{\pi}{2}$. Le déphasage est obtenu par déplacement de l'objet de référence à l'aide du piézo.

En un point, les intensités successives s'écrivent :

$$I_1 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi))$$

$$I_2 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{\pi}{2}))$$

$$I_3 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \pi))$$

$$I_4 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{3\pi}{2}))$$

La résolution de ce système d'équations donne la phase $\varphi(x,y)$ (modulo 2π) en tout point de la surface étudiée (plus précisément pour tout pixel de l'image de la poutre sur le CCD).

L'opération $\varphi \cdot 255/2\pi$ donne l'**image phasée** où l'éclairement de chaque pixel est l'image de sa phase (exprimée en niveaux de gris NG modulo 256).

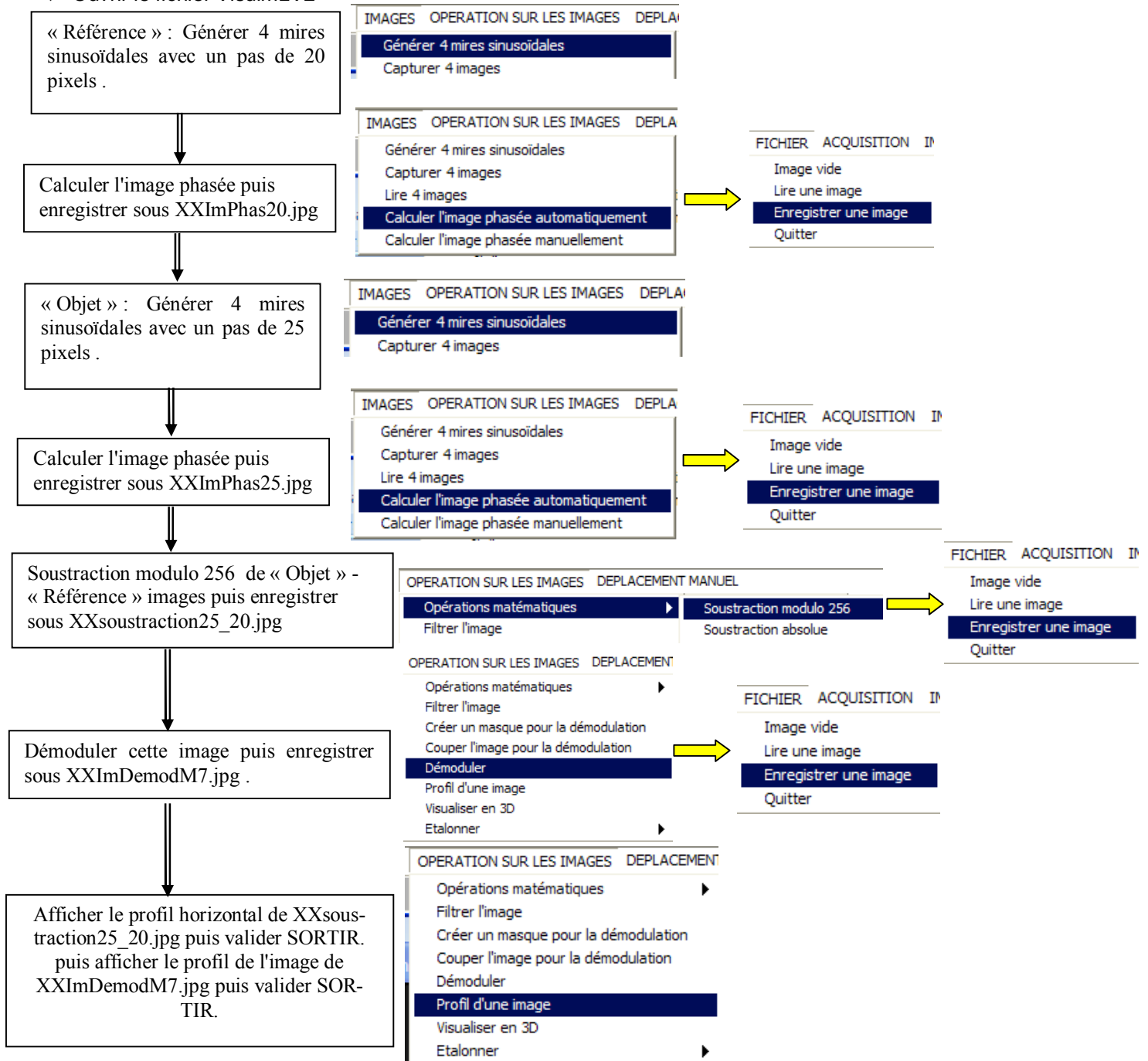
La **différence des images phasées** $\varphi_2 - \varphi_1$ entre 2 états de la poutre permet d'obtenir le profil de la déformation de l'objet (en NG modulo 256).

La **démodulation** permet d'obtenir le profil de la déformation de l'objet en NG (entre 0 et 255).

L'**étalonnage** permet d'obtenir le profil de la déformation de l'objet z en μm .

Application sous LabView :

♦ Ouvrir le fichier VisuimLV2



♦ Conclusions :

En analysant l'image **XXsoustraction25_20.jpg**, donner la signification du paramètre **M = 7** affichée lors de la démodulation. Conclure sur le profil de l'image démodulée.

À partir des explications précédentes, répondre aux questions suivantes :

Comment sont représentées les valeurs de $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{4\pi.\Delta z}{\lambda}$

- sur l'image **XXsoustraction25_20.jpg** ?
- sur l'image **XXImDemodM7.jpg** ?

Faire appel à un professeur pour expliquer vos conclusions.

1.3.3. Analyse fonctionnelle

Par la méthode SADT, complétez le niveau A0 donné cadre 8 : Analyse fonctionnelle niveau A0 de l'analyse fonctionnelle.

Vous pourrez choisir dans la liste des termes suivants :

Disperser ; montage d'interférométrie ; montage d'optique ; projecteur de diapo ; traiter l'image ; Faisceau ; énergie électrique ; interférences ; filtrer ; laser ; positionner ; interférence des grains de speckle signal analogique ; diode laser ; générer un faisceau laser ; créer des interférences ; carte numérique ; digitalisation-image de la déformation ; source blanche ; créer l'image ; convertisseur ; acquérir l'image ; faisceau résultant des interférences ;

