

Fiche pédagogique

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

Niveau :

2^{ème} année de BTS systèmes photoniques.

Objectifs :

En possession des documents et des informations techniques complémentaires nécessaires, l'élève doit être capable de mettre en œuvre un système de contrôle dimensionnel par caméra intelligente et de déterminer le cadencement maximal des mesures.

- C1.1 : Analyser un cahier des charges
- C1.2 : Définir l'architecture fonctionnelle d'un système
- C1.3 : Proposer des solutions techniques
- C1.5 : Simuler et valider les solutions techniques
- C2.1 : Assembler les composants
- C2.3 : Régler le système
- C3.1 : Mettre en œuvre un système optique
- C3.2 : Valider un système
- C5.3 : Synthétiser des données techniques.

Forme :

TP de 8 heures, par binôme ou trinôme.

Pré-requis :

- Lecture de dossiers ressources.
- Connaissance en mathématiques, optique, mécanique et électronique.

Méthode :

On donne :	On demande :	On évalue :
<ul style="list-style-type: none"> - Un sujet de T.P., - Un dossier technique. - Les logiciels associés au TP - Tout le matériel nécessaire à la mise en œuvre du système. 	<ul style="list-style-type: none"> - De faire l'analyse fonctionnelle du système. - De mettre en œuvre le système. - D'analyser les performances du système. 	<ul style="list-style-type: none"> - La compréhension du principe de l'interférométrie de speckle. - La mise en œuvre du système. - L'analyse des résultats obtenus lors de la mise œuvre du système. - L'attitude, l'autonomie. - Le résultat obtenu. - Le respect des règles de sécurité - La présentation du compte rendu.

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

1. Éléments à votre disposition

1.1. Matériel

Voir cadre 1.

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

cadre 1.

Liste des logiciels

LabView : VisuimLV2
 Speckle
 Excel

cadre 2.

1.2. Logiciels

Voir cadre 2.

2. Présentation du contexte

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 micro-déplacements 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 micro-métriques est réalisée à l'aide d'un montage optique du type interféromètre de Michelson (voir cadre 2).

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.

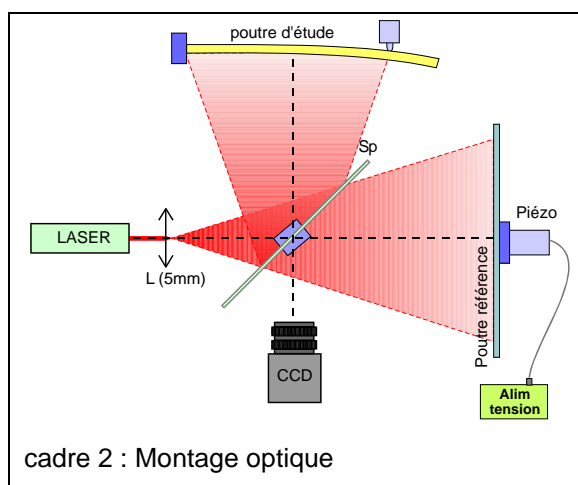
Le logiciel VisuimLV2 permet l'acquisition et le traitement des images. Il permet également de quantifier la déformation.

Dans un premier temps, on analysera les principes mis en œuvre, notamment la notion de Speckle, et on se familiarisera avec le logiciel de traitement d'images.

Puis, on réalisera le montage de base qui permet de faire de l'interférométrie en temps réel. Ensuite, 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.

Enfin, 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 étalonnagera 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.

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



cadre 2 : Montage optique

3. Analyse du système :

3.1. Interféromètre de Michelson

En quoi le montage proposé cadre 2 diffère-t-il du montage habituel de Michelson ?

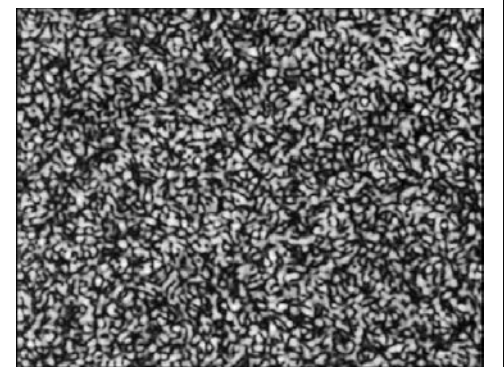
Quelle condition, relative à la longueur des bras et à la longueur de cohérence de la source, permet d'obtenir des interférences sur la caméra ?

3.2. Grains de speckle

Lorsqu'on éclaire un objet **diffusant** avec un laser, on observe une image granulaire appelée «figure de Speckle» (cadre 3).

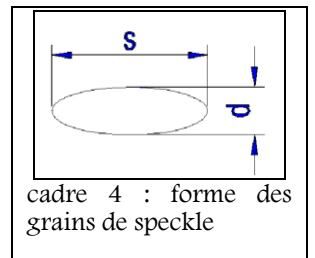
Le cadre 4 représente une coupe transversale de ces grains de Speckle (comparables à des grains de riz) qui sont allongés dans le sens perpendiculaire à la figure.

Ces grains lumineux résultent des interférences entre les ondes lumineuses diffusées par tous les points de la surface rugueuse. On peut les observer de deux manières : la première en plaçant un écran ou une caméra sans objectif sur le chemin de la lumière diffusée : c'est le **Speckle objectif**. Dans ce cas, la taille des grains dépend de la taille de la surface éclairée et de la distance entre celle-ci et l'écran. La deuxième manière consiste à faire l'image de la surface diffusante avec un instrument d'optique (œil, caméra avec objectif etc.) C'est le **Speckle subjectif**, ainsi nommé car la taille des grains de Speckle dépend des caractéristiques de l'instrument d'optique (diamètre d'ouverture, distance focale etc.) Dans la suite, on visualisera uniquement le Speckle subjectif avec une caméra CCD.



cadre 3 : Figure de Speckle

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 : $d = 1,22(1 + |G_t|) \cdot \lambda \cdot NO$. La valeur de d est donc fonction :



cadre 4 : forme des grains de speckle

- 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 : $NO = \frac{f'}{D}$, 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 $\varnothing = 1,22 \cdot \lambda \cdot NO$.

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

- Calculer la valeur de s avec la valeur de $NO = 4$. ($\lambda = 633 \text{ nm}$)
- 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 ?

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

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

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 : $I_2 = I_{\text{REF}} + I_{\text{OBJ}} + 2 \cdot \sqrt{I_{\text{REF}} \cdot I_{\text{OBJ}}} \cdot \cos(\varphi_{\text{REF}} - \varphi_{\text{OBJ}} - \varphi_{z_2})$ avec $\varphi_{z_2} = 4\pi z_2 / \lambda$.

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 :

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

- Justifier que $|I_2 - I_1|$ devient nulle (frange sombre dite de corrélation d'intensité) lorsque $(\varphi_{z_2} - \varphi_{z_1})/2 = k\pi$
- 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 ?

3.4. Principe des images phasées

A la fin de la mise en œuvre (partie 4), on utilisera 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 $\sin(\varphi)$

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

En un point, les intensités successives s'écrivent :

$$I_1 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi)) \qquad I_2 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{\pi}{2}))$$

$$I_3 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \pi)) \qquad I_4 = I(1 + m \cdot \cos(\varphi + \frac{3\pi}{2}))$$

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

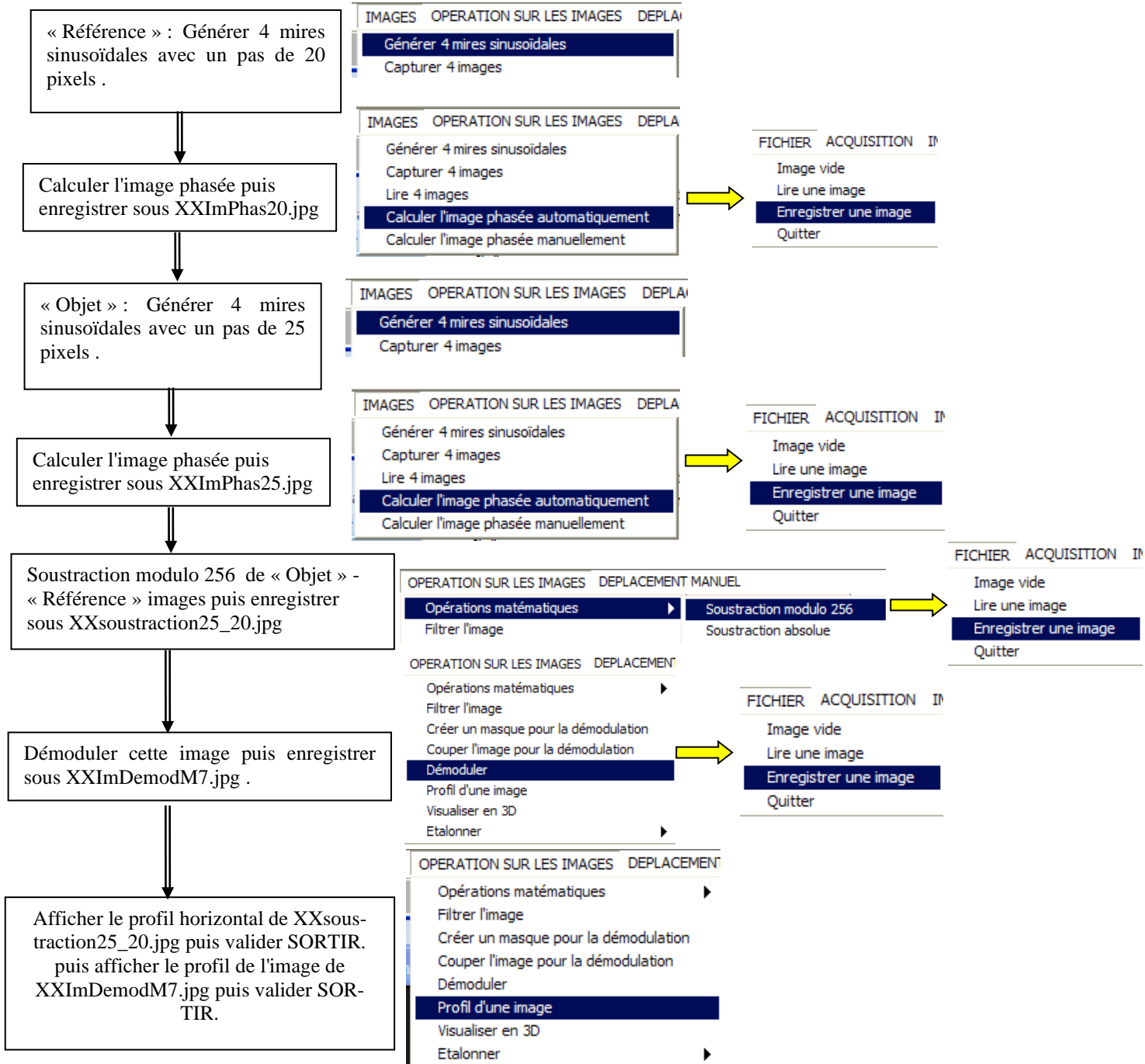
La **différence des images phasées** $\varphi_2 - \varphi_1$ entre 2 états de la poutre permet d'obtenir le profil de la déformation de l'objet (en NG modulo 256).

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.

3.6. Analyse fonctionnelle

Diagramme de cas d'utilisation

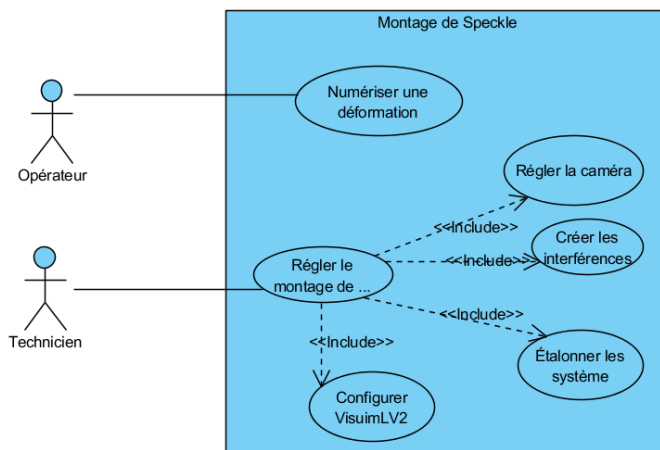
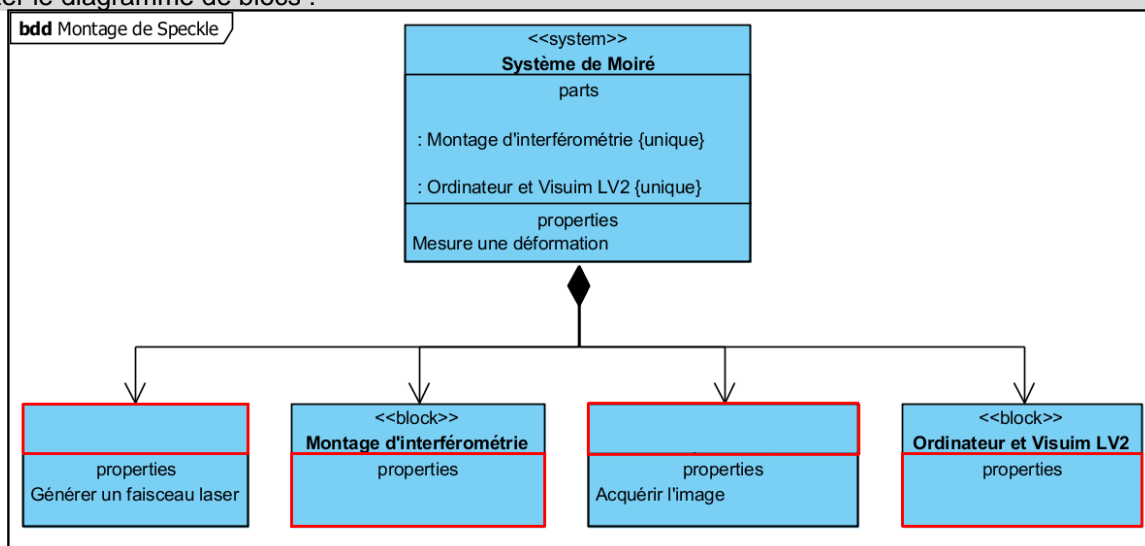


Diagramme de définition des blocs

Compléter le diagramme de blocs :

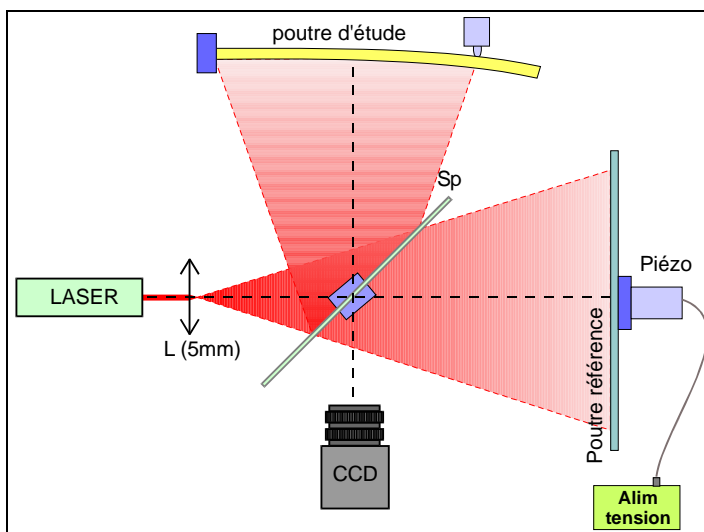


4. Mise en œuvre du système :

4.1. Réalisation du montage

4.1.1. Images en temps réel

- Réaliser le montage d'enregistrement décrit ci-contre. Eloigner suffisamment la poutre de la lentille pour avoir un éclaircissement homogène de la poutre.
- Placer la séparatrice et la caméra. Ouvrir *VisuimLV2*
- Choisir la caméra utilisée.
- Choisir **ACQUISITION/ Live**
- Choisir l'objectif de manière à observer la poutre à analyser entre l'encastrement (ajuster le champ de la caméra ou déplacer la poutre afin que l'image se situe sur l'un des bords de l'écran vidéo) et les 120 premiers mm .
- Installer la poutre de référence montée sur piézo. Superposer l'image de la poutre et de l'objet de référence à travers la séparatrice.



cadre 5 : Montage avec déphaseur piézo.

- Modifier l'ouverture de l'objectif et le temps d'intégration de la caméra (ou la luminosité de l'image). Constaté leur action sur la taille des grains de speckle.
- Faire [ACQUISITION/Fausse couleurs](#) et vérifier qu'il y ait un minimum de saturation et une répartition homogène (peu de pixels blanc mais présence de couleurs).
- Le point de poussée est situé à la distance L (environ 180 mm) de l'encastrement. A l'aide du micromètre, appliquer une précontrainte à la poutre (ce sera l'état 1 de référence avant la déformation).
- Faire [ACQUISITION/Temps réel](#). Si le montage est stable, l'image doit rester uniformément noire. Votre montage est alors opérationnel.

Faire appel à un professeur pour vous aider ou pour vérifier le montage.

- Agir sur le micromètre pour déformer la poutre de + 6 µm au point de poussée . La poutre doit apparaître à l'écran avec les franges les franges de corrélation. Si rien ne se passe, augmenter le gain.

Note : il est toujours préférable d'initialiser le déplacement du micromètre dans le sens où l'on veut faire le déplacement afin d'avoir une valeur proche du déplacement voulu à 1 ou 2 µm près.

- Sauvegarder cette image sous [nom de l'élève_temps_reel1.jpg](#).
- Initialiser le déplacement du micromètre dans l'autre sens. Agir sur le micromètre pour déformer la poutre de - 6 µm au point de poussée. La poutre doit apparaître à l'écran avec les franges de corrélation.
- Sauvegarder cette nouvelle image sous [nom de l'élève_temps_reel2.jpg](#).

4.1.2. Images en double exposition

Pour bien comprendre comment on obtient une image en temps réel, on décompose les différentes opérations effectuées sur les images : c'est ce qu'on appelle l'interférométrie en double exposition.

- Capturer deux images de la poutre : en choisissant [ACQUISITION/Live](#) (en appuyant sur Sortir elle sera affichée) une dans un état de référence (Image1.jpg), l'autre (Image2.jpg) dans un état où la poutre subit une flèche de 6 µm au point de poussée.
- Dans [OPERATION SUR LES IMAGES/Opérations mathématiques/Soustraction absolue](#), sauvegarder cette image.
- Dans [OPERATION SUR LES IMAGES/ Opérations mathématiques/Multiplier l'image par constante](#), multiplier cette image par une constante (5 par exemple) pour augmenter la luminance de tous les pixels, sauvegarder cette nouvelle image sur le disque en spécifiant le nom donné au fichier image (par exemple: [nom de l'élève_double_expo1.jpg](#)).
- Recommencer en prenant l'image soustraite et en la multipliant par elle-même en cliquant sur [OPERATION SUR LES IMAGES/ Opérations mathématiques/Multiplier l'image par elle-même](#), sauvegarder cette nouvelle image sur le disque en spécifiant le nom donné au fichier image (par exemple: « [nom de l'élève_double_expo2.jpg](#) »).

Faire appel à un professeur pour montrer les opérations effectuées.

- Expliquer l'influence de la multiplication de l'image différence par une constante ou par elle-même

4.2. Images phasées

4.2.1. Fonctionnement du déphaseur

- Dans le montage réalisé, l'objet de référence est monté sur un translateur piézo-électrique qui permet de faire varier le chemin optique du faisceau de référence et d'obtenir des images phasées.
- Vérifier la connexion du déphaseur piézo-électrique à un port série de l'ordinateur pour cela basculer l'interrupteur sur Line. Vérifier sous [DEPLACEMENT MANUEL/Piezo alimentation 0-100 ou 500V](#) que celui-ci fonctionne en demandant une tension de 250 V par exemple.
- Pour déterminer le déphasage : cliquer sur le bouton « [TRACER LA COURBE : Luminance = f\(Upiezo\)](#) », cliquez sur le bouton « [SPECKLE](#) » puis placer le curseur sur un point de la poutre (VisuimLV2 va tracer la luminance de ce point en fonction de la tension U_{piezo} : la courbe sera une sinusoïde). Placer les deux curseurs entre deux maximums et noter « [DeltaUcurseur/4](#) » (cela correspondra à la variation de tension à appliquer pour un déphasage de π/2)
- Refaire trois fois, cette étape et compléter le tableau ci-dessous :

N° mesure	1	2	3	Moyenne
DeltaUcurseur/4 en V				

4.2.2. Acquisition de l'image de la déformée

Initialiser le déplacement du micromètre. Acquérir 4 images avec la poutre dans l'état 1 en cliquant sur [IMAGES/Capturer 4 images](#). Rentrer dans le tableau les valeurs de la tension de début (200V), le pas calculé en 4.2.1. et un tempo de 1s.

Calculer l'image de référence phasée en cliquant sur [IMAGES/Calculer l'image phasée automatiquement](#) puis sauvegarder sous : [nom_élève_ref1.jpg](#) en cliquant sur [FICHIER/Enregistrer une image](#).

Acquérir 4 images après avoir appliqué la flèche supplémentaire df d'environ 8 µm au point de poussée en cliquant sur [IMAGES/Capturer 4 images](#) avec les mêmes paramètres.

Calculer l'image phasée de l'objet en cliquant sur [IMAGES/Calculer l'image phasée automatiquement](#) puis sauvegarder sous : [nom_élève_ref2.jpg](#) en cliquant sur [FICHIER/Enregistrer une image](#).

Noter les valeurs de df et L.

Cliquer sur [OPERATION SUR LES IMAGES/Opérations mathématiques/Soustraction modulo 256](#) et soustraire l'image phasée de l'objet - l'image phasée de la référence. L'enregistrer sous [nom_élève_DifPhase1.jpg](#) en cliquant sur [FICHIER/Enregistrer une image](#).

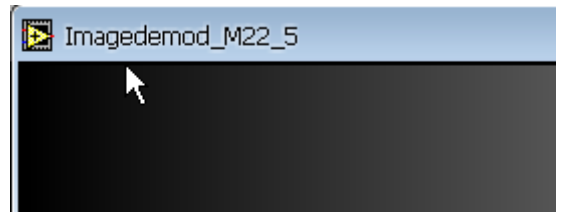
Compter le nombre de sauts de phase qui apparaissent dans la zone intéressante.

Sous [OPERATION SUR LES IMAGES /Créer un masque pour la démodulation](#), sélectionner par un rectangle la zone intéressante de la poutre à l'aide de la souris puis validez.

Sous [OPERATION SUR LES IMAGES /Démoduler](#), démoduler l'image en précisant l'image masque. Lors de la démodulation, VisualLV2 calcule le nombre de sauts de phase M. Il est donné dans le titre de l'image démodulée Exemple ci-contre : M=22.

Noter votre M obtenu.

Sauvegarder l'image sous [nom_élève_demod1.jpg](#) en cliquant sur [FICHIER/Enregistrer une image](#).



Exemple d'images

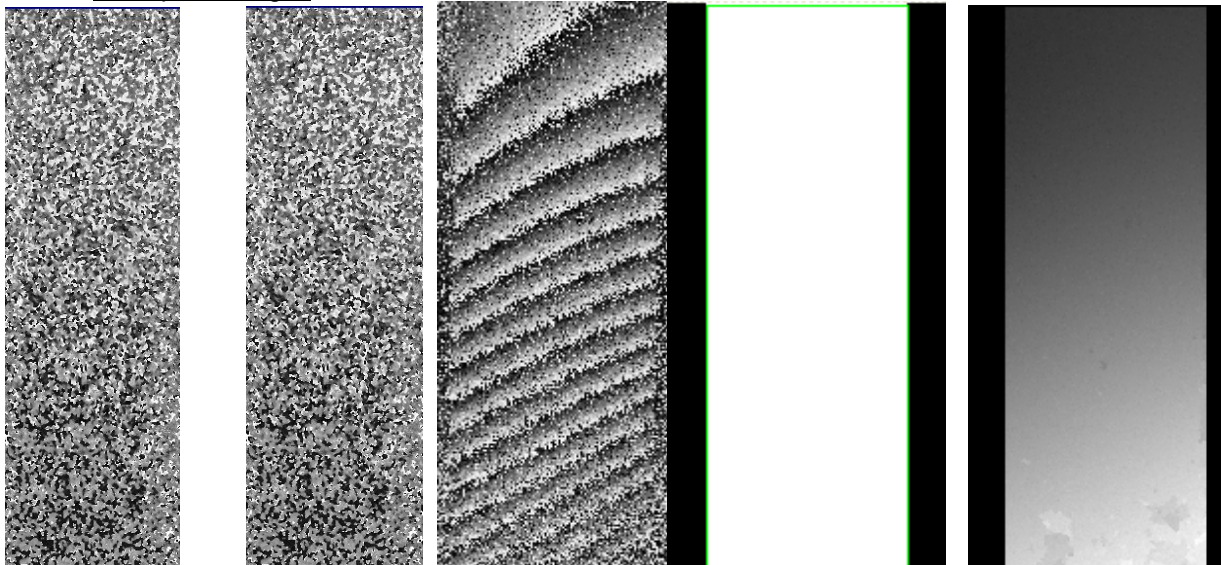


Image phasée ref1 Im. phasée ref2 Image soustraction Image masque Image démodulée

L'image démodulée représente la déformée de la poutre en nuances de gris : la valeur de M est affichée à côté de l'image démodulée.

Si des bogues apparaissent dans l'image démodulée, changer les options : Image avec discontinuités physiques, avec bruit de fond...

4.2.3. Image de la déformée dans l'autre sens

Initialiser le déplacement du micromètre dans l'autre sens. Recommencer l'opération en changeant le sens de la déformation et sauvegarder les images sous [nom_élève_ref3.jpg](#), [nom_élève_ref4.jpg](#), [nom_élève_DifPhase2.jpg](#) et [nom_élève_demod2.jpg](#)

4.2.4. Visualisation 3D

Choisir la plus belle des 2 images précédentes. Noter la valeur de M associée.

Faire une visualisation 3D en cliquant sur [OPERATION SUR LES IMAGES/Visualisation 3D](#)

Faire appel à un professeur pour montrer les opérations effectuées.

4.3. Partie informatique : calcul d'une image phasée

On souhaite programmer le calcul de l'image phasée de l'objet dans l'intervalle $[0, 2\pi]$ d'après rela-

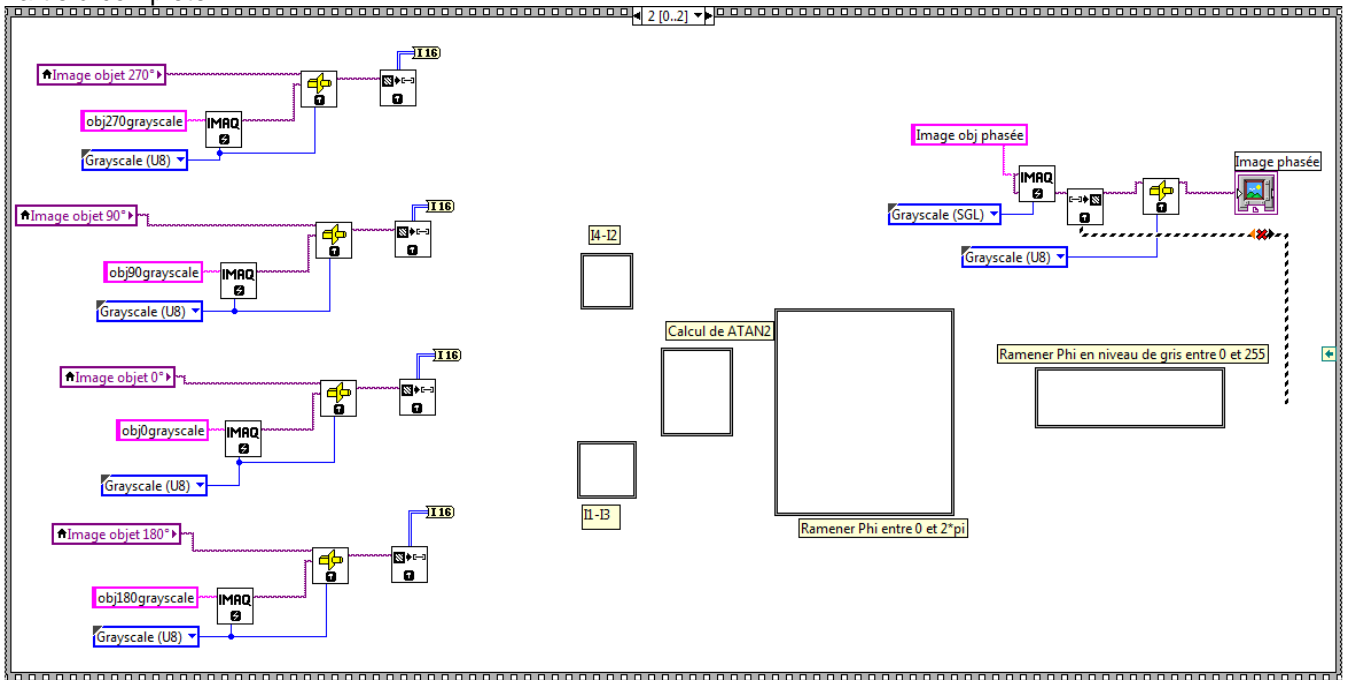
tion : $\tan \varphi = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$ et $\varphi = \text{ATAN}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$.

Compléter le VI Calculobjphasée.vi qui doit réaliser les opérations suivantes :

- 1) Calcul des différences d'images ($I_4 - I_2$ et $I_1 - I_3$)
- 2) Calcul du déphasage ramené en niveaux de gris :
 - on calcule ATAN en utilisant la fonction "ATAN2" qui donne le déphasage compris entre $-\pi$ et $+\pi$ qu'il faudra ramener à une valeur comprise entre 0 et 2π .
 - le déphasage devra être ramené en niveaux de gris à une valeur comprise entre 0 et 255.

Après exécution du programme, sélectionner le répertoire contenant les quatre images déphasées puis sélectionner le premier fichier déphasé de 0° (Mire_objet0.jpg), les trois autres seront chargés automatiquement.

Partie à compléter :



Imprimer le diagramme.

Faire appel à un professeur pour montrer le programme.

5. Analyse des performances du système :

5.1. Mesure de la déformée

Sous **OPERATION SUR LES IMAGES/ Etalonner / En X et Y**, nous allons calculer l'échelle suivant x et y. Pour cela, acquérir une nouvelle image de la poutre puis tracer une ligne horizontale sur la largeur de la poutre puis indiquer sa valeur en mm.

Noter l'échelle obtenue.

Faire appel à un professeur pour vérifier vos mesures.

Charger *nom_élève_demod1.jpg* ou *nom_élève_demod2.jpg* ou *secours_demod_M12.jpg*

Sous **OPERATION SUR LES IMAGES/ Etalonner / En Z** Choisir Speckle puis donner la longueur d'onde du laser en μm puis cliquer sur OK pour calculer l'échelle en z.

Mesurer la déformée maximum en μm en déplaçant le curseur sur la visualisation 3D.

Tracer un profil de l'image démodulée montrant la déformée de la poutre en cliquant sur **OPERATION SUR LES IMAGES/Profil d'une image**.

Faire une sortie imprimante.

5.2. Images phasées : intérêt et recherche de la flèche supplémentaire

Expliquer ce qui différencie les 2 images phasées *nom_élève_demod1.jpg* et *nom_élève_demod2.jpg*

Que permet la méthode utilisant les images phasées que ne permet pas la méthode en temps réel ?

Remarque : Si l'image démodulée n'a pas pu être obtenue ou si elle est de mauvaise qualité, prendre la série des images *I_Specklexx.jpg* (charger par exemple demM12 : sur cette image masquée on voit une largeur de 40 mm ; $df = 6 \mu\text{m}$, $L = 185 \text{ mm}$).

- L'équation de la déformée de la poutre est donnée par :
$$z = -\frac{df \cdot y^3}{2L^3} + \frac{3 \cdot df \cdot y^2}{2L^2} \quad (1),$$
 avec df flèche (ex : $6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$) appliquée à la distance L (ex : 180 mm) de l'encastrement.

- Cliquez dans votre image sur le bouton gauche de la souris au point d'encastrement. Relever en bas d'image la déformation notée DZ et la distance DY de l'encastrement (Exemple : $DZ = 4,2 \mu\text{m}$, $DY = 135 \text{ mm}$).
- À l'aide de l'équation de la déformée (1), calculer la valeur de la déformée z pour la longueur $y = DY$. Conclure en comparant z à DZ .

Faire appel à un professeur pour vérifier vos mesures.

5.3. Simulation de la position des franges : comparaison avec le modèle théorique

Quitter *LabVIEW* et charger le logiciel *Speckle*.

Choisir parmi les 2 images obtenues en temps réel (préciser laquelle : par exemple celle du fichier *nom de l'élève_temps_reel1.jpg*) celle qui donne un nombre de franges acceptable (une douzaine sur les 120 mm qui suivent l'encastrement) et si possible une frange sombre près de l'encastrement.

Sélectionner le modèle Poutre encastree.

Répérer sur l'image une distance connue. Exemple : la largeur de la poutre (50 mm). Mesurer cette distance en pixels.

Sous *Image/Calibration*, donner le facteur de conversion pixel \rightarrow mm. Cocher *coordonnées de l'image en mm*.

Mettre la boîte de dialogue *Paramètres* à jour, notamment la position des franges expérimentales (sombres) à relever en mm sur l'image.

Optimiser ces paramètres de façon à faire correspondre le mieux possible les franges théoriques aux franges expérimentales.

Sauvegarder sous *franges.spe*.

Faire une sortie imprimante des simulations en changeant préalablement le format en mode paysage (Fichiers/Configurer imprimante).

Conclusions.

Faire appel à un professeur pour vérifier votre simulation.

Que peut-on dire de la précision avec laquelle on produit la déformation ? Proposer une amélioration possible.

5.4. Problématique

Peut-on détecter, avec cette méthode sans contact, de très faibles déformations de l'ordre du micron ? (argumenter votre réponse)