

INTRODUCTION

Le **speckle** est cette granularité particulière à la lumière laser lorsqu'elle est diffusée par une surface rugueuse.

Au niveau microscopique, une surface présente en général des irrégularités de forme (rugosité) d'amplitude supérieure ou égale à la longueur d'onde de la lumière visible. Quand une surface de ce type est éclairée par de la lumière laser, l'onde diffusée subit un déphasage aléatoire à cause de la différence de chemin optique liée à la micro-rugosité ().

En un point tel que M de l'espace interfèrent toutes les ondes issues des points tels que P. Il en résulte un état d'éclairage donnant à la surface cet aspect granulaire (Figure 2.)

Les mesures de formes et de déformations dans la gamme de sensibilité de l'ordre du micron utilisent les techniques de **photographie de speckle** (1968), d'**interférométrie de speckle** (1970). Associées aux développements des caméras CCD, cartes d'acquisition PC (1985), ces techniques s'imposent en 1996 en marginalisant d'autres techniques comme l'interférométrie holographique (1965).

Ce TP se déroulera en 12 heures et 4 parties :

1) Principes mis en œuvre : on analysera les principes physiques et traitements d'images utilisés. On précisera ce qu'est le speckle et l'utilisation qu'on peut en faire en :

- photographie de speckle
- interférométrie de speckle

2) Mise en œuvre : on réalisera un montage de base qui permet de faire de l'interférométrie en temps réel ou en double exposition pour la mesure de déformations « hors du plan » d'une plaque métallique puis une expérience de **shearographie** permettant la mise en évidence de défauts non apparents.

3) Analyse des performances : on confrontera les résultats obtenus par double exposition à ceux prévus par le calcul.

On fera évoluer le montage interférométrique en faisant varier légèrement l'un des chemins optiques. Cette variation sera obtenue en déplaçant de manière maîtrisée une cellule piézo-électrique pilotée par logiciel. On obtiendra alors l'**image phasée** de la déformation. On cherchera alors à connaître quelles informations supplémentaires cette méthode apporte à la technique.

4) Etude de documents pour connaître les originalités et les performances de quelques systèmes industriels.

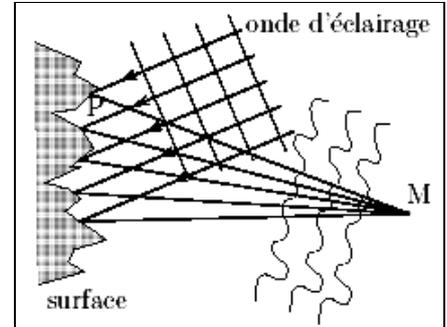


Figure 1 : Diffusion aléatoire de la lumière par la micro-rugosité d'une surface

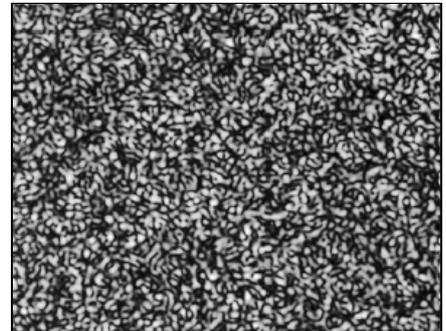


Figure 2.

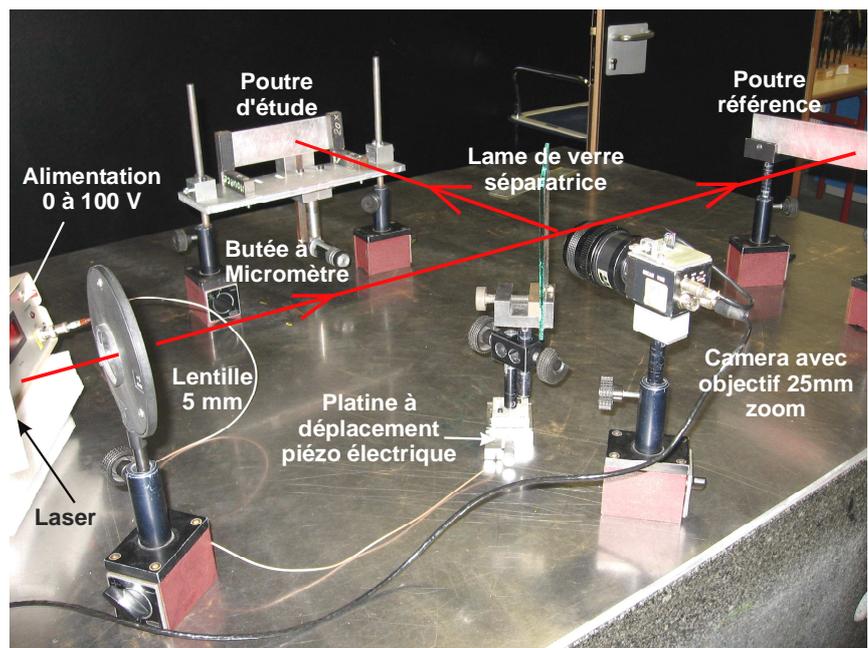


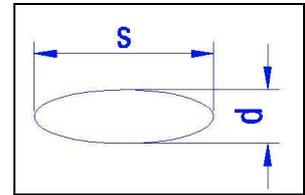
Photo du montage d'interférométrie de speckle en images phasées

PRINCIPES

1. Notion de speckle

Lorsqu'on éclaire un objet diffusant avec un laser, on observe une «figure de speckle» Figure 2.

Chaque grain de speckle a la forme d'un grain de riz ; la figure du cadre 1 représente une coupe transversale de ces grains qui sont allongés dans le sens perpendiculaire à la figure.



cadre 1 : Grain de speckle.

L'observation du speckle peut être faite de 2 manières différentes :

- en plaçant un écran au voisinage de l'objet diffusant : c'est le **speckle objectif**.
- en utilisant un système de projection : l'œil, une lentille ou un objectif (voir cadre 3) : c'est le **speckle subjectif**.

1.1 Speckle objectif : observations.

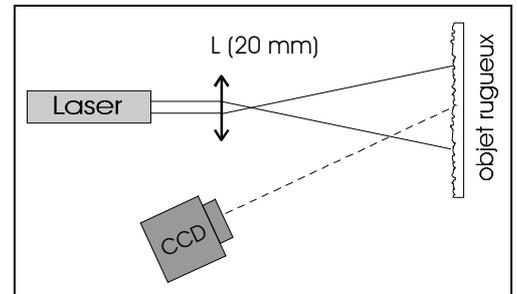
Réaliser le montage du **cadre 2**. Le dépoli ou une lame plus ou moins rugueuse est au départ à environ 70 cm de la lentille L et la caméra CCD (sans objectif) à 50 cm du dépoli.

Ouvrir le logiciel *Visulm.exe*. Observer l'image de speckle.

Rapprocher la lentille L du dépoli : la taille des grains dépend de la surface éclairée sur le dépoli.

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

Rq : l'observation peut aussi se faire par transmission si l'objet n'est pas opaque.



cadre 2: observation du speckle

Montrer le résultat et expliquez comment on peut utiliser cette observation pour repérer le foyer d'une lentille.

1.2 Speckle subjectif : dimension des grains.

1.2.1 Influence de l'ouverture de l'objectif sur la largeur du grain

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 : $d = \frac{1,22\lambda p'}{D}$. La valeur de d est donc fonction de la distance p entre l'objet et l'objectif et du diamètre d'ouverture D de l'objectif. On utilise un objectif de distance focale f' dont on peut faire varier le nombre d'ouverture NO défini par :

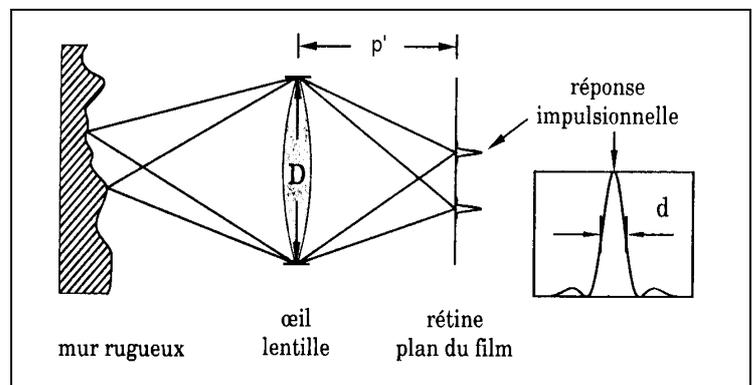
$$NO = \frac{f'}{D}$$

- Le grandissement transversal G_t (les grandeurs sont toutes en valeur absolue) est

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'}{f'} - 1 = G_t$$

En déduire la relation : $d = 1,22(1 + G_t) \cdot \lambda \cdot NO$.

- Application numérique : $\lambda = 633 \text{ nm}$, $p = 300 \text{ mm}$, $f' = 25 \text{ mm}$ et $D = 2,5 \text{ mm}$. Calculer p' , G_t , NO puis d .
- A la limite, si on éloigne l'objet sans changer l'ouverture de l'objectif d devient $d = 1,22 \cdot \lambda \cdot NO$. La taille d des grains doit être supérieure à celle des pixel du CCD ($10 \mu\text{m}$). Quelle doit être la valeur minimale de NO ?



cadre 3: taille des grains de speckle.

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

Rq : Le NO est porté sur la bague des diaphragmes d'objectifs. Les valeurs usuelles sont :
1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16 32

Quand NO passe d'une valeur à la valeur supérieure, on divise le diamètre d'ouverture par $\sqrt{2}$.

1.2.2 Influence de l'ouverture de l'objectif sur la longueur (épaisseur) du grain

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

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

Rq.: s limite la valeur du déplacement transversal (ou de la déformation) décelable par interférométrie de speckle.

2. Interféromètre de Michelson

La mesure de déplacements micrométriques hors plan est réalisée à l'aide d'un montage optique du type interféromètre de Michelson.

Voir cadre 1 et cadre 2 du dossier technique.

- Faire un schéma d'un interféromètre de Michelson classique utilisant une source laser et deux miroirs.
- Quelle condition relative à la longueur des bras permet d'obtenir des interférences ?
- En quoi le montage proposé cadre 4 diffère du montage habituel de Michelson ?

3. Interférométrie de speckle

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 subjectif de la lame de référence et de la lame 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 de la lame de référence.

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

On suppose que l'on réalise un enregistrement en double exposition d'une poutre fléchie : la première image est celle de la poutre dans l'état 1. Après une déformation initiale de la lame, la déformée z_1 au point d'abscisse x diminue de $2z_1$ le trajet de la lumière dans le bras de mesure et induit un déphasage supplémentaire : $\frac{4\pi}{\lambda} z_1$.

L'intensité enregistrée sur le pixel d'abscisse x est :

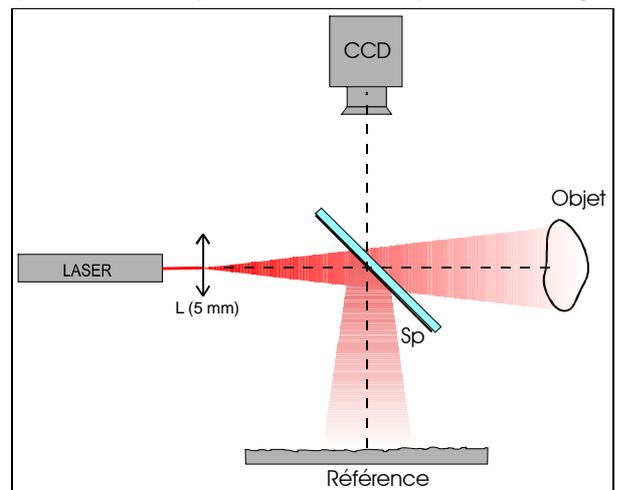
$$I_1 = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + \frac{4\pi}{\lambda} z_1)$$

Si l'on déplace l'objet sans changer la référence (ce qui suppose la déformation plus faible que la profondeur s des grains de speckle), la deuxième image est celle de la poutre dans l'état 2. Le même pixel reçoit un flux du type

$$I_2 = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + \frac{4\pi}{\lambda} z_2)$$

Le traitement d'image permet de réaliser des opérations mathématiques pixel par pixel entre les intensités lumineuses restituées. On peut par exemple effectuer la différence $I_2 - I_1$ et en prendre la valeur absolue.

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



cadre 4 : interférométrie de speckle

- Développer le calcul de $I_2 - I_1$ (utiliser la formule de trigo $\cos(a) - \cos(b) = -2 \sin \frac{a+b}{2} \sin \frac{a-b}{2}$).
- Montrer que $I_2 - I_1 = 0$ (pixel noir) si $z_2 - z_1 = p\lambda/2$ (p entier).
- Montrer que $I_2 - I_1$ est aléatoire si $z_2 - z_1 \neq p\lambda/2$ avec des chances d'être maximum (en valeur absolue) pour $z_2 - z_1 = (p + 1/2)\lambda/2$.
- Lorsque $I_2 \approx I_1$ la soustraction donne du noir. Sur l'image, l'ensemble des pixels noirs forment des franges sombres dites franges de « corrélation d'intensité ». Expliquez ce terme.

Franges sombres => déformation $z = p\lambda/2$ (p entier)

4. Shearographie

Observer le schéma du montage du cadre 5 et comparer au cadre 4.

- Que voit la caméra CCD dans l'un et l'autre cas ?
- Pourquoi le miroir M1 est-il incliné cadre 5 ?
- Quelle est la référence dans le cas du cadre 5 ?

En shearographie on fait interférer un grain de speckle A avec un grain de speckle B décalé (shearo) d'une valeur $AB = s$. A et B sont deux points du même objet d'étude leur interférence crée l'éclairement I_1 sur un pixel du CCD.

Si A et B se déforment de la même façon, l'éclairement I_2 résultant ne change pas et la différence absolue $I_2 - I_1$ est nulle (frange sombre).

De même si la différence des déformations est multiple de $\lambda/2$. On parle d'**interférométrie différentielle**.

Les franges sombres correspondent donc aux régions de l'objet où la variation Δz de déformation entre deux points distants de s est nulle ou multiple de $\lambda/2$

Franges sombres => différence de déformation $\Delta z = p\lambda/2$ (p entier)

5. Traitements d'images.

Cette partie vous familiarisera avec le logiciel Visulm5.

5.1 Photographie de speckle

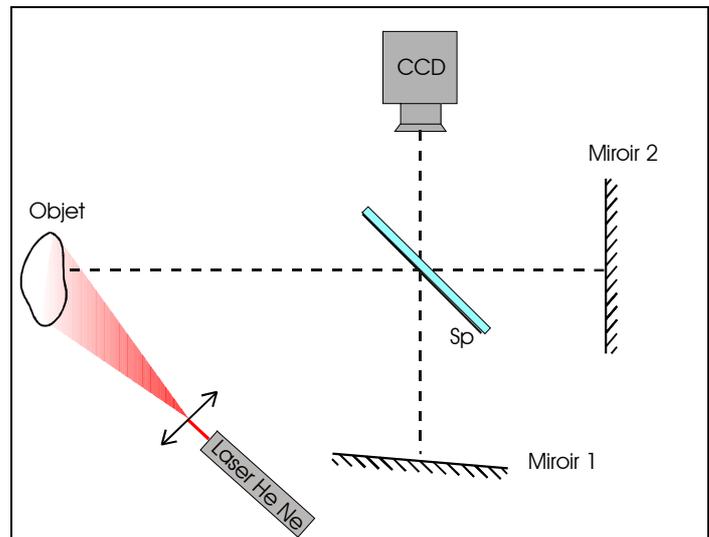
Ouvrir le logiciel "Visulm".

Ouvrir les images 00.jpg et 08µm.jpg. Elles sont l'enregistrement du speckle diffusé par un objet dans une première position puis dans une position décalée de $8 \mu\text{m}$ dans son plan.

Utilisant "*Image - Opérations*" faire l'addition des deux images. Demander ensuite la transformée de Fourier FFT de l'image somme.

Refaire le même travail avec 00.jpg et 16µm.jpg obtenue après un déplacement de $16 \mu\text{m}$.

Observer les images obtenues. Que peut-on dire de l'écart entre les franges obtenues ?
Expliquer alors le principe de la mesure de déplacements dans le plan par photographie de speckle.
Enregistrer une image "FFT.jpg"



cadre 5 : Interférométrie de speckle différentiel ou shearographie

5.2 Interférométrie de speckle en double exposition.

Ouvrir les images Expo1.jpg et Expo2.jpg. Elles sont les l'enregistrement du speckle résultant de l'interférence du speckle d'un objet de référence et du speckle diffusé par une poutre (cadre 4), avant puis après une déformation.

Utilisant "*Image - Opérations*" faire la soustraction absolue Expo1 - Expo2 des deux images puis multiplier l'image obtenue par une constante. Recommencer en faisant Expo2 – Expo1.

Observer les franges sombres obtenues. En utilisant les conclusions du paragraphe 3, estimez la valeur de la déformation à la base de la poutre sur l'image (la longueur d'onde du laser est $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$).

Enregistrez votre résultat "*DoubleExpo.jpg*"

5.3 Interférométrie de speckle en images phasées

Ouvrir Phasee1.jpg et Phasee2.jpg. Cette fois le niveau de gris de chaque grain de speckle correspond à la valeur de la différence de phase, c'est à dire aussi à la différence des chemins optiques entre la poutre et la référence.

Faire les soustractions modulo 256 des deux images. Phasee2 – Phasee1 puis Phasee1 – Phasee2. Observer les images "soustraction1" et "soustraction2"

Dans "*Image – Créer une image masque*" faire un masque rectangulaire sur l'une des images obtenues.

Dans "*Analyse de franges – Image phasée*" faire la démodulation des deux "soustractions" en utilisant le masque. On obtient les images de la déformation en niveaux de gris.

A l'aide de la souris, faire le profil de la déformation.

Enregistrez vos résultats "*Profil1.jpg*" et "*Profil2.jpg*". Laquelle de ces images correspond à la déformation effectivement réalisée ?

MISE EN ŒUVRE

1. Mesure d'une déformation hors plan par interférométrie de speckle

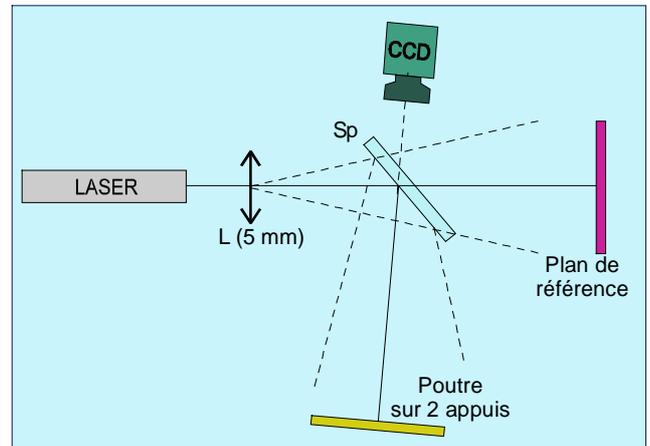
1.1 Image en temps réel

Il s'agit de la méthode par double exposition. La première image enregistre l'état 1 (initial) de l'objet d'étude (poutre sur deux appuis).

Elle est systématiquement soustraite (soustraction absolue) à chaque image qui suit.

On observe alors les franges qui caractérisent la déformation par rapport à l'état initial.

- Réaliser le montage d'enregistrement décrit dans le document *HOLO3* du dossier technique et schématisé Cadre 6. Les bras de l'interféromètre font environ 50 cm. Sp est une séparatrice (ou une simple lame de verre ordinaire)
- Réaliser la mise au point avec l'objectif 25 mm à zoom.
- En utilisant *Visulm.exe* acquérir une première image de la poutre après avoir sélectionné le numériseur (*Numériseur/Matrox/Meteor II*).
- Appliquer, en son centre, une précontrainte à la poutre (ce sera l'état 1 avant la déformation).
- Superposer l'image de la poutre et de l'objet de référence à travers la séparatrice. Assurez vous que 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.
- Pour optimiser les réglages, on utilise l'échelle des pseudo-couleurs (*Numériseur/Visualiser en fausses couleurs*). On doit obtenir une dominante verte avec des grains de speckle les plus gros possible.
- Figurer l'image, se positionner dans *Numériseur/Temps réel*. Réaliser une image de référence. Si le montage est stable, l'image doit rester uniformément noire.



Cadre 6 : schéma du montage.

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

1.2 Acquisition et interprétation

- Agir sur le micromètre pour déformer la poutre au point de poussée. La poutre doit apparaître à l'écran avec les franges de corrélation. Noter en utilisant l'indication du micromètre la valeur (approximative) de cette déformation.
- Refaire plusieurs fois la manipulation pour vous familiariser avec la méthode et optimiser vos résultats. Analyse des résultats après avoir étalonné l'image (correspondance pixels → mm). Sauvegarder votre image sur le disque dur sous [Noms_temps réel.jpg](#).

Les franges sombres correspondent à une déformation nulle ou multiple de $\lambda/2$: $z_2 - z_1 = p\lambda/2$ où p est l'ordre des franges. p est entier croissant jusqu'à la déformation maximum puis décroissant (p = 0 aux points d'appuis n'est pas visible).

Numéro de la frange sombre	1	2	3	
Position x (mm)					
ordre p	1	2	3		
Déformation $z_2 - z_1$ (µm)	0,316	0,633			

Tableau 1 :Double expo, position des franges de corrélation d'intensité.

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

Représenter sous Excel la déformation $z = z_2 - z_1$ (en μm) en fonction de x (en mm). Pour cela ouvrir (en lecture seule) le fichier excel "*Calcul_deformee.xls*". Rentrer les valeurs de x et p et la correspondance pixels \rightarrow mm. Un exemple se trouve sous "*calcul_deformee_ex.xls*".

On démontre en RDM que l'équation de la déformée est $z = \frac{4f}{L^3}x^3 - \frac{3f}{L}x$ si $x < \frac{L}{2}$ avec (valeur à ajuster) $L \approx 180$ mm et pour f la valeur indiquée par le micromètre (en tenant compte du bras de levier).

Si $x > \frac{L}{2}$ l'équation est la même en remplaçant x par $L - x$. Ajouter sur le même graphe la courbe théorique en ajustant au mieux la valeur de f ainsi que le décalage d (écart de la position de la frange d'ordre 1 prise pour origine par rapport à $p=0$ sur le point d'appui). Enregistrer votre fichier "*Noms_deformee.xls*".

Conclusions. Théorie et expérience sont-elles en accord ? Quelle est la valeur de f retenue ?

2. Visualisation de défaut par interférométrie différentielle (shearographie)

Réalisez le montage du cadre 5. L'objet d'étude est formé de deux plaques d'acier jointes. Celle de la face avant présente un défaut non apparent (cadre 7).

Veillez à superposer les deux images de l'objet vues par la caméra puis, en inclinant légèrement un miroir, à les décaler dans le sens diagonal.

Utiliser le mode "temps réel". Prendre une référence puis imposer une contrainte à l'objet.

On impose une contrainte en modifiant légèrement la pression d'air enfermée entre les plaques. Il suffit pour cela de plier le tuyau.

Faire observer le montage à un professeur.
Expliquez pourquoi selon vous le défaut apparaît. Enregistrer "Shearo.jpg"

D'autres méthodes existent pour imposer une contrainte au matériau (chaleur, chocs, ...) – Voir étude de documents.

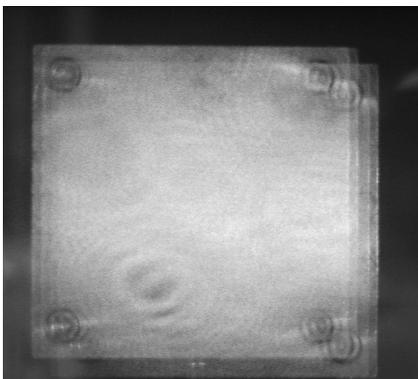
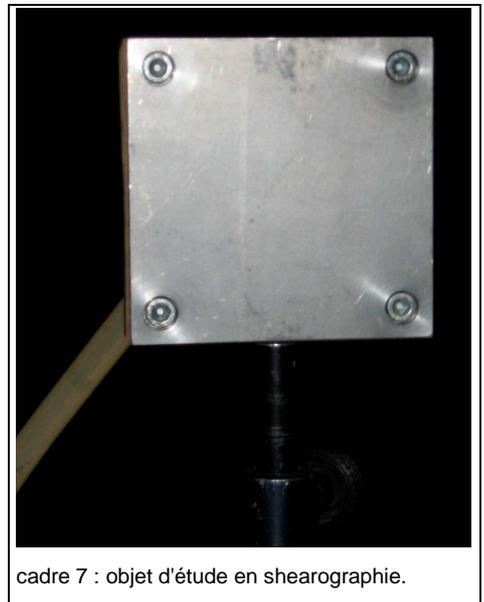
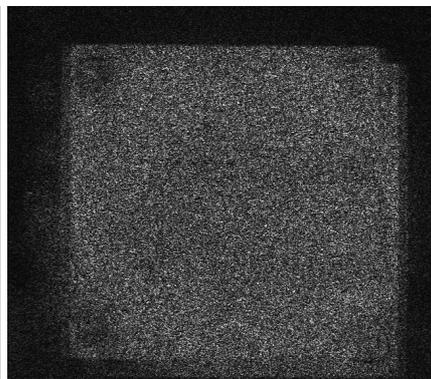
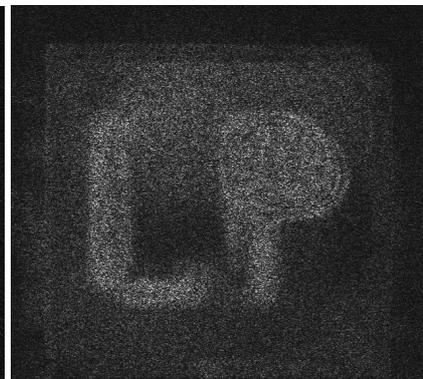


Image 1 vue par la caméra
(superposition de deux images
décalées)



Soustraction Absolue ($Im1 - Im2$)
(sans contrainte imposée lors de
l'image 2)



Soustraction Abs ($Im1 - Im2$)
(objet sous contrainte)
Le "défaut" apparaît

ANALYSE DES PERFORMANCES

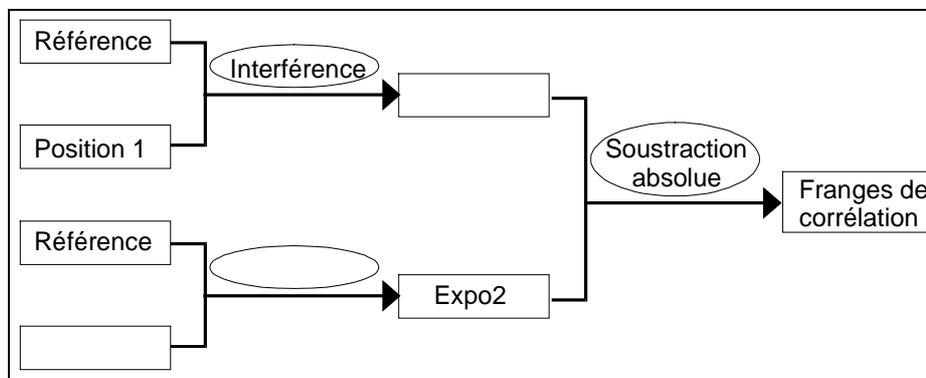
1. Performances de la méthode de double exposition.

La méthode par double exposition permet de retrouver la déformation $z = z_2 - z_1$ infligée en chaque point le long de l'axe Ox de la poutre. La situation initiale a fourni l'éclairement I_1 , et la situation finale l'éclairement I_2 , après avoir augmenté la flèche imposée à la poutre.

Pourtant, on peut déceler dès le départ une imperfection inhérente à la méthode utilisée : l'image calculée par **soustraction absolue** $|I_2 - I_1|$ est identique si on avait fait $|I_1 - I_2|$ c'est à dire si la déformation avait lieu dans l'autre sens. Le résultat aurait été le même si on avait diminué, de la même importance, la flèche imposée à la poutre.

La méthode ne permet pas de connaître le sens de la déformation.

Compléter le tableau du cadre 8.



cadre 8 : Méthode de double exposition

2. La méthode des images phasées.

La méthode des images phasées permet de retrouver le sens de la déformation. L'éclairement I_1 , au point d'abscisse x , issu de la première exposition est $I_1 = I_{REF} + I_{OBJ} + 2\sqrt{I_{REF}I_{OBJ}} \cos(\varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + \frac{4\pi}{\lambda} z_1)$ (1). Il comporte le terme de phase : $\Phi_1 = \varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + 4\pi z_1/\lambda$

Φ_1 contient une partie aléatoire due aux phases des grains de speckle et une partie déterminée par l'écart z_1 entre les bras du Michelson. Sa valeur est comprise entre 0 et 2π (modulo 2π).

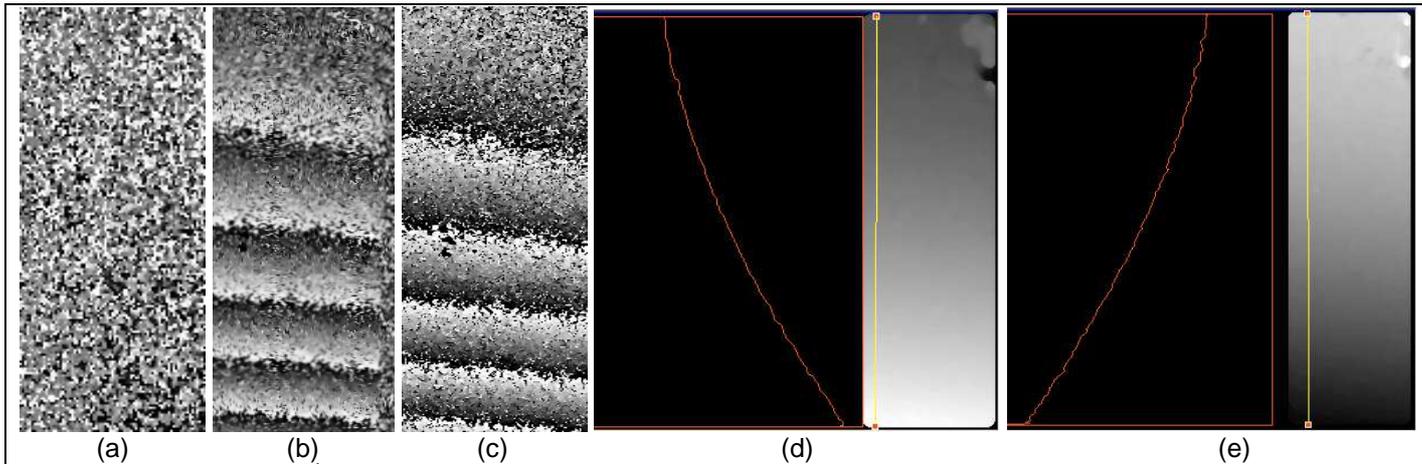
La **méthode du décalage de phases** va nous permettre de remplacer l'image d'éclairement I_1 en x , par une image d'éclairement proportionnel à Φ_1 . C'est l'**image phasée**. Cet éclairement est compris entre 0 et 255 (modulo 256). La partie aléatoire la rend inexploitable (cadre 10 (a))

On fera de même l'image phasée de la seconde exposition d'éclairement, chaque point d'abscisse x a une intensité proportionnelle à $\Phi_2 = \varphi_{REF} - \varphi_{OBJ} + 4\pi z_2/\lambda$.

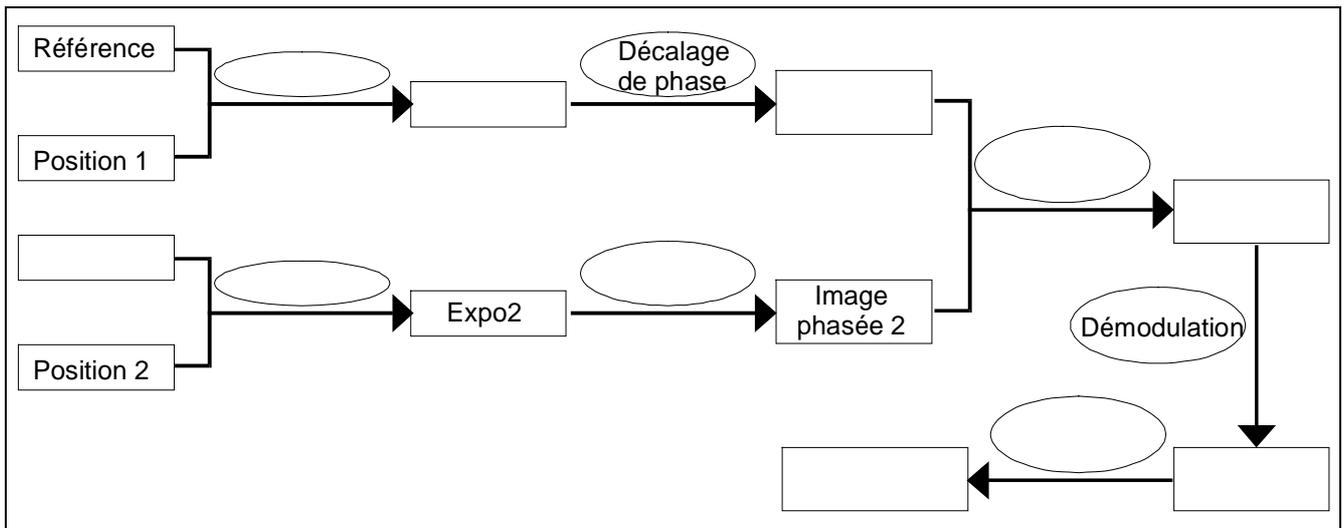
La **différence modulo 256** des images phasées donnera en tout point d'abscisse x un éclairement proportionnel à $\Phi_2 - \Phi_1$ c'est à dire à $z_2 - z_1$. C'est l'image modulée de la déformation. Elle ne comporte plus la partie aléatoire (cadre 10 (b)) et $\Phi_1 - \Phi_2 \neq \Phi_2 - \Phi_1$ (cadre 10 (c))

Le signe, donc le sens, de la déformation est préservé.

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE



a : image phasée de la 1^{ère} exposition : Φ_1
 b : différence des images phasées : phasée2 - phasée1 ($\Phi_2 - \Phi_1$)
 c : différence des images phasées : phasée1 - phasée2 ($\Phi_1 - \Phi_2$).
 d : image démodulée de phasée2 - phasée1 ($\Phi_2 - \Phi_1$) et son profil
 e : image démodulée de phasée1 - phasée2 ($\Phi_1 - \Phi_2$) et son profil
 cadre 10 : méthode des images phasées



cadre 9 : Méthode des images phasées.

L'opération de **démodulation** (ou dépliement) fournit la déformation point par point en NG (niveaux de gris). Une **calibration** (ou étalonnage) permet ensuite d'obtenir le profil de la déformation (cadre 10 (d)).

Compléter le tableau du cadre 9.

Dans l'expression (1) du paragraphe 0 ci-dessus, calculer I_{MAX} , I_{MIN} , $I_M = I_{MOYEN}$, le contraste m .

Montrer que (1) peut s'écrire : $I_1 = I_M(1 + m \cdot \cos(\Phi))$

Principe de la méthode du décalage de phase :

Il est étudié en détail dans le TP N°5 Moiré.

Au lieu d'enregistrer 1 image de la poutre dans un état donné, on enregistre 4 images déphasées de $\pi/2$ pour avoir accès à la valeur de φ en chaque point P de l'image. Le déphasage est obtenu en déplaçant l'objet de référence à l'aide d'une cellule piézo-électrique pilotée par le micro-ordinateur. En P, les intensités successives s'écrivent :

- $I_{00} = I_M(1 + m \cdot \cos(\Phi))$ écriture simplifiée de l'expression (1)
- $I_{90} = I_M(1 + m \cdot \cos(\Phi + \frac{\pi}{2}))$
- $I_{180} = I_M(1 + m \cdot \cos(\Phi + \pi))$
- $I_{270} = I_M(1 + m \cdot \cos(\Phi + \frac{3\pi}{2}))$

Montrer que l'on obtient Φ (à π près) par : $\Phi = \text{Arc tan} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$.

3. Mise en œuvre de la méthode :

3.1 Montage

Réaliser le montage du cadre 11 et de la photo page 1.

On obtiendra les 4 images déphasées en déplaçant la séparatrice à l'aide d'une platine munie d'un translateur piézo-électrique.

La platine doit faire un angle α un peu inférieur à 45° .

Connecter l'alimentation 0 - 100V à un port série de l'ordinateur.

Dans "*Analyse de franges - Piloter déphaseur*" vérifier le choix du port série et la **tension maximum de l'alimentation mise à 100 Volts** (cadre 12).

Montrez votre montage

Basculer l'interrupteur sur Line. Actionner le curseur et vérifier que la commande se fait correctement. Etalonnage du déphaseur

3.2 Principe

Le déphaseur piézo-électrique permet de faire varier la différence des chemins optiques de $\lambda/4$, $\lambda/2$, $3\lambda/4$ et d'obtenir les déphasages $\pi/2$, π , $3\pi/2$ nécessaires pour obtenir une image phasée.

Lorsque la platine se déplace d'une valeur x , les chemins AB et AC varie respectivement de $x \cos(\alpha)$ et $x \sin(\alpha)$. La différence de marche optique est donc $\delta = 2x(\cos(\alpha) - \sin(\alpha))$.

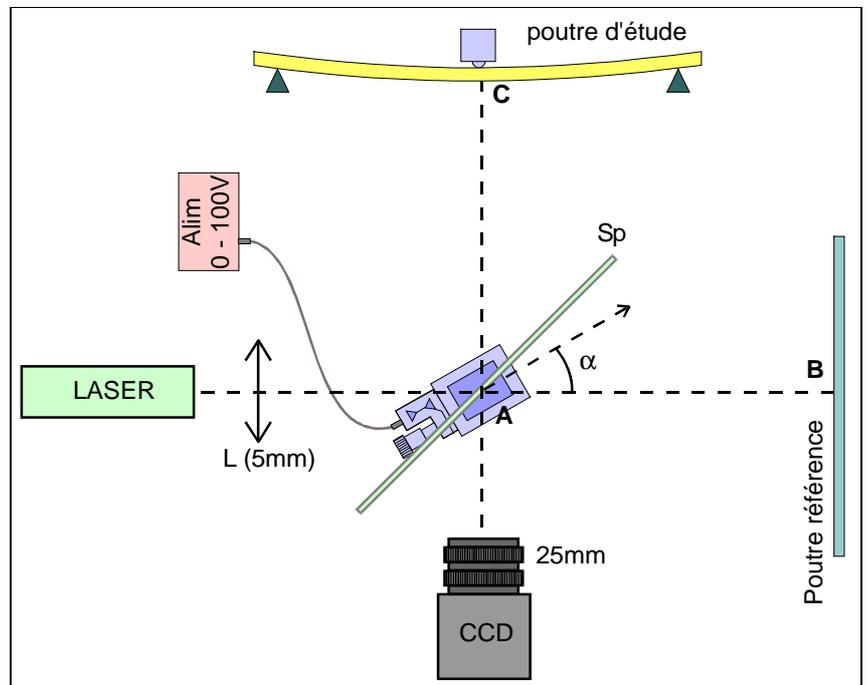
Calculer x pour avoir une différence de marche $\delta = \lambda$ (déphasage de 2π) si on choisit $\alpha = 40^\circ$.

Le translateur piézo-électrique déplace la platine de $15 \mu\text{m}$ lorsque la tension passe de 0 à 100 V. Quelle variation de tension ΔV faudra-t-il pour obtenir un déphasage de 2π ? (On suppose que le déplacement est fonction linéaire de la tension).

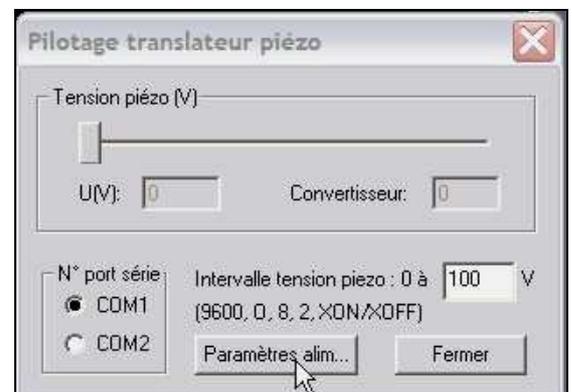
3.3 Etalonnage

ΔV dépend très fortement de α . On recherchera ΔV expérimentalement.

Se placer en temps réel, appliquer une déformation qui permet de faire apparaître quelques franges, alimenter



cadre 11 : Schéma du montage



cadre 12 : réglage des liaisons.

le piézo sous une tension d'offset de $V_0 = 40$ V environ (zone à peu près linéaire), repérer une frange sombre, puis rechercher l'augmentation ΔV de la tension du piézo qui amène la frange sombre adjacente à la place de la frange précédente. Refaire cette opération plusieurs fois et retenir la valeur moyenne.

Montrez votre montage

Noter et entrer les valeurs trouvées de V_0 et ΔV dans Analyse de *Analyse de franges/Image phasée/Acq. image phasée à 4 images* (cadre 13).

3.4 Acquisitions des images phasées. Démodulation.

Acquérir une première image phasée à 4 images avec la poutre dans l'état initial. Sauvegarder sous : *noms_phas1.jpg*.

Acquérir une deuxième image phasée à 4 images en appliquant préalablement la flèche supplémentaire à la poutre. Sauvegarder sous : *noms_phas2.jpg*.

Dans *Images/Opérations/Logiques et math entre images*, soustraire les 2 images phasées précédentes et sauvegarder sous *noms_phas.jpg*. Démodulation.

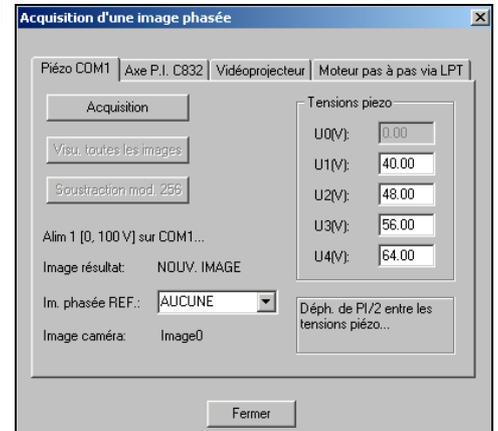
Sous *Image/Créer un masque*, créer une image masque en sélectionnant par un rectangle la zone intéressante de la poutre à l'aide de la souris. Cliquer sur *Ajouter*. Les zones inintéressantes (bruit de fond, ...) doivent être noires sur l'image masque.

Sous *Analyse de franges/Image phasée/Démodulation image phasée*, démoduler l'image et retrouver la déformée de la poutre en nuances de gris : spécifier les bonnes images : image phasée et image masque. Cliquer sur *Démoduler*.

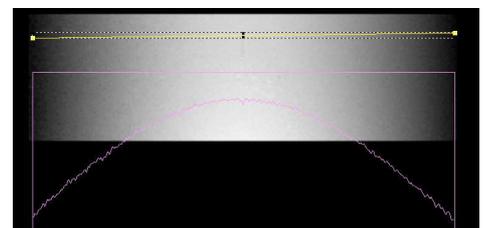
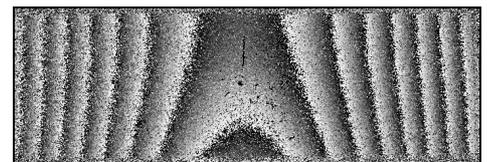
Si des bogues apparaissent dans l'image démodulée, changer les options : Image avec discontinuités physiques, avec bruit de fond...

Sauvegarder l'image démodulée sous *noms_dem.jpg*.

Calibration - Réalisation du profil de la déformée.



cadre 13 : étalonnage du déphasage



cadre 14 : Image phasée de la déformation et image démodulée avec profil en NG.

3.5 Image de la déformation

Sous *Image/Etalonner*, cliquer sur *Speckle* puis *OK* pour déterminer l'échelle en z (conversion NG --> mm).

L'étalonnage en x,y peut se faire en se servant d'une dimension connue sur l'image (largeur de la poutre par exemple, conversion pixels --> mm).

Remarque :

Le coefficient M correspond au nombre de sauts 2π (ordre des franges) rencontrés dans l'image démodulée.

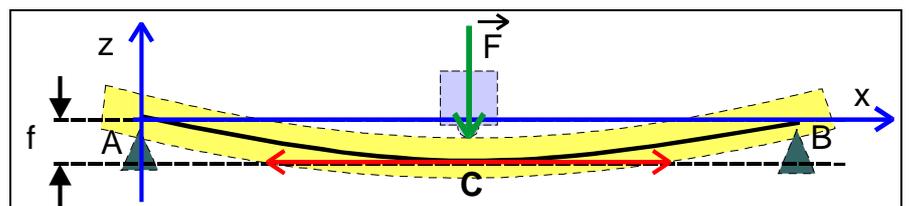
Tracer un profil sur l'image obtenue dans une fenêtre. En faire une sortie imprimante.
Ranger les images demandées dans un dossier *Votre nom_Speckle*.

4. Étude de la flexion de la poutre en RDM

La poutre, de longueur L est soumise à une charge F en son milieu C. La symétrie permet de ne faire l'étude que entre A et C.

Le moment fléchissant est $M_F = \frac{F}{2}x$ sur le tronçon AC.

Nous savons que : $-E.I.z'' = M_F$;



cadre 15 : Poutre soumise à une force F

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE

$z'' = \frac{d^2z}{dx^2}$ (la dérivée seconde de z est la variation de la pente z' au point d'abscisse x)

E : module d'élasticité : à prendre dans la table http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_Young

I : moment quadratique (mm^4); pour une section rectangulaire $I = \frac{h \cdot e^3}{12}$ avec : h : largeur poutre = 50 mm ; e : épaisseur poutre = 2 mm.

On peut utiliser pour le calcul de l'inertie : <http://perso.orange.fr/philippe.fichou/sections/sections.htm>

On remarque que la pente z' est nulle au point C d'abscisse $x = L/2$ et $z = 0$ en $x = 0$. Ces conditions permettent de trouver les constantes d'intégrations permettant d'atteindre z' puis z".

Démontrer que l'équation de la déformée est $z = \frac{F}{4EI} \left(\frac{x^3}{3} - \frac{L^2x}{4} \right)$ puis calculer la flèche maximum f pour $x = L/2$

En déduire que $F = -\frac{48EIf}{L^3}$.

Déterminer la valeur numérique de l'effort F pour la flèche f trouvée expérimentalement.

Comparer vos résultats avec ceux obtenus à l'aide du logiciel de calcul de RDM : <http://perso.orange.fr/philippe.fichou/Poutre/poutre6.htm>.

ETUDE DE DOCUMENTS

Lire la documentation "HOLO3", "GOM" et "CND" du DT et "Interférométrie de speckle par F. Taillade

Résumer en quelques lignes les applications de l'ESPI ainsi que les performances que l'on peut attendre (résolution, champ, conditions d'applications ...)

Précisez ce qu'est l'ESPI par analyse vibratoire. Quels avantages apporte-t-elle ?

Quelles sont les particularités de la shearographie ? dans quels cas la préfère-t-on à d'autres méthodes ?

INTERFEROMETRIE DE SPECKLE**LISTE DU MATERIEL et DES LOGICIELS**

<i>Type matériel</i>	<i>Nbre</i>	<i>Remarques</i>
<i>Poutre à étudier</i>	<i>1</i>	<i>A placer sur deux appuis dans le support</i>
<i>Butée à micromètre digital</i>	<i>1</i>	<i>Agit sur la poutre par l'intermédiaire d'un bras de levier</i>
<i>Poutre de référence</i>	<i>1</i>	<i>Lame quelconque de dimension égale ou supérieure à la poutre d'étude et maintenue pour éviter toute vibration</i>
<i>Objet d'étude pour la shearographie</i>	<i>1</i>	<i>L'enceinte est creusée. Un défaut a été artificiellement créé sur la paroi interne. On peut faire varier la pression interne en appuyant sur le tuyau.</i>
<i>Platine de translation Polytec</i>	<i>1</i>	<i>Munie d'un vérin piézoélectrique</i>
<i>Alimentation pour piezo RS232</i>	<i>1</i>	<i>Steibichler – Alimentation 0 à 100 V</i>
<i>Séparatrice</i>	<i>1</i>	<i>Surface fragile ! Ne pas essuyer. On peut la remplacer avantageusement par une simple lame de verre. A placer sur la platine PI.</i>
<i>Lentilles (f=5; 20; 200; 500 mm)</i>	<i>1</i>	
<i>Miroirs plans</i>	<i>2</i>	<i>Grand diamètre.</i>
<i>Éléments mécaniques de liaison (noix, blocs magnétiques, ...)</i>		
<i>Laser He-Ne Spectra Physics</i>	<i>1</i>	<i>30 mW; 632.8 nm (on peut aussi utiliser un Melles Griot 10 mW)</i>
<i>Camera CCD</i>	<i>1</i>	<i>Micam VHR2000</i>
<i>Objectif 25 mm</i>	<i>1</i>	<i>Avec zoom</i>
<i>Micro-ordinateur</i>	<i>1</i>	
<i>Carte d'imagerie Matrox Meteor II</i>	<i>1</i>	<i>Dans le micro ordinateur</i>
<i>Imprimante</i>	<i>1</i>	
<i>Logiciels</i>		
<i>VisulmMeteor</i>		
<i>Poutre.mht – Calcul Inertie.mht</i>		
<i>Excel ; Calcul déformée.xls</i> <i>Calcul déformée co.xls</i>		

cadre 16 : liste du matériel