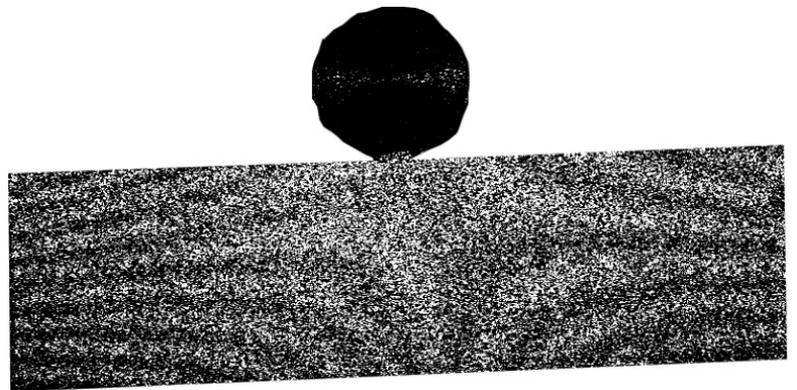
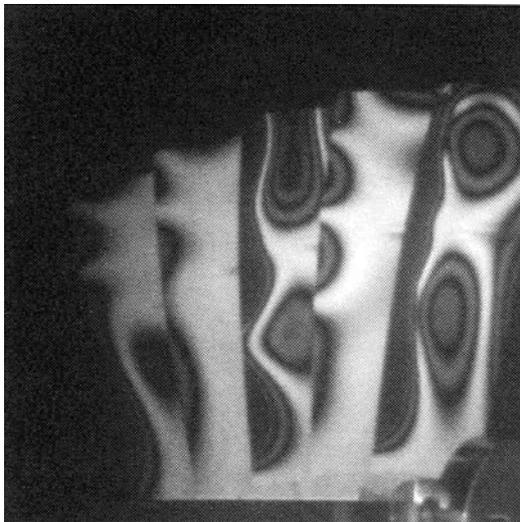


R A P P O R T D E P R O J E T
BTS Génie Optique option Photonique
s e s s i o n j u i n 2 0 0 4



Interférométrie de Speckle
pour l'analyse de contraintes et de vibrations

Sujet proposé par:

Les professeurs de la section photonique

Réalisé par: PHILIBERT Nicolas & HENOCQ Benoît

Remerciements

Nous tenons à remercier Monsieur Kempf pour l'aide qu'il nous a apportée dans la réalisation du programme informatique.

Nous aimerions également remercier nos professeurs de physique Messieurs Jehin et Samsou pour l'aide sur la théorie qu'ils nous ont apportée mais aussi pour les conseils pratiques.

Merci à tous les professeurs de la section, en particulier Monsieur Siegrist professeur d'électronique et Monsieur Mater professeur de mécanique pour avoir suivi de près comme de loin la réalisation de notre projet.

Pour finir nous souhaitons remercier le lycée Jean Mermoz d'avoir mis à notre disposition tout le matériel nécessaire à l'élaboration de ce projet.

Sommaire

Cahier des charges

Élèves :	HENOCQ Benoît - PHILIBERT Nicolas
Partenaire :	Lycée Jean Mermoz
Adresse :	
Parrain du projet :	
Tél :	
Fax :	
E-mail:	
Financement :	Lycée Jean Mermoz

ESPI APPLIQUEE A LA MESURE DE DEFORMATIONS DANS LE PLAN ET A L'ETUDE DES MODES DE VIBRATION

1. Définition du cahier des charges

L'objectif de ce chapitre est de saisir et d'énoncer le besoin, c'est-à-dire l'exigence fondamentale nécessitant la mise en œuvre du système.

1.1 Analyse du besoin

1.1.1 Saisie du besoin

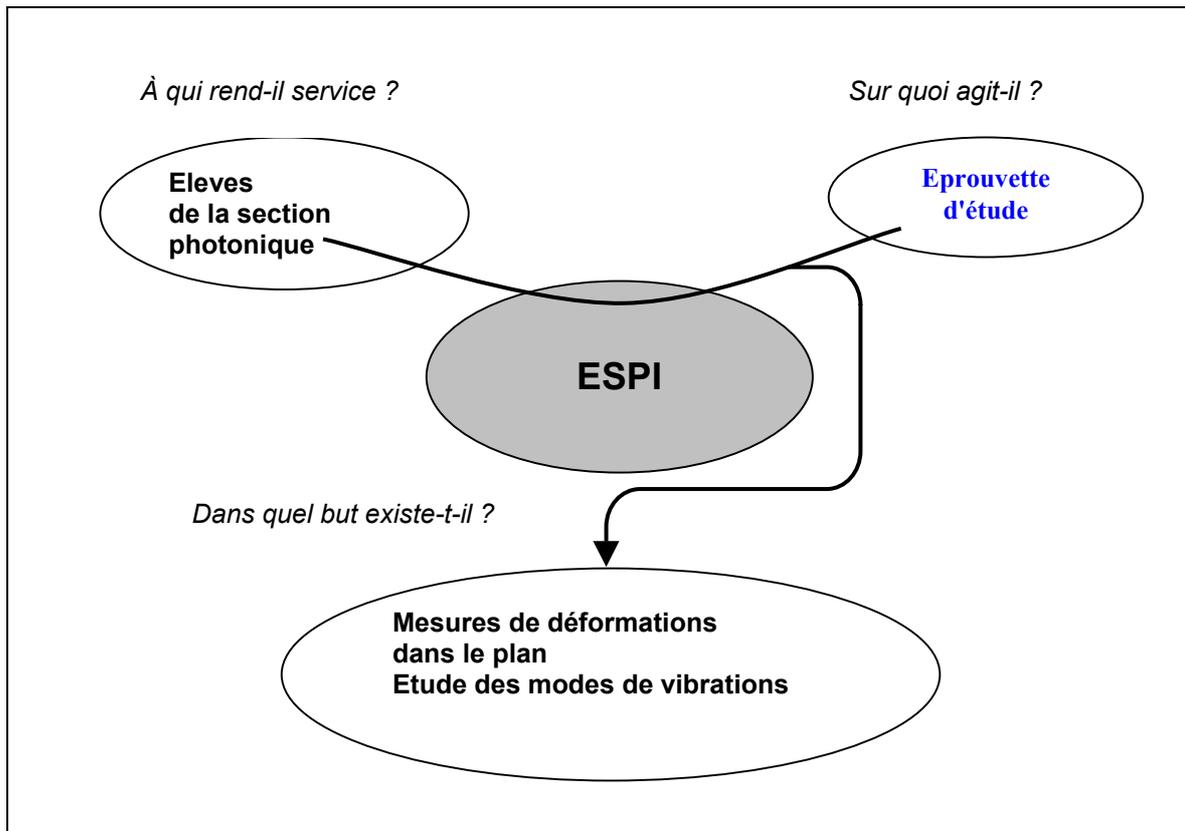
Projet à contenu technique affirmé et en collaboration avec une entreprise.

L'ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) a été développée depuis les années 1970. Profitant des progrès en matière de caméra CCD et d'informatique, elle s'impose dans les années 1990, faisant disparaître progressivement l'interférométrie holographique.

Les techniciens en génie optique photonique doivent être formés à cette technique devenue incontournable. Ainsi l'ESPI a été retenu, dans le cadre de l'harmonisation des critères d'évaluation de l'épreuve BTS GO (option photonique), comme système industriel permettant la rédaction d'un sujet commun pour l'ensemble des sections de France.

La section de Saint-Louis possède déjà un TP de MO où la technique d'interférométrie de speckle est utilisée pour la mesure de déformations hors plan. Il est souhaitable de la compléter par ses autres champs d'applications que sont la mesure de déformations dans le plan et l'analyse modale.

1.1.2 Énoncé du besoin



cadre 1 : Diagramme bête à cornes.

1.1.3 Validation du besoin

Pourquoi ce besoin existe-t-il ?

- L'enseignement de mise en œuvre des systèmes en classe GO option photonique vise à faire acquérir des connaissances et des démarches permettant la compréhension des systèmes optiques et lasers : analyse fonctionnelle, mise en œuvre, étude des performances.
- Un enseignement moderne doit suivre l'évolution technologique. Le choix d'un système industriel comme support commun à l'épreuve de MO du BTS s'est naturellement porté sur l'ESPI.

Qu'est-ce qui peut le faire disparaître ? Le faire évoluer ?

- Une technique nouvelle plus performante pouvant faire disparaître l'ESPI
- Une modification des programmes du BTS

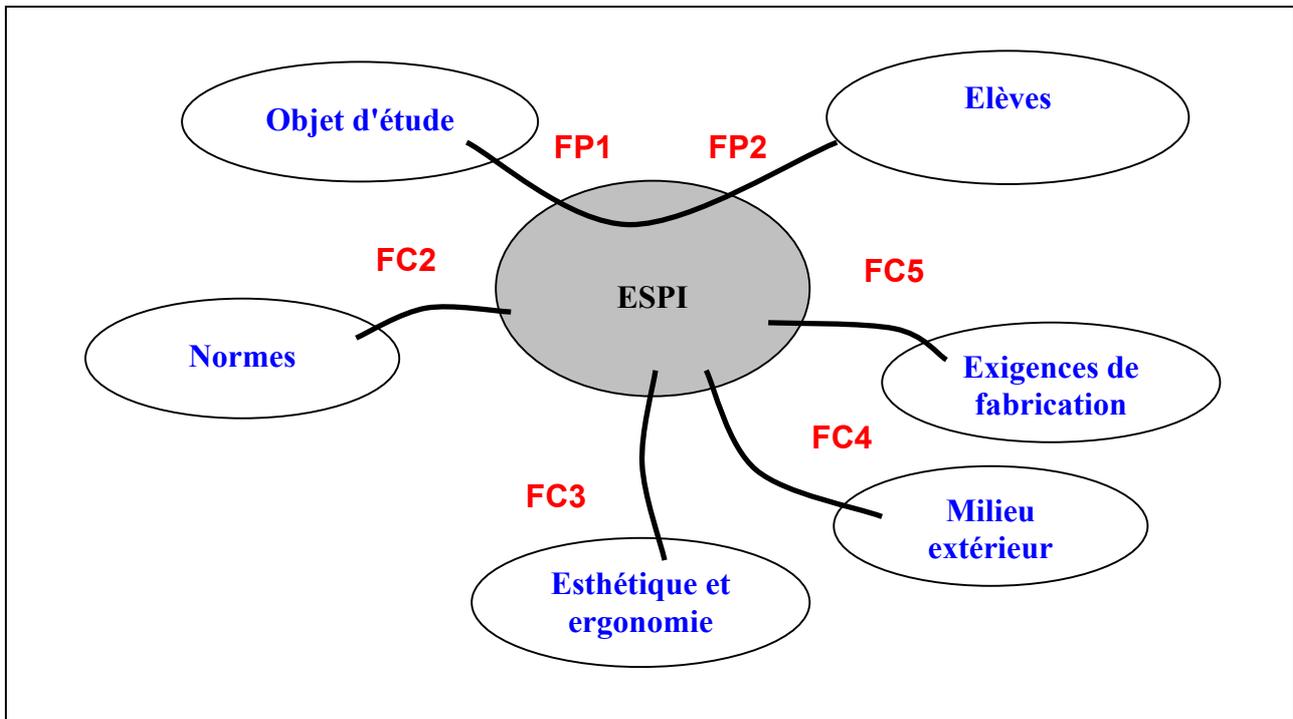
Conclusion :

- Ce besoin est bien réel, donc validé.

1.2 Étude de faisabilité

Le besoin étant validé, il s'agit de recenser et d'expliquer dans ce chapitre les satisfactions et performances attendues du système.

1.2.1 Identification des fonctions



cadre 2 : Diagramme pieuvre.

Fonction principale

FP1	Mesure de déformations dans le plan
FP2	Etude des modes de vibrations

Fonctions contraintes

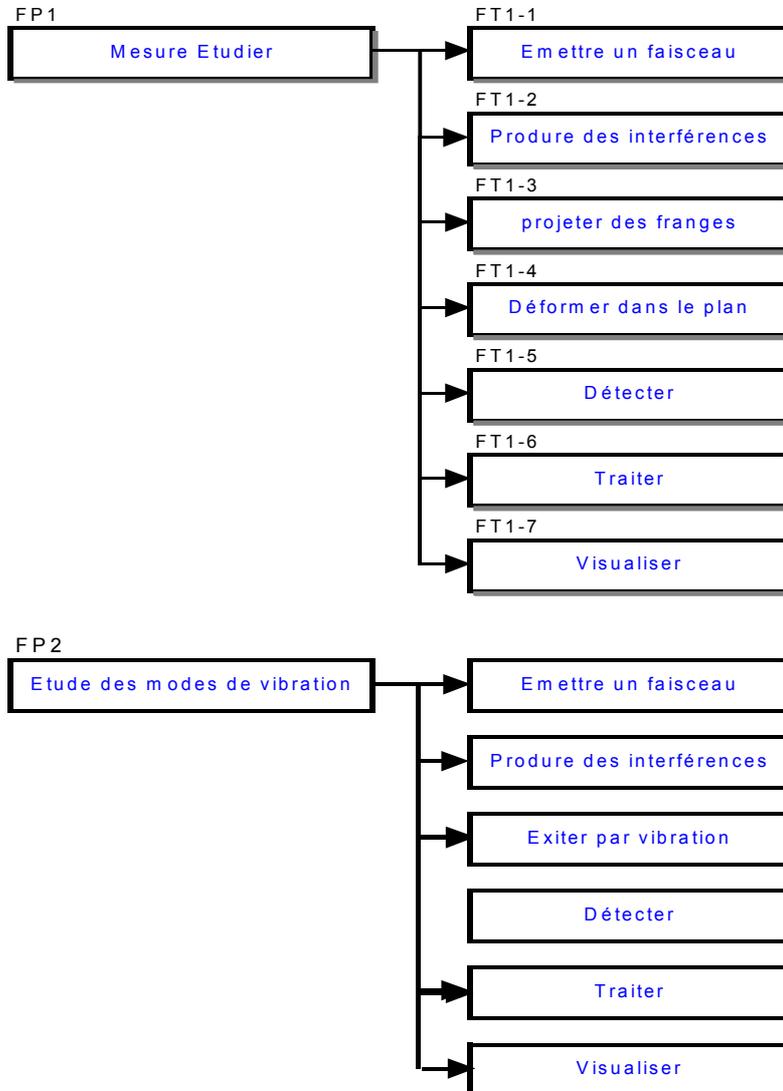
FC2	Assurer la sécurité de l'utilisateur d'un point de vue électrique, mécanique et optique.
FC3	Être agréable à l'œil, et facile d'utilisation.
FC4	Fonctionner dans le milieu ambiant (laboratoire de mise en œuvre).
FC5	Respecter les exigences de fabrication.

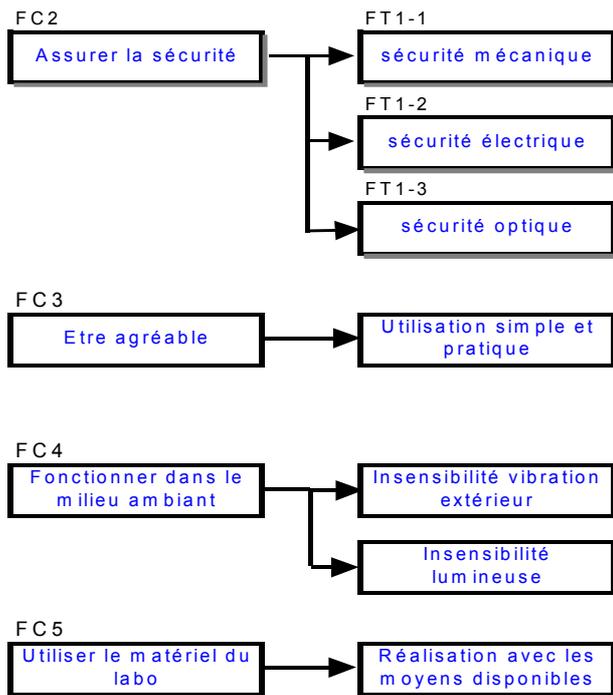
1.2.2 Critères à respecter

Fonctions de service	Critères	Niveaux - Limites
FP1 : Mesurer...	<ul style="list-style-type: none"> Eprouvette résolution Déformation Affichage des mesures : Mesure par un procédé optique 	<ul style="list-style-type: none"> Métallique ou plastique longueur : 5 à 20 cm largeur : 2 à 10 cm épaisseur : 1 à 10 mm < 0,2 μm montage aisé rapidité de mise en place tension; pression Possibilité d'enregistrer les mesures pour traitement informatique sans contact
FP2 : Etudier...	<ul style="list-style-type: none"> Eprouvette Vibration Affichage des mesures : Mesure par un procédé optique 	<ul style="list-style-type: none"> Métallique ou plastique Fréquence variable Possibilité d'enregistrer les mesures pour traitement informatique sans contact
FC2 : Assurer la sécurité ...	<ul style="list-style-type: none"> sécurité mécanique : sécurité électrique : 	<ul style="list-style-type: none"> Capoter les pièces sous tension > 121V Sécurisation des câblages
FC3 : Etre agréable...	<ul style="list-style-type: none"> Système simple d'utilisation Ensemble compact Esthétique 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en œuvre aisée
FC4 : Fonctionner dans ...	<ul style="list-style-type: none"> Eliminer les lumières parasites 	<ul style="list-style-type: none"> Insensibilité à l'éclairage ambiant pour une meilleure visualisation des acquisitions
FC5 : Utiliser les moyens...	<ul style="list-style-type: none"> Réaliser le système avec les moyens disponibles au lycée : 	<ul style="list-style-type: none"> Tenir compte du parc machine du lycée

1.3 Recherche des solutions

Pour les solutions constructives non précisées, il s'agit de faire un inventaire des solutions et de choisir la plus appropriée.





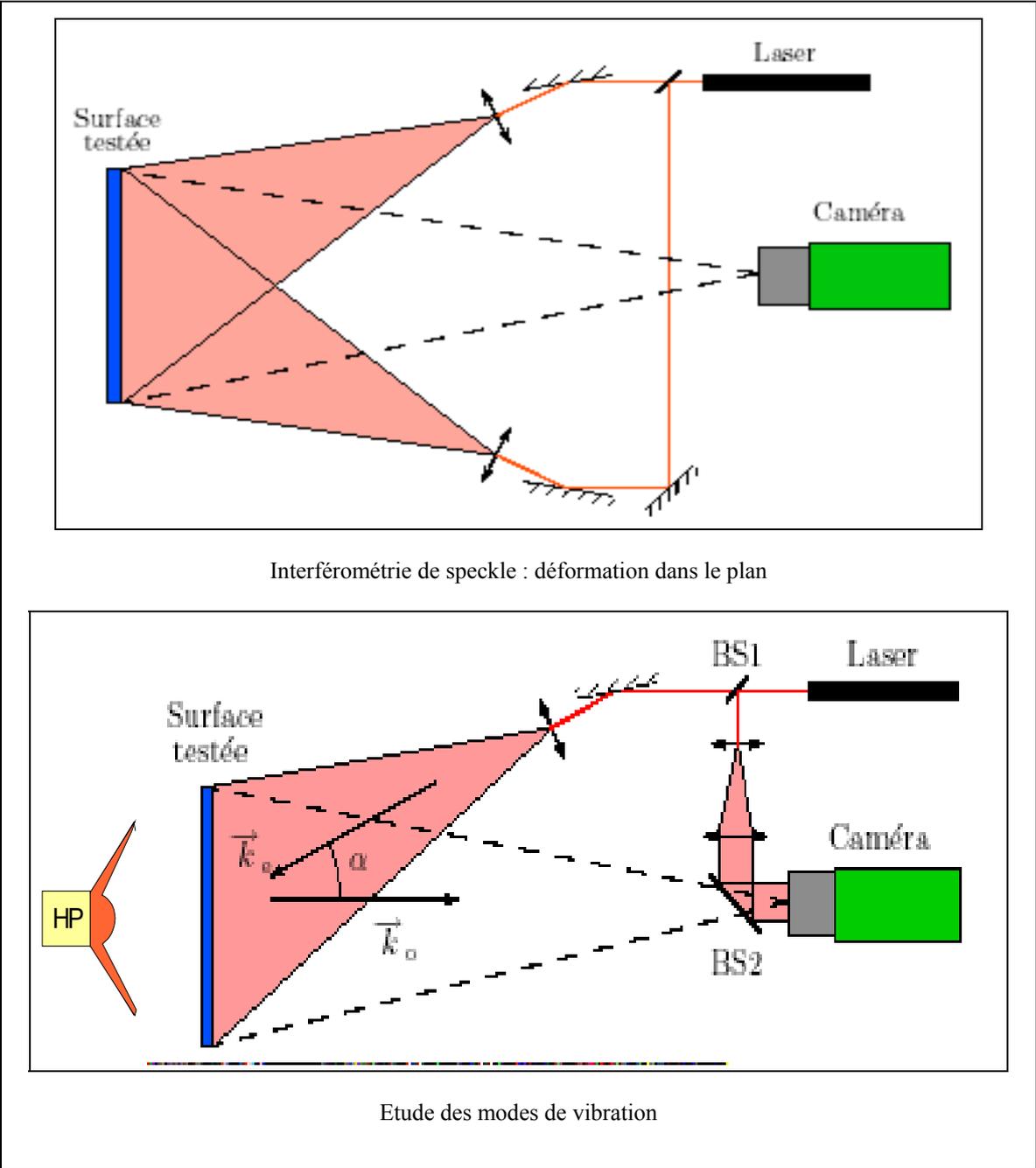
Légende :

FP : Fonction principale, FT : Fonction technique, FC : Fonction contrainte, SC : Solution constructive.

() : Coefficient de difficulté de mise en œuvre de la fonction (1 : facile et/ou rapide, ..., 4 : long et/ou difficile).

B. Principes mis en œuvre

1.4 Schéma de principe



cadre 3 : Schéma fonctionnel.

1.5 Explications fondamentales

Voir *cadre 3*.

Déformations dans le plan :

L'objet sous contrainte est éclairé avec un laser suivant deux directions et observé par une caméra CCD.

Les grains de speckles issus de ces éclairagements se superposent et interfèrent. Chaque pixel de la caméra présente un éclairage résultant de ces interférences.

Lors de la déformation, les déplacements des grains de speckle créent un état d'interférence différent et donc un éclairage différent sur chaque pixel.

Le traitement d'images permet alors de faire apparaître les franges de corrélation d'intensité. On pourra ensuite calculer en chaque point du champ de la caméra la déformation de l'objet d'étude.

Etude des modes de vibration :

Le montage est voisin de celui utilisé lors de l'étude de déformations hors plan. L'objet est mis en vibration par une source extérieure et l'image des franges de corrélation d'intensité informe sur l'amplitude des vibrations de l'objet.

En faisant varier la fréquence d'excitation on pourra mettre en évidence les modes de résonance, d'antirésonance et les défauts de structure, de masse ou d'amortissement dans le matériau de l'éprouvette.

2. Démarche du projet

Elève 1 :Philibert Nicolas ; élève 2 :Hénocq Benoît

		Travail demandé	
		Séances (4 H)	Élèves
A1	Analyse du besoin		
A.1.1	Saisie du besoin : Compléter le cas échéant le paragraphe A.2.1.	1	1&2
A.1.2	Énoncé du besoin : Compléter le cas échéant le paragraphe A.2.2.	1	1&2
A.1.3	Validation du besoin		
A2	Étude de faisabilité		
A.2.1	Identification des fonctions : • Mettre les éléments ext. en relation avec le produit. • Formuler le but visé pour chacune des relations.	1	1&2
A.2.2	Caractérisation des fonctions : Compléter les colonnes <i>caractéristiques</i> et <i>critères</i> .	1	1&2
A3	Caractérisation des fonctions		
A.3.1	Recherche de solutions : • Compléter le FAST. Proposer un maximum de solutions, ne pas en éliminer à priori. • Rechercher des solutions existantes ou similaires. • Consulter publications, articles, anciens rapports... • Approfondir les connaissances sur le sujet en optique, électronique, mécanique, informatique...	2	1&2
A.3.2	Évaluation des solutions : • Critique des différentes solutions issues du FAST. • Choix de la solution retenue. • Montage simple avec du matériel disponible au laboratoire ou mis à disposition par l'entreprise permettant de démontrer la faisabilité du projet.	2	1&2
REVUE CRITIQUE N°1 : DEMONSTRATION DE FAISABILITÉ (19, 20 décembre)			
A4	Définition du projet		
	Définition exacte de la solution finale : • Choix des composants. • Réalisation dessins d'ensemble et de définition. • Schémas structurels. • Programme informatique. <u>Répartition du travail</u> (voir A.3.) : • Déformation dans le plan • Modes de vibration • Mécanique pour déformer la pièce • Informatique pour la déformation • Informatique pour la vibration • Electronique liée à l'excitation	4	1 2 1 1 2 2
REVUE CRITIQUE N°2 : VALIDATION DE LA DÉFINITION DU PROJET (6, 7 mars)			
A5	Mise en œuvre		
	• Montage, assemblage, ... • Réalisation, réglages, ... • Après la mise en œuvre de la partie réalisée par chaque étudiant, intégration finale et mise au point.	4	1&2
A6	Homologation et conclusions		
	• Faire les mesures demandées dans le cadre du projet. • Analyser les performances du système. • Rédiger le rapport de projet. • Rédiger éventuellement une notice d'utilisation.	4	1&2
		Total :30	
REVUE CRITIQUE N°3 : ANALYSE DES PERFORMANCES DU SYSTÈME – RÉSULTATS OBTENUS (15, 16 mai)			

FICHE À REMPLIR PAR LA COMMISSION DE VALIDATION

Système support de l'activité de "réalisation, réglage, mise au point" :

Système de codes à barres.

Ce thème est proposé à : 1 2 3 4 étudiant(s)

- L'organisation prévisionnelle, dans l'espace et dans le temps, - la description des tâches confiées à chaque étudiant, - leurs relations en vue de la "réalisation ..." que l'on se propose d'atteindre sont décrites de façon :	<input checked="" type="checkbox"/> CORRECTE <input type="checkbox"/> PARTIELLE <input type="checkbox"/> INSUFFISANTE
Le "contrat pédagogique" passé avec chaque étudiant fait apparaître à travers les tâches qui lui sont confiées les capacités à atteindre et les connaissances qui leur sont associées de façon :	<input checked="" type="checkbox"/> EXPLICITE et UNIVOQUE <input type="checkbox"/> DIFFICILE à INTERPRÉTER <input type="checkbox"/> INSUFFISANTE

LE THÈME EST : VALIDE À MODIFIER REJETÉ

ÉLÉMENTS D'APPRECIATION DE LA COMMISSION :

DÉFINIR AVEC PRÉCISION LES MODIFICATIONS DEMANDÉES

Fait à Levallois, le 27, 28 novembre 2002

LES MEMBRES DE LA COMMISSION D'APPROBATION

Nom	Spécialité	Établissement	Signature
DENAVEAUT	Info. Ind.	Lycée Gustave Eiffel	<i>[Signature]</i>
DIVEL	Y	L. Eiffel	<i>[Signature]</i>
LAPORTE JC	Meca	L. "	<i>[Signature]</i>

Interférométrie de speckle

Cette technique a été inventée dans les années 1970 pour pallier les insuffisances de l'holographie dans le domaine de l'interférométrie en ce qui concerne le milieu d'enregistrement (en général des plaques et films argentiques puis des films thermoplastiques). Contrairement à l'interférométrie holographique classique, l'interférométrie de speckle permet l'utilisation de caméras CCD pour calculer et visualiser le champ des déplacements d'un objet diffusant. Elle s'est notamment développée en Grande-Bretagne avec A.E. Ennos, J.A. Leendertz, J.N. Butters, J.M. Burch et E. Arnold.

Elle est très adaptée aux applications industrielles (appareils plus compacts et facilement transportables, coûts plus faibles, traitement numérique des données en temps quasi réel ...) et s'est donc beaucoup développée ces dernières années au point de remplacer progressivement les systèmes de contrôles non destructifs holographiques existant dans les grandes sociétés notamment, et cela malgré des performances qui sont loin d'égaliser celles de l'interférométrie holographique comme la résolution spatiale, la taille de l'objet analysé et la possibilité d'avoir une image 3D de cet objet, par exemple. Les caméras CCD ont une résolution faible (6 mm au mieux aujourd'hui) comparée à celle des plaques photographiques argentiques (une fraction de mm) .

Les franges d'interférence créées, comme en holographie, par la superposition de deux ondes cohérentes entre elles devront pouvoir être lues par la caméra électronique, ce qui impose un angle voisin de zéro entre les ondes et une exploitation de l'information différente de l'holographie. Car, en fait, on va exploiter numériquement directement les franges d'interférence alors qu'en holographie on utilise ces franges d'interférence enregistrées sur plaque ou film photographique pour restituer analogiquement l'onde objet. Dans les deux cas, on effectuera des enregistrements pour au moins deux états différents de l'objet (à 2 instants différents) pour accéder à la mesure des déplacements subis par l'objet entre ces deux états.

En interférométrie de speckle, on fera donc l'exploitation numérique des 2 systèmes de franges pour remonter aux déplacements.

En interférométrie holographique, les ondes restituées correspondant aux 2 états de l'objet créent un système de franges d'interférence sur l'image lumineuse 3D de l'objet, franges qui caractérisent le champ des déplacements. Ce sont ces franges qu'il faudra exploiter numériquement pour remonter aux déplacements.

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 1 représente une coupe transversale de ces grains qui sont allongés dans le sens perpendiculaire à la figure.

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

Au niveau microscopique, une surface présente en général des irrégularités de forme (rugosité). Quand une surface de ce type est éclairée par de la lumière cohérente, l'onde diffusée subit des variations de chemin optique supérieures à la longueur d'onde de la source donc un déphasage aléatoire à cause de la différence de chemin optique liée à la micro-rugosité. On suppose que la longueur de cohérence de la source laser est plus grande que les variations du chemin optique (SMH) (figure 3). Les dimensions latérales moyennes des grains sont de l'ordre de :

$$s = \lambda D / \varnothing_D$$

($s = 1,22 \lambda D / \varnothing_D$ pour un diffuseur de diamètre \varnothing_D). Le speckle remplit tout l'espace. Sa dimension longitudinale moyenne a pour expression: $\sigma = 8 \lambda D^2 / \varnothing_D^2$

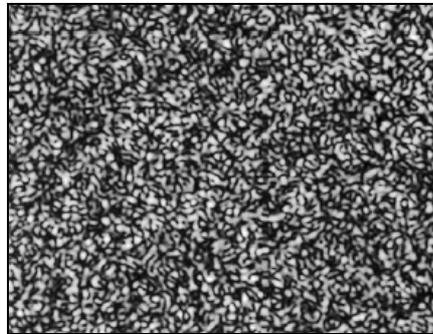
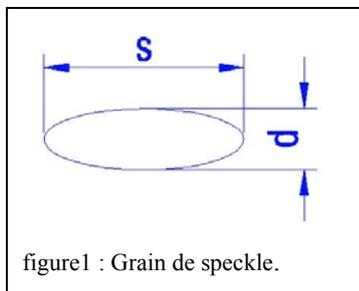


Figure 2 : granularité laser ou speckle

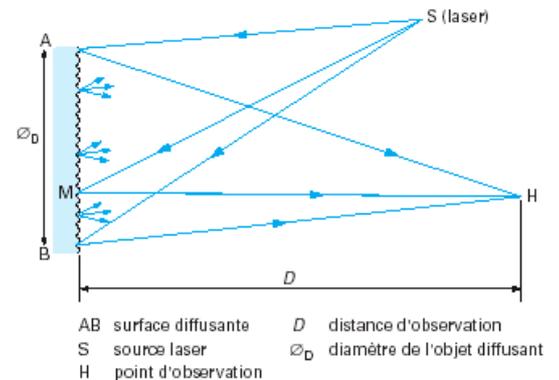


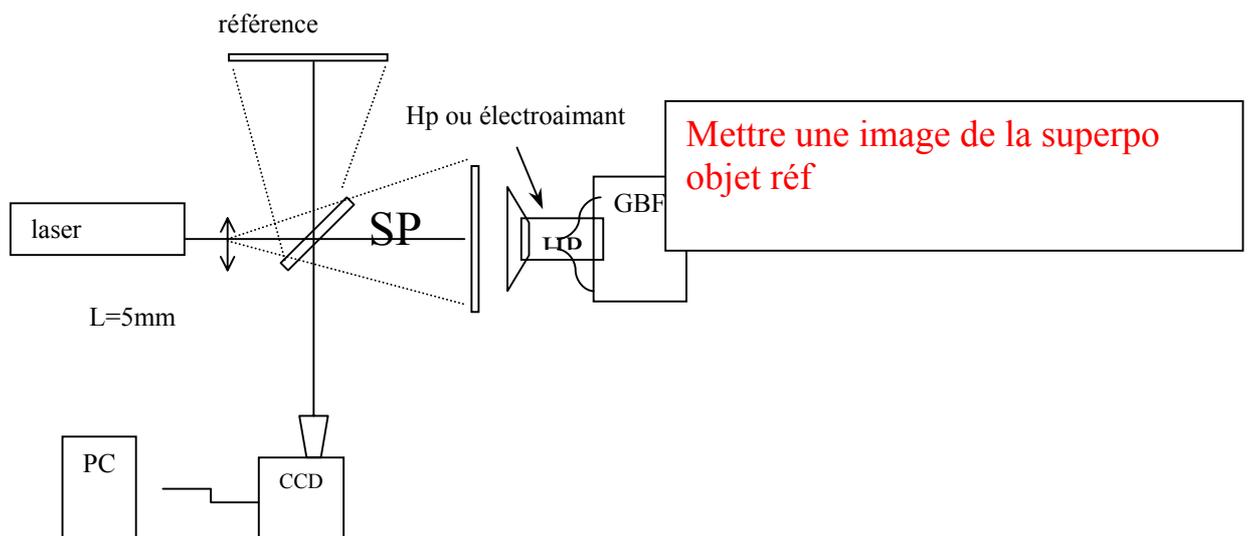
Figure 3 : Speckle sans lentille

Montage étude des modes de vibration

Le montage est du type "interféromètre de Michelson". L'image de l'objet en vibration est superposée au niveau de la caméra avec l'image d'une pièce de référence qui ne bouge pas. L'intensité de la lumière diffusée par la référence doit être du même ordre de grandeur que celle provenant de la pièce observée. Ceci afin d'obtenir des franges d'interférences avec un bon contraste. La différence de longueur des deux bras de l'interféromètre ne doit pas être supérieure à la longueur de cohérence du laser.

Une image est prise quand l'objet est au repos. L'électro-aimant met en vibration l'objet. Le faisceau provenant de source est éclaté par la lame séparatrice qui va ainsi éclairer le plan de référence et l'objet. Les faisceaux difusés par la référence et par l'objet interfèrent et sont renvoyés sur la caméra CCD. La caméra voit les deux images de l'objet et de la référence.

Pour mettre l'objet en vibration on utilise un haut parleur ou un électroaimant relié à un GBF. Grâce au GBF nous pouvons balayer la pièce en fréquence de 0 à 3KHz environ.



Interférence

Chaque grain de speckle de l'objet et de la référence interfèrent. En supposant que la différence de chemin optique d entre les deux bras est nulle le déphasage φ aussi, l'intensité résultante des deux ondes s'écrit:

$$I = 2I_0(1 + m \cos \varphi) \quad \text{où } I_0 \text{ est l'intensité d'une onde individuelle.}$$

Ainsi, l'intensité résultante est comprise entre:

$$I_{\max} = 4I_0 \text{ et } I_{\min} = 0.$$

Lorsque l'objet est en vibration le déphasage φ est une fonction sinusoidale:

$$\delta = 2e \sin(\omega t) \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} * 2e \sin(\omega t)$$

$$\text{on pose } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ et } \varphi_0 = 2ke$$

de période T très inférieur au temps d'intégration de la caméra l'intensité vue par la caméra est donc moyennée.

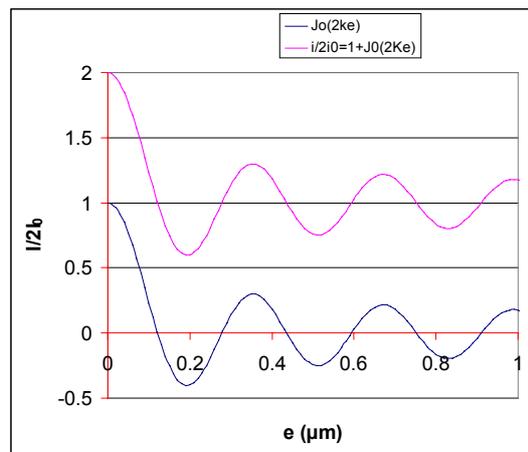
$$\langle I \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T 2 * I_0 * (1 + m * \cos \varphi) dt$$

En faisant le calcul (voir annexe) on aboutit à l'intensité moyenne suivante:

$$\langle I \rangle = 2I_0(1 + m * J_0(2ke))$$

Où J_0 est une fonction de Bessel du premier ordre (voir annexe).

Pour un nœud de vibration: $e=0$ donc l'intensité sera maximale il se produira une frange claire.



Temps Réel

Le fonctionnement en temps réel ne pose aucun problème pour l'étude en laboratoire de phénomènes, comme en analyse vibratoire lorsque l'on étudie des modes de vibration d'objets excités sinusoidalement, par exemple. On compare une intensité de référence $I_{\text{Réf}}$ avec une intensité à un instant donné I_{vib} (soustraction $I_{\text{réf}} - I_{\text{vib}}$). Dans tous les cas, on visualise les phénomènes sous forme de franges d'interférence, mais on ne les quantifie pas.

Quand l'objet est à l'arrêt, on prend l'image de référence dont l'intensité lumineuse d'un point de l'image est: $I_{\text{réf}}=2I_0 (1+m \cos 0)$; $I_{\text{réf}}=2I_0 (1+m)$
On met l'objet en vibration l'intensité lumineuse d'un point de l'image devient:

$$I_{\text{vib}}=2I_0 (1+mJ_0(2ke))$$

En temps réel c'est à dire en permanence le programme effectue chaque période (temps d'intégration de la caméra) une soustraction de l'intensité de l'image de référence $I_{\text{réf}}$ avec l'intensité de l'image de l'objet en vibration I_{vib} , et la multiplie par une constante appelée gain, remet cette intensité exprimée en niveau de gris dans un intervalle $[0;255]$ et l'affiche dans une image à l'écran.

$$I = I_{\text{réf}} - I_{\text{vib}} = 2I_0 (1+m) - 2I_0 (1+mJ_0(2ke))$$

$$I = 2I_0 (1 - J_0(2ke))$$

En soustrayant les deux quantités précédentes, on obtient la valeur des $\Delta\phi$, c'est-à-dire les variations de phase dues aux déplacements dans le plan dans la direction x.
Pour un nœud de vibration $e=0 \rightarrow J_0(2ke)=1 \rightarrow I=2I_0 (1-1)=0$
Donc un nœud apparaîtra en sombre.

```

Void CtemReDlg::OnTimer (Unit nIDevent)
{
short i j;
lon w;
m_sNb.Format("%d",m_iNb);
// Acq. D'une image dans m_ps
if (m_pApp->m_OkCarte) m_ps->AcqPerm();
if (m_pApp->m_OkCarte) m_ps->FigerAcq ();
//On soustrait cette image à la référence et on la multiplie par le gain
for (i=m_ps->image->stx;i<=m_ps->image->endx;i++)
{
    for (j=m_ps->image->sty; j<=m_ps->image->endy;j++)
    {

```

```

        w=abs (getpixelcolor(m_ps->image,I,j) - getpixelcolor(m_pApp->imt[0],i,j));
        w=w*m_iGain;
        if (w<255) w=255;
        setpixelcolor (m_pd->image,i,j,w);
    }
}
UpdateData (FALSE);
// m_pd->UpdateAllViews (NULL);
m_pd->m_pViewMAJ_Fen();
Cdialog::OnTimer (nIDEvent);
}
//
void CtemReDlg::OnAcqref()
{
    if (m_OKP)
    {
        //La première fois
        m_OKP=FALSE;
        //Création fenêtre destination
        PremiereFois();
        SetTimer(1,300,NULL);
    }
    //ACquisition d'une référence
    m_iNb=0;
    m_ps->AcqPerm();
    m_ps->FigerAcq ();
    //l'image est maintenant dans m_ps->image;
    //On la copie dans la référence
    copyimage (m_ps->image,m_pApp->imt[0]);
}
//
void CtemReDlg::OnChangeGain()
{
    //vérification de la validité du changement de gain
    int i,j;
    if (m_sGain.GetLenght(>0)
    {
        j=sscanf(m_sGain,"%d",&I);
        if (j==0)
            m_iGain=1;
        else
            m_iGain=abs(i);
        m_sGain.Format("%d",m_iGain);
    }
    else
    {
        m_iGain=1;
        m_sGain="1";
    }
    UpdateData (FALSE);
}

```

Explication: Pour tous les pixels de l'image de référence et de l'objet en vibration, nous prenons la luminance en ces points. Puis nous soustrayons ces deux luminances. la luminance résultante est multipliée par un gain , remise dans l'intervalle [0;255] et affichée à l'écran.

Temps moyenné à 2 images déphasées de π

On utilise la méthode décalage de phase, nous l'implémentons à l'aide d'un actionneur piézo-électrique intercalé dans le chemin de l'onde de référence. Il est nécessaire d'établir une relation entre la tension appliquée au cristal piézo-électrique (et le déplacement de l'objet de référence) et la variation de phase introduite dans le bras sur lequel il est situé. Ce dispositif introduit donc un déphasage supplémentaire entre l'onde objet et l'onde de référence noté:

$$\Delta\varphi_{o-r}$$

L'expression de l'intensité pour une image devient:

$$\langle I \rangle = 2 * I_0 * [1 + m * \cos(\Delta\varphi_o - r * J_0(2ke))]$$

En appliquant, pour deux images successives, des déphasages:

$$\Delta\varphi_{o-r} = 0, \pi$$

L'intensité lumineuse d'un point de l'image est:

$$I_0 = 2I_o(1 + mJ_0(2ke))$$

$$I_\pi = 2I_o(1 - mJ_0(2ke))$$

le programme effectue la différence **absolue** d'intensité en chaque point de la surface étudiée et la multiplie par une constante appelée gain, remet cette intensité exprimée en niveau de gris dans un intervalle [0;255] et l'affiche dans une image à l'écran.

$$I = |I_0 - I_\pi| = 2mJ_0(2ke)$$

On obtient ainsi sur l'image la valeur du déphasage.

Programme informatique

```
void CtemMoDlg::OnTimer(UNIT nIDEvent)
{
    short i,j;
    long w,w1;
    float r;
    if (m_OkBusy==FALSE)
    {
        m_OkBusi=TRUE;
        m_iNb++;
        if (m_iNb<= m_iMoy)
        {
            m_sNb.Format("%2d/%2d",m_iNb,m_iMoy);
            UpdateData (FALSE);
            //Déphaseur sur 0V
            m_pPiezo->Tension(0);
            Sleep (50);
        }
    }
}
```

```

//Déphaseur sur la tension correspondante à  $\varphi=0^\circ$ 
m_pPiezo->Tension(m_iU0);
Sleep (50);
if (m_pApp->m_OKCarte) m_ps->AcqPerm();
if (m_pApp->m_OKCarte) m_ps->FigerAcq();
//copie dans l'image temporaire n°0
copyimage(m_ps->image,m_pApp->imt[0]);

//Déphaseur sur la tension correspondante à  $\varphi=180^\circ$ 
m_pPiezo->Tension(m_iU180);
Sleep (50);
if (m_pApp->m_OKCarte) m_ps->AcqPerm();
if (m_pApp->m_OKCarte) m_ps->FigerAcq();
//Calcul de l'image temps myonné
for (i= m_ps->image->stx ; i<= m_ps->image->endx ; i++)
{
    for (j= m_ps->image->sty ; j<= m_ps->image->endy ; j++)
    {
        //Soustraction image  $0^\circ$ - image  $180^\circ$ 
        r = getpixelcolor(m_pApp->imt[0],i,j) - getpixelcolor(m_ps-
>image,i,j);

        //Soustraction absolue
        r=fabs(r);
        w=(long)r;
        w1= getpixelcolor(m_pApp->imt[1],i,j);
        w1=w1+w;
        //on met la somme dans image temporaire n°1
        stepixelcolor(m_pApp->imt[1],i,j,w1);
    }
}
else
{
//Calcul de la moyenne sur m_iMoy images
for (i= m_ps->image->stx ; i<= m_ps->image->endx ; i++)
{
    for (j= m_ps->image->sty ; j<= m_ps->image->endy ; j++)
    {
        getpixelcolor(m_pApp->imt[1],i,j);
        r=1.0*w1*m_iGainm_iMoy;
        if (r<255) r=255;
        w=(long)r;
        stepixelcolor(m_pd->image,I,j,w);
    }
}
m_pd->m_pView->MAJ_Fen():
m_iNb=0;
}
m_OKBusy=FALSE;
}
Cdialog::OnTimer (nIDEvent);
}

```

Temps moyenné à 4 images

On utilise la méthode décalage de phase, nous l'implémentons à l'aide d'un actionneur piézo-électrique intercalé dans le chemin de l'onde de référence. Ce dispositif introduit donc un déphasage supplémentaire entre l'onde objet et l'onde de référence noté:

$$\Delta\varphi_{o-r}$$

L'expression de l'intensité pour une image devient:

$$\langle I \rangle = 2 * I_o * [1 + m * \cos(\Delta\varphi_o - r * J_o(2ke))]]$$

En appliquant, pour quatre images successives, des déphasages:

$$\Delta\varphi_{o-r} = 0; \frac{\pi}{2}; \pi; \frac{3\pi}{2}$$

On obtient les expressions:

$$\begin{aligned} I_0 &= 2I_o [1 + m \cos(J_o(2ke))] \text{ déphasage de } 0: e^{i0} = +1 \\ I_1 &= 2I_o [1 - m \sin(J_o(2ke))] \text{ déphasage de } \pi/2 \\ I_2 &= 2I_o [1 - m \cos(J_o(2ke))] \text{ déphasage de } \pi: e^{i\pi} = -1 \\ I_3 &= 2I_o [1 + m \sin(J_o(2ke))] \text{ déphasage de } 3\pi/2 \end{aligned}$$

Le programme informatique calcule et affiche à l'écran une nouvelle image qui fait apparaître les franges de vibration, dont l'intensité est:

$$I = \sqrt{(I_0 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}$$

En faisant les calculs on obtient:

$$I = 4I_o m |J_o(2ke)|$$

On obtient ainsi sur l'image la valeur du déphasage.

Programme informatique

```
void CtemMo1Dlg::OnTimer(UNIT nIDEvent)
{
    float r;
    short i,j;
    long w;
    if (m_ OkBusy==FALSE)
    {
        m_ OkBusi=TRUE;
        //Acquisition image 0°
        m_ps->AcqPerm();
        m_pPiezo->Tension(0);
        Sleep(50);
        m_ps->FigerAcq();
        copyimage(m_ps->image,m_pApp->imt[0]);
    }
}
```

```

//Acquisition image 90° _____
m_ps->AcqPerm();
m_pPiezo->Tension(m_iU2);
Sleep(50);
m_ps->FigerAcq();
copyimage(m_ps->image,m_pApp->imt[1]);
//Acquisition image 180° _____
m_ps->AcqPerm();
m_pPiezo->Tension(m_iU3);
Sleep(50);
m_ps->FigerAcq();
copyimage(m_ps->image,m_pApp->imt[2]);
//Acquisition image 270° _____
m_ps->AcqPerm();
m_pPiezo->Tension(m_iU4);
Sleep(50);
m_ps->FigerAcq();
copyimage(m_ps->image,m_pApp->imt[3]);

//Calcul image phasée formule internet _____
for (i= m_ps->image->stx ; i<= m_ps->image->endx ; i++)
{
    for (j= m_ps->image->sty ; j<= m_ps->image->endy ; j++)
    {
        r=pow(pow(getpixelcolor(m_pApp->imt[0],i,j) -
getpixelcolor(m_pApp->imt[2],i,j),2) + pow(getpixelcolor(m_pApp->imt[1],i,j) -
getpixelcolor(m_pApp->imt[3],i,j),2),0.5);
        r=r*m_iGain;
        if (r>255) r=255;
        w=(long)r;
        setpixelcolor(m_pd->image,I,j,w);
    }
}
m_pd->m_pView->MAJ_Fen();
m_iNb++;
m_s.Format("(%d)",m_iNb);
UpdateData (FALSE);
m_OkBusi=FALSE;
}
CDialog::OnTimer(nIDEvent);
}

```

Etalonnage tension du déphaseur correspondant à un déphasage de 90°

Le translateur piézo-électrique RS232 permet de faire varier le chemin optique δ donc le déphasage φ du faisceau de référence et d'obtenir des images déphasées.

L'objet ne vibrera pas mais sera déformé au moyen d'un micromètre.

Un fois le montage réalisé, dans le logiciel visulm météo on se met en acquisition en temps réel. En agissant sur le micromètre on provoque environ 5 franges.

L'alimentation du déphaseur étant branchée et en mode manuelle, si on modifie la tension, on observe un déplacement des franges.

On applique une tension de $V_0=200V$, on la position d'une frange sombre, puis on recherche l'augmentation ΔV de la tension du piézo qui amène la frange sombre suivante à la place de la frange sombre précédente de départ (décalage de phase de 2π ou 360°).

La tension ΔV correspond à un décalage de phase de 2π .

La tension ΔV correspond à un décalage de phase de π est $\Delta V_\pi = \Delta V/2$.

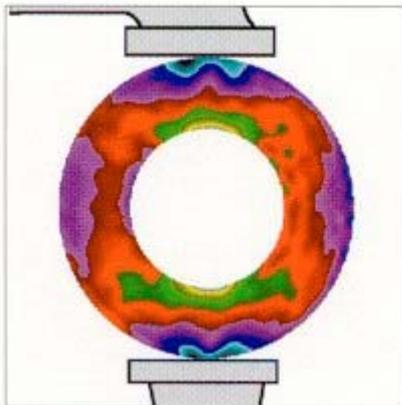
La mesure de déformation



Y a-t-il risque de rupture ?

Comment détecter les parties fragiles d'une pièce ou d'un ensemble mécanique complet dans les conditions réelles de fonctionnement ?

Comment contrôler la bonne tenue géométrique d'un assemblage ? ...



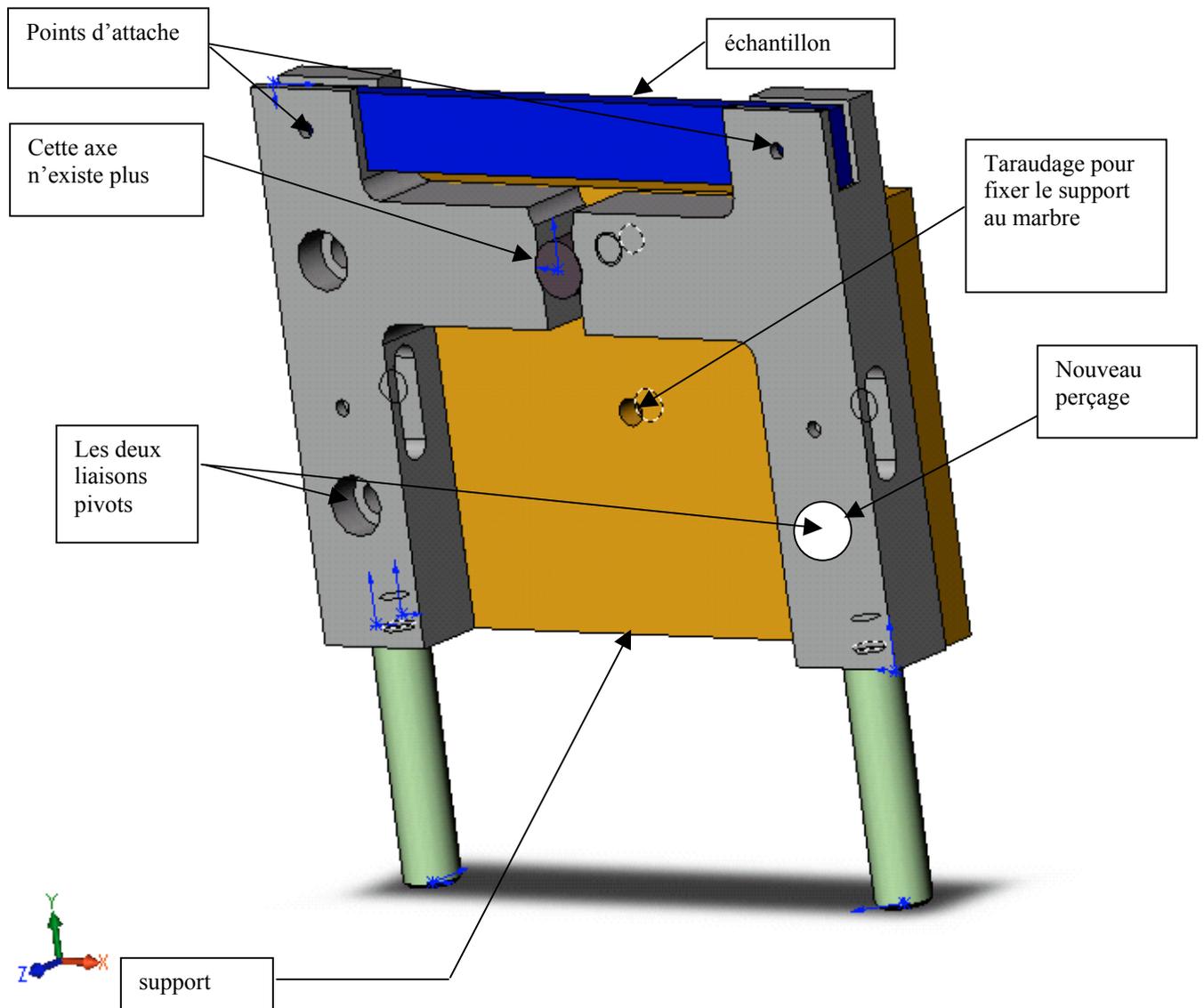
Mesure de déformation

Une simple visualisation et une quantification en temps réel de la déformée de la pièce au fur et à mesure qu'une sollicitation est appliquée, permet d'identifier instantanément les zones de faiblesse de celle-ci.

- Etude de la tenue mécanique d'une structure
- Validation de codes de calcul
- Concentration des contraintes
- Etude de loi de comportement de matériaux

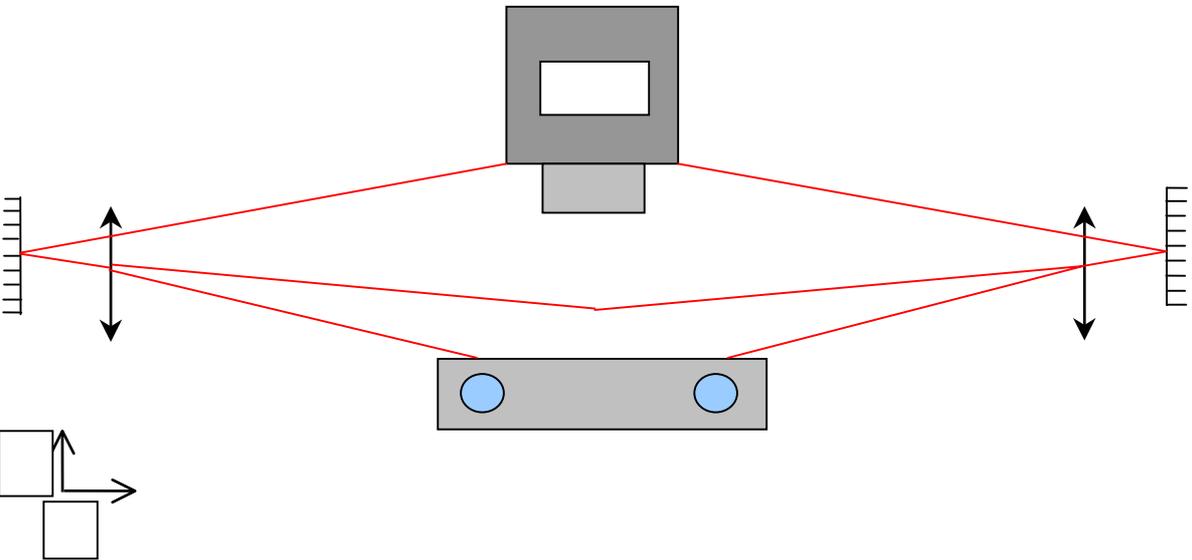
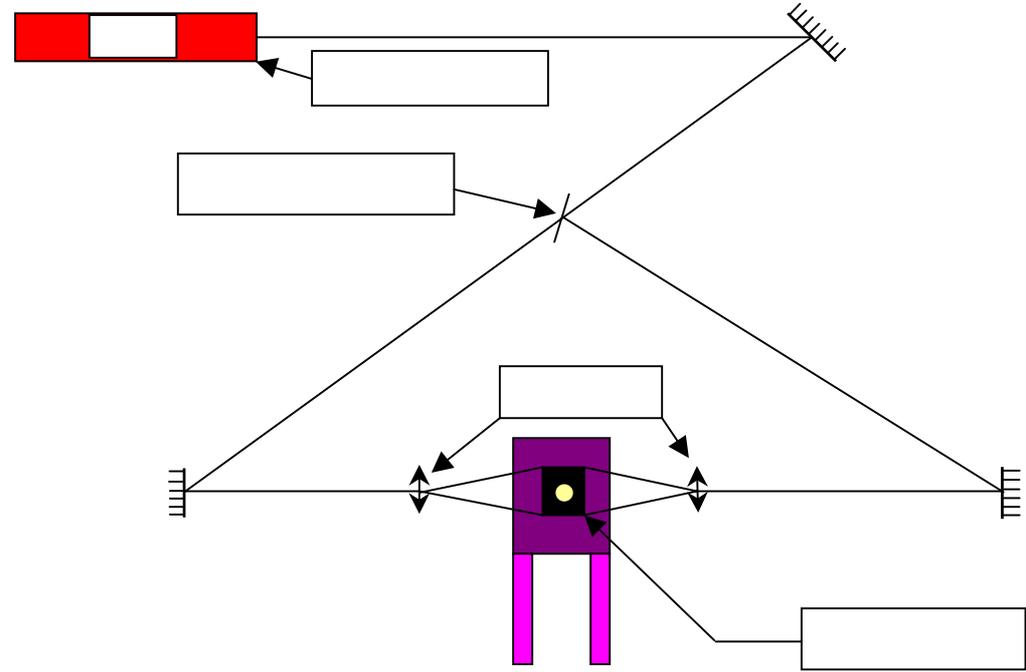
Un des buts de notre projet était de créer un système de contrainte pouvant effectuer traction, compression et flexion.

L'idée de départ s'adapte sur le principe du photoélasticimètre ou la traction et la flexion sont déjà adaptées. Le dessin ci-dessous représente notre système. Seulement des modifications y ont été apportés à cause de problèmes d'isostatisme.



Ce système de mise sous contrainte à la base permet la compression la traction et la flexion. Le modèle ci-dessus représente la traction. Nos premiers essais nous montre des résultats en traction et en flexion mais difficilement en compression dû à la difficulté gérer l'état dans lequel le matériau va se comprimer.

Montage optique de la mesure de déplacement dans le plan par ESPI :



- Différence de marche nul
- même intensité
- éclairement rasant

Interférométrie de speckle : mesure des déplacements dans le plan

Principe

L'objet est éclairé en lumière laser parallèle de façon symétrique. Un objectif photographique L forme de l'objet une image sur un support photosensible H (film ou plaque photographique, caméra CCD, le plus souvent).

Si l'on ne considère que l'éclairage 1, on observe un speckle déterminé. Avec l'éclairage 2 seul, on observe un autre speckle.

Si on éclaire l'objet **simultanément** avec les deux éclairages, les deux figures de speckle interfèrent. Elles sont superposées à la surface de l'objet en l'absence de déplacement. En présence d'un déplacement dans le plan D_x , les deux figures de speckle sur l'objet se décalent de la même quantité. Si ce déplacement D_x est inférieur à la dimension latérale s du grain de speckle rapporté dans le plan objet, les grains de speckle de chaque figure sont encore partiellement superposés et interfèrent. La différence de chemin optique provoquée par ce décalage D_x a pour valeur $2 D_x \sin q$.

Il y a maximum de lumière lorsque la phase est égale à un nombre entier de fois 2π et un minimum pour un nombre impair de fois π :

$$D_j = 2\pi D d / l = k \times 2\pi, \text{ respectivement } (2k + 1)\pi$$

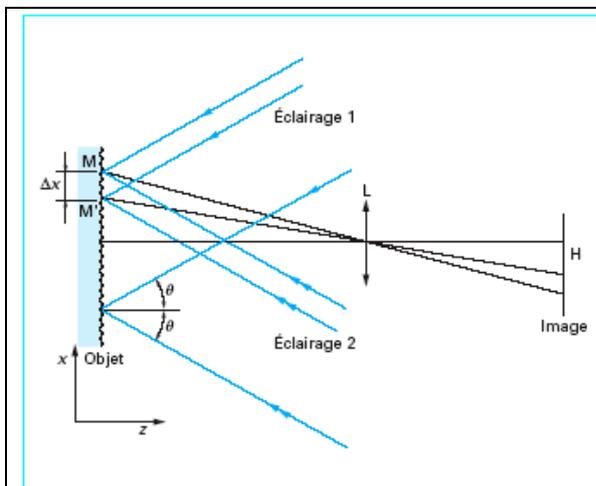


Figure 6 - interférométrie de speckle à éclairages symétriques

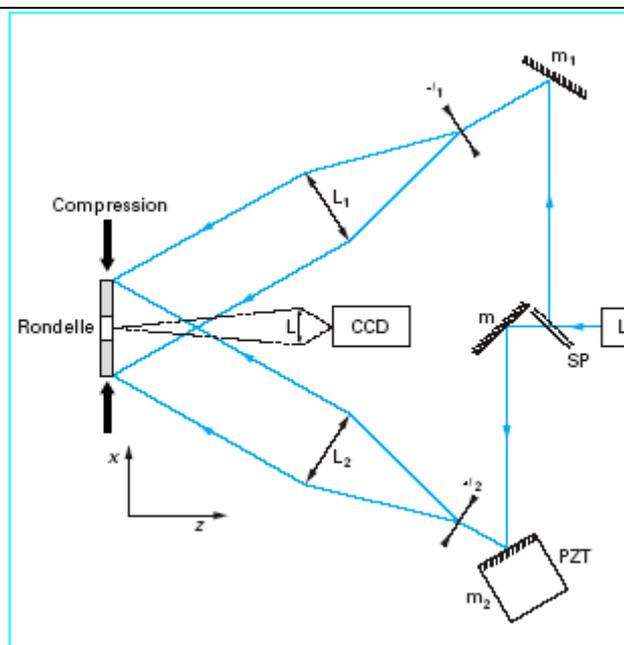


Figure 7 - Mesure quantitative des déplacements dans le plan. Principe du montage expérimental

ou bien :

$$D d = k l, \text{ respectivement } (2k + 1) l / 2.$$

Les franges d'interférence brillantes sont donc caractérisées par la relation :

$$2 D_x \sin q = k l$$

avec l longueur d'onde du laser, k nombre entier.

Ces franges sont les lignes d'égal déplacement dans le plan dans la direction x .

En modifiant le montage (éclairages dans le plan (y, z)), on obtient les lignes d'égal déplacement dans le plan dans la direction y .

La dimension latérale du grain de speckle dans le plan image de l'objectif L de focale f et de diamètre \mathcal{A} a pour expression

$$s \gg 1,22 l (1 + g) f / \mathcal{A}, \text{ avec } g \text{ grandissement.}$$

Toujours dans le plan image, le déplacement a pour valeur $g D_x$. La condition de fonctionnement de l'interférométrie (déplacement

inférieur au grain de speckle) s'écrit donc :

$$g D x < 1,22 l(1 + g) f/\lambda$$

Nota : les deux faisceaux d'éclairage interfèrent et donnent sur l'objet de fines franges d'interférence de pas :

$$i = l/2 \sin 2 q,$$

soit pour $q = 45^\circ$ et $l = 0,7$ mm, un pas $i = l/2 = 0,35$ mm.

Ces franges ne sont pas enregistrées, la résolution du système d'observation étant bien trop faible.

Fonctionnement en temps réel

L'interférométrie de speckle que l'on vient de voir fonctionne aussi bien en double exposition (avec laser continu ou avec laser pulsé pour l'étude des déplacements dynamiques) qu'en temps réel. Pour fonctionner en temps réel, on utilise comme support d'enregistrement une caméra CCD. On enregistre d'abord l'intensité de l'image de l'objet au repos (numérisation de l'image). L'intensité numérisée de l'image de l'objet en déformation est comparée à l'intensité numérisée de référence, et cela à la fréquence vidéo de 25 Hz. En fait, on réalise toutes les 40 ms une soustraction de l'intensité de chaque image I avec l'intensité de l'image de référence I_R .

On a :

avec $\Delta\varphi$ différence de phase engendrée par déformation.

On observe en temps réel soit :

ou encore

On a :

$$I_R = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos (\varphi_2 - \varphi_1 + \Delta\varphi)$$

avec $\Delta\varphi$ différence de phase engendrée par la déformation.

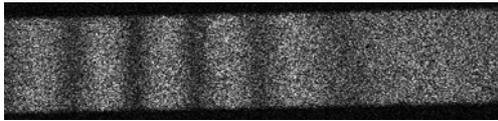
On observe en temps réel $|I - I_R|$ soit :

$$|I - I_R| = 2 A_1 A_2 |\cos (\varphi_2 - \varphi_1 + \Delta\varphi) - \cos (\varphi_2 - \varphi_1)|$$

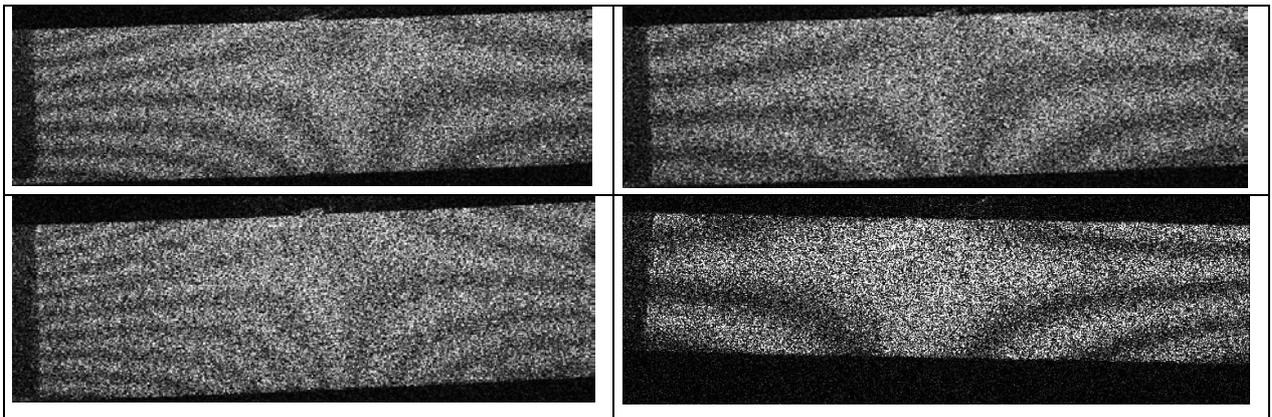
ou encore

$$|I - I_R| = 4 A_1 A_2 |\sin (\Delta\varphi/2) \sin(\varphi_2 - \varphi_1 + \Delta\varphi/2)|$$

Exemple de franges en traction :



Exemple de franges en flexion :



Annexes

Exemple fonction de Bessel premier ordre

