
Les techniques optiques de mesure de champ : essai de classification

Yves Surrel

*Techlab,
4c, la Tannerie
BP 30055
57000 METZ, France
surrel@techlab.fr*

R...SUM... Nous proposons un essai de classement systématique de différentes méthodes de mesure de champs cinématiques. Ce classement est fondé sur les aspects essentiels qui les fondent, en se basant sur un certain nombre de clés (méthode interférométrique ou non, codage aléatoire ou codage en phase, nature du mesurand). L'approche proposée n'est pas la seule possible ; elle n'est probablement pas complètement satisfaisante, mais elle permet néanmoins une vision systématique. Par ailleurs nous présentons les éléments permettant de fonder une démarche réellement métrologique, en rappelant les termes et les concepts fondamentaux de métrologie.

ABSTRACT: We propose a systematic classification of the many different full-field optical measurement techniques. It relies on the essential features of these techniques, and on some basic keys (interferometric or white light method, random or phase encoding of information, nature of the measurand). The proposed approach is not the only conceivable one. It is certainly not fully satisfying, but anyhow introduces a systematic background. Also, we present elements enabling a fully metrological approach of these techniques, after reminding the basic terminology of metrology.

MOTS-CL...S : Corrélacion d'images, grille, phase, moiré, projection de franges, stéréocorrélacion, déflectométrie, interférométrie, holographie, speckle

KEYWORDS: Digital image correlation, grid, phase, moiré, fringe projection, stereocorrelation, deflectometry, interferometry, holography, speckle

1. Introduction

Les mesures optiques [GAS 02, CLO 98] connaissent depuis une décennie un essor considérable dans les domaines du contrôle industriel et de la caractérisation mécanique expérimentale. En particulier, les techniques dites « de champ » (par opposition à : « ponctuelles ») utilisant une ou plusieurs caméras permettent d'avoir accès à des cartographies de grandeurs physiques comme les déplacements, les déformations, les pentes, les courbures ou les coordonnées des points d'une surface. La quantité d'informations quantitatives que délivrent cette classe de méthodes, qui est celle à laquelle nous nous intéresserons dans cet article, est donc très importante, et cela justifie amplement l'intérêt suscité auprès des utilisateurs. Par ailleurs, les techniques optiques sont toujours sans contact et souvent sans préparation de surface, ce qui rajoute à leur intérêt. Finalement, les résultats quantitatifs sont souvent obtenus dans des temps proches de la seconde, ce qui est souvent très compétitif par rapport aux techniques concurrentes. L'exemple le plus frappant à ce niveau concerne la mesure de forme : une technique de mesure par stéréocorrélation d'image ou projection de lumière structurée est incomparablement plus rapide qu'une mesure utilisant une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), et le nombre de points de mesure est supérieur d'un facteur 1000 ou 10 000.

Cependant, un certain nombre d'obstacles sont encore présents pour ralentir une large dissémination de ces techniques. On peut citer les suivants.

– Il existe une certaine méfiance des utilisateurs envers l'utilisation de l'optique, méfiance due en partie à un manque voire une absence de formation initiale en optique, cette discipline étant très peu représentée dans la plupart des formations autour de la mécanique ou des procédés, et en partie à des expériences malheureuses ; par exemple, la vision industrielle qui a été très à la mode ces dernières années s'est révélée certaines fois plus difficile à rendre robuste qu'initialement prévu, principalement à cause de problèmes liés à la qualité de l'éclairage.

– La quantité des informations fournies, mentionnée ci-dessus comme un avantage, peut aussi être ressentie par un utilisateur comme un inconvénient, ou plus précisément comme une inadéquation au problème qu'il se pose ; lors d'un contrôle industriel de qualité, la réponse recherchée est soit binaire (garder/rebuter la pièce contrôlée), soit est une position sur une échelle à peu de niveaux, par exemple : A -> sans défaut, B -> défaut visible par le contrôleur, C -> défaut visible par le client amenant occasionnellement une réclamation, D -> défaut intolérable pour le client amenant à coup sûr réclamation et correction. La mesure optique de champ doit donc souvent s'accompagner d'un *post-traitement* réduisant les centaines de milliers de mesures quantitatives réalisées en un indice interprétable immédiatement. Dans le domaine de l'identification mécanique, le problème est un peu analogue. La mesure des champs cinématiques (déplacements, déformations lors d'un essai) n'est qu'un moyen pour parvenir aux grandeurs recherchées, le plus souvent des propriétés matérielles : modules d'élasticité, d'amortissement, d'endommagement, etc. Un vaste domaine de recherche s'est ouvert ces dernières années, qui est la mise au point de méthodologies permettant d'*exploiter au mieux* les champs de mesures obtenus pour en extraire le maxi-

num d'informations pertinentes. C'est par exemple l'objectif d'un groupement de recherche du CNRS, le GDR 2519 créé en 2003 « Mesures de champs et identification en mécanique des solides », <http://lm3-serveur.paris.ensam.fr/gdr2519>.

– Le dernier obstacle est l'actuelle absence de normalisation pour la plupart des techniques, qui empêche leur utilisation dans le cadre d'une assurance qualité.

Dans cet article, nous commençons par rappeler brièvement quelques définitions des grandeurs mécaniques. Ensuite, nous présenterons la chaîne de mesure et enfin une présentation générale des méthodes optiques de champ permettant de les situer les unes par rapport aux autres.

2. Grandeurs mécaniques

2.1. Déplacements et déformations

Il faut bien distinguer la notion de déplacement et celle de déformation, qui est un *gradient* de déplacement. Rappelons que la langue française ne distingue pas entre le *phénomène* de déformation (en anglais : *deformation*), c'est-à-dire le changement de forme sous l'effet d'un chargement, et la grandeur physique *décrivant* localement ce changement de forme (*strain*). À noter que le terme anglais peut faire incorrectement penser au terme français *contrainte* (*stress*), qui décrit le champ de forces internes dans le matériau déformé, et n'est donc pas une notion simplement *cinématique* accessible à la mesure.

En tant que grandeur physique, la déformation doit permettre de mesurer un changement de forme. Lors d'un chargement, chaque point \vec{r} d'un corps déformable va se déplacer. Ce déplacement va être décrit par un *champ de vecteurs déplacement* $\vec{u}(\vec{r})$. Or, le champ de vecteurs déplacement transporte trois informations bien distinctes.

– Il y a d'abord une information sur la *translation d'ensemble* de la zone étudiée ; dans une translation, tous les vecteurs déplacements sont identiques d'un point à un autre : il n'y a pas de *gradient* de déplacement ; le vecteur déplacement moyenné sur l'ensemble d'une zone d'intérêt va donc donner la translation de cette zone.

– Il y a ensuite une information sur la *rotation locale* de la zone étudiée ; lors de cette rotation, il y a un gradient de déplacement (les vecteurs déplacement varient d'un point à un autre), mais ce gradient n'est pas « n'importe comment ». En effet, lors d'une rotation d'un angle $\delta\theta$ autour d'un axe portant le vecteur unitaire \vec{a} , le vecteur déplacement en un point \vec{r} est donné par $\delta\vec{u}(\vec{r}) = \delta\theta\vec{a} \wedge \vec{r} = \underline{\omega}\vec{r}$, où l'on a noté $\underline{\omega}$ l'opérateur linéaire $\delta\theta\vec{a} \wedge$. On peut vérifier facilement que cet opérateur est *antisymétrique*, c'est-à-dire que $\vec{r} \cdot \underline{\omega}\vec{r}' = -\vec{r}' \cdot \underline{\omega}\vec{r}$. La partie antisymétrique du gradient de déplacement est donc liée à un phénomène de rotation.

– Il y a enfin l'information sur la *déformation locale*, liée à la partie symétrique du gradient de déplacement.

De manière générale, on cherche à mesurer la déformation, mais la plupart des méthodes optiques mesurent le déplacement, et non pas la grandeur différentielle qu'est la déformation. Cela nécessitera donc une *dérivation numérique* des déplacements, accompagnée d'un énergique filtrage spatial pour réduire l'augmentation du *bruit de mesure* inhérent à une dérivation numérique. La conséquence de ce filtrage est une dégradation de la résolution spatiale.

La relation différentielle reliant les petites déformations ϵ_{ij} aux composantes du déplacement u_i est :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \quad (1)$$

On peut écrire la matrice des composantes dans un repère orthonormé (x, y) :

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

où l'on a tenu compte de la symétrie $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$. On voit qu'il n'y a que trois composantes indépendantes. On se restreint ici au cas plan puisque les mesures optiques donnent des renseignements en surface.

Les déformations sont sans dimension. Elles sont souvent exprimées en pourcents (%) ou en *microdéformations* (*microstrains*, $\mu\epsilon$). Chacune des composantes du tenseur a une interprétation géométrique : ϵ_{xx} (resp. ϵ_{yy}) est la *dilatation linéaire relative* selon x (resp. y) et ϵ_{xy} est le *glissement* ou *déformation de cisaillement*.

La partie antisymétrique du gradient des déplacements donne comme on l'a dit la rotation locale. Cette grandeur est jusqu'à présent très peu employée et l'on n'en parlera pas plus ici.

2.2. Déformations principales, glissement maximal

Le tenseur des déformations est symétrique ; il est donc diagonalisable, c'est-à-dire qu'il existe un repère où les composantes non diagonales, donc les glissements, sont nulles. Les directions de ce repère sont les *directions principales de déformation*.

Plus généralement, quand on change de repère, les composantes du tenseur des déformations changent. Il existe un repère où la valeur du glissement passe par un maximum : c'est le *glissement maximal*.

La photoélasticimétrie mesure ce glissement maximal (les *franges isochromatiques* sont les lignes d'isovaleur du glissement maximal), et donne également accès aux directions principales de déformations, par les franges isoclines. Ce glissement maximal a une importance particulière pour le mécanicien car la contrainte associée (contrainte de cisaillement maximal, ou *contrainte de VON MISES*) est une *grandeur dimensionnante*, c'est-à-dire une grandeur à prendre particulièrement en compte lors de la conception des structures. En effet, les phénomènes de rupture ou de ruine sont souvent induites lorsque cette contrainte dépasse la valeur limite que le matériau peut

supporter, appelée *résistance au cisaillement* (*shear strength*). Très souvent, les logiciels d'analyse numérique des structures par éléments finis représentent le résultat de leurs calculs sous la forme de cartes d'isovaleurs de la contrainte de VON MISES. Les valeurs numériques attachées à chaque point correspondent donc à des contraintes de cisaillement dans des repères dont l'orientation varie en général d'un point à un autre.

2.3. Pentas et courbures

La mesure optique ne pourra avoir accès qu'à des informations de surface. Si l'on appelle x et y les coordonnées dans le plan tangent de la surface qui se déforme, les coordonnées u_x et u_y du déplacement vont permettre d'avoir accès à la partie plane du tenseur de déformation.

Certaines mesures optiques permettent de mesurer le déplacement hors-plan, donc la composante u_z . Dans l'hypothèse où l'état initial de la surface est plan ($z = 0$ partout), la forme de la surface dans l'état déformé est donnée par la fonction $z(x, y) = u_z(x, y)$.

Les dérivées de $z(x, y)$ selon x et y donnent accès à la pente locale suivant x et y , θ_x et θ_y respectivement :

$$\begin{cases} \theta_x &= \frac{\partial z}{\partial x} \\ \theta_y &= \frac{\partial z}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

Si l'état initial n'est pas plan, on raisonne sur la modification de forme $z_{\text{final}} - z_{\text{initial}} = u_z$.

Lors d'un essai de flexion (essai sur plaque mince ou sur membrane), on s'intéresse en fait au *gradient* de la pente, car la pente locale ne renseigne pas sur le phénomène de déformation. Le gradient de la pente est le tenseur d'ordre deux symétrique $k_{ij} = \partial^2 z / \partial i \partial j$. Les termes diagonaux donnent les *courbures* suivant x et y , le terme non-diagonal est la *torsion* :

$$\begin{cases} k_{xx} &= \frac{1}{R_x} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \\ k_{yy} &= \frac{1}{R_y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \\ k_{xy} &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (4)$$

Les *rayons de courbure* sont les inverses des courbures (Fig. 1).

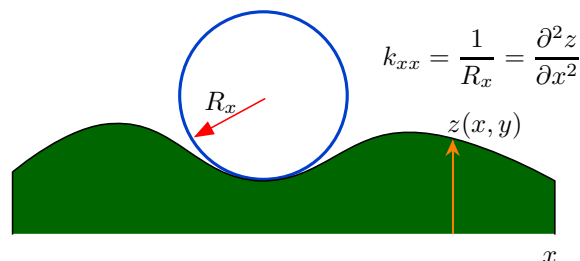


Figure 1. La courbure k_{xx} est l'inverse du rayon de courbure R

De la même manière que pour le cisaillement dans le cas plan, il y a un repère où la torsion est nulle. Dans ce repère, les courbures sont les courbures *principales*. Le repère principal du tenseur des courbures n'a aucune raison d'être confondu avec le repère principal des déformations planes.

La notion de courbure principale est familière aux opticiens ; un dioptre est en effet caractérisé par ses deux courbures principales (il y a *astigmatisme* si elles sont différentes) et l'orientation des axes portant ces deux courbures.

3. Chaîne de mesure, bruit, aspects métrologiques

3.1. Description de la chaîne

La chaîne de mesure (Fig. 2) qui permet d'obtenir des grandeurs cinématiques à partir d'images acquises avec une caméra comporte un grand nombre d'éléments. Chaque élément peut avoir des répercussions sur la qualité des mesures et introduire des erreurs systématiques (exemple : distorsion non corrigée d'objectif de caméra), un filtrage de fréquences spatiales (exemple : formation d'images) ou temporelles, et/ou du bruit. Pour une analyse convenable des incertitudes de mesure, il est nécessaire d'analyser chaque étape et de faire ensuite le bilan global des incertitudes. Sur la Fig. 2, nous faisons en particulier apparaître le fait qu'à la plupart des étapes correspondent des analyses établies depuis fort longtemps. On sait par exemple parfaitement quel est l'effet de l'optique de formation d'image sur le contenu spectral spatial de l'image, ou encore l'effet de l'échantillonnage spatial sur ce même contenu fréquentiel.

Les notions de codage en phase ou de codage aléatoire sont explicitées dans la suite de cet article.

3.2. Bruit, résolution, répétabilité

Le bruit peut être caractérisé élément par élément (par exemple au niveau de la caméra et de l'acquisition), ou globalement en faisant simplement la différence de

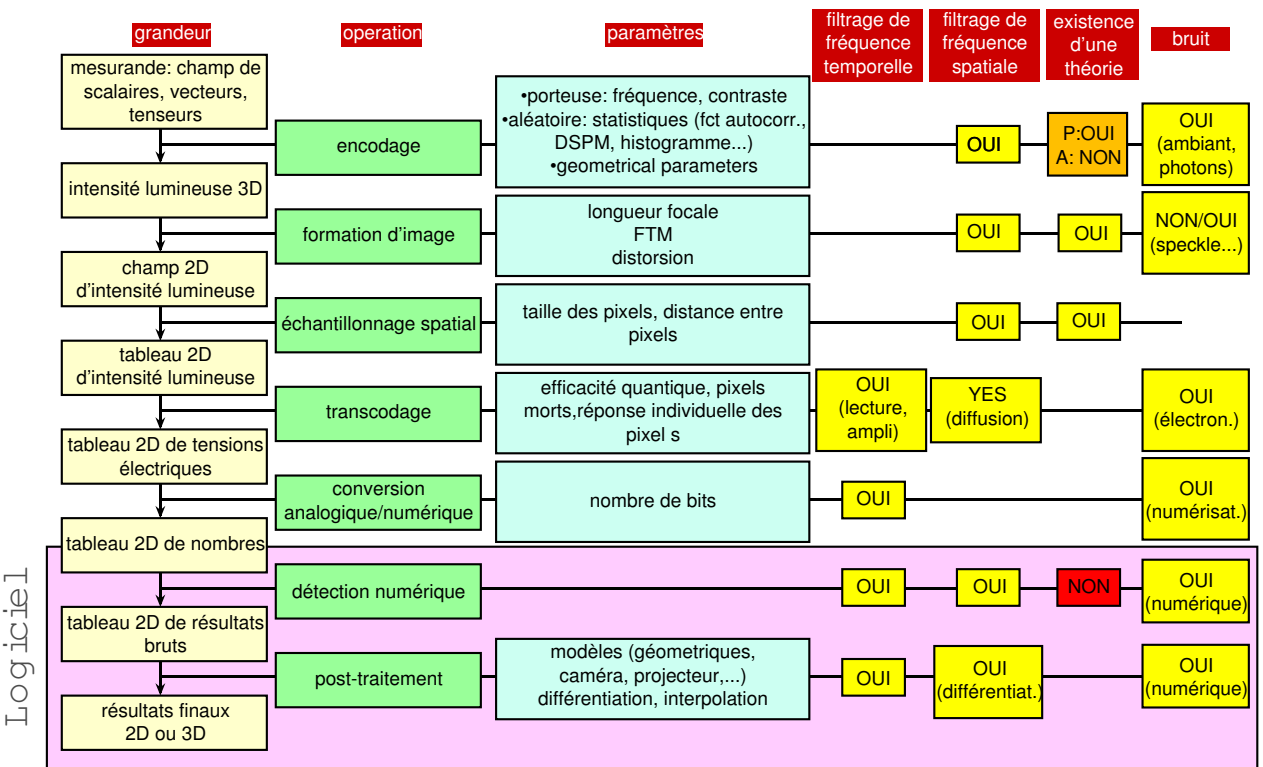


Figure 2. Éléments de la chaîne de mesure. DSPM = densité spectrale de puissance moyenne; FTM = fonction de transfert de modulation; A = codage aléatoire, P = codage en phase

deux mesures successives indépendantes $m_1(i, j)$ et $m_2(i, j)$ sur une scène statique (i et j sont les indices de ligne et de colonne du tableau de résultats), et en soustrayant les mesures. En appelant le signal $s(i, j)$ et le bruit $b_k(i, j)$, $k = 1, 2$, la résultante $\Delta m(i, j)$ de la soustraction est :

$$\Delta m(i, j) = [s(i, j) + b_2(i, j)] - [s(i, j) + b_1(i, j)] = b_2(i, j) - b_1(i, j) \quad (5)$$

On obtient donc la différence de deux bruits indépendants dont la variance est :

$$\sigma_{\Delta m}^2 = \sigma_{b_1}^2 + \sigma_{b_2}^2 = 2\sigma_b^2 \quad (6)$$

en supposant, ce qui est justifié, les statistiques des bruits b_1 et b_2 identiques, en particulier leur variance σ_b^2 . L'écart-type σ du bruit de mesure est donc :

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{\Delta m}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

La variance obtenue permet de chiffrer la *résolution* de la mesure, à savoir la plus petite variation mesurable du mesurande. On peut convenir de caractériser cette résolution par l'écart-type du bruit de mesure : on dit alors que l'on commence à voir une variation du mesurande lorsque celle-ci « sort » du bruit. On rejoint ici des notions classiques en thermographie par exemple, où les caméras sont caractérisées par le NETD, *noise equivalent temperature difference*, qui est précisément la variation de température correspondant à un écart-type du bruit de sortie. On retrouve également cette approche pour la caractérisation des amplificateurs avec le NEP, *noise equivalent power*, puissance (de signal) équivalente au bruit.

À noter que notre définition de la *résolution* s'écarte de celle du Vocabulaire international de la métrologie (VIM) [ISO95]. En effet, dans ce document, le terme résolution concerne les afficheurs. La résolution telle que nous la présentons correspond dans le VIM au « seuil de détection » (*discrimination threshold*).

Sur le plan pratique, la caractérisation de la résolution par l'écart-type du bruit est très facile à réaliser, et est un renseignement fondamental sur la qualité de la mesure. *Aucun résultat ne devrait être présenté sans l'indication de la résolution.*

La caractérisation de la résolution telle que présentée dans cette section correspond également à ce qu'on appelle une étude de *répétabilité* [ISO95], consistant à évaluer la dispersion de résultats lors de la répétition d'une mesure en laissant l'ensemble des paramètres le plus invariant possible (même montage, même lieu, même opérateur, temps minimal entre mesures, etc. . .).

3.3. Résolution spatiale

Le deuxième point essentiel est la *résolution spatiale*. De la même manière qu'en théorie de la formation des images, celle-ci peut-être définie à partir de la fréquence de coupure spatiale. Un champ de mesurandes peut-être décomposé en fréquences

spatiales par transformée de FOURIER. Le système de mesure va être capable de capter ces fréquences jusqu'à un certain point : il y aura une fonction de transfert globale de la mesure. C'est bien pour cela que l'on a fait apparaître sur la Fig. 2 une colonne prenant en compte le filtrage éventuel de fréquences spatiales à chaque étape de la chaîne de mesure. Les fréquences les plus élevées, correspondant aux gradients importants, ne seront pas vues au-delà d'une certaine *fréquence de coupure* f_c . La résolution spatiale Δx peut-être définie par :

$$\Delta x = \frac{1}{f_c} \quad (8)$$

Une étape essentielle et très fréquente qui a un impact sur la résolution spatiale est le post-traitement des mesures. Bien entendu, un *lissage spatial* va diminuer la résolution spatiale, selon les lois bien connues en traitement du signal, l'effet d'un lissage (par convolution avec un noyau, par exemple) correspondant à un certain filtrage dans l'espace fréquentiel, que l'on sait caractériser. Là encore, *les caractéristiques des post-traitements réalisés devraient être systématiquement indiqués avec les résultats présentés.*

On est confronté en pratique au choix d'un compromis entre résolution et résolution spatiale : un lissage diminue le bruit (amélioration de la résolution) mais dégrade la résolution spatiale (disparition des gradients).

Signalons que cette approche pour la caractérisation de la résolution spatiale est celle suivie par le GDR 2519 cité plus haut, qui l'applique à la caractérisation des logiciels de corrélation d'images.

3.4. Incertitude, reproductibilité

La résolution ne doit en aucun cas être confondue avec l'incertitude de mesure. Sur la Fig. 2, une étape importante est celle indiquée en bas du tableau : le passage de la mesure brute issue de la détection de phase ou de la corrélation (voir ci-dessous, § 4 et 5) au mesurande, par le biais de la prise en compte de la *géométrie* du système de mesure : position relative des éléments du système (lentilles, caméras, points source, projecteurs...) et distorsions des optiques.

Des erreurs dans les paramètres du modèle se traduiront par des *erreurs systématiques* sur le mesurande. L'incertitude de mesure est l'évaluation de la *plage probable* dans laquelle peut se trouver la valeur vraie du mesurande du fait des différentes erreurs de mesure. La composante aléatoire de ces erreurs (pour une géométrie fixée) correspond au bruit de mesure mesurée par la résolution σ_b évaluée lors d'une étude de répétabilité (voir § 3.2). Il faut également évaluer la dispersion possible σ_m des erreurs systématiques liées aux erreurs sur les valeurs numériques des paramètres du modèle géométrique (longueurs, distances focales, angles, etc.). Pour simplifier, nous faisons rentrer dans la notion de « modèle géométrique » d'éventuels post-traitements purement mathématiques comme l'intégration numérique de pentes pour obtenir des cotes. La description de la manière donc la composante σ_m est évaluée renseignera sur

la *reproductibilité* de la mesure, c'est-à-dire son aptitude à être réalisée par un autre opérateur, à un autre endroit, avec un autre matériel.

L'incertitude de mesure à 1 écart-type $u_{1\sigma}$ sera finalement :

$$u_{1\sigma} = \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_m^2} \quad (9)$$

L'incertitude ne saurait donc être inférieure à la résolution. Souvent, la composante de l'incertitude liée au modèle, σ_m , est la part prépondérante. C'est malheureusement aussi celle qui est la plupart du temps la moins bien évaluée (quand elle l'est...).

L'incertitude élargie est égale à l'incertitude multipliée par un coefficient K suffisant pour lui donner le sens d'« intervalle de confiance ». Par exemple, en faisant l'hypothèse d'une répartition gaussienne des erreurs, un coefficient $K = 3$ permet d'assurer que la valeur vraie du mesurande se situe dans l'intervalle d'incertitude $\pm u_{3\sigma} = \pm 3u_{1\sigma}$ avec une probabilité de 99,5 %.

3.5. *Étalonnage, calibrage*

Le terme étalonnage correspond à l'anglais *calibration*. Il désigne « l'ensemble des opérations qui établissent, dans des conditions données, la relation entre les valeurs indiquées par l'instrument ou le système de mesure, et les valeurs correspondantes réalisées par un étalon » [ISO95].

Il faut noter qu'il n'est pas spécifié qu'un étalon soit utilisé de manière directe. Le lien à l'étalon peut être indirect, pourvu que ce lien soit traçable.

Le terme « calibration » n'est pas un terme métrologique en français. Le mot calibrage existe, il correspond à l'anglais *gauging* : opération consistant à fixer la position des repères de l'échelle d'un instrument de mesure, en relation avec la valeur correspondante du mesurande [ISO95].

Dans le domaine des techniques optiques de mesure, il faut se poser la question de la nécessité de l'étalonnage. Un grand nombre de méthodes mesurent soit des déplacements, soit des coordonnées. Il est donc nécessaire de relier les mesures de manière traçable au *mètre*. Mais il est également nécessaire de procéder à l'*identification des paramètres* du modèle géométrique. Certaines procédures d'identification, par exemple en stéréovision, permettent de connaître les paramètres du modèle géométrique à une homothétie près. Il peut être discutable de donner le nom d'étalonnage à de telles procédures, dans la mesure où la géométrie est identifiée à un facteur d'échelle près, et donc indépendamment de l'étalon métrique. Les procédures en question sont souvent basées sur la *redondance* et la *cohérence* de mesures faites sur un objet dont la forme est inconnue mais invariable.

À partir du moment où est introduit dans la procédure un objet dont on suppose connue les dimensions (barre, sphère, etc), on réalise effectivement un étalonnage. L'objet utilisé doit pouvoir être relié de manière traçable au mètre, normalement par une mesure avec un instrument étalonné).

En résumé, il est plus clair de séparer l'*identification* des paramètres du modèle géométrique de l'*étalonnage* proprement dit. Il faut bien sûr spécifier l'objet et la dimension de celui-ci (longueur, rayon, diamètre...) qui permet le raccordement au mètre.

Les systèmes qui mesurent directement des déformations (comme les systèmes basés sur la photoélasticimétrie) posent un problème spécifique. La déformation est une grandeur sans dimension, pour laquelle il n'y a ni définition légale ni étalon. Que signifie alors un étalonnage ? Un champ de déformation est un champ spatial qui caractérise une variation *temporelle* de géométrie, entre un état « avant » et un état « après ». Il est malheureusement extrêmement difficile de réaliser un étalon de déformation, qui permettrait de reproduire un champ de déformation entre deux états. Cette difficulté est d'ordre mécanique : le chargement d'un élément mécanique est trop peu maîtrisé au niveau des conditions aux limites pour pouvoir obtenir de manière fiable et reproductible un champ de déformation. En théorie, un système de mesure de déformation peut se limiter à l'identification des paramètres du modèle géométrique à un facteur d'échelle près. Dans le cas de la photoélasticimétrie, les constantes photoélastiques du matériau doivent être connues ou mesurées d'une manière indépendante. Cela ne fait pas à proprement parler partie de l'étalonnage du système de mesure, c'est la caractérisation du matériau photoélastique.

4. Techniques de mesure non interférométriques

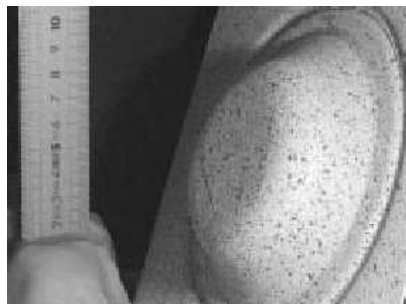
Dans cette famille de techniques, le mesurande est codé dans la variation spatiale d'une intensité lumineuse, variation obtenue d'une manière non interférométrique ; autrement dit, il ne s'agit pas de franges d'interférences. Les aspects optiques sont quelquefois réduits à la prise d'image : une mesure de déplacement par corrélation d'image ou par la méthode de la grille n'a rien de spécifiquement optique dans son concept : c'est le phénomène géométrique (le fait que le mouchetis ou la grille se déforme en même temps que le substrat) qui permet la mesure.

Il y a deux grandes classes de techniques, en fonction de la nature du codage de l'information.

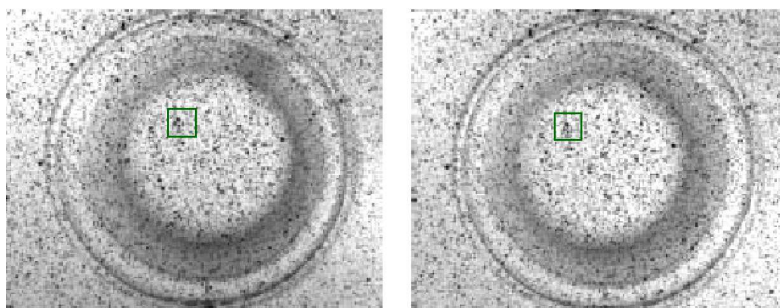
4.1. Codage aléatoire

L'intensité lumineuse est caractérisée par sa variation aléatoire locale, qui joue le rôle d'une signature ; le système de détection devra identifier cette signature pour réaliser une mesure ; on retrouve ici toutes les méthodes de corrélation : corrélation d'images, stéréocorrélation, corrélation de speckle (appelée également photographie de speckle), où le rôle de la lumière laser est simplement de *marquer* la surface.

Le logiciel d'analyse des images enregistrées apparie les points correspondants par *corrélation numérique*. Cette technique peut être utilisée pour des mesures de déplacements plans. Ceux-ci peuvent être causés par un changement de perspective lors de la



(a) Objet à mesurer



(b) Images gauche et droite

Figure 3. *Images stéréoscopiques d'un objet texturé (Doc. J.-J. ORTEU)*

prise de vue. Cela permet de remonter à la forme d'un objet ; c'est la *stéréocorrélation* (Fig. 3).

4.2. Codage périodique

Le mesurande est codé à travers la modulation d'un signal périodique, plus précisément par la modulation de la phase d'une porteuse spatiale (ex : traits d'une grille modulés par le déplacement du substrat, Fig. 4) ou temporelle (source modulée).

Le logiciel d'analyse des images enregistrées détecte cette modulation de phase. De la même manière que précédemment, cette technique permet de mesurer des déplacements plans, réels ou apparents, comme les déplacements induits par une observation oblique d'un objet illuminé par des franges (Fig. 5, projection de lumière structurée), les distorsions d'un objectif ou les défauts de courbure d'une surface (Fig. 6, déflectométrie).

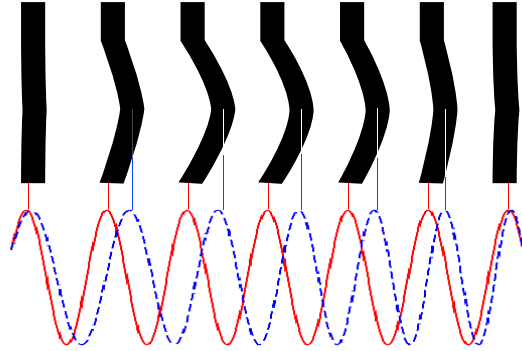


Figure 4. Modulation de la phase d'une porteuse spatiale par un champ de déplacement apparent

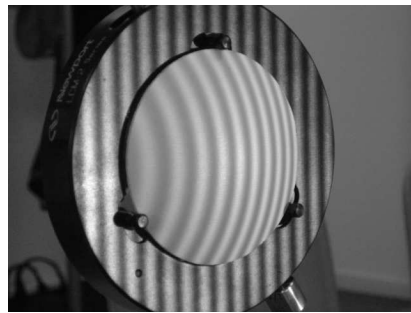


Figure 5. Distorsion des franges par le relief : mesure de forme par projection de lumière structurée.



Figure 6. Déformation d'une structure périodique par les courbures locales. Le contrôle déflectométrique de la qualité de surface ONDULO est basé sur cet effet.

4.3. Discussion

On voit que les différences essentielles sont surtout dans la nature du codage, harmonique ou aléatoire. Le choix peut se discuter sur des critères de simplicité de mise en œuvre, de coût et de performance.

Il faut réaliser que *chaque technique existe sous les deux formes* (codage aléatoire ou périodique), même si la terminologie ne permet pas forcément de s'en rendre compte. Il y a bien sûr des différences essentielles entre ces codages, qui se répercutent au niveau des performances.

- Le codage aléatoire est souvent beaucoup plus facile à réaliser.
- La réalisation d'un codage aléatoire, qui est fondamentalement un bruit, est *non maîtrisé*, et se *caractérise difficilement*. On peut au contraire mesurer le rapport signal sur bruit d'un signal périodique.
- Le codage aléatoire *n'est pas en lui-même quantitatif*, en ce sens qu'aucun *nombre* n'est attaché localement à la surface ; l'information est dans l'unicité de la morphologie locale. La modulation de phase est au contraire quantitative.
- La détection de la phase d'un signal sinusoïdal est plus résolutive que la corrélation sur un signal de type « bruit aléatoire ».
- Un inconvénient du codage périodique est précisément sa *périodicité* : le même code se retrouve plusieurs fois, ce qui mène à des ambiguïtés. La levée de cet ambiguïté correspond au *dépliage de phase*. On trouve également dans la littérature les termes de « déroulement » et de « démodulation ». Ce dernier peut prêter à confusion : il fait référence au fait que la phase est détectée *modulo* 2π , mais dans le cadre d'une présentation orientée « traitement du signal » autour d'une dialectique modulation/détection, le terme démodulation pourrait évoquer improprement l'étape de détection (dé-modulation).

4.4. Applications

4.4.1. Mesure de déplacements plans

La mesure de déplacements plans, c'est-à-dire des composantes planes du vecteur déplacement, est une application directe de ce qui précède. Entre un état initial et un état final, les déplacements des points matériels de l'objet emmènent avec eux la luminance locale. Les deux implémentations existent :

- codage aléatoire : la technique prend le plus souvent le nom de *corrélacion d'image*, ou corrélation d'images numériques (CIN) [BOR 05, VIA 05, DES 05, GAL 05] ;
- codage en phase : une grille est collée sur l'objet étudié ; la phase varie de 2π par période ; on parle de *technique de grille* [SUR 05].

Dans les deux cas le logiciel d'analyse apparie les points correspondants entre les deux images, ceux ayant la même signature aléatoire locale dans le cas de la corrélation d'image ou ceux ayant la même phase locale dans le cas de la méthode de la grille. Les déplacements apparents sont reliés aux déplacements réels par l'intermédiaire du grandissement transversal de l'optique d'imagerie.

Attention : dans les deux cas existe également une sensibilité au déplacement hors-plan, simplement causée par la variation du grandissement transversal en fonction de la distance frontale de l'objet. Si l'on appelle d et d' les distances objet et image, le grandissement transversal γ est donné par :

$$\gamma = -\frac{d'}{d} \quad (10)$$

Si la distance d varie de δd , la distance image d' restant fixe, le grandissement varie suivant :

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = -\frac{\delta d}{d} \quad (11)$$

Pour un objet de taille y , on a $y' = \gamma y$ et $y' + \delta y' = (\gamma + \delta\gamma)y = y' + \delta\gamma y$. Donc $\delta y'/y' = \delta\gamma/\gamma = -\delta d/d$. Or $\epsilon_{\text{app}} = \delta y'/y'$ n'est autre que la déformation apparente liée au mouvement hors plan.

Par exemple, un mouvement hors-plan de $100 \mu\text{m}$ vu à une distance frontale $d = 100 \text{ mm}$ introduit une déformation apparente de $0,1 \%$, loin d'être négligeable. Il ne semble pas y avoir de moyen de s'affranchir de cet effet parasite autrement que par des mesures complémentaires (mesures du mouvement hors plan par projection de lumière structurée, par exemple). La stéréocorrélation (voir ci-dessous) s'affranchit de ce problème puisque les trois composantes du déplacement sont mesurées.

4.4.2. Moiré

Le moiré n'est pas en lui-même une technique de mesure. C'est simplement un effet qui vient ou non se surajouter à la technique de la grille, et qui modifie le contenu spectral des informations délivrées par cette technique. Le moiré est l'effet non-linéaire de battement entre deux signaux de fréquences spatiales voisines. Cet effet non-linéaire peut être obtenu de différentes façons (multiplication, opération XOR, etc). Le cas le plus simple est la *superposition* de deux grilles transparentes d'orientations voisines. Les grilles sont décrites par les transparences ($i = 1, 2$) :

$$t_i(\vec{r}) = A_i \{1 + \gamma_i \cos[\phi_i(\vec{r})]\} \quad (12)$$

avec localement :

$$\vec{\nabla} \phi_1(\vec{r}) = 2\pi \vec{f}_1(\vec{r}) \quad (13)$$

où $\vec{f}_i(\vec{r})$ est le vecteur fréquence spatiale local. Les grilles étant d'orientations voisines, $\vec{f}_2 \approx \vec{f}_1$. La transparence des grilles superposées est le produit des transparences t_1 et t_2 . Dans ce produit apparaîtra le terme constant $A_1 A_2$, deux termes en $\cos \phi_1$ et $\cos \phi_2$ de fréquences spatiales \vec{f}_1 et \vec{f}_2 , et un terme en $\cos \phi_1 \cos \phi_2 \propto$

$\cos(\phi_2 + \phi_1) + \cos(\phi_2 - \phi_1)$ de fréquences $\vec{f}_2 + \vec{f}_1$ et $\vec{f}_2 - \vec{f}_1$. Cette dernière fréquence est faible, et correspond donc à une période de franges grande devant la période des grilles. Ces franges sont appelées franges de moiré, et le vecteur fréquence spatial local \vec{f}_m vérifie donc :

$$\vec{f}_m = \vec{f}_2 - \vec{f}_1 \quad (14)$$

L'intérêt du moiré réside précisément dans cette translation qui est réalisée dans l'espace des fréquences. Si la grille 1 est la grille déformée (c'est-à-dire que dans l'espace de FOURIER il y a un lobe élargi autour de la fréquence nominale \vec{f}_1), et la grille 2 une référence non déformée, l'effet de la multiplication va être une translation de l'information contenue dans les lobes autour de \vec{f}_2 et $-\vec{f}_2$ vers l'origine. Cet effet est représenté sur la Fig. 7. Sur cette figure est aussi représenté un cercle représentant le pouvoir de résolution de l'instrument d'optique faisant l'acquisition de l'image. Dans le cas présenté, le moiré permet à cet appareil de voir une information qui correspond au départ à des fréquences spatiales trop élevées pour lui : il ne « résout » pas les traits, alors qu'il voit bien les franges de moiré.

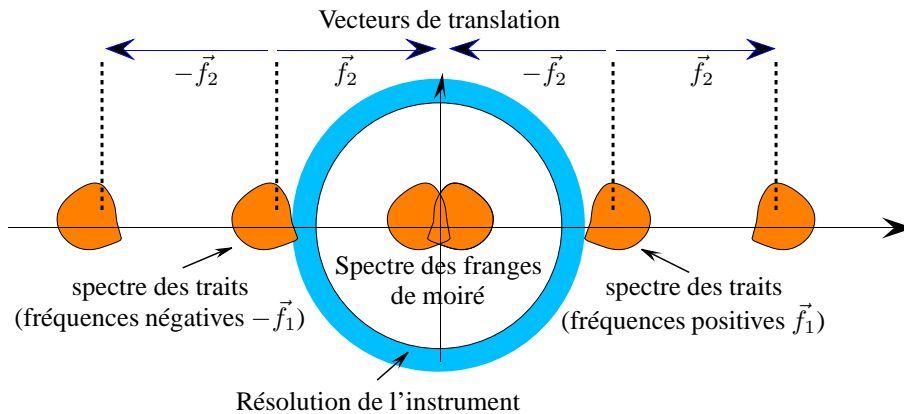


Figure 7. Translations du spectre dûs à l'effet de moiré. La figure est tracée dans le plan des fréquences spatiales. Le pic de fréquence nulle correspondant à l'intensité moyenne n'est pas représenté.

Il n'y a pas plus d'informations dans une figure de moiré que dans une image de grille déformée bien résolue. Il vaut d'ailleurs mieux travailler avec cette dernière qu'avec la figure de moiré correspondante puisqu'on évite une étape de filtrage passe-bas.

4.4.3. Mesure de forme et de déplacements hors-plan

Cette classe de techniques est basée sur la triangulation dans l'espace que permet une observation stéréoscopique. La configuration géométrique fondamentale (Fig. 8(a)) est strictement la même pour la *stéréocorrélation*, où deux caméras regardent

l'objet sous deux angles de vue différents, et pour la *profilométrie par projection de franges*, ou de lumière structurée, où un vidéoprojecteur projette un motif de grille sur l'objet.

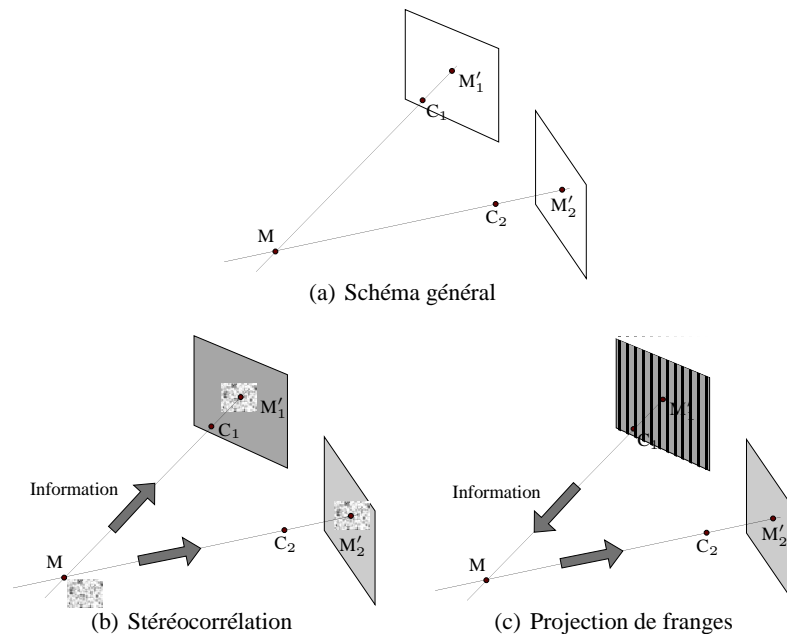


Figure 8. Mesure de forme par stéréo ou projection de franges

Si la position dans l'espace des centres optiques C_1 et C_2 sont connues, la connaissance des points M'_1 et M'_2 permet de déterminer la position spatiale du point M . La différence entre les deux techniques se situe au niveau de la circulation et de la nature de l'information :

- en stéréocorrélation (Fig. 8(b)), l'information part du point M et se propage vers M'_1 et M'_2 , situés sur des capteurs de caméras ; le logiciel d'analyse doit reconnaître la signature locale de M dans les plans image pour appairer M'_1 et M'_2 ;

- en projection de franges (Fig. 8(c)), l'information (quantitative : c'est une phase de frange) part de M'_1 qui est un pixel de vidéoprojecteur vers M puis M'_2 . Le logiciel d'analyse n'a qu'à mesurer la phase (dépliée) en chaque point pour s'apparier au point émetteur.

Il faut insister sur l'importance particulière de la bonne identification des paramètres géométriques du montage. Une erreur même faible sur les paramètres géométriques se traduit au bout du « bras de levier » M'_1C_1M ou M'_2C_2M par une erreur qui peut devenir rapidement importante. La procédure d'identification acquiert donc une importance particulière [ORT 05].

Il existe également une implémentation de la projection de franges où deux caméras visent l'objet sur lequel sont projetées les franges ; il y a donc trois éléments au total : deux caméras et un projecteur. L'information phase sert toujours à appairer les points stéréocorrespondants sur les deux plans image des caméras ; il n'y a plus besoin dans ce cas de déterminer les distorsions de l'optique de projection, seules les distorsions des objectifs des caméras sont à prendre en compte.

Il faut noter que la stéréocorrélation permet de déterminer les *déplacements 3D* entre deux états, puisque les points matériels sont repérés dans chaque état par la signature de leur mouchetis local. En revanche, la projection de franges ne permet que de déterminer le changement de forme, sans accès aux déplacements individuels de chaque point.

4.4.4. Déflectométrie

Il est rappelé sur la Fig. 9. Une caméra regarde par *réflexion* sur la pièce une mire faite de traits alternativement blancs et noirs. Malgré une apparente ressemblance, il ne s'agit pas ici de projection de lumière structurée, qui s'emploie sur des pièces diffusantes, et où le reflet spéculaire est gênant. Au contraire, la réflexion est le phénomène principal mis en œuvre, et la technique ne s'applique pas sur des pièces sans réflexion spéculaire suffisante.

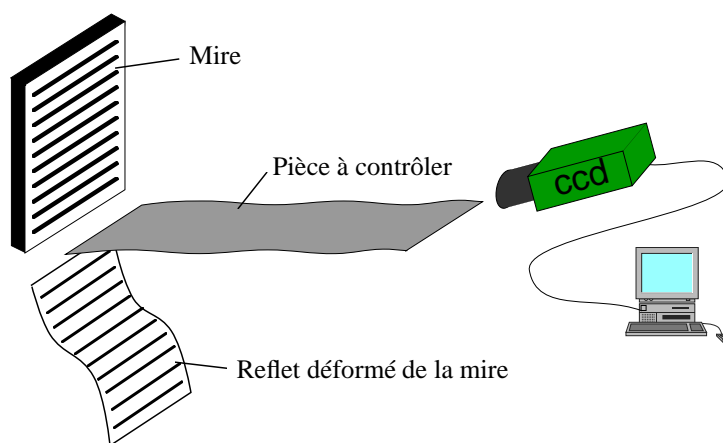


Figure 9. *Système déflectométrique*

Les défauts déformants déplacent les reflets des traits par rapport à leur position normale (Fig. 6). Mesurer la phase des traits revient à mesurer le champ des déplacements liés aux défauts. La dérivation de ce champ de déplacement donne quantitativement le champ de ces déformations, qui peuvent être considérées comme une mesure du défaut d'aspect local. Cette technique de mesure répond de manière intéressante à la problématique de la caractérisation des défauts d'aspects *tels qu'ils sont vus*.

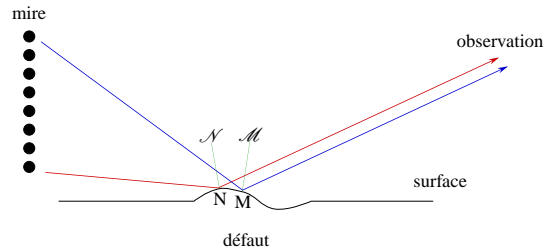


Figure 10. Influence des pentes locales sur le point d'impact du rayon sur la mire

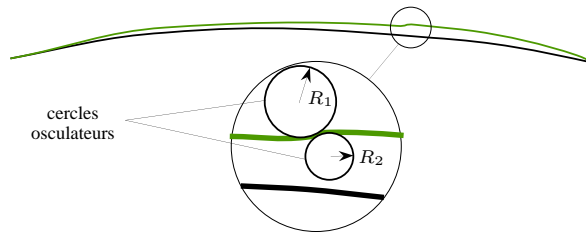


Figure 11. Un défaut est relié à une courbure importante

Si l'on pousse plus loin l'analyse, on voit que l'origine des déplacements des traits par rapport à leur place normale est liée à une mauvaise valeur de la pente locale (Fig. 10). Rappelons que les pentes locales d'une surface définie localement par $z = z(x, y)$ sont les grandeurs $\partial z / \partial x$ et $\partial z / \partial y$. Les déformations, dérivées de ces déplacements, sont donc liées aux dérivées des pentes, donc aux courbures. Il y a deux courbures locales, $\partial^2 z / \partial x^2$ et $\partial^2 z / \partial y^2$ (la dérivée croisée est la torsion, que l'on n'évoquera pas ici). Les défauts locaux sont les zones où la courbure locale est excessive (Fig. 4.4.4). Signalons seulement que la détermination de la forme de la surface à partir du champ de phase mesurée n'est pas un problème trivial dans le cas général (incidence oblique, pièce tourmentée); en effet, la position de l'image d'un trait dépend de la pente locale, mais aussi de la position du point de l'objet où le rayon lumineux se réfléchit. Or cette position est inconnue. Il y a donc une équation implicite reliant la phase et la géométrie de l'objet. Heureusement, des stratégies peuvent être mises en œuvre dans des cas simples, comme celui d'un objet étudié quasi-plan.

5. Méthodes interférométriques

5.1. Interférences

La phase $\psi(t) = \omega t + \phi$ d'une onde électromagnétique monochromatique dans le domaine visible, telle celle émise par un laser hélium-néon ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ou néodyme-YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$) oscille à une fréquence de l'ordre du térahertz (10^{14} Hz).

Aucun récepteur n'est capable d'enregistrer les variations temporelles de cette phase à des fréquences aussi élevées. C'est pourquoi on a recours au phénomène des interférences [HAR 92], dont le but principal est d'éliminer par un phénomène de battement le terme en ωt présent dans ψ .

Considérons deux ondes électromagnétiques d'amplitudes $E_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \phi_1)$ et $E_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \phi_2)$. L'intensité mesurée par un détecteur ne recevant que l'onde 1 seule est proportionnelle à la moyenne temporelle du carré du champ $E_1(t)$:

$$I_1 \propto \overline{E_1^2(t)} = \frac{A_1^2}{2} \overline{[1 + \cos(2\omega t + 2\phi_1)]} = \frac{A_1^2}{2} \quad (15)$$

et de même pour I_2 , d'où l'on déduit $A_1 \propto \sqrt{2I_1}$ et $A_2 \propto \sqrt{2I_2}$. Si les deux ondes interfèrent, on a :

$$\begin{aligned} E^2(t) &= [E_1(t) + E_2(t)]^2 \\ &= \frac{A_1^2}{2} [1 + \cos(2\omega t + 2\phi_1)] + \frac{A_2^2}{2} [1 + \cos(2\omega t + 2\phi_2)] \\ &\quad + A_1 A_2 [\cos(2\omega t + \phi_1 + \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_2)] \end{aligned} \quad (16)$$

soit pour l'intensité I détectée :

$$I \propto \overline{E^2(t)} = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} + A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (17)$$

soit :

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \Phi) \quad (18)$$

où $I_0 = I_1 + I_2$, où le contraste γ est donné par :

$$\gamma = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (19)$$

et la phase Φ des franges d'interférences est :

$$\Phi = \psi_1 - \psi_2 = \phi_1 - \phi_2 \quad (20)$$

On peut écrire également :

$$\Phi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_0} \quad (21)$$

où δ est la différence de marche entre les deux faisceaux et λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

En fait, une mesure interférométrique se fait toujours entre un état initial qui sert de référence (on n'a en effet jamais d'état de référence correspondant à une absence totale de franges) et un état final. On exploite donc toujours une *variation de phase des franges d'interférence* $\Delta\Phi$ qui est une double différence :

$$\Delta\Phi = (\phi_2 - \phi_1)_f - (\phi_2 - \phi_1)_i = (\phi_f - \phi_i)_2 - (\phi_f - \phi_i)_1 = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1$$

5.2. Interactions lumière-surface

Selon le mode d'interaction entre la lumière incidente et la surface, l'interférométrie peut se mettre en œuvre de différentes manières, mises en évidence sur la Fig. 12.

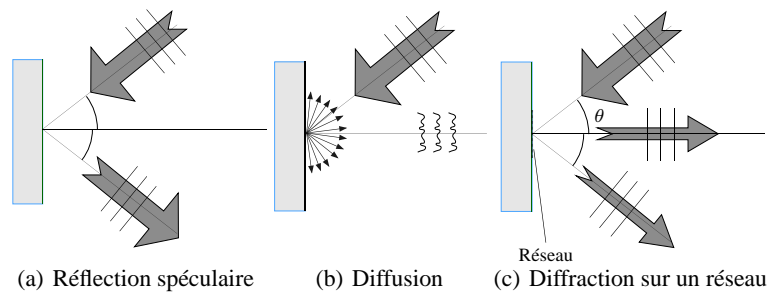


Figure 12. Différents modes d'interaction de la lumière sur une surface

– Dans le premier cas (Fig. 12(a)), la surface est un miroir. Toute l'énergie incidente sur la surface repart dans une direction bien déterminée, donnée par la loi de SNELL-DESCARTES (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence). Si la surface d'onde incidente est « lisse », c'est-à-dire sans variation spatiale aléatoire (typiquement : plane ou sphérique), la surface d'onde réfléchie est lisse elle aussi.

– Dans le deuxième cas (Fig. 12(b)), la lumière est diffusée dans tout un demi-espace. L'observateur peut se trouver n'importe où. Comme l'énergie est répartie dans une grande zone, un système d'observation situé au voisinage d'une direction donnée recueillera peu d'énergie. Cette configuration qui correspond à ce qu'il est coutume d'appeler l'interférométrie de speckle (plus correctement : l'interférométrie en lumière diffuse), nécessite donc une source laser de puissance importante. Le gros intérêt de cette configuration est qu'aucune préparation de la surface est nécessaire ; il suffit qu'elle soit suffisamment diffusante ; si ce n'est pas le cas, une simple pulvérisation de peinture blanc mat est suffisante. Un inconvénient d'opérer ainsi en lumière diffuse est que les surfaces d'onde diffusées sont aléatoires, c'est-à-dire que leur surface est très accidentée. Cela se traduira par un bruit spatial très important lors des mesures de champ de phase de franges d'interférences.

– Dans le troisième cas (Fig. 12(c)), un réseau de diffraction est déposé par moulage sur la surface, de manière à ce que le premier ordre diffracté soit normal à la surface. Dans ce cas, une fraction importante de l'énergie repart vers un observateur situé dans la direction normale, et les surfaces d'ondes diffractées dans cette direction sont lisses.

L'intérêt de configurations où l'éclairage est oblique et l'observation normale se révèle lorsque l'on introduit le *vecteur sensibilité*.

5.3. Vecteur sensibilité

Lorsqu'un point d'une surface éclairée par de la lumière monochromatique est soumis à un petit déplacement caractérisé par un vecteur \vec{u} , la variation de phase du faisceau provenant de la source et renvoyé vers l'observateur est calculée par la variation du chemin optique entre la source S et l'observateur T (Fig. 13).

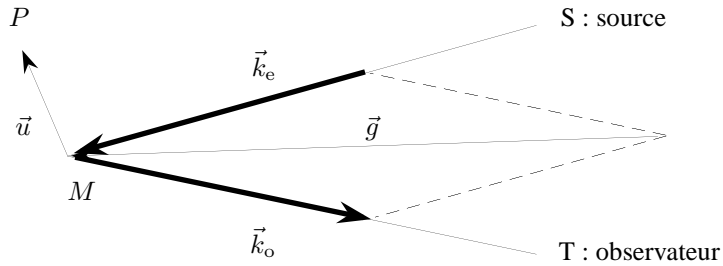


Figure 13. Définition du vecteur sensibilité

Le chemin optique l entre la source et le point d'observation est :

$$l = n(SM + MT) \quad (22)$$

La variation de ce chemin optique est :

$$\Delta l = n(\Delta SM + \Delta MT) \quad (23)$$

correspondant à une variation de phase :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l \quad (24)$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide. On peut écrire :

$$SM^2 = \overrightarrow{SM}^2 \quad (25)$$

soit :

$$\begin{cases} SM \cdot \Delta SM = \overrightarrow{SM} \cdot \Delta \overrightarrow{SM} = \overrightarrow{SM} \cdot \vec{u} \\ SM \cdot \Delta TM = \overrightarrow{TM} \cdot \Delta \overrightarrow{TM} = \overrightarrow{TM} \cdot \vec{u} \end{cases} \quad (26)$$

d'où l'on tire :

$$\begin{cases} \Delta SM = \frac{\overrightarrow{SM}}{SM} \cdot \vec{u} \\ \Delta TM = \frac{\overrightarrow{TM}}{TM} \cdot \vec{u} \end{cases} \quad (27)$$

Comme les vecteurs d'onde du faisceau d'éclairage \vec{k}_e et celui du faisceau d'observation \vec{k}_o ont pour expression :

$$\begin{cases} \vec{k}_e = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \frac{\vec{SM}}{SM} \\ \vec{k}_o = -\frac{2\pi n}{\lambda_0} \frac{\vec{TM}}{TM} \end{cases} \quad (28)$$

le résultat pour la variation de phase $\Delta\phi$ est donc :

$$\Delta\phi = (\vec{k}_e - \vec{k}_o) \cdot \vec{u} \quad (29)$$

On pose :

$$\vec{g} = \vec{k}_e - \vec{k}_o \quad (30)$$

et on appelle ce vecteur le *vecteur sensibilité*. Il est aligné avec la bissectrice des directions des vecteurs \vec{k}_e et \vec{k}_o . On a avec cette notation :

$$\Delta\phi = \vec{g} \cdot \vec{u} \quad (31)$$

Donc le vecteur sensibilité indique la composante du déplacement à laquelle la méthode de mesure sera sensible : la composante parallèle à \vec{g} .

Dans le cas d'une réflexion miroir, le vecteur sensibilité est normal à la surface ; on ne peut alors mesurer que les déplacements hors-plan (interférométrie type MICHELSON ou FIZEAU). Dans le cas d'un éclairage oblique et d'une observation normale, le vecteur sensibilité est oblique, et comporte donc simultanément une composante dans le plan et une composante hors-plan.

5.4. Vecteurs sensibilité synthétiques

Si l'on utilise N directions différentes du faisceau d'éclairage dans l'état initial, et les mêmes N directions d'éclairage dans l'état final, avec une mesure de phase à chaque fois, on obtient $2N$ cartes de phase $\phi_{i_{\text{initial}}}$ et $\phi_{i_{\text{final}}}$, $i = 0 \dots N - 1$, et donc par soustraction N cartes de variation de la phase des franges d'interférences $\Delta\phi_i$, $i = 0 \dots N - 1$, chacune correspondant à un vecteur sensibilité \vec{g}_i , avec les relations :

$$\begin{cases} \Delta\phi_0 = \vec{g}_0 \cdot \vec{u} \\ \Delta\phi_1 = \vec{g}_1 \cdot \vec{u} \\ \dots \\ \Delta\phi_{N-1} = \vec{g}_{N-1} \cdot \vec{u} \end{cases} \quad (32)$$

Par de simples combinaisons linéaires de ces équations (donc des cartes de phase obtenues), on peut faire apparaître des combinaisons linéaires de vecteurs sensibilité, qu'on peut appeler *vecteurs sensibilité synthétiques* :

$$\sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i \Delta\phi_i = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i \vec{g}_i \right) \cdot \vec{u} = \vec{G} \cdot \vec{u} \quad (33)$$

L'intérêt est de pouvoir faire apparaître des mesures de composantes de déplacement qui ne soient pas directement accessibles par la configuration géométrique d'éclairage, typiquement les composantes dans le plan et hors plan que l'on obtient alors à partir de vecteurs sensibilité obliques.

5.5. Différents types d'interférométrie

Ce qui suit n'est que l'exploitation de la formule 5.1 :

$$\Delta\Phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 \quad (34)$$

où les indices 1 et deux désignent les deux chemins suivis par les ondes qui interfèrent.

On peut avoir interférence entre *le faisceau objet et un faisceau de référence invariable*. On a alors $\Delta\Phi = \Delta\phi_{obj} - \Delta\phi_{ref} = \Delta\phi_{obj} = \vec{g} \cdot \vec{u}$, et on mesure la composante du déplacement le long du vecteur \vec{g} . Exemple : mesure de déplacement approximativement hors-plan par interférométrie de speckle (Fig. 14), où la composante mesurée du déplacement est la composante u_g dirigée suivant la bissectrice des directions d'observation et d'éclairage.

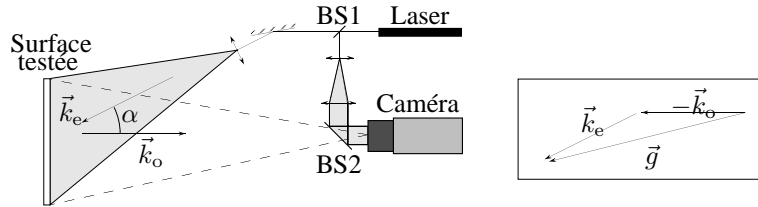


Figure 14. Montage d'interférométrie en lumière diffuse (ESPI) pour la mesure des déplacements hors plan

On peut avoir interférence entre *deux faisceaux objet provenant du même point*, mais avec des éclairages différents, donc avec des vecteurs sensibilité différents. On a alors $\Delta\Phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = (\vec{g}_2 - \vec{g}_1) \cdot \vec{u} = \vec{G} \cdot \vec{u}$. On a comme exemple le moiré interférométrique (plus correctement : l'interférométrie sur réseau¹) de la Fig. 15(a). La même configuration peut être mise en œuvre en lumière diffuse, comme indiqué sur la Fig. 15(c). Le vecteur \vec{G} est un vecteur sensibilité synthétique obtenu « analogiquement » et non pas numériquement.

1. Ici, une fois de plus, le nom de la technique apporte plutôt de la confusion, son interprétation se faisant très simplement sans aucune référence à la notion de moiré.

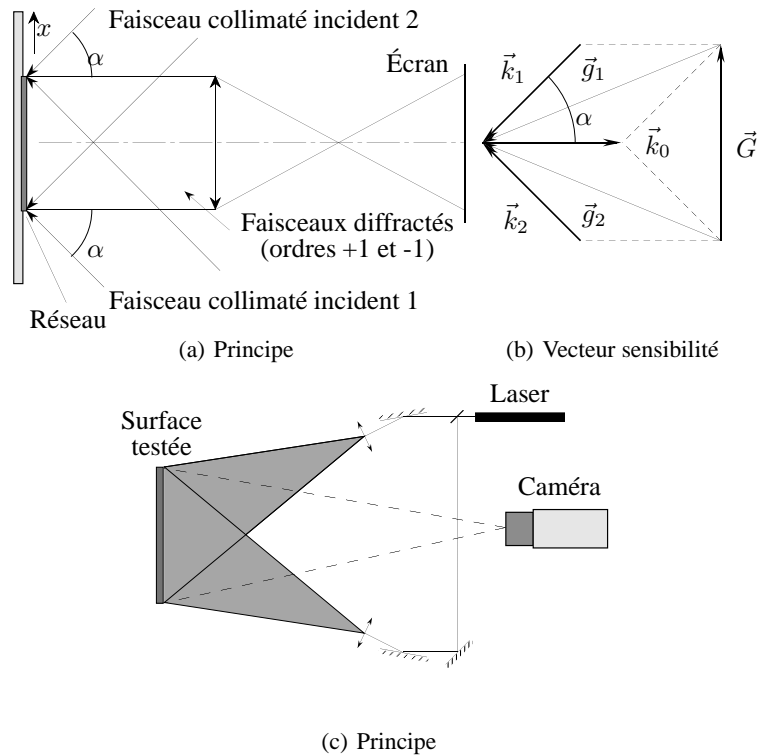


Figure 15. Mesure de déplacements plans : moiré interférométrie, vecteur sensibilité, interférométrie en lumière diffuse (ESPI plan)

On peut enfin avoir interférence entre deux faisceaux objet provenant de deux points voisins. Un système dédoubleur permet de superposer sur la caméra d'observation deux images décalées latéralement d'une quantité $\delta \vec{l}$ (Fig. 16). La variation de la phase des franges d'interférence est donc : $\Delta\Phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = \vec{g} \cdot (\vec{u} + \delta\vec{u}) - \vec{g} \cdot \vec{u} = \vec{g} \cdot \delta\vec{u}$. On mesure donc un déplacement différentiel. Avec différents éclairages, on peut mettre en œuvre la technique du vecteur sensibilité synthétique et par combinaison linéaire de cartes de phase faire apparaître des vecteurs sensibilité dans le plan et hors plan. Là encore, la version avec un réseau et la version en lumière diffuse existent (shearographie).

En alignant la direction du décalage suivant les axes x et y , on obtient donc toutes les dérivées partielles de toutes les composantes du déplacement. On peut donc obtenir toutes les composantes des déformations planes, ainsi que les deux pentes.

C'est une technique insensible aux vibrations parasite, celles-ci ne modifiant ni l'état de déformation ni les pentes.

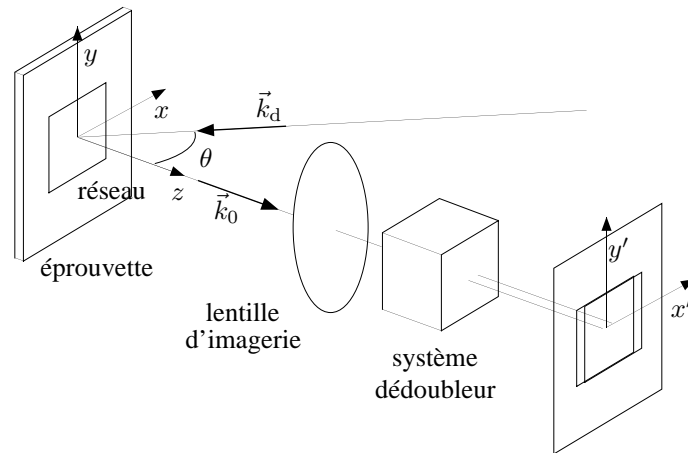


Figure 16. Interférométrie différentielle à réseau, ou shearographie sans celui-ci

5.6. Photoélasticimétrie

La photoélasticimétrie sort un peu du cadre de ce classement, puisque ce n'est pas une méthode donnant au départ des renseignements de *surface*. Elle concerne en effet les matériaux *transparents*, et donne des informations intégrées sur le *volume* traversé². C'est par exemple l'une des principales techniques optiques utilisée dans l'industrie du verre [BER 05].

Ceci dit, beaucoup de mécaniciens connaissent la photoélasticimétrie (qui est peut-être une des seules techniques qui leur est enseignée) pour ses applications à des études de champs surfaciques. Simplement, la surface à étudier est recouverte d'une couche fine de matériau transparent photoélastique, et la connaissance de l'épaisseur de cette couche dans laquelle existe un état de contraintes planes va permettre de remonter à la composante plane (tangentielle) de son état de déformation. La lumière se réfléchit à l'interface et fait donc un aller et retour dans la couche. L'hypothèse de la continuité des déplacements à l'interface entre le substrat étudié et la couche photoélastique et la faible épaisseur de la couche impliquent que cette composante plane des déformations est la même que la composante tangentielle des déformations du substrat. Le calcul des *contraintes* dans le matériau résulte ensuite de la modélisation mécanique habituelle. Il est bien entendu parfaitement licite d'utiliser la photoélasticimétrie sur un substrat anisotrope puisque l'on mesure les *déformations*, donc la *cinématique* de la surface. Dans ce cas précis, il faut simplement utiliser ensuite les lois de comportement anisotropes pour remonter aux contraintes.

Nous ne présentons ici la technique [AVR 84] que très grossièrement. La photoélasticimétrie est basée sur le phénomène de *biréfringence accidentelle*, c'est-à-dire

2. La notion de vecteur sensibilité n'est donc pas pertinente ici.

induite par les déformations dans un matériau initialement optiquement isotrope, donc non biréfringent. Localement, les directions principales de déformation correspondent par symétrie aux directions selon lesquelles une polarisation plane se propagera sans altération de son état de polarisation. Aux deux directions principales de déformation sont associés deux vitesses de propagation de la lumière, donc deux indices n_1 et n_2 . Les interférences sont produites entre ces deux composantes polarisées, pour un même trajet *géométrique*, la traversée du matériau photoélastique. On montre que les franges dites isochromatiques obéissent à l'équation habituelle des interférences à deux ondes (18) avec un contraste $\gamma = -1$ (la frange d'ordre 0 est sombre). La phase ϕ des franges est toujours donnée par (21) et la différence de marche est :

$$\delta = (n_2 - n_1)e \quad (35)$$

où e est l'épaisseur *totale* traversée (deux fois l'épaisseur de la couche en cas d'étude sur un substrat opaque). La loi de la *photoélasticité* est simplement l'approximation linéaire de la dépendance de la différence ($n_2 - n_1$) en fonction de la différence des déformations principales $\epsilon_2 - \epsilon_1$:

$$\Delta n = n_2 - n_1 \propto \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad (36)$$

La photoélasticimétrie donne donc accès à la différence $\epsilon_2 - \epsilon_1$ des déformations principales. On peut montrer que cette valeur n'est autre que le *glissement maximal* mentionné au §2.2.

Une controverse séculaire oppose ceux qui expriment la loi de la photoélasticité comme ci-dessus (proportionnalité de Δn aux déformations) et ceux qui l'expriment comme la proportionnalité de Δn aux contraintes³. Dans une hypothèse d'élasticité du matériau, cela revient finalement au même, les contraintes étant dans ce cas proportionnelles aux déformations. Sur le fond, le physicien considère que l'interaction lumière-matière dépend de la fonction d'onde électronique $\Psi(x, y, z, t)$ dans le matériau, donc au final de sa *géométrie*. Les contraintes sont les grandeurs duales des déformations au sens de la thermodynamique, et la lumière ne la « voit » pas. Il paraît donc plus normal de partir d'une proportionnalité aux déformations. Cela étant, une majorité d'ouvrages font le choix inverse...

Terminons par signaler les progrès récents qu'a fait cette technique depuis l'utilisation de vaporisateurs pour pulvériser une couche photoélastique sur une pièce opaque, qui vient heureusement remplacer la technique fastidieuse et difficile du galbage (dépôt d'un film polymérique pâteux, qui polymérise en place) sur les pièces de forme, ou de collage (couche rigide) sur les pièces planes.

5.7. Holographie

L'holographie n'est pas une méthode de mesure, c'est une méthode d'enregistrement. C'est une technique qui permet d'enregistrer une surface d'onde électromagnétique, et de la restituer par la suite.

L'interférométrie holographique consiste à enregistrer l'onde électromagnétique généralement diffusée par un objet, et à la restituer ultérieurement pour la faire interférer avec l'onde diffusée par le même objet modifié, par exemple par un chargement mécanique. L'holographie peut se coupler avec n'importe laquelle des techniques interférométriques présentées.

Une comparaison entre holographie analogique et holographie numérique est présentée dans le Tableau 1.

6. Conclusion

Nous avons présenté une approche permettant de regrouper un grand nombre de techniques optiques différentes en fonction de leurs aspects essentiels (techniques interférométriques ou non, codage aléatoire ou périodique, nature du mesurande). Les Tableaux 2 et 3 proposent une synthèse, ainsi que les performances des techniques qui sont liées aux concepts fondamentaux mis en œuvre. Bien entendu, de tels tableaux ne peuvent être qu'un reflet grossier des détails de la réalité, et l'exercice consistant à tout regrouper présente évidemment des limitations. Néanmoins, il est espéré qu'il pourra aider à une première approche des techniques optiques de mesure de champ.

3. Il s'agit des contraintes dans le matériau photoélastique, pas dans un éventuel substrat.

Tableau 2. Récapitulatif

Techniques non interférométriques			
Mesurande	Codage aléatoire	Modulation de phase	Remarques
Depl. plan	Corrélation d'images	Grille (avec ou sans moiré)	Couplage avec depl. hors plan
Forme	Stéréocorrélation	Projection de franges (lumière structurée)	Étalonnage transverse caméra essentiel
Deplacement dans l'espace	Stéréocorrélation avec mouchetis solidaire	Impossible	Idem
Pentes	Non utilisé, mais concevable	Défectométrie	Couplage avec la forme
Interférométrie			
Mesurande	Lumière réfléchie	Lumière diffusée	Lumière diffractée
Depl. plan	Impossible	Speckle dans le plan	Moiré interférométrique
Depl. hors plan	Interférométrie MICHELSON-TWYMANN-GREEN	Speckle hors plan	Inusité, mais un montage est concevable
Montage différentiel (pentes, déform.)	Microscopie Nomarski p. ex.	Shearographie	Interférométrie différentielle sur réseau

Tableau 3. Performances

	Non interférométrique, aléatoire	Non interférométrique, phase	Interférométrie
Simplicité	++	+	–
Coût	---	–	+
Performances	–	–+	++

7. Bibliographie

- [AVR 84] AVRIL J., *Encyclopédie d'analyse des contraintes*, Vishay Micromesures, 1984.
 [BER 05] BERNARD F., 'La photoélasticité : un moyen de contrôle des structures en verre ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.

- [BOR 05] BORNERT M., COL., ' Mesure tridimensionnelle des champs de déplacement et de déformation par analyse d'images volumiques ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.
- [CLO 98] CLOUD G., *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-63642-6.
- [DES 05] DESMARS B., COL., ' Application de la méthode de stéréo-corrélation d'images à la caractérisation des élastomères en grandes déformations ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.
- [GAL 05] GALERNE C., ' Application des méthodes optiques pour le suivi global du comportement des structures aéronautiques ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.
- [GAS 02] GASVIK K. J., *Optical Metrology*, John Wiley & Sons Ltd, 3rd édition, 2002, ISBN 0-470-84300-4.
- [HAR 92] HARIHARAN P., *Basics of interferometry*, Academic Press, 1992.
- [ISO95] ISO, ' International vocabulary of basic and general terms in metrology ^a, 1995, ISBN 92-67-01075-1.
- [ORT 05] ORTEU J.-J., ' Gridless calibration of distorted visual sensors ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.
- [SUR 05] SURREL Y., ' La méthode de la grille et ses applications ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.
- [VIA 05] VIALETES P., SIGUIER J.-M., KARAMA M., ' Mesure par stéréo-corrélation des champs de déplacement et de déformation de sous ensembles de ballons stratosphériques pressurisés ^a, *Instrumentation, Mesures, Métrologie*, vol. 5/1-2, 2005.

Tableau 1. Comparaison holographie analogique/holographie numérique ; $A_r = a_r \exp(i \phi_r)$: onde de référence, $A_o = a_o \exp(i \phi_o)$: onde objet, hypothèse : $a_r \approx cte$. La partie modulée de l'intensité lors de l'enregistrement est notée I_m . DPT, DPS : décalage de phase temporel, spatial.

	Holographie analogique (HA)	Holographie numérique (HN)
Enregistrement	<ul style="list-style-type: none"> - spatialement continu (plaque holographique) - $I_m \propto a_o \cos(\phi_o - \phi_r) = a_o \exp[i(\phi_o - \phi_r)] + a_o \exp[i(-\phi_o + \phi_r)]$ - développement tel que la transparence en amplitude soit $t \propto I_m$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Échantillonné (capteur matriciel) - Deux possibilités : <ol style="list-style-type: none"> 1) enregistrement intensité I_m 2) DPT ou DPS : enregistrement de $a_o \exp[i(\phi_o - \phi_r)]$ (« hologramme complexe »)
Restitution dans le plan de l'hologramme	<ul style="list-style-type: none"> - Inutile de connaître A_r - Illumination par $A_r \propto \exp(i\phi_r)$ - $tA_r \propto A_o + A_o^* \exp(2i\phi_r)$ - 2 ordres \implies nécessité de séparation spatiale 	<ul style="list-style-type: none"> - A_r doit être connu - multiplication par $A_r \propto \exp(i\phi_r)$ - Deux possibilités <ol style="list-style-type: none"> 1) $tA_r \propto A_o + A_o^* \exp(2i\phi_r)$ (deux ordres, idem holographie analogique) 2) DPT ou DPS : $tA_r \propto A_o$: un seul ordre
Propagation	Physique (onde électromagnétique)	Calcul