
Mesure de champ de déplacement micrométrique d'une surface par corrélation de sa topographie

Fabien Amiot^{*,} — François Hild^{*} — Jean Paul Roger^{**}**

** LMT-Cachan, ENS de Cachan / CNRS-UMR 8535 / Université Paris 6
61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan Cedex, France.
{Fabien.Amiot,Francois.Hild}@lmt.ens-cachan.fr*

*** Laboratoire d'Optique Physique, ESPCI / CNRS-UPR A0005
10 rue Vauquelin, F-75005 Paris, France.
{amiot,roger}@optique.espci.fr*

RÉSUMÉ. On présente dans cet article un dispositif expérimental permettant la mesure de champs de déplacements plan et hors-plan de surfaces observées en réflexion. Il est basé sur un interféromètre de type Nomarski, que l'on utilise avec deux prismes de Wollaston introduisant des décalages différents. La topographie de la surface peut alors être reconstruite et partagée en surface moyenne et rugosité. Le champ de déplacement hors-plan est obtenu par différence des surfaces moyennes, alors que le champ de déplacement plan est obtenu par intercorrélation de la rugosité.

ABSTRACT. We present an experimental set-up that allows us to measure in-plane and out-of-plane displacement fields of surfaces in reflection microscopy. This set-up is based upon a Nomarski shear-interferometer, which is used with two different Wollaston prisms. The real topography of the object is deduced and divided into mean surface and roughness. The out-of-plane displacement field is obtained by difference of mean surfaces, while the in-plane displacement field is deduced from the cross-correlation of the roughness.

MOTS-CLÉS : Mesure de champ cinématique, Interférométrie Nomarski, Corrélation d'images numériques, Capteurs micromécaniques, Biocapteurs.

KEYWORDS: Full-field measurement, Nomarski interferometry, Digital image correlation, Micromechanical sensors, Biosensors.

1. Introduction

Le développement de techniques de lithographie de plus en plus performantes a joué un rôle important dans la multiplication des géométries d'objets mécaniques de dimensions réduites (*i.e.*, de l'ordre du micromètre) disponibles (MEMS : Micro-Electro-Mechanical-Systems), fabriqués en grande quantité [GAD 02]. Ces objets se caractérisent par un rapport surface/volume significativement plus élevé que pour des objets plus macroscopiques. Cette particularité implique que le comportement mécanique de ces MEMS est dominé par des phénomènes de surface plutôt que de volume, ce qui en fait, potentiellement, des capteurs sensibles à leur environnement performants [RAI 01]. D'autre part, les tolérances géométriques sur les objets micrométriques obtenus par lithographie sont (relativement aux dimensions de l'objet) beaucoup plus grandes que pour les objets macroscopiques. Les conditions aux limites sont également plus difficilement maîtrisées. Aussi est-il nécessaire de réaliser des essais fournissant une mesure sur une région étendue de l'objet. L'étude des effets mécaniques induits par l'environnement (sous la forme d'un chargement mécanique ou d'une modification des propriétés des matériaux) nécessite de nouveaux outils pour pouvoir étudier le comportement mécanique de ces objets. En premier lieu, cela nécessite une mesure de quantités cinématiques suffisamment résolues spatialement. C'est le cas, par exemple, lorsque l'on cherche à modéliser les effets mécaniques induits par divers phénomènes surfaciques : électrocapillarité ou hybridation d'oligonucléotides sur des MEMS [HAG 02] par exemple. Dans ce cas, les temps caractéristiques de réaction interdisent l'utilisation d'une méthode point par point pour détecter des effets hétérogènes. Ensuite, la faible rugosité des surfaces observées (*e.g.*, de l'ordre du nanomètre) et la nécessité de ne pas les modifier pour garantir leur réactivité interdisent l'utilisation de techniques basées sur la diffusion de la lumière par la surface ou de techniques par contact.

On a conçu un outil d'imagerie permettant la mesure du champ de déplacement d'une surface à l'échelle micrométrique. L'instrument proposé est basé sur un interféromètre de Nomarski, utilisé avec deux prismes de Wollaston. Les algorithmes utilisés pour traiter ensuite les images obtenues permettent d'en déduire les champs de déplacement plan et hors-plan.

2. L'interféromètre de Nomarski à intégration de phase

2.1. Dispositif

Le dispositif de microscopie interférentielle utilisé est celui proposé par Gleyzes *et al.* [GLE 95 ; GLE 97] et présenté sur la figure 1. Une diode électro-luminescente (LED, $\lambda = 630$ nm) éclaire au travers d'un polariseur une lame séparatrice. Le faisceau arrive alors sous incidence normale sur le prisme de Wollaston. Le faisceau réfléchi par la lame est polarisé à 45° des axes propres du prisme de Wollaston. Celui-ci transmet alors deux faisceaux formant un petit angle. Ces faisceaux, polarisés orthogonalement selon les axes du prisme de Wollaston, sont focalisés à la surface de

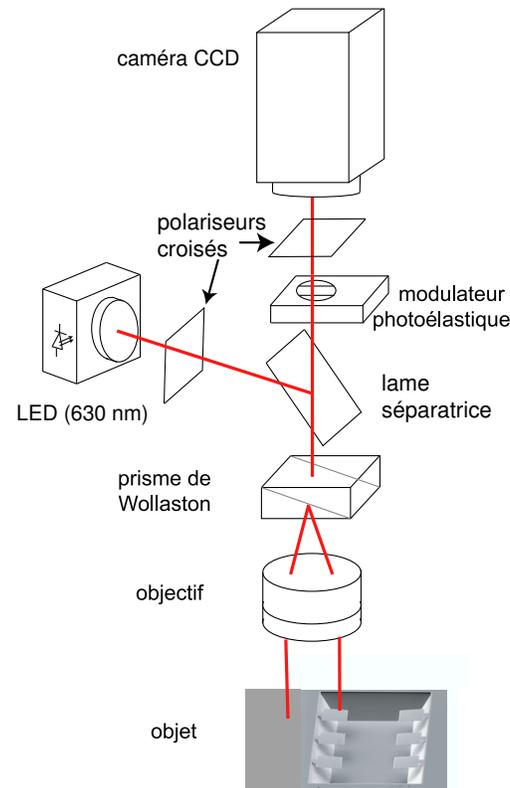


Figure 1. *Dispositif d'imagerie Nomarski à intégration de phase.*

l'échantillon à l'aide d'un objectif de microscope. Après réflexion sur l'objet, les deux faisceaux polarisés se recombinaient dans le prisme avant de traverser la lame séparatrice puis un modulateur photoélastique en silice, dont les axes sont parallèles à ceux du prisme de Wollaston. Ce modulateur, alimenté en tension sinusoïdale, impose un déphasage variable entre les deux directions de polarisation. Le faisceau traverse un analyseur, dont les axes sont à 45° de ceux du modulateur, et à 90° du premier polariseur. On réalise ainsi l'interférence entre deux topographies de la surface décalées d'une valeur d introduite par le prisme de Wollaston. La figure d'interférences obtenue au foyer de la lentille tube est recueillie sur un capteur CCD. La fréquence de modulation est la celle de résonance du modulateur, soit 50,3 kHz.

2.2. Technique d'intégration de phase

Formellement, le flux reçu par un pixel (repéré par ses coordonnées (l, m) sur la matrice CCD) peut se mettre sous la forme

$$I(l, m, t) = I_0 + A \cos[\phi(l, m) + \psi(t)], \quad [1]$$

où $\phi(l, m)$, la grandeur à déterminer, représente la phase optique introduite par l'échantillon et le prisme de Wollaston. La modulation de phase optique introduite par le modulateur photoélastique s'écrit

$$\psi(t) = \psi_0 \sin(2\pi ft + \theta). \quad [2]$$

Les angles ψ_0 et θ sont deux paramètres que l'on peut choisir de manière *a priori* quelconque. La procédure d'extraction de ϕ est alors la suivante : si l'on appelle $T = 1/f$ la période de la modulation, on acquiert 4 images de la surface pendant la période T , de sorte que chaque image soit le résultat de l'intégration du signal pendant un quart de période. On obtient quatre images E_p , pour $p = 1, 2, 3, 4$

$$E_p = \int_{\frac{(p-1)T}{4}}^{\frac{pT}{4}} I(t) dt. \quad [3]$$

On montre alors [DUB 01] qu'il existe un couple (ψ_0, θ) qui permet d'en déduire le déphasage ϕ avec une sensibilité optimale

$$\tan[\phi(l, m)] = \frac{E_1 - E_2 - E_3 + E_4}{E_1 - E_2 + E_3 - E_4}. \quad [4]$$

2.3. Topographie différentielle

Le prisme de Wollaston est placé de sorte que le déphasage introduit soit uniforme dans le champ d'observation. Si d'autre part la surface observée a un comportement uniforme en réflexion (*i.e.*, si la différence de marche introduite à la réflexion ne dépend pas du point considéré), alors on peut déduire la topographie différentielle $S(l, m)$ de l'image de phase $\phi(l, m)$ après dépliement

$$S(l, m) = \frac{\lambda \phi_d(l, m)}{4\pi}. \quad [5]$$

Les composants sont ajustés afin que la direction du décalage introduit par le prisme de Wollaston soit parallèle à une direction du capteur CCD (*e.g.*, l). La reconstruction de la topographie est formellement simplifiée en opérant dans l'espace de Fourier. L'information recueillie est discrète, de sorte que la transformée de Fourier rapide à une dimension (FFT) \tilde{F} de la topographie $f(l, m)$ est donnée par

$$\tilde{F}(k, m) = \sum_{l=1}^N f(l, m) \exp \left[-2j\pi \frac{(k-1)(l-1)}{N} \right]. \quad [6]$$

Par conséquent, si l'on appelle d le décalage introduit en pixel suivant la première coordonnée, la FFT \tilde{S} de la topographie différentielle $S(l, m)$ issue de la topographie $f(l, m)$ avec $l \in \{1, \dots, N\}$ est donnée par

$$\tilde{S}(k, m) = 2j\tilde{F}(k, m) \sin \left[\pi d \frac{(k-1)}{N} \right] = \tilde{F}(k, m)\tilde{H}(k, m). \quad [7]$$

Les fréquences spatiales absentes de l'image observée correspondent aux zéros de la fonction de transfert, et ne dépendent que du décalage introduit. Ces fréquences spatiales absentes interdisent une détermination directe de $\tilde{F}(k, m)$ à partir de $\tilde{S}(k, m)$: le problème est mal-posé au sens de Hadamard [DEM 01]. On a ainsi développé un moyen expérimental qui permet d'obtenir les informations manquantes.

3. Interférométrie à deux décalages

3.1. Principe

Un moyen de fournir plus d'informations pour décrire la topographie est de former deux images de celle-ci avec deux décalages différents. Pour chaque fréquence spatiale, on reconstruit la FFT de la topographie à partir de l'image dans laquelle l'information, à la fréquence considérée, est *a priori*, la moins affectée par le bruit de mesure.

On forme deux topographies différentielles $\tilde{S}_1(k, m)$ et $\tilde{S}_2(k, m)$ de la même topographie avec deux décalages d_1 et d_2 . Les fonctions de transfert sont respectivement $\tilde{H}_1(k, m)$ et $\tilde{H}_2(k, m)$. Pour résoudre le problème inverse, on définit (cf. figure 2)

$$\tilde{H}_{eq}(k, m) = \sup_{| \cdot |} [\tilde{H}_1(k, m), \tilde{H}_2(k, m)] \quad [8]$$

$$K_1 = \left\{ k_1 \mid \tilde{H}_{eq}(k_1, m) = \tilde{H}_1(k_1, m) \right\}$$

$$K_2 = \left\{ k_2 \mid \tilde{H}_{eq}(k_2, m) = \tilde{H}_2(k_2, m) \right\}. \quad [9]$$

Comme $\tilde{H}_{eq}(k, m) \neq 0, \forall k \neq 1$, il vient

$$\tilde{F}(k, m) = \begin{cases} \frac{\tilde{S}_1(k, m)}{\tilde{H}_{eq}(k, m)} & \forall k \in K_1, \\ \frac{\tilde{S}_2(k, m)}{\tilde{H}_{eq}(k, m)} & \forall k \in K_2. \end{cases}$$

Si les décalages introduits par les prismes de Wollaston sont supposés connus, on déduit la topographie recherchée $f(l, m)$ par FFT inverse, à un ensemble de constantes additives près. Ces constantes sont déterminées soit par des connaissances a priori sur l'objet [WAL 96], soit par une nouvelle mesure avec un décalage dans la direction perpendiculaire. On dispose alors d'une mesure du gradient de la topographie suivant

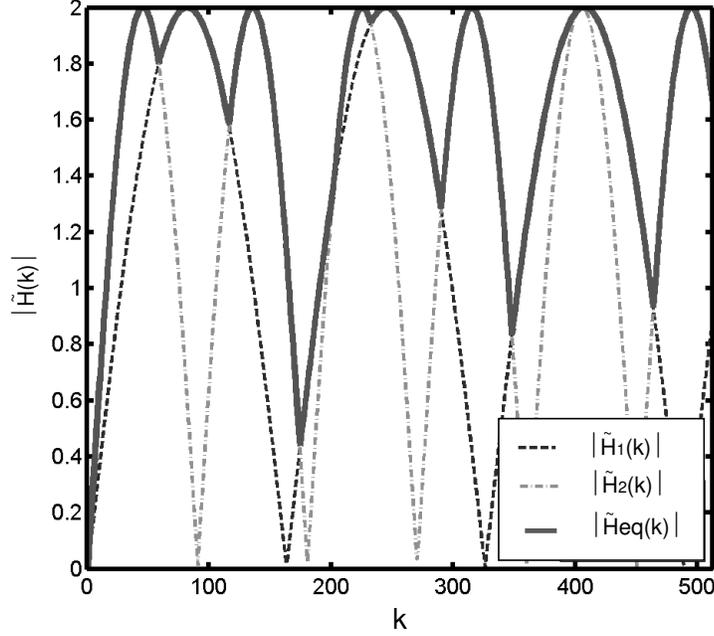


Figure 2. Norme de la fonction de transfert pour deux systèmes avec deux décalages différents et pour le système équivalent.

deux directions, $\frac{\partial f_{exp}(l,m)}{\partial l}$ et $\frac{\partial f_{exp}(l,m)}{\partial m}$. La topographie $f(l,m)$ s'obtient alors en minimisant :

$$\sigma_{\perp}^2 = \sum_{l,m} \left[\left(\frac{\partial f(l,m)}{\partial l} - \frac{\partial f_{exp}(l,m)}{\partial l} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(l,m)}{\partial m} - \frac{\partial f_{exp}(l,m)}{\partial m} \right)^2 \right] \quad [10]$$

Cette procédure expérimentale, plus lourde, atténue alors considérablement l'effet de l'incertitude de mesure sur la topographie reconstruite.

3.2. Choix et contrôle du couple de décalages

Le couple de décalages est choisi sur des critères liés d'une part à la fonction de transfert \tilde{H}_{eq} (valeur moyenne, valeur pour les faibles k), d'autre part à des contraintes technologiques sur la géométrie des prismes de Wollaston. Dans la suite, les angles de séparation des prismes utilisés sont de $6,2 \times 10^{-4}$ rad et $2,9 \times 10^{-3}$ rad, soit 9,4 et 44 pixels, respectivement.

Ces décalages peuvent être estimés avec une erreur absolue de quelques dixièmes de pixel à partir d'images obtenues avec de faibles grossissements. Dans ce cas, $|\tilde{S}(k, m)|$ présente une pseudo-périodicité caractéristique de la valeur du décalage employé (cf. équation [7]), qu'il suffit d'estimer pour approcher le décalage introduit.

3.3. Influence d'une erreur de mesure du décalage

À une fréquence k donnée, on peut estimer l'erreur relative $\eta(k)$ faite lors de la reconstruction du fait de l'erreur relative ϵ commise sur le décalage correspondant (d_i si $k \in K_i$, $i = 1, 2$)

$$\eta(k) = 1 - \frac{\sin \left[\pi d_i \frac{(k-1)}{N} \right]}{\sin \left[\pi d_i (1 + \epsilon) \frac{(k-1)}{N} \right]}. \quad [11]$$

Une faible erreur relative sur la mesure du décalage introduit des erreurs importantes sur la topographie reconstruite. Par exemple, avec $\epsilon = 10^{-2}$, $d_1 = 11.4$ pixel et $N = 1024$ pixel, une erreur de l'ordre du pourcent sur le décalage peut induire une erreur de reconstruction $\eta(k)$ de l'ordre de 60 %. Un moyen de régulariser ce problème d'inversion est alors de considérer l'ensemble K_{inter} des fréquences pour lesquelles la détermination de $\tilde{F}(k, m)$ peut se faire de manière quasi équivalente en utilisant $\tilde{S}_1(k, m)$ ou $\tilde{S}_2(k, m)$

$$K_{\text{inter}} = \left\{ k \mid \left| 1 - \frac{|H_1(k)|}{|H_2(k)|} \right| < 0.05 \right\}. \quad [12]$$

Comme la fonction à reconstruire est réelle, $\tilde{F}(k, m)$ doit être hermitienne. On définit le critère

$$\chi^2 = \sum_{k \in K_{\text{inter}}} \left| \frac{\tilde{S}_1(k)}{\tilde{H}_1(k)} - \overline{\left(\frac{\tilde{S}_2(k)}{\tilde{H}_2(k)} \right)} \right|^2. \quad [13]$$

Après une première reconstruction à l'aide de valeurs approchées du décalage, on minimise χ^2 par rapport aux deux valeurs de décalages. C'est alors le couple de décalages solution qui sert à une nouvelle définition des ensembles K_1 et K_2 , puis à la reconstruction définitive de la topographie. L'erreur $\eta(k)$ de reconstruction est alors inférieure à 1 %.

4. Obtention du champ de déplacement

4.1. Déplacement hors-plan

Le dispositif présenté sur la figure 3 est une réalisation pratique du montage décrit sur la figure 1. Il est basé sur un statif de microscope optique commercial, sur lequel

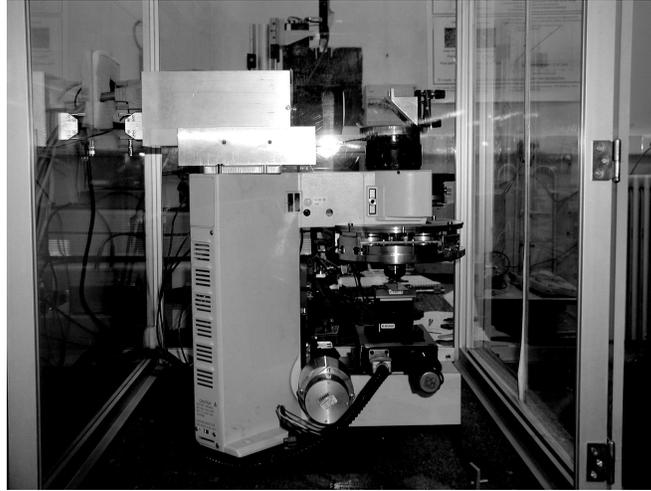


Figure 3. Photographie du dispositif d'imagerie de Nomarski à intégration de phase muni d'une tourelle pour 2 prismes de Wollaston.

est ajoutée une tourelle permettant de disposer l'un ou l'autre des prismes de Wollaston sur le trajet du faisceau. Pour obtenir des champs de déplacement, on réalise des topographies avant et après chargement mécanique. On partage alors ces topographies en un polynôme et son complément. On appellera dans la suite "rugosité" ce complément. Le déplacement hors-plan est obtenu par différence des polynômes représentant la surface moyenne avant et après chargement.

4.2. Déplacement plan

Pour obtenir le champ de déplacement plan, on utilise la rugosité définie précédemment comme un marqueur de la surface, au même titre qu'un mouchetis de peinture ou que la texture naturelle [HIL 02]. Le champ de déplacement plan est obtenu en isolant cette rugosité et en utilisant l'algorithme proposé par Sutton *et al.* [SUT 83]. On note $\langle f, g \rangle(\mathbf{u})$ le produit d'intercorrélation de deux fonctions $f(\mathbf{x})$ et $g(\mathbf{x})$ caractéristiques de la rugosité

$$\langle f, g \rangle(\mathbf{u}) = \int f(\mathbf{x})g(\mathbf{x} - \mathbf{u})d\mathbf{x}. \quad [14]$$

Dans le cas où g est le translaté (par \mathbf{U}) de f

$$g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x} + \mathbf{U}) \quad [15]$$

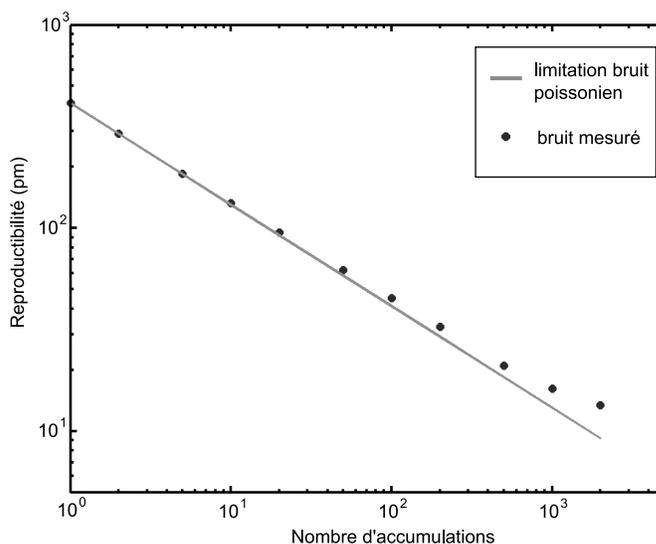


Figure 4. *Reproductibilité des topographies différentielles en fonction du nombre d'accumulations.*

le produit d'intercorrélation devient

$$\begin{aligned} \langle f, g \rangle(\mathbf{u}) &= \int f(\mathbf{x})f(\mathbf{x} + \mathbf{U} - \mathbf{u})d\mathbf{x} \\ &= \langle f, f \rangle(\mathbf{u} - \mathbf{U}). \end{aligned} \quad [16]$$

Comme $\langle f, f \rangle(\mathbf{v})$ est par construction maximum en $\mathbf{v} = \mathbf{0}$, le profil d'intercorrélation présente un maximum en $\mathbf{u} = \mathbf{U}$. C'est cette propriété que l'on exploite pour retrouver \mathbf{U} à partir de la donnée de f et g , le profil d'intercorrélation pouvant être facilement calculé dans l'espace de Fourier [HIL 02].

5. Validation

On peut vérifier que la répétabilité de mesure des topographies différentielles est limitée par le bruit de photons et est d'environ 10 pm (voir figure 4) pour 2000 images accumulées. Dans les conditions standard de mesure (temps de pose de l'ordre de la minute au maximum et capteur CCD proche de la saturation), les divers bruits (électroniques) de lecture comme les dérives thermiques du montages sont négligeables.

On présente sur la figure 5 un essai de validation de cette mesure de déplacement plan sur une surface de silicium observée avec un grandissement de 5. Le déphasage

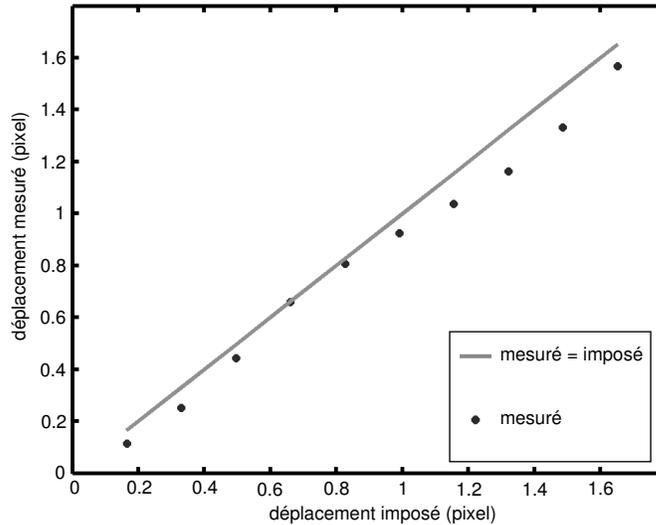


Figure 5. Validation de la mesure de déplacement plan : déplacement mesuré en fonction du déplacement imposé.

introduit à la réflexion est considéré comme uniforme dans le champ. Pour une zone de mesure de 1024×1024 pixels, l'erreur absolue par rapport à la droite "idéale" est toujours inférieure à 0.15 pixel (*i.e.*, $0,3 \mu\text{m}$). Elle peut être décomposée en une erreur attribuée à la procédure de corrélation de l'ordre de 0.05 pixel RMS et une erreur systématique de 0.08 pixel par rapport à la droite "idéale", de l'ordre de grandeur du jeu dans le dispositif permettant d'imposer le déplacement.

6. Conclusion

On a présenté un dispositif interférométrique pour révéler un marqueur lié à la topographie d'objets de taille micrométrique. Ce marqueur, avant et après chargement mécanique, permet de mesurer le champ de déplacement (plan et hors-plan) de la surface observée. Ces champs de déplacement sont le point de départ d'une procédure d'identification de propriétés mécaniques à l'échelle de quelques micromètres [AMI 04]. On pourra alors étudier les modifications de propriétés mécaniques induites, par exemple, par l'hybridation d'oligonucléotides adsorbés à la surface de MEMS.

[AMI 04] F. AMIOT, F. HILD, J.P. ROGER, « Measuring the displacement field of microcantilevers under electrostatic loading to identify their mechanical properties », *Proceedings SEM X*, CD-ROM, 7p., 2004.

- [DEM 01] G. DEMOMENT, J. IDIER, J.-F. GIOVANNELLI, A. MOHAMMAD-DJAFARI, « Problèmes inverses en traitement du signal et de l'image », *Techniques de l'ingénieur*, vol. TE 5235, 2001, p. 1-25.
- [DUB 01] A. DUBOIS, « Phase-map measurements by interferometry with sinuoidal phase modulation and four integrating buckets », *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 18, 2001, p. 1972-1979.
- [GAD 02] GAD-EL-HAK M., *The MEMS Handbook*, CRC Press, 2002.
- [GLE 95] P. GLEYZES, F. GUERNET, A.C. BOCCARA, « Profilométrie picométrique. II L'approche multi-détecteur et la détection synchrone multiplexée », *J. Optics (Paris)*, vol. 26, 1995, p. 251-265.
- [GLE 97] P. GLEYZES, A.C. BOCCARA, H. SAINT-JALMES, « Multichannel Nomarski microscope with polarization modulation : performance and applications », *Optics Letters*, vol. 22, 1997, p. 1529-1531.
- [HAG 02] F.H. HAGAN, A. MAJUMDAR, A.K. CHAKRABORTY, « Nanomechanical forces generated by surface grafted DNA », *J. Phys. Chem. B*, vol. 106, 2002, p. 10163-10173.
- [HIL 02] F. HILD, B. RAKA, M. BAUDEQUIN, S. ROUX, F. CANTELAUBE, « Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation », *Appl. Optics IP*, vol. 41, 2002, p. 6815-6828.
- [NOM 55] G. NOMARSKI, « Microinterféromètre différentiel à ondes polarisées », *J. Phys. Radium*, vol. 16, 1955, p. 9S-11S.
- [RAI 01] R. RAITERI, M. GRATTAROLA, H. J. BUTT, P. SKLADAL, « Micromechanical cantilever-based biosensors », *Sensors and Actuators B*, vol. 79, 2001, p. 115-126.
- [SUT 83] M.A. SUTTON, W.J. WOLTERS, W.H. PETERS, W.F. RANSON, S.R. MCNEILL, « Determination of displacements using an improved digital correlation method », *Im. Vis. Comp.*, vol. 1, 1983, p. 133-139.
- [WAL 96] S. WALDNER, « Removing the image-doubling in shearography by reconstruction of the displacement field », *Opt. Comm.*, vol. 127, 1996, p. 117-126.