



Revue des méthodes de démodulation de phase pour la microscopie interférométrique et développements récents

Cédric Bréluzeau, Alain Bosseboeuf, Sylvain Petitgrand

► To cite this version:

Cédric Bréluzeau, Alain Bosseboeuf, Sylvain Petitgrand. Revue des méthodes de démodulation de phase pour la microscopie interférométrique et développements récents. MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, IRISA – IETR – LTSI, Nov 2005, Rennes, pp.3-18. inria-00000870

HAL Id: inria-00000870

<https://inria.hal.science/inria-00000870>

Submitted on 29 Nov 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revue des méthodes de démodulation de phase pour la microscopie interférométrique et développements récents

Cédric Bréluzeau^(a), Alain Bosseboeuf^(a), Sylvain Petitgrand^(b)

^aInstitut d'Electronique Fondamentale, UMR CNRS 8822, Université Paris XI, 91405 Orsay

^bFogale Nanotech, Parc Kennedy, 285 rue Gilles Roberval, 30000 Nîmes

Résumé : Une synthèse des résultats des travaux de recherche et de développement sur la technique de profilométrie-vibrométrie optique interférométrique est présentée. L'accent est mis sur les applications de cette technique dans le domaine de la microtechnologie et des microsystèmes électromécaniques (MEMS) pour lequel elle est particulièrement bien adaptée. D'autres possibilités de cette technique comme la mesure d'épaisseur de films transparents sont également illustrées. Dans une seconde partie, nous présentons nos travaux, portant sur la méthode d'analyse des figures d'interférences par la technique de démodulation par transformée de Fourier associée à une extrapolation des franges est étudiée en détail dans le cadre de la profilométrie rapide de surfaces découpées et/ou présentant des motifs. Pour de telles surfaces, les discontinuités des franges constituent une source importante d'erreurs lorsque l'extrapolation n'est pas appliquée. Des règles pratiques concernant le choix des paramètres intervenant dans la mesure (dimensions des zones à extrapoler, densité des franges, nombre d'itérations de l'algorithme d'extrapolation...) sont mises en évidence dans le but d'atteindre les objectifs de précision, de rapidité et d'automatisation des mesures, tout en s'affranchissant d'une expertise préalable de l'utilisateur.

Mots Clés : Interférométrie, transformée de Fourier, figures d'interférences, MEMS, microscopie interférométrique, vibrométrie, microélectronique.

1. INTRODUCTION

La microscopie interférométrique est une technique largement utilisée dans le domaine des microtechnologies pour la caractérisation des déformations et des vibrations des microsystèmes. Cette technique repose sur la démodulation de phase et/ou d'amplitude d'interférogrammes en lumière monochrome ou blanche, reflétant des déformations statiques ou dynamiques hors plan du microdispositif mesuré. Pour atteindre une résolution axiale nanométrique, de nombreuses méthodes d'analyse à un ou plusieurs interférogrammes ont été développées depuis les années 70 [Malacara, 1998]. Les techniques de profilométrie par décalage de phase en lumière monochrome et par balayage en lumière blanche, impliquant une variation contrôlée du déphasage entre les deux bras de l'interféromètre, permettent la caractérisation plein champ de microsystèmes avec une

résolution axiale entre 0.1 et 5 nm pour une durée de mesure comprise typiquement entre 5 et 40 secondes. La technique de démodulation de phase par Transformée de Fourier (TF) rapide ne nécessite qu'une seule image. Les temps d'acquisition et de traitement beaucoup plus courts autorisent alors des mesures en temps réel de déformations des MEMS et facilitent les mesures dans un environnement bruyé. Nous exposerons tout d'abord le principe des mesures statiques puis dynamiques par microscopie interférométrique. Nous présenterons ensuite nos travaux de recherche sur une technique automatique de démodulation, associée à une méthode itérative de réduction des effets de bord, pour l'étendre à la topographie de motifs structurés, de petites dimensions.

2. MICROSCOPIE INTERFEROMETRIQUE

2.1 Système et principe de mesure

Les microscopes interférométriques sont, dans leur version la plus simplifiée, constitués d'un microscope optique associé à un interféromètre à deux faisceaux pour lequel le chemin optique d'un des bras de l'interféromètre peut être ajusté avec précision, à l'aide d'un actionneur piézoélectrique par exemple. Dans sa configuration classique (Fig.1.a), le front d'onde incident est divisé en deux par une séparatrice. La recombinaison du faisceau de référence réfléchi par le miroir interne de l'interféromètre et du faisceau réfléchi par la surface à mesurer produit un interférogramme (Fig.3) qui est enregistré par la caméra CCD. La source de lumière est, selon le type de mesure souhaitée, une source quasi monochrome ou de lumière blanche.

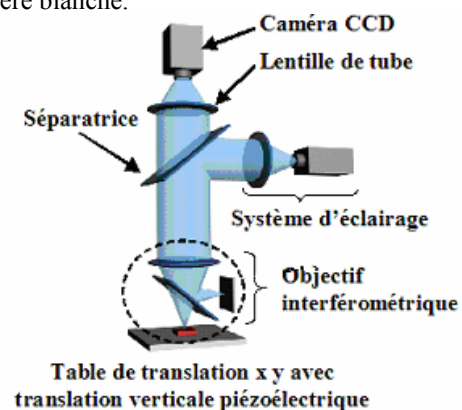


Fig.1.a Schéma d'un microscope interférométrique
Les microscopes sont munis d'une série d'objectifs de divers grossissements allant de x5 (interféromètre de type Michelson) à x40 (interféromètre de type Mirau) (Fig. 1.b).

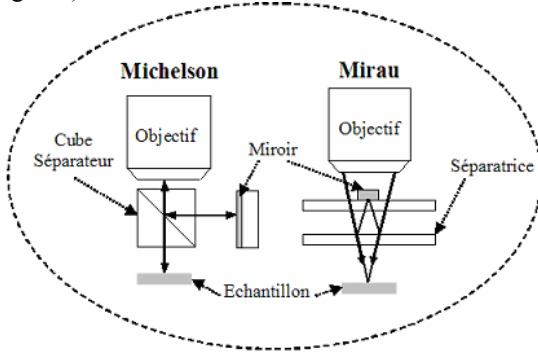


Fig.1.b Exemples d'objectifs interférométriques

A un pixel P' de coordonnées (x', y') de la caméra correspond un point P de coordonnées $(x = x'/G, y = y'/G)$ sur l'échantillon et son conjugué P'' sur le miroir de référence, où G est le grandissement global du système optique. Pour un faisceau incident (quasi)monochrome ou polychromatique (lumière blanche), l'intensité détectée peut être approximée par l'équation suivante :

$$i(\vec{r}') = D(\vec{r}')T(\vec{r}') I_0(\vec{r}') \{1 + C(\vec{r}, h - z) \cos[\varphi(\vec{r}, h - z)]\} \quad (1)$$

avec D la réponse du détecteur, T la transmission du système optique, I_0 le fond continu à la sortie de l'interféromètre, C la visibilité des franges d'interférences et φ le déphasage entre les deux fronts d'onde. La phase φ dépend à la fois de la distribution des hauteurs $h(x, y)$ à la surface de l'échantillon et de la différence de chemin optique moyenne $2z$ (Fig.2) :

$$\varphi(\vec{r}, z) = 4\pi [h(\vec{r}) - z] / \lambda_{effm} + \Delta\varphi_{MS}(\vec{r}) \quad (2)$$

avec λ_{effm} la longueur d'onde effective moyenne qui dépend de l'ouverture numérique de l'objectif et du spectre de la source et $\Delta\varphi_{MS}$ la différence du décalage de la phase à la réflexion entre l'échantillon et le miroir de référence au point considéré. La phase φ du signal contient l'information désirée sur le profil de la surface $z(x'/G, y'/G)$.

La visibilité des franges C dépend des coefficients de réflexion du miroir de référence et de la surface mesurée au point $(x'/G, y'/G)$. Elle dépend également de l'altitude $z(x'/G, y'/G)$ en raison de la cohérence limitée de la source et de la profondeur de champ limitée de l'objectif. Elle est maximum lorsque la différence de chemin optique des deux bras de l'interféromètre est nulle et décroît de part et d'autre. Elle peut être légèrement dissymétrique car il est difficile en pratique d'obtenir $h(x, y) - z = 0$ au milieu de la profondeur de champ.

La mesure de la topographie de l'échantillon étudié repose ensuite sur l'analyse des interférences (Fig.3) résultant de la recombinaison entre la lumière réfléchie par l'échantillon et celle réfléchie par le miroir de référence de l'objectif.

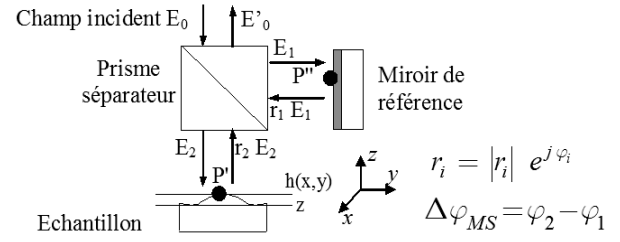


Fig.2 Principe des interférences entre les deux fronts d'onde et origine du décalage de phase

Le profil 3D de la surface ne peut être déterminé de manière précise à partir de la phase φ que si la méthode d'extraction de φ à partir de l'intensité mesurée $I(x, y)$ est insensible aux variations spatiales de I_0 et de C . Ceci peut être effectué de nombreuses manières à partir d'un ou de plusieurs interférogrammes.

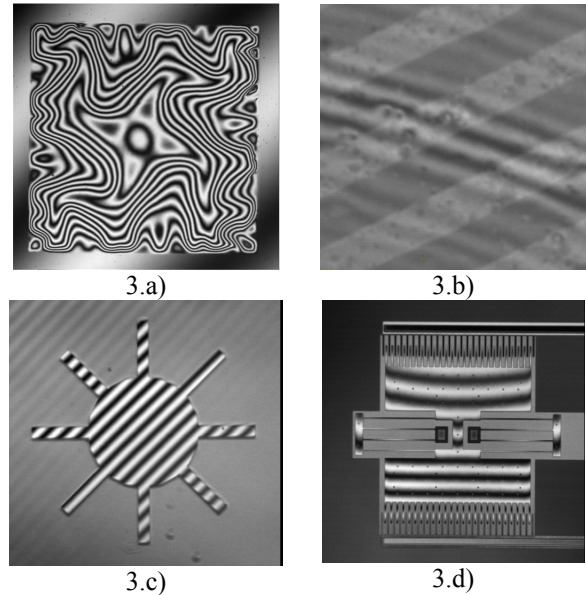


Fig.3 Interférogrammes obtenus par microscopie interférométrique. (a) Membrane flambée ($240\mu m \times 240\mu m$). Lumière monochrome. (b) Sillons gravés dans Si (Largeur : $30\mu m$, profondeur : $300nm$). Lumière blanche. (c) Motif en étoile en Si. Lumière monochrome. (d) Résonateur de Tang

2.2 Décalage de phase en lumière monochrome

La technique de décalage de phase [Creath, 1998] permet la mesure de rugosités, de déformations de microsystèmes et de marches dont les dimensions n'excèdent pas $\lambda/4$. Le principe de cette technique est d'enregistrer au minimum trois interférogrammes obtenus en lumière monochrome, pour différentes positions contrôlées de l'échantillon sous l'objectif. Cela implique donc l'utilisation d'un système de translation précis, un translateur piézoélectrique par exemple.

Le signal interférométrique étant périodique (présence de la fonction cosinus), la phase est calculée modulo π . Une étape supplémentaire consiste donc à « déplier » la phase afin d'éliminer ces sauts de phase dus à la périodicité. Les domaines d'application de cette méthode se limitent par conséquent à l'étude de surfaces ne présentant pas de discontinuités supérieures à $\lambda/4$. Les étapes successives de la profilométrie par décalage de phase sont illustrées sur la figure 4 à partir de la mesure d'une membrane flambée en silicium.

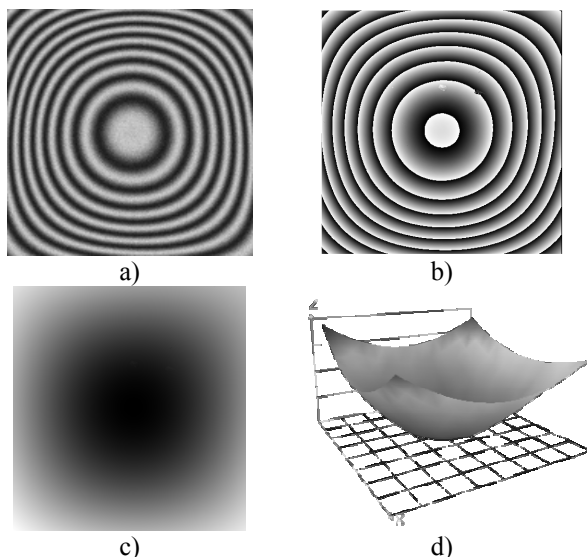


Fig.4 Mesure en décalage de phase d'une membrane en Si ($130\mu\text{m} \times 130\mu\text{m}$). (a) Interférogramme. (b) Phase pliée. (c) Surface après dépliement de la phase. (d) Reconstruction 3D

La limite de détection est de 0.1nm et la durée de mesure inférieure à quelques dizaines de secondes. Cette technique convient pour la mesure de faibles rugosités de surface (Fig.5.a), pour la mesure de profils 2D ou 3D de surfaces présentant des discontinuités inférieures à $\lambda/4$ (Fig.5.b) et pour la mesure de champs de déplacements hors plan dans la gamme 10 nm à quelques microns (cf. partie 2)

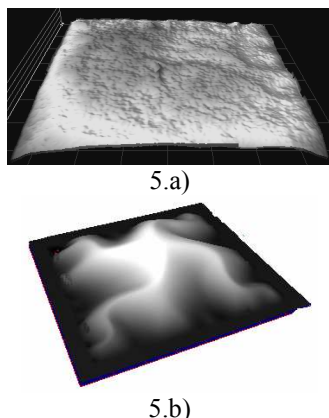


Fig.5 Exemples de mesures en décalage de phase. (a). Rugosité sur surface en Or ($950\mu\text{m} \times 950\mu\text{m}$). Rugosité rms : 20 nm. (b) Membrane flambée à 333K ($1\text{mm} \times 1\text{mm}$). Déflexion maximum : 12 μm

2.3 Profilométrie en lumière blanche

La profilométrie en lumière blanche [Stand, 1987] s'applique à la mesure d'échantillons très rugueux ou comportant des marches supérieures à $\lambda/4$. En lumière blanche, la fonction de contraste $C(z)$ présente un maximum en $z = 0$ (Fig.6) en raison de la faible cohérence temporelle de la source, quelle que soit la profondeur de champ de l'objectif. Des interférogrammes sont alors enregistrés à intervalles réguliers lors du déplacement vertical de l'échantillon et l'intensité lumineuse en chaque pixel, fonction de z , est analysée pour déterminer le maximum de l'enveloppe correspondant à la frange centrale et à l'égalité des chemins optiques. Le traitement étant indépendant pour chaque pixel, des profils 3D de géométries complexes comprenant des marches ou des motifs peuvent être alors déterminés (cf. Fig.7).

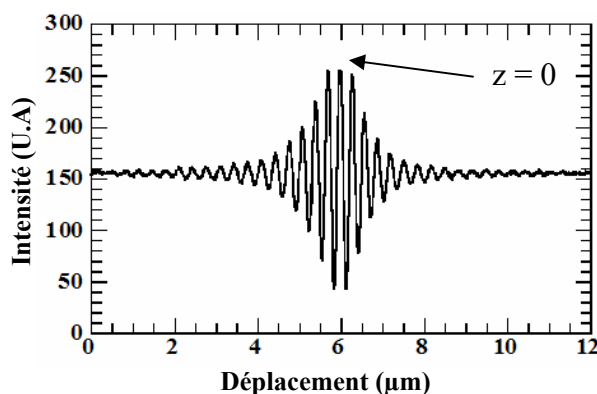


Fig.6 Interférogramme en lumière blanche enregistré sur chaque pixel de la caméra

Le balayage comprend typiquement 1000 images et dure 40s pour une dynamique de $400\mu\text{m}$. Le point de départ des valeurs de position z auquel correspond l'enregistrement est conservé.

Lors de la phase de dépouillement, un filtrage convolutif, associé à une interpolation parabolique de la forme du sommet de l'enveloppe permet une détermination à 2 nm près de la position de maximum de l'enveloppe. Le contraste est extrait et donne une cartographie de la réflectivité de la surface.

Ajoutons que cette mesure permet également de déterminer le spectre de réflectivité en longueur d'onde de chaque pixel de l'échantillon si le résultat est normalisé par une mesure effectuée sur un échantillon de référence, de réflectivité connue.

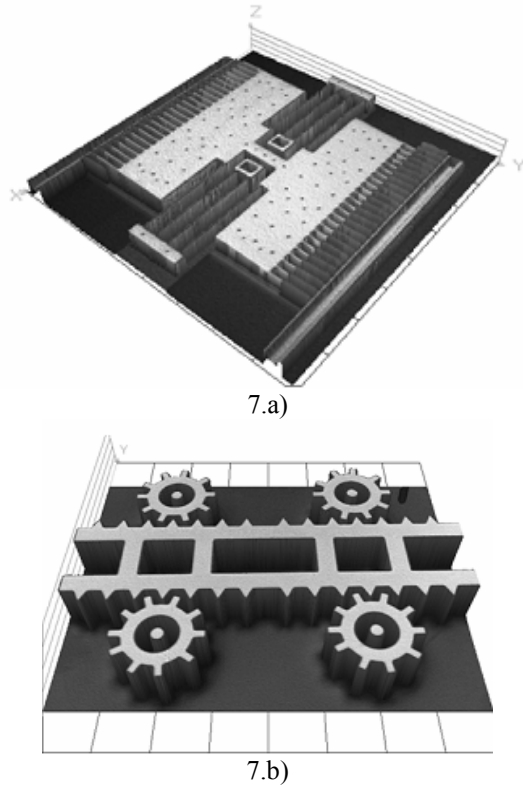
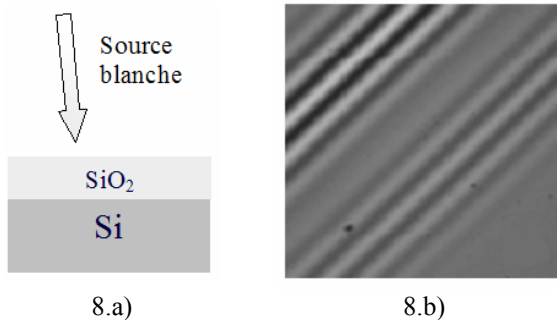


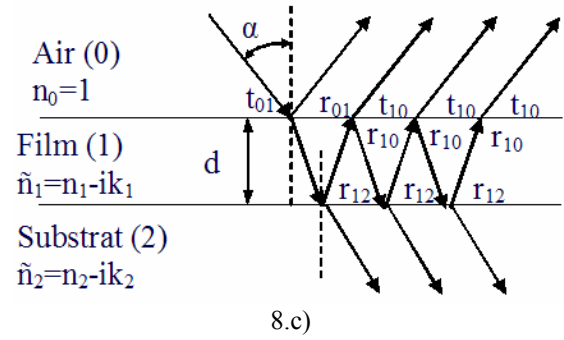
Fig.7 Exemples de mesures en lumière blanche. (a) Résonateur de Tang (440μm*410μm). Hauteur : 5.2 μm. (b) Motifs de Si en forme d'engrenage (gravure DRIE). Hauteur : 12 μm

De plus lorsque la surface mesurée est recouverte d'un film transparent épais ($>1\mu\text{m}$), l'enveloppe du signal $I(z)$ en lumière blanche présente deux lobes en raison des réflexions sur les faces supérieures et inférieures du film (Fig.8). Dans le cas où l'on utilise un objectif interférométrique avec une faible ouverture numérique, les effets liés à la polarisation et à l'angle d'incidence des faisceaux lumineux sont faibles et la distance entre les pics est égale à l'épaisseur optique du film : $n_g \cdot d$. L'indice de groupe n_g pouvant être calculé à partir du rapport des pics (R), l'épaisseur physique du film d peut alors être déterminée (Fig.9). Ainsi il est possible d'avoir rapidement et simplement une cartographie de l'épaisseur et de l'indice de groupe du film semi-transparent [Bosseboeuf, 2003a].



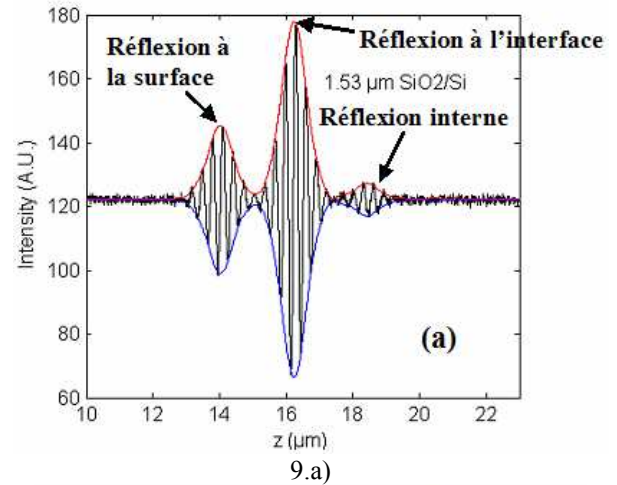
8.a)

8.b)

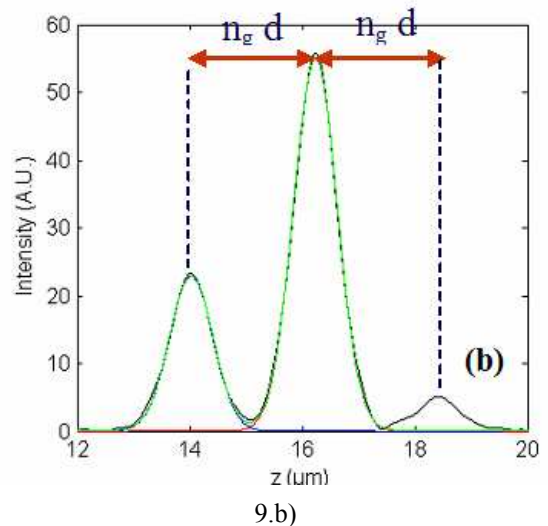


8.c)

Fig.8 Principe de la mesure d'épaisseur en lumière blanche. (a) Eclairage avec une source polychromatique. (b) Image de la caméra et observations des deux trains de franges. (c) Réflexions aux interfaces



9.a)



9.b)

Fig.9 Détection de pics. (a) Interférogramme enregistré en un point de la surface. (b) Calcul de l'enveloppe et détection des maximums

Pour la mesure de films minces (jusqu'à 50 nm), une autre méthode consiste à calculer les réflectivités spectrales de l'échantillon recouvert du film transparent et d'un échantillon de référence (dans notre cas un film d'Aluminium déposé sur un substrat de Silicium) par traitement par transformée de Fourier du signal $I(z)$ enregistré pour un point de l'échantillon. L'épaisseur du film peut être déduite de la distance entre les extrema locaux de la réflectivité spectrale normalisée ou par un fit non linéaire de la courbe de réflectivité spectrale normalisée (Fig.10). Cette méthode est applicable à la mesure de films minces (en dessous de la longueur de cohérence de la source), avec une résolution nanométrique dans le cas où la dispersion ou l'indice moyen du substrat sont connus et ce, quelque soit la connaissance à priori de la dispersion de l'échantillon, dans la mesure où l'épaisseur du film est connue à ± 100 nm.

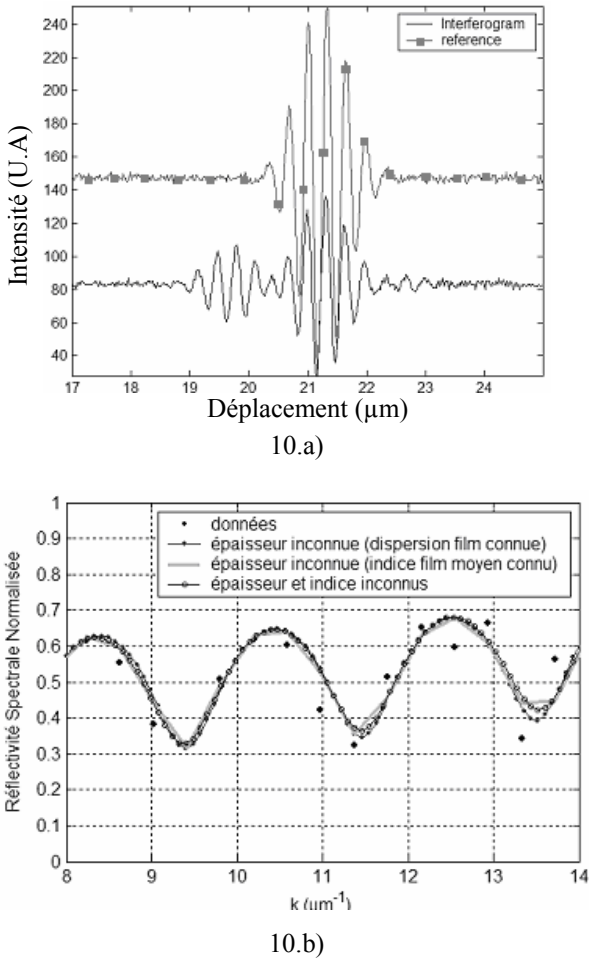


Fig.10 Étapes du calcul de la réflectivité spectrale et fits associés aux hypothèses formulées sur la nature du film transparent. (a) interférogrammes obtenus sur l'échantillon et sur la référence. (b) calcul de la réflectivité spectrale et fits

2.4 Démodulation par transformée de Fourier

2.4.1 Principe

L'analyse des interférogrammes par TF a été proposée pour la première fois par Takeda et al [Takeda, 1982] dans le cas 1D. Depuis, de nombreux auteurs ont proposé d'étendre cette technique au cas 2D [Macy, 1983] et ont apporté de nombreuses améliorations [Bone, 1986] [Kujawinska, 1988] [Petitgrand, 2001a]. Cette technique est principalement utilisée dans le cas d'interférogrammes comportant une fréquence spatiale linéaire, appelée porteuse, introduite en inclinant un des deux fronts d'ondes de l'interféromètre. Si l'inclinaison est suffisante, la figure d'interférences obtenue contient des franges approximativement rectilignes, parallèles et équidistantes (Fig.11.a). Posons θ_x and θ_y les angles d'inclinaison introduits suivant les direction Ox et Oy. La distribution d'intensité de la figure d'interférences s'écrit alors :

$$i(\vec{r}) = a(\vec{r}) + b(\vec{r}) \cos \left[\varphi(\vec{r}) + \frac{2\pi \sin \theta_x}{\lambda} x + \frac{2\pi \sin \theta_y}{\lambda} y \right] \quad (3)$$

avec $\varphi(\vec{r}) = 4\pi z(\vec{r})/\lambda$ le déphasage lié à la topographie de l'échantillon $z(\vec{r})$, λ la longueur d'onde de la source monochrome. L'inclinaison introduit une fréquence spatiale $\vec{f}_0$ de composantes $f_{0x} = \sin \theta_x / \lambda$ et $f_{0y} = \sin \theta_y / \lambda$ suivant les axes x et y. Les termes $a(\vec{r})$ et $b(\vec{r})$ représentent respectivement le fond continu et le contraste des franges. Cette équation peut se mettre sous la forme suivante :

$$I(\vec{r}) = a + c e^{2i\pi \vec{f}_0 \cdot \vec{r}} + c^* e^{-2i\pi \vec{f}_0 \cdot \vec{r}} \quad (4)$$

avec : $c = 1/2 b e^{i\varphi(x,y)}$ and c^* son conjugué complexe.

En appliquant une TF bidimensionnelle à l'équation (4) on obtient :

$$I(\vec{f}) = I(u, v) = A(\vec{f}) + C(\vec{f} - \vec{f}_0) + C^*(\vec{f} + \vec{f}_0) \quad (5)$$

Lorsque les variations de $a(x,y)$, $b(x,y)$ et $\varphi(x,y)$ sont faibles devant la fréquence de la porteuse, le spectre de Fourier présente trois lobes bien distincts : un lobe A centré sur l'origine, lié aux variations du fond continu et deux lobes symétriques C et C^* centrés sur les fréquences $\vec{f}_0$ et $-\vec{f}_0$, et dont les étendues sont liées aux déformations de la surface de l'échantillon. Ceci est illustré sur la figure 11.b, dans le cas d'un interférogramme sans bruit (Fig.11.a). Ensuite un des deux lobes (C ou C^*) est filtré, puis translaté vers l'origine pour éliminer l'inclinaison introduite. Enfin en appliquant une TF inverse au spectre obtenu, un des deux termes $c(x,y)$ ou $c^*(x,y)$ est déterminé.

La carte de phase pliée $\varphi(x,y)$ modulo 2π et le contraste des franges $b(x,y)$ sont calculés à partir de la partie réelle et de la partie imaginaire de $c(x,y)$ ou de $c^*(x,y)$. Un dépliement est alors appliqué et la topographie complète de la surface étudiée est obtenue. On note que lors du filtrage du lobe de modulation par un filtre passe-bande, dont les fréquences de coupure sont bien choisies, les très basses fréquences des variations du fond continu et les hautes fréquences liées au bruit sont éliminées.

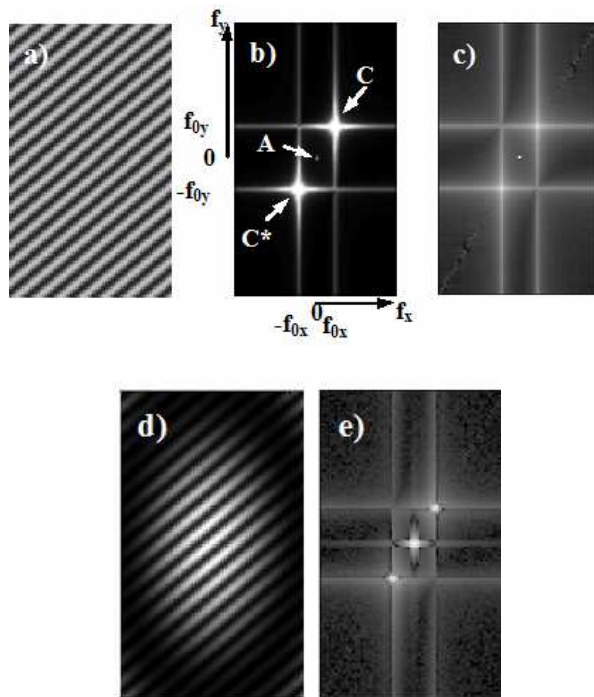


Fig.11 (a) Simulation d'un interférogramme, obtenu en lumière monochrome à partir d'un plan incliné. Nombre non entier de franges suivant les directions x et y . (b) Spectre de Fourier, échelle linéaire. (c) Spectre de Fourier, échelle log. (d) Interférogramme multiplié par une fonction d'apodisation. (e) Spectre de Fourier de l'interférogramme apodisé, échelle log. Taille de l'interférogramme : 64x128 pixels.

Les étapes de la démodulation par TF sont représentées sur la figure 12 dans le cas d'une mesure sur trois poutres en silicium.

2.4.2 Limitations de la méthode

Un défaut bien connu de la technique de démodulation par TF est l'apparition d'erreurs significatives aux bords de l'image lorsque les nombres de franges suivant les directions horizontale et verticale ne sont pas entiers. Ces erreurs proviennent de la fuite d'énergie résultant de la périodicité cyclique imposée par la transformée de Fourier. Cette fuite d'énergie se traduit dans l'espace de Fourier par l'apparition de bandes verticales et horizontales centrées sur la porteuse (Fig.11.c et 11.e). Les artéfacts résultant après démodulation de la phase au voisinage des bords des motifs sont particulièrement critiques pour l'étude des MEMS qui présentent des surfaces très découpées. Afin de réduire ces erreurs, deux méthodes peuvent être appliquées.

La première consiste à multiplier l'interférogramme enregistré par une fonction d'apodisation [Kujawinska, 1991] qui réduit l'amplitude des franges aux bords de l'image. Ceci est illustré sur les figures 11.d et 11.e lorsque l'interférogramme original est multiplié par une fonction de Hamming. Cette méthode est facile à mettre en œuvre mais présente deux inconvénients majeurs. Tout d'abord elle diminue le rapport signal sur bruit au bord de l'image. Ensuite, elle n'est pas applicable lorsque les surfaces étudiées présentent des discontinuités à l'intérieur même de l'image, comme cela est visible sur la figure 12 qui illustre une mesure de poutres en silicium. Dans ce cas les franges doivent être extrapolées dans les régions découpées du dispositif.

Une deuxième technique est de reconstruire aux bords de l'interférogramme des franges extrapolées en faisant appel à l'algorithme de Gerchberg [Gerchberg, 1974] [Roddier, 1987]. Celui-ci procède par itérations en remplaçant les zones sans franges ou avec des franges faiblement contrastées par des franges calculées. Une première étape consiste à calculer la TF de l'interférogramme et à filtrer le lobe de modulation par un filtre passe-bande. Ensuite une TF inverse est appliquée, le signal réel fait alors apparaître les franges extrapolées. Enfin les données valides, correspondant à un contraste des franges important, sont réintroduites dans l'image.

Cette procédure est ensuite itérée de manière à assurer une continuité du contraste et de la forme entre les « vraies » franges et les franges extrapolées.

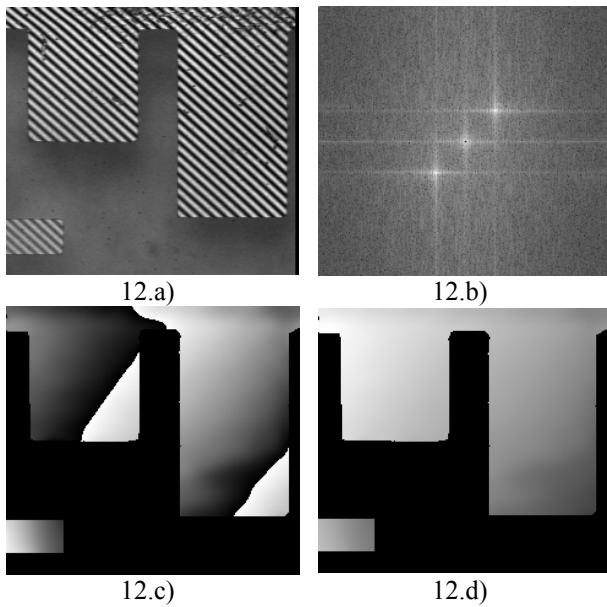


Fig.12 Étapes de la méthode de démodulation par TF pour des poutres en Si déformées. (a) Interférogramme enregistrés. (b) Spectre de Fourier. (c) Phase pliée. (d) Phase dépliée.

2.5 Vibrométrie par microscopie interférométrique

Les techniques de profilométrie s'appliquent sur des objets fixes. Or le fonctionnement de nombreux microdispositifs met en jeu des mouvements mécaniques. Dans le cas de mouvements quasi-statiques, il est possible de réaliser une mesure à chaque étape intermédiaire du mouvement. C'est le cas par exemple de la caractérisation des films piézo-électriques, ou d'une déformation sous l'effet d'un actionnement électrostatique pour lesquels un signal d'excitation constant par paliers peut être appliqué. Dans le cas de mouvements mettant en jeu des forces d'inertie, de mouvements répétitifs, en particulier pour la caractérisation des modes de vibrations des structures mécaniques, il est nécessaire d'utiliser une technique d'éclairage stroboscopique.

Dans ce cas on doit considérer que le mouvement se produit avec une période courte devant le temps d'exposition d'une image par la caméra.

On utilise un éclairage pulsé synchronisé avec le mouvement de l'objet, l'effet d'intégration durant l'exposition sur la caméra permet d'atteindre un niveau de signal lumineux satisfaisant (chaque image caméra intègre un grand nombre de pulses lumineux). L'image montre l'objet comme s'il était immobile, figé dans une position intermédiaire de son mouvement périodique.

On peut alors ajuster librement la position observée en modifiant la position temporelle des pulses lumineux par rapport au mouvement de l'objet. Il devient ainsi possible d'observer n'importe quelle position d'un objet en vibration, et d'appliquer les techniques de profilométrie décrites précédemment. De plus, la technique de démodulation de phase par TF permet une mesure en temps quasi réel (12 à 25 profils 3D/s) des modes de vibrations de microdispositifs de géométrie simple comme des micropoutres ou des membranes. Il est ainsi possible d'étudier rapidement l'évolution des modes de vibration en fonction du temps, de la fréquence ou de l'amplitude d'excitation avec une résolution verticale (sub)nanométrique [Bosseboeuf, 2003b] [Petitgrand, 2001b]. Avec des sources pulsées à base de LEDs, ces mesures stroboscopiques peuvent être réalisées jusqu'à la fréquence de 1 MHz.

La combinaison de mesures pour différents retards entre l'excitation et les impulsions lumineuses permet de déterminer à la fois la cartographie de la phase et de l'amplitude de vibration et peut être utilisée pour la mesure de phénomènes transitoires répétitifs.

Des mesures stroboscopiques en décalage de phase et par analyse de Fourier sont présentées sur la figure 13.

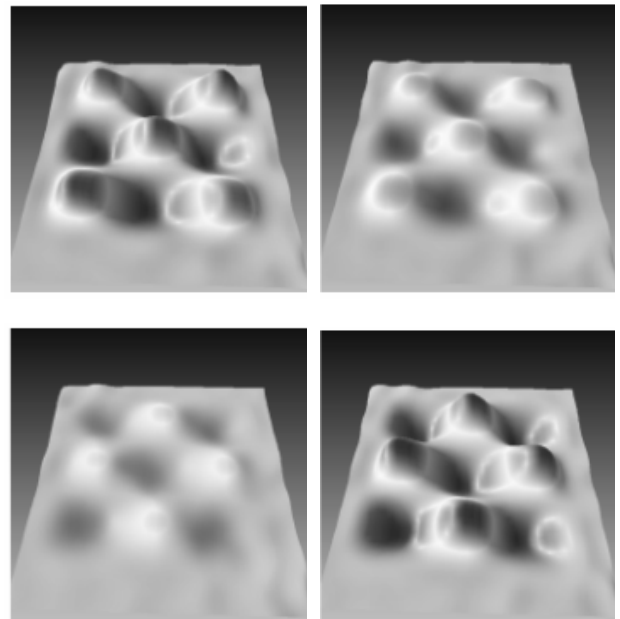


Fig.13 Mesure résolue en temps par interférométrie stroboscopique avec démodulation de phase par FFT du profil 3D du mode de vibration 33 à 293.3kHz d'une membrane carrée de Pt/TiO₂/Ti/Si₃N₄ Amplitude de vibration : 120nm. Taille de la membrane 622μm x 622μm

3 AUTOMATISATION DE LA METHODE DE DEMODULATION PAR FFT

La technique de démodulation de phase par Transformée de Fourier rapide (TF) ne nécessite qu'une seule image, permettant d'accéder à des temps d'acquisition beaucoup plus courts. Des mesures dans un environnement perturbé comme celui des salles blanches sont alors possibles. De plus l'algorithme de calcul de la TF est très rapide, ce qui constitue un intérêt pour les mesures en temps réel de déformations des MEMS (cf. partie 2.).

Nous nous intéressons dans cette étude à l'automatisation de cette technique associée à une méthode itérative de réduction des effets de bord inhérents à la démodulation par TF, adaptée à la topographie de motifs structurés, de petites dimensions. En effet pour des mesures statistiques sur un wafer donné ou pour des mesures en fonction d'un paramètre extérieur, de nombreux interférogrammes doivent être enregistrés et analysés, ce qui souligne la nécessité de mettre en place une mesure automatique. Enfin il est préférable de limiter le nombre de paramètres de mesure à ajuster et de s'affranchir d'une connaissance a priori de l'échantillon.

3.1 Optimisation des paramètres de la démodulation

3.1.1 Choix des interférogrammes simulés

Afin d'étudier les paramètres principaux qui gouvernent la méthode de démodulation par TF, des interférogrammes simulés ont été créés à partir de surfaces calculées de micro-poutres déformées et de micro-membranes et micro-ponts flambés (Fig.14). La longueur d'onde de la source a été choisie égale à 600nm pour chacun de ces interférogrammes. Pour les membranes et les ponts flambés, le maximum de la déflexion se trouve au centre de l'image. Pour les poutres déformées, la déflexion maximum est localisée au bord de l'image.

Typiquement, la dimension des interférogrammes est de 256*256 pixels et le nombre de franges sur les interférogrammes est généralement compris entre 8 et 25 suivant les directions x et y. Ces valeurs ont été choisies de manière à représenter au plus près le cas d'une mesure réelle. En effet, bien qu'il ait été démontré [Macy, 1983] que la mesure est optimale pour un nombre de franges sur l'image correspondant à 3 pixels par frange, la longueur de cohérence limitée de la source et la faible profondeur de champ de l'objectif interférométrique limitent la valeur de la porteuse. Ainsi une inclinaison importante, nécessaire pour obtenir les 3 pixels par frange, se traduit dans le cas pratique par une forte diminution du contraste des franges aux bords de l'image.

De la même manière les valeurs de la déflexion maximum des microsystèmes élémentaires décrits sur la figure 14 ont été choisies de manière à illustrer les cas pour lesquels la démodulation par TF est difficile à appliquer dans de bonnes conditions.

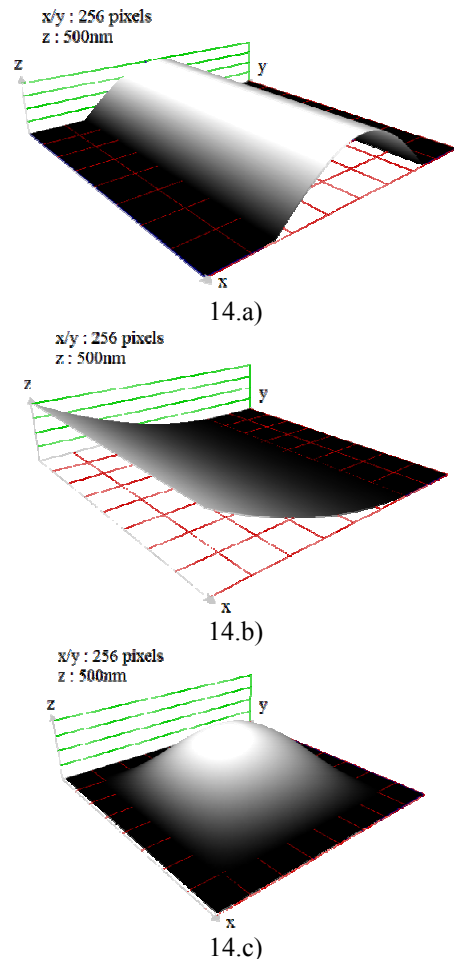


Fig.14 Exemples de microsystèmes élémentaires utilisés pour les simulations : (a) Pont flambé, b) Poutre déformée, c) Membrane flambée

La première étape de la méthode de démodulation par TF, décrite dans la partie 1.4.1, consiste à détecter les angles d'inclinaison ou la fréquence de la porteuse. Ceci peut être réalisé dans l'espace réel par « zero-crossing » ou dans l'espace de Fourier par localisation du maximum du lobe de modulation. La deuxième méthode est ici appliquée. Cependant la discrétisation de la figure d'interférence ne permet pas toujours de déterminer exactement la valeur de la porteuse. Ceci implique la présence sur la surface reconstruite d'une inclinaison résiduelle qui peut être supprimée par la suite par détection du plan moyen (méthode des moindres carrés). Cela génère également des ondulations parasites sur la topographie, liées au décentrement du filtre passe-bande lors de l'étape de filtrage du lobe de modulation.

Il est possible de corriger cet artéfact par interpolation du signal dans l'espace de Fourier ou en modifiant la valeur de la porteuse de manière à minimiser les ondulations dans les zones planes.

La deuxième étape consiste à filtrer dans l'espace de Fourier un des deux lobes de modulation avec un filtre approprié. Cependant le choix d'un filtre passe-bande, dont la forme et les fréquences de coupure sont adaptées à la forme et à l'étendue du lobe, est difficile à obtenir dans le cas pratique. En effet la grande variété des échantillons rencontrés, des conditions expérimentales (nombre de franges, variations du fond continu...) rend l'automatisation difficile à atteindre.

Dans le but d'optimiser la méthode nous avons étudié l'influence de la taille et de la forme du filtre sur le résultat final. Parmi les différentes formes de filtres envisagées, des filtres rectangulaires, circulaires binaires ou avec une décroissance sinusoidale et des filtres adaptés à la forme du lobe de modulation ont été étudiés. Ces filtres sont illustrés sur la figure 15. Les filtres adaptés, représentés sur les figures 15.d et 15.e ont été créés à partir du lobe de modulation d'une membrane flambée. Le filtre adapté de la figure 15.d est normalisé par la valeur maximum du lobe. Ce filtre ne nécessite aucun seuillage, à l'inverse du filtre adapté binaire, calculé par seuillage du lobe.

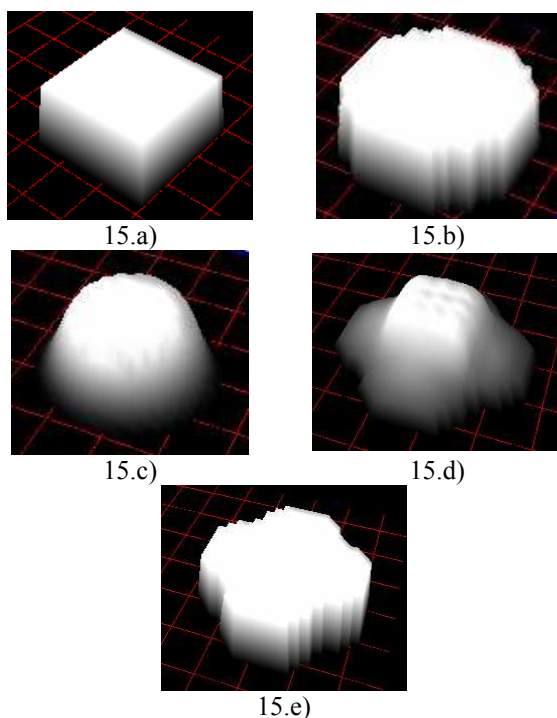


Fig.15 Filtres étudiés pour l'étude de la méthode de démodulation par TF. (a) Filtre rectangulaire. (b) Filtre circulaire binaire. (c) Filtre circulaire à bords doux. (d) Filtre adapté normalisé. (e) Filtre adapté binaire.

3.1.2 Influence de la taille du filtre

La résolution latérale de la phase reconstruite est améliorée lorsque la taille du filtre est augmentée. Dans le cas d'interférogrammes faiblement bruités, des filtres étendus, de forme quelconque, peuvent être utilisés. Dans ce cas les erreurs résultantes sont principalement dues aux effets de digitalisation ou d'une mauvaise détection de la porteuse, comme cela est décrit dans la partie 1.4.2. Une précision jusqu'à $\lambda/500$ sur la mesure de la phase peut alors être atteinte. Lorsque le niveau de bruit devient significatif, un filtre étroit est préférable. L'influence de la taille du filtre est mise en évidence sur la figure 16. La courbe décrit l'étude d'un interférogramme d'une membrane flambée auquel a été ajouté 10% de bruit gaussien et d'un filtrage du lobe par un filtre circulaire. Une autre source d'erreur provient de la coupure du lobe par un filtre passe-bande dont les fréquences de coupure sont sous-estimées (Fig.17). Ceci peut être évité en détectant de manière automatique la taille du filtre, estimée par seuillage du lobe de modulation dans l'espace de Fourier.

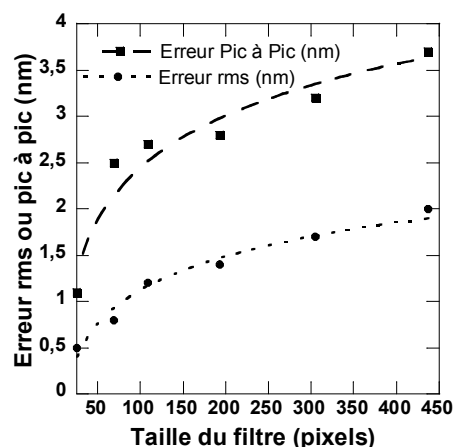


Fig.16 Erreurs rms et Pic à Pic en fonction de la taille du filtre. Calcul effectué sur une membrane flambée de déflexion maximum égale à 200 nm.

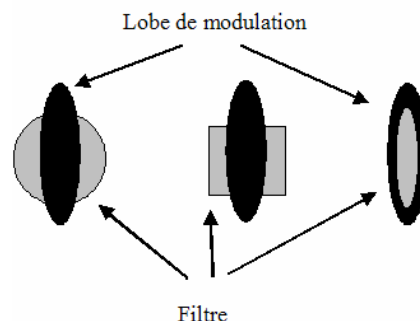


Fig.17 Troncature d'un lobe de forme anisotrope par un filtre inapproprié. De gauche à droite : filtre circulaire, rectangulaire et adapté.

3.1.3 Influence de la forme du filtre

Les erreurs sur la phase peuvent également être dues à un choix inadéquat de la forme du filtre dans l'espace de Fourier [Talamonti, 1996] [Herráez, 1999]. Dans le cas d'interférogrammes très bruités, des fréquences liées à ce bruit sont distribuées autour du lobe. Ainsi les filtres classiques, pour lesquels l'étendue spectrale ne coupe pas ces fréquences parasites, entraînent la présence de bruit sur le résultat final. En d'autres termes, lorsque les considérations liées au bruit ne peuvent pas être négligées, des filtres passe-bande avec des fréquences de coupure ajustées à la forme du lobe sont à privilégier. Cependant, du fait de l'étendue des deux lobes de modulation, qui dépend des fréquences spatiales de la figure d'interférence sans l'inclinaison, des formes de filtres à symétrie circulaire sont requis lorsqu'une résolution latérale isotrope est critique (cas des systèmes symétriques comme les membranes). Inversement, lorsque les microsystèmes présentent une forme fortement anisotrope, comme les poutres déformées ou les micro-ponts, les lobes de modulation s'étendent principalement suivant la direction de sa plus grande dimension. Un filtre dont la forme est anisotrope donnera alors la meilleure résolution. La figure 18 illustre les filtres les plus étroits qui peuvent être appliqués au filtrage du lobe de modulation calculé par TF d'un interférogramme simulé à partir d'un micro-pont flambé. Comme cela est attendu, le minimum de la valeur de l'erreur rms est atteint lorsque le filtre qui a été appliqué est un filtre adapté ou un filtre rectangulaire (Tableau 1). En fait, pour un tel échantillon, le lobe de modulation s'étend principalement suivant l'axe f_y dans l'espace de Fourier. Les deux filtres précédents sont alors mieux proportionnés vis à vis de la forme du lobe que le filtre circulaire.

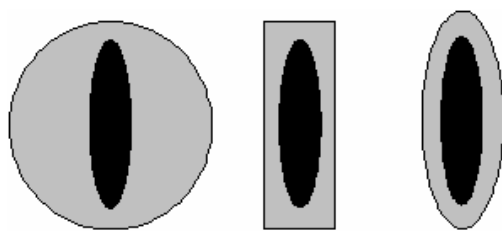


Fig.18 Lobe anisotrope et taille minimum du filtre pour différentes formes de filtre : circulaire, rectangulaire, adapté.

Forme du filtre	Erreur rms (nm)
Rectangulaire	3.1
Circulaire binaire	5.7
Circulaire à bords doux	4.2
Adapté binaire	3

Tab.1 Erreur rms sur le profil de la surface pour plusieurs formes de filtre de même dimension. Cas d'un pont flambé.

Cette partie souligne l'importance de la forme du filtre et la difficulté pour l'utilisateur de choisir le filtre optimal. En faisant appel au filtre adapté binaire, calculé par seuillage de l'amplitude du lobe de modulation, il n'est plus nécessaire de connaître a priori l'allure de l'échantillon. Ainsi des mesures précises et automatiques peuvent être mises en œuvre. De plus la valeur du seuil peut elle-même être déterminée automatiquement, en calculant le niveau de bruit dans la partie du spectre où se trouvent les hautes fréquences spatiales. Le seul inconvénient est que de tels filtrages ont pour conséquence une anisotropie de la résolution latérale de la surface reconstruite.

3.2 Optimisation des paramètres de l'extrapolation

3.2.1 Détection des zones sans franges

Comme cela a été présenté dans la partie 1.4.2, durant l'étape d'extrapolation, des franges sont calculées par transformées de Fourier directes et inverses successives. Ensuite les valeurs de l'interférogramme original, pour lesquelles le contraste des franges est au dessus d'un certain seuil, sont réintroduites. Les zones extrapolées se situent donc aux bords de l'image autour de laquelle une marge de valeurs nulles a été ajoutée et dans les régions à l'intérieur de l'image sans franges ou avec des franges parasites faiblement contrastées (Fig.19.a). La bande encadrant l'interférogramme original permet à la fois de repousser les effets de bords loin des zones utiles où la meilleure résolution est attendue, d'ajouter des franges extrapolées corrigeant les discontinuités des franges liées à la dimension finie du signal traité par TF et d'ajuster le nombre de points pour atteindre une puissance de 2, valeur qui minimise le temps de calcul de la TF. Dans le cas, fréquent lors de l'étude de microsystèmes présentant des motifs complexes et découpés, des zones à extrapoler localisées au centre de l'image, il est nécessaire de détecter avec une très bonne résolution, les surfaces où les franges extrapolées seront conservées. Pour cela un masque binaire peut être automatiquement généré en seuillant la carte de contraste des franges, calculée préalablement en appliquant une première démodulation par TF. Ce calcul implique donc un filtrage du lobe et un filtre optimal doit être choisi. De nombreuses simulations dans des conditions variées ont fait apparaître qu'un filtre rectangulaire étendu aux hautes fréquences spatiales donne les meilleurs résultats. Un filtre moins étendu a pour effet d'arrondir les contours et de conduire à un masque erroné (Fig.19.b). C'est ce qui est illustré sur la figure 19 dans le cas de micro-ponts flambés sur lesquels des poussières créent des discontinuités de la figure d'interférence. La figure 19.d illustre le masque binaire établi à partir de la carte de contraste de la figure 19.c (les vraies valeurs seront réimplantées dans les zones blanches).

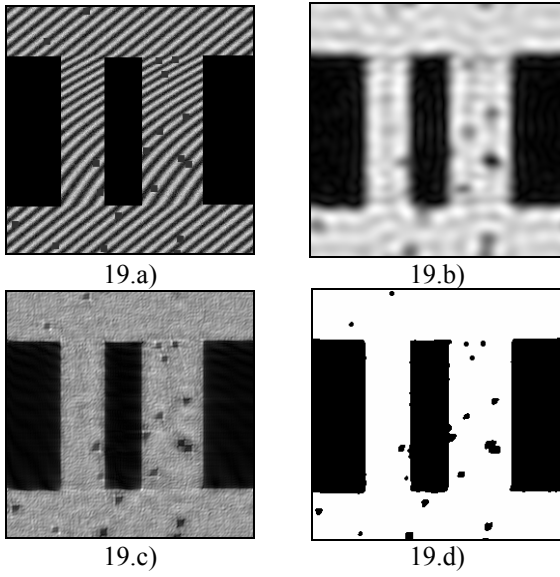


Fig.19 Détection des zones invalides par TF. a) Interférogramme original simulé (ponts flambés). b) Carte de contraste calculée après démodulation incluant un filtre étroit. c) Carte de contraste dans le cas d'un filtre large-bande. d) Masque binaire calculé par seuillage du contraste 19.c.

La détection des zones pour lesquelles le contraste est faible est également très utile pour la suppression de franges parasites, dont la présence peut affecter sensiblement le résultat final, particulièrement lorsque leur fréquence est proche de la fréquence de la porteuse.

3.2.2 Convergence de l'algorithme d'extrapolation

L'extrapolation des franges par l'algorithme de Gerchberg est une méthode itérative qui peut être coûteuse en terme de temps de calcul. Le nombre d'itérations est donc un critère important car s'il doit être suffisant pour assurer la continuité de la forme des franges et de leur contraste, il ne doit pas être surestimé et augmenter inutilement la durée du traitement. Afin d'étudier ce paramètre nous avons fait appel à l'énergie contenue dans l'interférogramme extrapolé après remplacement sur la continuité du contraste des franges. En effet, pour les premières étapes de l'algorithme, le contraste des franges extrapolées est faible et il converge peu à peu vers celui des franges contrastées de l'interférogramme original. Ainsi l'énergie totale normalisée est d'abord faible et converge peu à peu vers celle de l'interférogramme original. L'énergie a été calculée comme suit :

$$E = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \left[\sum_{i,j=1}^{N_x, N_y} |FT(I_{ij})|^2 \right] \quad (6)$$

avec $N_x \cdot N_y$ le nombre total de pixels, I_{ij} l'intensité mesurée au pixel de coordonnées (i,j) .

Le comportement de l'énergie a été étudié pour différentes tailles de filtre et pour différentes dimensions de la bande d'extrapolation ajoutée autour de la figure d'interférences. Les résultats sont présentés sur la figure 20 et montrent la convergence de l'algorithme. On peut remarquer qu'une bande étroite et un filtrage étroit du lobe de modulation accélèrent la convergence. Cependant un filtre trop étroit ne permettra pas d'assurer la continuité de la forme des franges extrapolées, en particulier lorsque les franges originales sont très déformées. Un bon compromis est d'associer des itérations avec des filtres larges pour assurer la continuité de la forme des franges (au début et à la fin du processus) et des itérations au cours desquelles le filtre utilisé est étroit et accélère la convergence. De plus une bande d'extrapolation dont la largeur atteint 10% de la dimension de l'interférogramme s'est révélée suffisante dans la plupart des cas (voir également partie 3.2.4). Enfin une dernière façon d'accélérer la convergence est d'augmenter le gain de l'extrapolation en multipliant l'amplitudes franges extrapolées par un facteur supérieur à 1. Dans ce cas, la valeur de l'énergie normalisée de l'interférogramme extrapolé peut être comparée à celle de l'interférogramme de départ afin d'arrêter l'itération lorsque ces deux valeurs se rejoignent. Ceci évite que l'amplitude des franges extrapolées dépasse celle des vraies franges.

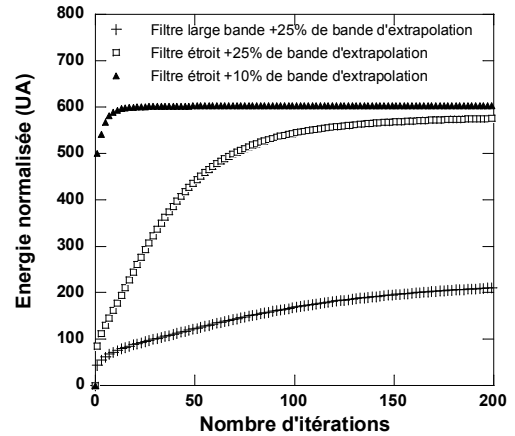


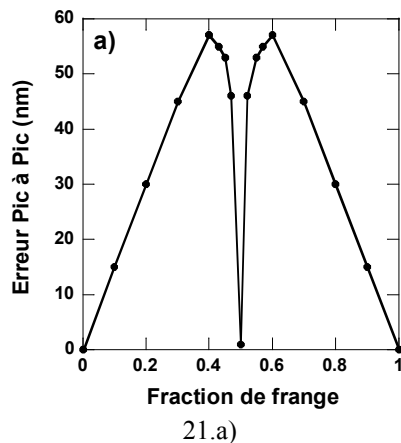
Fig.20 Convergence de l'algorithme d'extrapolation étudiée à travers un critère énergétique en fonction du nombre d'itérations, de la taille du filtre intervenant lors du processus de calcul des franges et de la taille de la bande d'extrapolation. Taille de l'image : 256x256 pixels.

3.2.3 Optimisation de la forme du filtre

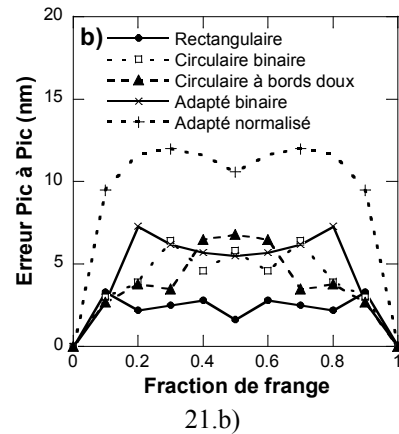
L'objectif de cette partie est d'évaluer l'influence de la forme du filtre utilisé durant l'étape d'extrapolation qui atténue l'effet de fuite d'énergie (cf. partie 1.4.2) dû à la présence d'un nombre non entier de franges suivant les directions horizontales et verticales. Les filtres étudiés sont ceux représentés sur la figure 15. La

qualité des résultats a été quantifiée en mesurant l'erreur pic à pic dans la région d'intérêt.

Les simulations ont été faites à partir d'interférogrammes calculés pour un pont flambé. Les résultats sont présentés sur la figure 21 dans une configuration où les franges sont faiblement déformées et sur la figure 22 lorsque la déformation est importante. Dans le premier cas le lobe dans l'espace de Fourier est quasi isotrope alors que dans le second, il est très étendu dans une seule direction. Sans extrapolation, des erreurs importantes apparaissent sur la topographie finale avec un maximum lorsque la fraction non entière de frange sur l'image est égale à 0.5 ± 0.1 (Fig.22.a et Fig.23.a). Ces erreurs sont particulièrement significatives dans la bande d'extrapolation, dont la taille a été fixée à 20% de la largeur de l'interférogramme original. Lorsque la fraction non entière de frange dans l'image atteint la valeur 0.5, l'erreur mesurée est étonnamment minimale. Ceci est lié au fait que la discontinuité des franges aux bords de l'interférogramme se traduit à la fois par une erreur sur la mesure de la surface et sur celle du contraste. Dans le cas particulier d'un nombre de frange égale à une valeur demi-entière (fraction de frange = 0.5) l'erreur est convertie entièrement sur le contraste. La surface est alors correctement mesurée. Dans tous les autres cas une réduction très significative de l'erreur pic à pic est obtenue lorsque l'extrapolation des franges est appliquée (Fig.21 et Fig.22). Lorsque le lobe est (quasi) isotrope, les différents filtrages conduisent à une précision semblable (entre 3 et 7 nm) à l'exception du filtre adapté normalisé qui ne réduit pas fortement les erreurs. Inversement, lorsque le lobe est fortement anisotrope, l'influence de la forme du filtre est clairement mise en évidence. Les filtres adaptés assurent alors la meilleure précision. Le filtre adapté binaire est le plus performant mais si un compromis est possible sur la précision, le filtre adapté normalisé n'implique pas de définir un seuil pour une erreur de mesure très légèrement supérieure. De manière générale, le filtre adapté binaire est le plus fiable quelque soit la forme du lobe de modulation.



21.a)



21.b)

Fig.21 Erreur pic à pic en fonction de la fraction non entière de franges sur l'image pour différentes formes de filtres. a) sans extrapolation. b) avec extrapolation. Taille de l'interférogramme : 256x256 pixels. Nombre de franges : 15 à 16 suivant x, 20 suivant y. Déflexion maximale : 200 nm.

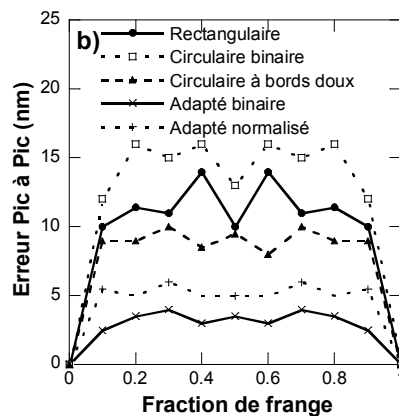
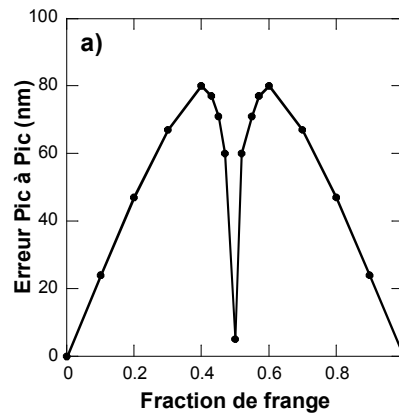


Fig.22 Erreur pic à pic en fonction de la fraction non entière de franges sur l'image pour différentes formes de filtres. a) sans extrapolation. b) avec extrapolation. Taille de l'interférogramme : 256x256 pixels. Nombre de franges : 15 à 16 suivant x, 20 suivant y. Déflexion maximale : 500 nm.

3.2.4 Influence de la taille de la bande d'extrapolation

Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer la taille optimale de la bande d'extrapolation. Cette étude a été menée sur deux interférogrammes de dimensions respectives 256x256 pixels et 64x256 pixels, tous deux dans le cas d'une mesure d'un pont flambé. Les résultats sont visibles sur la figure 23 pour différentes densités de franges (nombre de pixels par frange) mais avec un nombre identique d'itérations. Quelque soit la densité de frange et la taille de l'interférogramme, l'erreur finale diminue très rapidement dès lors que la largeur de la bande d'extrapolation dépasse 10% de la largeur de l'interférogramme. Au delà de cette valeur, l'erreur reste constante et on observe même une légère augmentation lorsque la bande d'extrapolation devient très grande. Ce phénomène est dû au fait que, à partir d'une certaine largeur de la bande, le rapport entre l'information connue (données de l'interférogramme original) et l'information inconnue (franges à extrapoler) devient trop faible et un plus grand nombre d'itérations est alors nécessaire. L'erreur est minimale lorsque la largeur de la bande est comprise entre 10% et 30% de la taille de l'image acquise par la caméra. Ceci est illustré par la comparaison entre les figures 23.a et 23.b et l'on note que l'erreur est plus faible ($\approx$ réduction par 2) lorsque l'interférogramme original est de grande dimension.

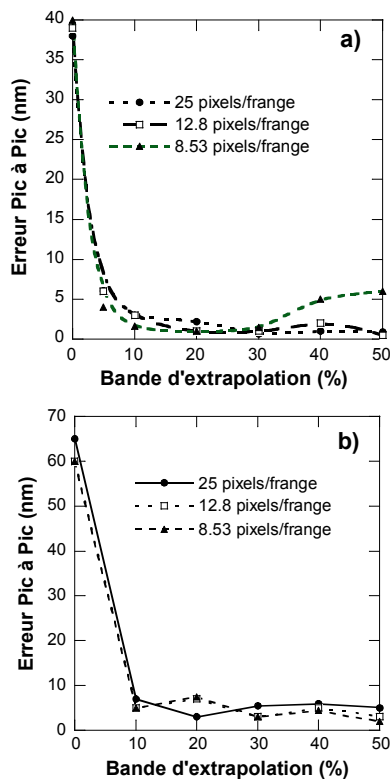


Fig.23 Erreur pic à pic en fonction de la taille de la bande d'extrapolation pour différentes densités de franges. Nombre d'itération : 10. a) Taille de l'interférogramme : 256x256 pixels, b) Taille de l'interférogramme 64x256 pixels. Déflexion maximum : 300 nm.

3.2.5 Influence de la taille de l'interférogramme

Il est intuitif de penser que l'effet de fuite de l'énergie sera d'autant plus important que la taille de l'image sera petite. Dans le but de quantifier le bénéfice apporté par l'extrapolation des franges dans le cas d'interférogrammes de petites dimensions, des simulations ont été effectuées. L'étude a été menée en conservant une taille fixe de la bande d'extrapolation (50 pixels autour de l'image) et une largeur variable de l'image originale. La figure d'interférence a été obtenue sur un pont flambé avec une déflexion maximale de 300 nm. La figure 24 donne la portion utile de l'image (en pourcent par rapport à la dimension de l'image). Cette portion utile est définie comme étant la zone de la topographie calculée, finale, dans laquelle l'erreur pic à pic ne s'écarte pas de l'erreur rms au centre. Cette information permet de savoir quelle proportion de la surface calculée représente des résultats fiables. Ceci est particulièrement utile lorsqu'on analyse des surfaces présentant un rapport d'aspect important. Les courbes de la figure 24 montrent que la surface mesurée fiable diminue très fortement lorsque la largeur de l'interférogramme est inférieure à 100 pixels environ. De plus, le nombre de pixels valides augmente avec la densité de franges. Ainsi, si on souhaite mesurer des motifs étroits par interférométrie avec la méthode démodulation de phase par TF, il est recommandé d'utiliser une bande d'extrapolation large et de favoriser une densité de franges importantes (en augmentant l'inclinaison de l'échantillon ou du miroir de référence).

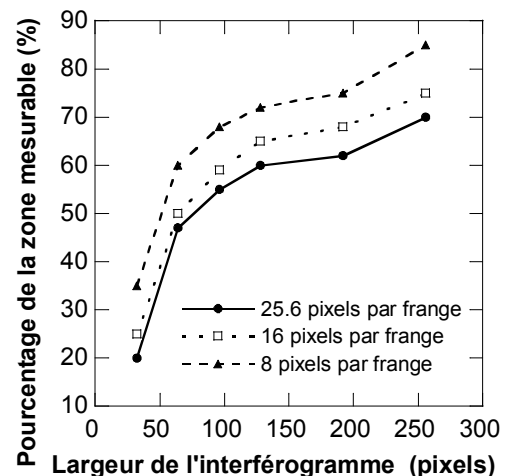


Fig.24 Influence de la largeur de l'interférogramme pour une bande d'extrapolation constante. Hauteur de l'image : 256 pixels. Nombre d'itérations de l'étape d'extrapolation : 10.

3.3 Résultats expérimentaux

Des mesures automatiques de la surface de microsystemes par démodulation par TF associée à une extrapolation des franges décrite précédemment, ont été mises en œuvre. Des interférogrammes ont été enregistrés au moyen d'un microscope interférométrique de la société Fogale Nanotech [Fogale, 2005] muni d'un objectif de type Michelson x5. La figure 25 illustre un exemple de mesure. Il s'agit de la caractérisation de poutres en silicium réalisés sur un substrat SOI et réalisées par gravure de la couche sacrificielle. Cette mesure a été faite dans le but de déterminer quelle était la longueur maximale d'une poutre pouvant être fabriquée sans qu'elle soit affectée par les forces de capillarité du substrat. La largeur des poutres est de 20 μm et l'épaisseur de la couche sacrificielle est de 500 nm. La figure 25.a représente l'interférogramme enregistré. Les franges contrastées correspondent à la surface des poutres et on observe également des franges faiblement contrastées sur le substrat. Le masque binaire extrait du contraste de franges seuillé est visible sur la figure 25.b. Ce masque a été utilisé lors de l'étape d'extrapolation pour conserver les données originales des franges sur les poutres. Le résultat de l'extrapolation est illustré sur la figure 25.c. et le résultat final sur la figure 25.d. La reconstruction tridimensionnelle de la surface (Fig.25.e) montre que les deux poutres les plus longues sont collées au substrat alors que les poutres plus courtes sont parfaitement libérées et plates. Ce résultat a été confirmé par une mesure en décalage de phase (cf. partie 1.2).

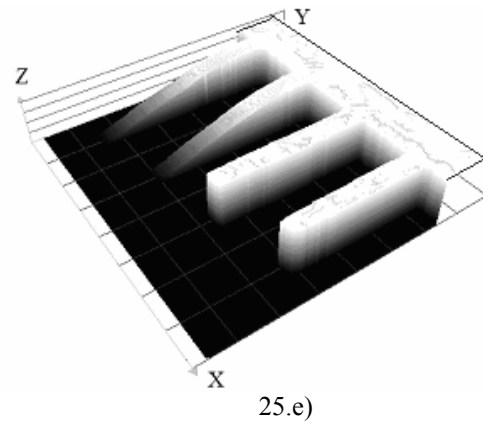
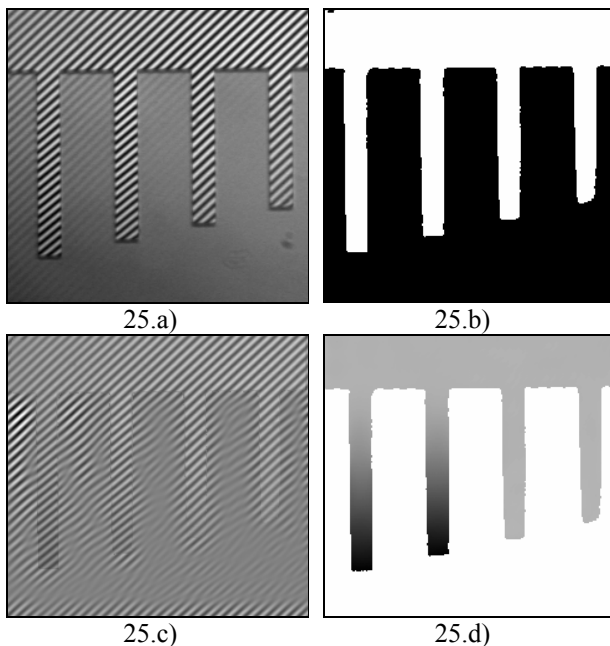


Fig.25 Démodulation de phase par TF et mesure de poutres en Si déformées (20 μm de largeur et 110-140 μm de long). (a) Interférogramme original. (b) Masque binaire pour la détection des franges faiblement contrastées. (c) Franges extrapolées. (d) Topographie après démodulation et filtrage du lobe avec un filtre adapté binaire. (e) Reconstruction du profil 3D

D'autres essais ont montré qu'un nombre d'itérations compris entre 10 et 15 donne des résultats satisfaisants dans la plupart des cas, ce qui est accord avec les simulations (voir partie 3.2.2). Cependant lorsque les franges sont très déformées ce nombre doit être augmenté. Les valeurs des différents seuils, qu'ils définissent la taille des filtres ou les limites du masque binaire, ne sont pas des paramètres sensibles (30% du maximum dans la plupart des cas), à l'exception du cas où la densité des franges est très faible (lobe de modulation à proximité des fréquences nulles). Ainsi des mesures automatiques avec des paramètres dont les valeurs sont fixées peuvent être appliquées à la plupart des échantillons rencontrés.

4. CONCLUSION

Nous avons montré que la profilométrie-vibrométrie interférométrique est une technique très performante pour la caractérisation plein champ d'échantillons présentant des motifs (sub)micrométriques avec une résolution axiale (suivant l'axe Oz) de l'ordre du nanomètre. Elle trouve un champ d'application très important dans la microtechnologie car les microsystemes, dont les dimensions s'accordent dans la plupart des cas avec la résolution de la microscopie interférométrique, réfléchissent généralement bien la lumière, et ne présentent pas des courbures trop importantes (technologie planaire). De plus une étude des paramètres fixant la précision de la technique de démodulation de phase par TF a été menée. Il a ainsi été démontré que des filtres adaptés à la forme du lobe de modulation dans l'espace de Fourier optimisent la précision des mesures tout en s'affranchissant d'une connaissance a priori des échantillons.

D'autres règles pratiques pour la mise en place d'une mesure efficace par démodulation de la phase avec extrapolation des franges ont été dégagées :

- un filtre étendu aux hautes fréquences spatiales est nécessaire pour obtenir des cartes de contraste avec une bonne résolution latérale pour l'identification des zones où l'extrapolation est souhaitée.
- la largeur de la bande d'extrapolation doit dépasser 10% de la plus petite dimension de l'interférogramme
- la densité des franges doit être aussi grande que possible
- le nombre d'itérations de l'algorithme d'extrapolation peut être réduit à 10-15 étapes lorsque des filtres adaptés de dimension variables sont associés.

Lorsque ces conditions sont réunies, il est possible de mesurer de manière automatique des surfaces présentant des motifs complexes par démodulation par TF avec un minimum de paramètres à ajuster. Selon la dimension de l'image, de telles mesures peuvent être réalisées en temps réel et appliquées à la caractérisation de modes de vibrations hors plan de microsystèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- [Bone, 1986] Bone D.J., Bachor H.A., Sandeman R.J. "Fringe pattern analysis using a 2-D Fourier transform". Appl. Opt. 25, p.1653 (1986)
- [Bosseboeuf, 2003a] Bosseboeuf A., Petitgrand S. "Application of microscopic interferometry techniques in the MEMS field". Microsystem engineering: Metrology and inspection. Proc. SPIE 5145-01 (2003)
- [Bosseboeuf, 2003b] Bosseboeuf A., Petitgrand S. "Simultaneous mapping of phase and amplitude of MEMS vibrations by microscopic interferometry with stroboscopic illumination", Proc. SPIE 5145-04 (2003)
- [Creath, 1998] Creath K. "Phase measurement interferometry techniques". Progress in Optics, vol. XXVI p.349-393 Editions North Holland Publishing Company, Hollande (1998)
- [Fogale, 2005] www.fogale.com (2005)
- [Gerchberg, 1974] Gerchberg R.W. "Super-Resolution Through Error Energy Reduction". Opt. Acta 21, p.709 (1974)
- [Herráez, 1999] Arevalillo Herráez M., Burton D.R., Lalor M.J. "Accelerating fast Fourier transform and filtering operations in Fourier fringe analysis for accurate measurement of three-dimensional surfaces". Optics and Lasers in Engineering 31 p.135 (1999)
- [Kujawinska, 1988] Kujawinska M., Robinson D.W. "Automatic fringe. pattern analysis for holographic measurement of transient event". Proc SPIE, 1026 p.93 (1988)
- [Kujawinska, 1991] Kujawinska M., Wojciak J. "High Accuracy Fourier Transform Fringe Pattern Analysis". Optics and Laser in Engineering 14 p.325 (1991)
- [Macy, 1983] Macy W. W. "Two-dimensional fringe-pattern analysis. Appl. Opt. 22(23) p.3898 (1983)
- [Malacara, 1998] Malacara D., Servin M., Malacarias Z. "Interferogram analysis for optical testing". Marcel Dekker, New York (1998).
- [Petitgrand, 2001a] Petitgrand S., Yahiaoui R., Danaie K., Bosseboeuf A., Gilles J.P. "3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes with a stroboscopic interferometric microscope". Optics and Lasers in Engineering 36 , p.77 (2001)
- [Petitgrand, 2001b] Petitgrand S., Yahiaoui R., Bosseboeuf A., Danaie K. "Quantitative time-averaged microscopic interferometry for micromechanical device vibration mode characterization", Proc.SPIE 4400, p.51-60 (2001)
- [Roddier, 1987] Roddier C, Roddier F. "Interferogram analysis using Fourier transform techniques". Appl. Opt. 26 p.1668 (1987)
- [Stand, 1987] Stand T.C., Katzir Y. "Extended unambiguous range interferometry". 26(19) pp.4274-4281 (1987)
- [Takeda, 1982] Takeda M., Ina H., and Kobayashi S. "Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry". J. Opt. Soc. Am. 72, p.156 (1982)
- [Talamonti, 1996] Talamonti J.J., Kay R.B., Krebs D.J. "Numerical model estimating the capabilities and limitations of the fast Fourier transform technique in absolute interferometry". Appl. Opt. 35 (13) p.2182 (1996)