

Etat de l'art de l'holographie dynamique : systèmes appliqués à la métrologie et au contrôle non destructif

Marc Georges^a, Cédric Thizy^a, Sébastien Ryhon^b, Philippe Lemaire^a

^a Centre Spatial de Liège, Parc Scientifique du Sart Tilman, Avenue du Pré Aily, B-4031 Angleur (Liège), Belgium, ph : 32-4-3676668, mgeorges@ulg.ac.be

^b Optrion S.A., rue des Chasseurs Ardennais, B-4031 Angleur (Liège), Belgium, ph : 32-4-3729333, gmhustinx@optrion-tech.com

ABSTRACT

Dans ce papier, nous présentons le résultat de plus de dix années de recherche et développement au Centre Spatial de Liège (CSL) concernant une caméra holographique (utilisant la technique de l'interférométrie holographique) capable d'effectuer des mesures, sans contact et sur un grand champ, de déplacements dans la gamme des microns et submicrons. Les principales applications montrées sont la recherche de défauts, l'identification de modes de vibration et la métrologie de déplacements.

In this paper, we present the results of more than a decade of R&D at the Centre Spatial de Liege (CSL) and that concerns a holographic camera (using the holographic interferometry technique) and that is able to perform non contact, full-field displacements measurement in the range of microns to submicrons. The main applications shown are the defect detection, the vibration mode shapes identification and displacement metrology.

I. INTRODUCTION

L'Interférométrie Holographique (IH)^{1,2} est une méthode de mesure sans contact et à grand champ qui permet de déterminer les déplacements d'objets opaques ou les variations d'indice de réfraction d'objets transparents. Elle consiste à observer l'interférence entre deux images de l'objet étudié, une (au moins) de ces deux images étant enregistrée sous forme d'hologramme. La technique que nous utilisons principalement est l'interférométrie holographique "en temps réel" dans laquelle un hologramme de l'objet au repos est enregistrée dans un premier temps. Dans un second temps a lieu la lecture lorsque l'objet se déplace ou se déforme. On observe alors une figure de franges superposée à l'image de l'objet (interférogramme). La forme des franges nous renseigne sur le type de déplacement/déformation. La distance entre deux franges étant reliée à la longueur d'onde lumineuse du laser utilisé, nous pouvons déterminer quantitativement le déplacement entre différents points de l'objet.

L'élément crucial d'un instrument basé sur une telle technique et le support photosensible qui permet l'enregistrement de l'hologramme de référence. Dans le cas de la caméra holographique du CSL, ce support est un cristal photoréfractif du type $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)^{3,4} qui permet un enregistrement holographique auto-développant in-situ et complètement réversible. L'instrument peut donc être réutilisé indéfiniment, ce qui est un atout majeur.

II. CAMERA HOLOGRAPHIQUE COMPACTE

Dans plusieurs articles⁵⁻⁸, le CSL a présenté le développements de différents prototypes de caméra holographique ainsi que diverses applications. Le but était la construction d'un dispositif compact permettant d'effectuer du Contrôle Non Destructif (CND) sur des objets de surfaces moyennes à larges. Le dispositif devait aussi être simple à utiliser et obtenir des mesures de haute résolution. L'instrument ainsi obtenu est montré à la figure 1. La lumière provient d'un laser de type YAG pompé par diode et doublé en fréquence, émettant à une longueur d'onde de 532 nm. Ce faisceau laser est acheminé dans la tête optique montrée à la figure 1 au moyen d'une fibre optique. Le faisceau est séparé en deux (éclairage de l'objet et référence) dans le bloc séparateur situé sur le côté de la tête optique. Le reste du dispositif consiste en un dispositif d'imagerie avec un cristal photoréfractif et une caméra CCD situé à l'arrière.

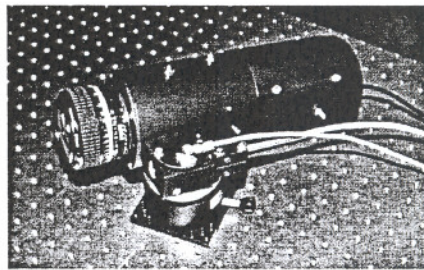


Figure 1. Caméra holographique compacte

Le principe de fonctionnement est le suivant. L'objet est illuminé continuellement par le faisceau d'éclairage objet et, dans le même temps, le faisceau référence est présent. Un hologramme s'enregistre alors endéans un certain temps que l'on peut faire varier dans certaines limites. Une fois l'hologramme enregistré, on peut déformer l'objet. On observe alors instantanément une figure de franges superposée à l'image de l'objet. Cette interférence provient de la superposition de l'hologramme diffracté par le cristal à la lecture et l'image de l'objet qui traverse directement le cristal. Après un certain temps, et si l'objet est stable, les franges disparaissent car un nouvel hologramme s'enregistre dans le cristal (et qui correspond au nouvel état de l'objet) tout en effaçant le précédent. Ensuite, la caméra holographique peut être réutilisée pour observer un nouveau déplacement. C'est donc un instrument auto-suffisant et indéfiniment réutilisable.

Dans le principe de fonctionnement de cet instrument, nous avons aussi inclus l'utilisation de techniques de mesure de la phase (principalement le décalage de phase)^{1,2}. Elles permettent de transformer l'information qualitative présente dans les interférogrammes en information quantitative, et ainsi déterminer la carte des déplacements d'un objet. L'ensemble de l'instrument est géré par un ordinateur tant au niveau du contrôle des différents segments que du traitement des interférogrammes (calcul de phase, du déplacement,...).

III. APPLICATIONS DE LA CAMERA HOLOGRAPHIQUE COMPACTE

La caméra holographique a été conçue de manière à être adaptée à la mesure de plusieurs types de phénomènes. Tout d'abord les déformations quasi-statiques. Un premier exemple montré à la figure 2. Il s'agit de CND (recherche de défauts) sur des panneaux en CFRP, développés pour l'aéronautique. La stimulation de l'objet qui permet de révéler les défauts consiste à chauffer l'échantillon et à le laisser refroidir quelques instants. Sur l'image obtenue, on peut voir une incurvation globale des franges qui trahit la présence de raidisseurs à l'arrière. Plus intéressant, on note la présence de variations très locales dans les franges. Ces dernières révèlent la présence de défauts d'impact ou de délamination dans l'échantillon étudié.

La figure 2(b) montre une carte de phase obtenue par la technique du décalage de phase appliquée sur l'image 2(b) et que nous avons évoquée ci-dessus. L'image de phase permet une visibilité accrue des défauts. Elle représente les variations de chemin optique entre les différents points de l'objet mais modulo 2π . Pour calculer une fonction monotone du déplacement, on doit éliminer les sauts de phase en appliquant la technique du déroulage de phase (image non montrée ici). Le but ici n'est pas d'avoir une carte de déplacement mais une localisation des défauts. La figure 2(c) montre une carte des défauts obtenue en différenciant l'image obtenue après déroulage de l'image 2(b). Un autre exemple de contrôle non destructif est montrés à la figure 3 (détection de défauts sur pièce d'Ariane5)



Figure 2. (a) interférogramme obtenu après chauffage d'un échantillon en CFRP contenant des défauts divers. (b) image de phase correspondante. (c) carte des défauts obtenue après traitement de (b).

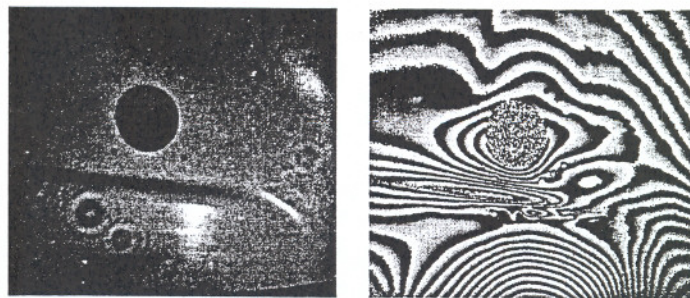


Figure 3. Détection de défauts de collage dans pièce de la coiffe d'Ariane 5

Outre le contrôle non destructif, la caméra holographique est utilisée pour la métrologie pure de déplacements d'objets larges. Ces mesures peuvent alors être utilisées pour comparaison avec des modèles éléments finis⁹ ou comme moyen d'étalonnage.

Un autre exemple de déformation est montrée à la figure 4, on observe la très haute résolution des mesures de ce type comparativement aux instruments concurrents basés

sur l'interférométrie de speckle. Il faut noter que ces images sont obtenues sans filtrage. Les valeurs de déplacement mesurables les plus petites sont de l'ordre de 10 nm et les plus grandes de l'ordre de 25 microns.

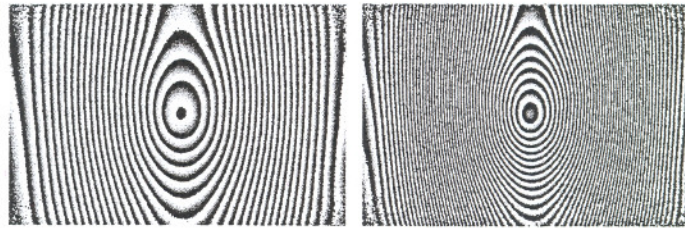


Figure 4. Mesures de déformations d'une plaque en aluminium. Ces images montrent l'extrême résolution du système (grand nombre de franges résolues).

Un exemple intéressant de mesure de déplacement pour industriel est montré à la figure 5. Il s'agissait de déterminer le coefficient de dilatation thermique de barreaux creux en fibre de carbone¹⁰. L'idée est d'observer le déplacement des franges entre le dessus de l'objet et une plaque de base sur laquelle celui-ci est posé, et ce, après une élévation de température donnée. Une possibilité consiste à générer des franges rectilignes (dites porteuses) par décalage latéral de l'illumination de l'objet. La figure 5(a) montre de telles franges sans élévation de température. Les franges entre le dessus de l'objet et la plaque sont connectées. Lorsqu'en plus, il y a une variation de température, les franges se déplacent entre le dessus et la base (figure 5(b)). En mesurant le décalage, on détermine le déplacement différentiel et, de là, le coefficient de dilatation thermique.

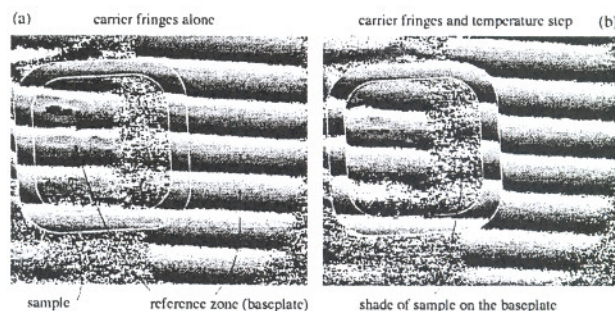


Figure 5. Mesure de coefficient de dilatation thermique par la technique d'observation du décalage de franges porteuses, (a) sans variation thermique, (b) avec variation thermique (échantillons SONACA).

Une amélioration apportée à la caméra holographique est la possibilité d'effectuer des mesures de déplacements ayant lieu dans le plan de l'objet, alors que dans tous les exemples ci-dessus il s'agit de déformations hors du plan. Cela tient au fait que la caméra utilise un seul faisceau d'illumination de l'objet, ce faisceau étant quasiment parallèle à la direction d'observation. Pour accéder aux mesures dans le plan, ou de plus manière générale dans les trois directions de l'espace, on doit multiplier les mesures de déplacements avec des points d'illumination déportés de la caméra holographique. La figure 6 montre un exemple de mesures de l'élongation d'une éprouvette dans le plan de celle-ci. On a ici utilisé deux points d'illumination et effectué deux mesures consécutives de la déformation, ce qui donne les deux images de phase à gauche. Connaissant la géométrie de l'ensemble constitué par l'objet, le point d'observation et les points d'illumination, on recombine les résultats pour retrouver soit la déformation dans-le-plan, soit la déformation hors-du-plan.

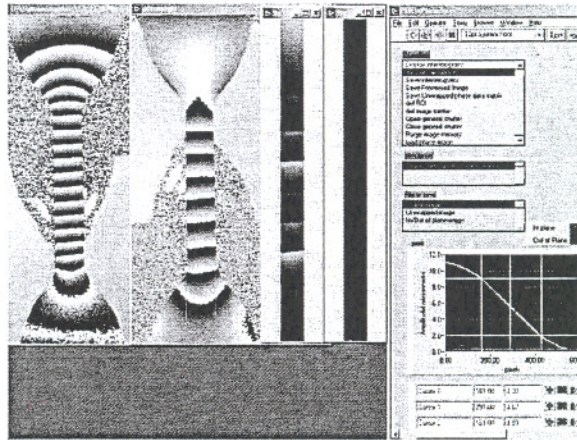


Fig. 6. Mesures de déplacement dans le plan. A gauche, deux interférogrammes correspondant à deux directions différentes de l'objet, en bas à droite la courbe de déplacement dans le plan de l'objet après traction de celui-ci.

Les exemples ci-dessus concernent des déformations de type statique où l'objet une fois déformé est dans un état stable. L'instrument peut aussi mesurer des objets en mouvement ou en constante évolution. Comme la lecture holographique détruit l'hologramme inscrit, le système est limité à un certain temps de lecture⁶. Si l'on désire suivre une déformation sur des temps très longs, il faut effectuer une lecture séquentielle à différents instants sur des durées de lecture très petites. Entre les différents instants de lecture, le faisceau laser est obturé pour ne pas effacer l'hologramme de référence.

Un cas particulier de mesures dynamiques rencontrés très largement dans l'industrie est l'identification des modes propres de vibration d'un objet^{11,12}. La technique que nous avons implémentée dans la caméra holographique consiste à effectuer une lecture stroboscopique lorsque l'objet est en vibration à une fréquence donnée. Le stroboscope est ouvert aux instants durant lesquels l'objet est en maximum de vibration, c.-à-d. à un instant où il est figé dans l'espace. L'hologramme de référence correspond à l'objet lorsqu'il ne vibre pas. L'interférogramme montre alors le déplacement entre l'état au repos et l'état de vibration maximale. Lorsque la fréquence d'excitation de l'objet varie, le stroboscope adapte sa fréquence de manière similaire. Un balayage en fréquence montre alors l'apparition des modes de vibration aux fréquences de résonance.

La figure 7 montre un tel balayage sur des aubes de compresseur de différents types. Il s'agit d'une mesure effectuée par Optrion comme prestataire de service pour un industriel du secteur aéronautique. Remarquons encore l'excellente résolution des résultats. Ces mesures ont été comparées aux modes de vibration calculés par éléments finis. La campagne de test a permis de révéler des modes non prédits, et ainsi améliorer la modélisation faite par le client.



Figure 7. Modes de vibration obtenu avec la caméra holographique en mode stroboscopique.

Les déplacements vibratoires doivent néanmoins être mesurables (gamme micrométrique). Lorsque le nombre de franges devient trop important, le niveau d'excitation doit être diminué pour garder un nombre de franges observable, ce qui est une contrainte. Aussi le contraste des franges dépend du rapport cyclique du stroboscope. Quand ce dernier diminue, le contraste augmente mais l'intensité reçue par le système d'observation diminue, ce qui fait baisser sensiblement le rapport entre la surface analysée et la puissance laser d'éclairement.

IV. CAMERA HOLOGRAPHIQUE IMPULSIONNELLE

Depuis 1998, nous avons axé une partie de nos développements autour de l'utilisation de lasers impulsions^{12,13}. D'une part, ils permettent de pouvoir figer l'image holographique sur une période de temps très courte (quelques nanosecondes) et ainsi travailler en environnement perturbé. D'autre part, si un laser double impulsion est utilisé, on peut enregistrer l'hologramme avec la première impulsion et relire l'hologramme avec la seconde lorsque l'objet s'est déformé. On peut donc aller observer des phénomènes qui se passent à des échelles de temps très courtes, selon le délai entre les deux impulsions. Cela peut nous permettre de nous affranchir des contraintes liées aux techniques décrites précédemment. Par exemple, pour les phénomènes où le déplacement est très important, il suffit d'utiliser deux impulsions très rapprochées dans le temps pour rester dans une gamme de mesure accessible, d'où l'intérêt d'utiliser des lasers à double impulsion avec délai variable entre impulsions.

Nous avons tout d'abord utilisé un laser simple impulsion disponible au laboratoire. Il nous a permis de trouver les points de fonctionnement de l'enregistrement holographique avec les cristaux photoréfractifs en régime impulsionsnel. Il existe cependant des difficultés particulières à l'utilisation du régime impulsionsnel, comme l'introduction de la technique du décalage de phase qui nécessite l'utilisation de plusieurs caméras observant l'objet simultanément avec un décalage de phase introduit artificiellement entre les différentes caméras. La figure 8 montre un interférogramme obtenu dans ces conditions pour un objet ayant subi une rotation.

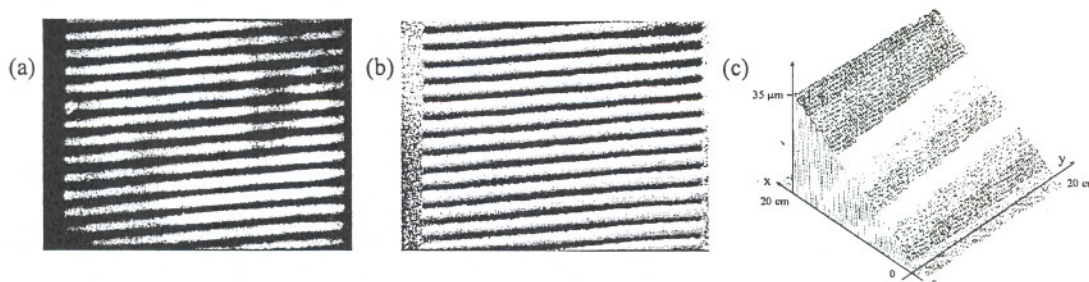


Fig. 8. (a) Interférogramme obtenu avec un laser impulsionsnel, (b) phase image correspondante (c) déplacement calculé d'après l'image de phase.

Une méthode de mesure de vibration a été mise au point et est basée sur l'utilisation de 4 impulsions déclenchées lors de la vibration de l'objet étudié, comme schématisé à la figure 9(a). On effectue une première mesure de déplacement sur base d'un pulse d'écriture W1 et d'un de lecture R1. On recommence la même opération 1/4 de période

plus tard avec des pulses W2 et R2. Un algorithme permet de déduire l'amplitude du déplacement vibratoire. A différentes fréquences d'excitation de l'objet, on effectue la même mesure. Cela permet d'obtenir une carte de l'amplitude sur une image complète et pour une plage de fréquence, de manière similaire à ce qu'obtient un vibromètre à balayage. La figure 9(b) montre l'amplitude de vibration sur un pixel particulier.

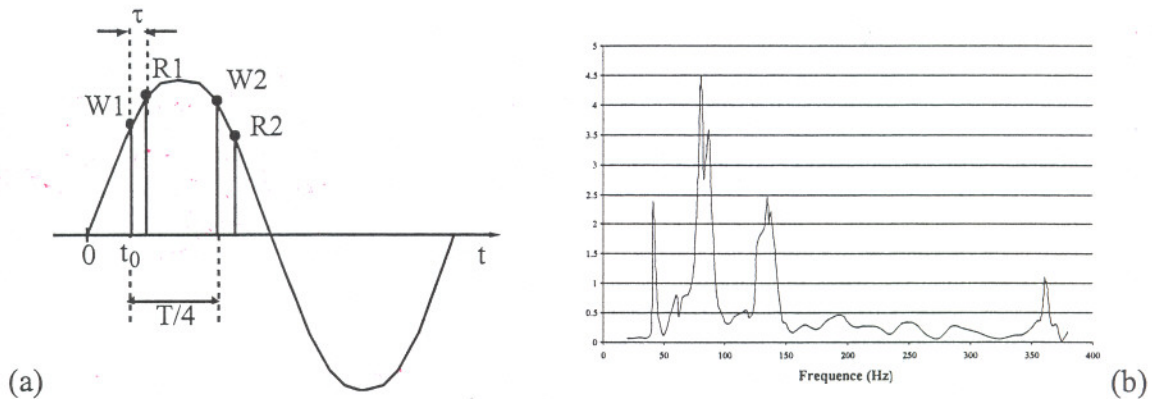


Figure 9. (a) 4 pulse technique for vibration measurement. (b) Frequency response in amplitude on one point of a vibrating plate.

Un projet européen est actuellement en cours pour mettre au point un prototype industriel de caméra holographique impulsionnelle pour la mesure de vibration et basé sur un nouveau type de laser à double impulsion (PHIFE "Pulsed Holographic Interferometer for the analysis of Fast Events"). La phase finale du projet verra le système utilisé dans des démonstrations de mesures vibratoires industrielles et des mesures aérodynamiques en soufflerie.

V. CONCLUSION

Nous avons présenté l'état de l'art de l'holographie dynamique basée sur l'utilisation de cristaux photoréfractifs. Un système est maintenant commercialisé et a des applications très variées allant du contrôle non destructif à la mesure vibratoire. Cet instrument est compact et grâce au senseur holographique auto-développant et réutilisable indéfiniment, il est utilisable par un non spécialiste en optique et son coût en consommables holographiques est nul. De plus, il permet d'atteindre des résolutions exceptionnelles sur des objets de grandes dimensions. Nous avons aussi présenté des développements plus récents centrés sur l'utilisation de lasers impulsionnels. Un projet européen est actuellement en cours visant à mettre au point un instrument innovant permettant la mesure de déplacements rapides.

REFERENCES

1. Ed. P.K. Rastogi, *Holographic interferometry : Principles and Methods*, Springer Series in Optical Sciences 68, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
2. Th. Kreis, *Holographic Interferometry : Principles and Methods.*, Akademie Verlag, Berlin, 1996
3. Ed. P. Günter and J.-P. Huignard, *Photorefractive Materials and their applications : Survey of Applications*, Topics in Applied Physics 62, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
4. M.P. Petrov, S.I. Stepanov and A.V. Khomenko, *Photorefractive crystals in Coherent Optical Systems*, Springer Series in Optical Sciences 59, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
5. M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Phase-shifting real-time holographic interferometry that uses bismuth silicon oxide crystals", *Applied Optics* 34, p. 7497-7506 (1995)

6. M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Real-time holographic interferometry using sillenite photorefractive crystals. Study and optimization of a transportable set-up for quantified phase measurements on large objects", *Appl. Phys. B*, **68**, p. 1073-1083 (1999)
7. M.P. Georges, Ph.C. Lemaire, "Holographic interferometry using photorefractive crystals for quantitative phase measurement on large objects", *Proc. SPIE 2652 on Practical Holography X*, p.248-257 (1996)
8. M.P. Georges, V. S. Scaufaire, Ph. C. Lemaire, "Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems", *Appl. Phys. B* **72**, p. 761-765 (2001)
9. Ph. Lemaire and M. Georges, "Holographic photorefractive images storage for applied optical metrology by interferometry", invited paper, IUTAM Symposium on *Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics*, A. Lagarde ed., Poitiers, France, 31 Aug-4 Sept 1998, Tome 2, p. 1-15
10. Marc Georges, Sébastien Ryhon, Cédric Thizy, Philippe Lemaire, "Mesure de coefficient de dilatation thermique de matériaux composites par holographie dynamique", *Actes du 3e colloque francophone Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie*, 18-22 Novembre 2002, Saint Aubin de Médoc, France, p. 18-26
11. M.P. Georges, Ph. C. Lemaire, "Real-time stroboscopic holographic interferometry using sillenite crystals for the quantitative analysis of vibrations", *Opt. Com.* **145**, p.249-257 (1998)
12. M.P. Georges, C. Thizy, Ph.C. Lemaire, G. Pauliat, G. Roosen, "Multiple exposure holographic interferometry with sillenite crystals applied to vibration measurement", *OSA TOPS Vol. 62, Photorefractive Effects, Materials, and Devices*, D.Nolte, G. Salamo, A. Siahmakoun and S. Stepanov, eds., p. 297-304 (2001)
13. Marc Georges, Cédric Thizy, Sébastien Ryhon, Gilles Pauliat, Philippe Lemaire, Gérald Roosen, "Holographic interferometers based on photorefractive crystals for vibration measurements", *SPIE's 5th conference on Vibration Measurements by Laser Techniques : Advances and Applications*, 18-21 June 2002, Ancona, Italy