

Mesure de vibrations par holographie dynamique multi-expositions

Marc P. Georges^a, Cédric Thizy^a, Philippe C. Lemaire^a,
Gilles Pauliat^b, Gérald Roosen^b

^a Centre Spatial de Liège (CSL), Université de Liège, Parc Scientifique du Sart Tilman, 4031 ANGLEUR (LIEGE), Belgique, tél : ++32-4-367 66 68, fax : ++32-4-367 56 13, e-mail : mgeorges@ulg.ac.be

^b Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCF-IO), Unité associée au Centre National de la Recherche scientifique, Centre Scientifique d'Orsay, Bât. 503, BP 147, 91403 Orsay Cedex, tél : ++33-1-69358755, fax : ++33-1-69358700, email : gerald.roosen@iota.u-psud.fr

Résumé

Nous présentons une caméra holographique avec un cristal photoréfractif comme support d'enregistrement dynamique et réutilisable et utilisée en régime impulsionnel. Le but du travail est de déterminer la réponse fréquentielle d'un objet en vibration. A cet effet, une technique d'enregistrement holographique à 4 impulsions a été mise en oeuvre et est décrite. Au niveau expérimental, cela a nécessité l'asservissement complet d'un laser de type YAG Q-switch. Des résultats préliminaires concernant une plaque mise en vibration par haut-parleur sont présentés.

I. Introduction - Motivations

L'Interférométrie Holographique (IH)¹ est une technique qui permet la mesure de déplacements micrométriques, notamment pour la mesure de déformées vibratoires. De par son caractère sans contact et à grand champ, elle présente des avantages certains par rapport aux méthodes plus classiques de caractérisation vibratoire, telles les mesures accélérométriques qui nécessitent d'équiper la surface (ce qui perturbe la mesure) et ce en quelques points seulement.

Différentes méthodes permettent l'observation ou la mesure de déformées vibratoires. La méthode la plus simple à mettre en oeuvre est l'IH en temps moyenné¹ qui consiste à enregistrer un hologramme de l'objet en cours de vibration à une fréquence donnée, le temps d'enregistrement étant plus long que la période de vibration. La lecture de cet hologramme fait apparaître une figure de franges dont le profil d'intensité est une fonction de Bessel. La ligne des noeuds est facilement repérable puisque située là où l'intensité des franges est maximale. Cette méthode présente certains défauts. D'une part, la difficulté de quantification de l'information par les méthodes classiques (décalage de phase, p.ex.). D'autre part, les déplacements doivent rester dans la gamme mesurable, soit quelques microns au plus pour garder une bonne résolution dans l'interférogramme. Enfin, il faut que l'objet soit en résonance pour observer des franges, ce qui handicape fortement la recherche des modes propres puisqu'il faut enregistrer un hologramme à chaque fréquence.

L'IH stroboscopique en temps réel² est apparue ensuite et permet de contourner ce dernier problème. Elle est basée sur l'écriture d'un hologramme de l'objet au repos suivi d'une lecture stroboscopique lorsque l'objet est en vibration, le stroboscope étant synchronisé avec le maximum de déplacement de l'objet. Un balayage de la fréquence fait apparaître les modes de vibration aux fréquences propres. La figure de franges observée est du type sinusoïdal et la technique du décalage de phase peut être appliquée pour quantification des déplacements. 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, et c'est le défaut majeur de la technique,

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.³

Pour contourner les problèmes liés aux techniques ci-dessus, la solution est d'utiliser un laser impulsionnel. D'une part, en utilisant deux impulsions avec délai variable, il suffit de diminuer ce délai lorsque l'amplitude devient trop importante afin d'obtenir un nombre de franges observables. D'autre part, toute l'énergie lumineuse étant fournie en une impulsion de quelques nanosecondes (dans le cas des lasers YAG Q-switch), on ne perd plus de lumière dans le processus d'écriture et de lecture, ce qui permet d'envisager des sources de plus basses énergies.

Le succès de l'une ou l'autre de ces techniques est lié aux propriétés du support d'enregistrement holographique. Les supports traditionnels (plaques, thermoplastiques) ne rendent pas l'hologramme immédiatement disponible de par leur processus de développements physico-chimiques respectifs. Pour cette raison, les travaux les plus récents en régime impulsionnel et en matière d'analyse vibratoire non ponctuelle se sont tournés vers des supports permettant une disponibilité quasi instantanée de l'information, à savoir les supports CCD (techniques de speckle⁴ et d'holographie digitale⁵) et les cristaux photoréfractifs.

Ces cristaux permettent un enregistrement dynamique in situ et sont effaçables (et donc réutilisables), et ce indéfiniment et sans dégradation du support.⁶ Il a déjà été montré à maintes reprises l'intérêt de ces supports pour l'IH. Récemment des caméras holographiques ont été mises au point par divers groupes⁷⁻⁹, sur base de cristaux de la famille des sillénites (BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) et BGO ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$)). Les particularités photoréfractives ont été étudiées et un compromis entre leurs spécificités avantageuses et désavantageuses a été effectué, rendant possible le transfert de cette technologie vers le monde industriel. Le principal intérêt des photoréfractifs est qu'ils ne constituent pas une limite au niveau de l'acquisition holographique vu qu'il permettent des enregistrements sur quelques nanosecondes, ce qui repousse les barrières naturelles auxquelles se heurtent les systèmes basés sur l'enregistrement par CCD. Le Laboratoire Charles-Fabry de l'Institut d'Optique a mis au point une caméra holographique photoréfractive pouvant travailler en régime impulsionnel.^{9,10} L'originalité de cet instrument est un dispositif à deux caméras permettant d'obtenir 2 images décalées en phase simultanément lors de l'étape de lecture holographique. Une mesure préliminaire de l'intensité moyenne de l'image sans franges d'interférence est cependant nécessaire pour calculer la phase. Initialement, cette caméra a été développée pour mesurer des vibrations sur base d'un laser à rubis. L'inconvénient majeur est que la longueur d'onde de ce laser (694 nm) est mal adaptée à la gamme de sensibilité des cristaux photoréfractifs du type BSO et BGO. A cet effet, un cristal de BGO dopé au cuivre et ayant une meilleure réponse à 694 nm a été développé. Malgré cela, l'efficacité de diffraction reste faible et les interférogrammes de vibration obtenus dans ces conditions sont fort bruités, ce qui n'empêche qu'une erreur de mesure de $\lambda/15$ a été obtenue, ce qui reste fort acceptable.

Depuis, CSL et LCF-IO sont associés pour poursuivre ces travaux¹¹. Le laser utilisé est un YAG Q-switch (COHERENT Infinity) doublé en fréquence et dont la longueur d'onde est naturellement adaptée aux cristaux. A la section II nous présenterons cet instrument et ses principales fonctionnalités. A la section III, nous donnerons les résultats d'une expérience d'optimisation préliminaire. A la section IV, nous décrirons la méthodologie à 4 impulsions pour déterminer l'amplitude de vibration et présenterons les résultats d'une première campagne expérimentale.

II. Caméra holographique en régime impulsionnel

La technique holographique est le temps réel, c-à-d que lors de la première impulsion, on enregistre l'hologramme de l'objet, et on visualise l'objet en relisant l'hologramme avec la seconde impulsion. Diverses contraintes ont du être prises en compte lors du développement :

1°) Le cristal nécessite une certaine densité d'énergie lumineuse pour écrire l'hologramme (env. 15 mJ/cm²). Cette énergie est amenée principalement par le faisceau référence, vu le caractère généralement diffusant des

expérience préliminaire menée à HOLO3 avec un laser de plus faible énergie, nous avons pu paramétrer les surfaces observables en fonction de l'énergie disponible à l'éclairement ¹⁰. Ces expériences se sont poursuivies avec le laser Coherent Infinity. La figure 2(a) montre un des deux interférogrammes décalés en phase d'un objet ayant subi une rotation. Celui-ci a une surface de 20x20 cm². Les énergies à l'impulsion d'écriture sont de 300 mJ d'éclairement de l'objet et de 40 mJ pour la référence. Les énergies à la lecture sont de 6 mJ pour l'objet et de 6 mJ pour la référence. La figure 2(b) montre la phase calculée à partir des images précédentes et la figure 2(c) le déplacement final en microns. La précision de mesure est typiquement de $\lambda/20$ soit 25 nm.

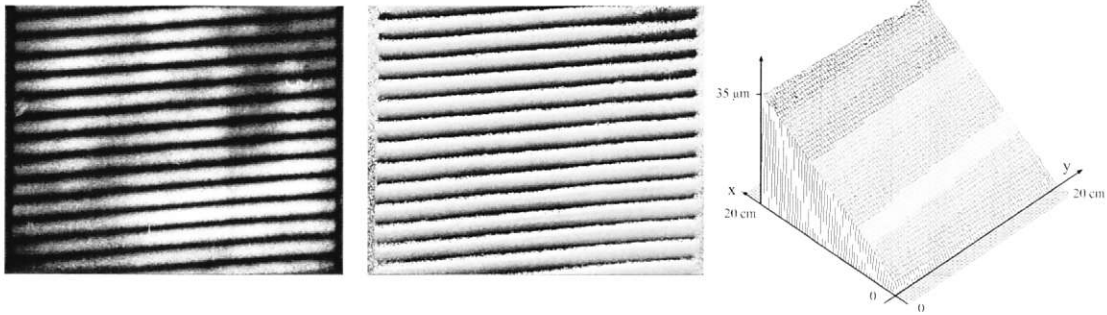


figure 2. (a) Interférogramme enregistré par une des 2 caméras CCD, (b) Image de phase correspondante (c) Déplacement de l'objet déterminé à partir de l'image de phase.

IV. Mesures de vibrations par une technique à 4 impulsions

La réponse en fréquence d'un objet peut s'exprimer comme une somme infinie de termes sinusoidaux (un pour chaque mode de fréquence propre ω_n) dont l'importance relative dépend de la fréquence d'excitation ω et du coefficient d'amortissement de chaque mode. Ecrivons cette réponse R_f comme suit

$$R_f = A_f e^{i\Phi_f} \quad (1)$$

Le problème qui nous intéresse est de déterminer l'amplitude de la réponse fréquentielle A_f . La réponse temporelle R_t d'un objet excité à la fréquence ω est donnée par

$$R_t = A_f \cos(\Phi_f + \omega t) \quad (2)$$

Considérons le schéma de la figure 3 montrant la réponse sinusoidale de l'objet.

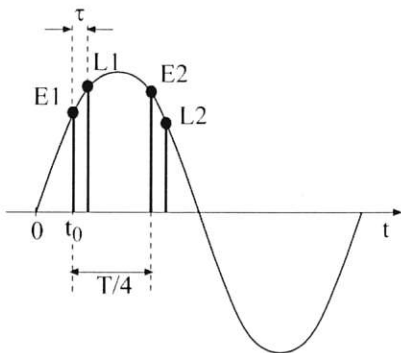


Fig 3. Technique à 4 impulsions

A l'instant t_0 , on écrit un premier hologramme (E1) dont la lecture s'effectue après un intervalle de temps τ (L1). On mesure un déplacement donné par

$$D_1 = A_f [\cos(\Phi_f + \omega\tau + \omega t_0) - \cos(\Phi_f + \omega t_0)] \quad (3)$$

On recommence la même opération 1/4 de période plus tard (E2 et L2), ce qui donne un déplacement

$$D_2 = A_f [\cos(\Phi_f + \omega\tau + \omega t_0 + \frac{\pi}{2}) - \cos(\Phi_f + \omega\tau + \frac{\pi}{2})] \quad (4)$$

L'amplitude de la réponse fréquentielle à la fréquence ω est alors donnée par

$$A_f = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{2(1 - \cos(\omega\tau))}} \quad (5)$$

L'application de cette technique à des hautes fréquences mais sur base d'un laser donnant une simple impulsion à une cadence jusque maximum 30 Hz a nécessité de reporter les différentes impulsions E1, L1, E2 et L2 sur des cycles différents, l'objet restant à la même fréquence. Il a fallu étudier et mettre en place un mode opératoire de synchronisation du laser au générateur de fréquence utilisé pour l'excitation de l'objet. L'ensemble de l'expérience, y compris l'émission laser, est complètement géré par un PC.

Les figures 4 (a) et (b) montrent les interférogrammes obtenus en faisant vibrer par haut-parleur une plaque encastrée sur un bord. Il s'agit des images obtenues sur une des deux caméras. La figure 4 (a) est celle obtenue à la lecture L1, tandis que la 4 (b) est obtenue 1/4 de période plus tard, à la lecture L2. La fréquence est ici de 78 Hz. Ces interférogrammes nous permettent de calculer, respectivement, les déplacements D_1 et D_2 , qui permettent à leur tour de calculer l'amplitude A_f .

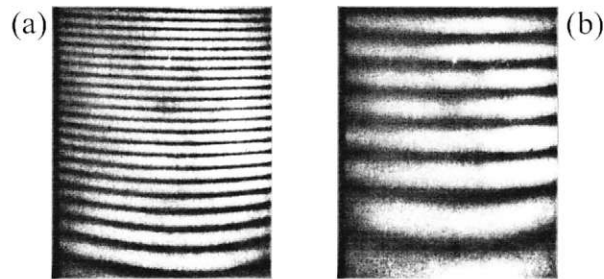


Figure 4. Interférogrammes d'une plaque encastrée (bord inférieur) en vibration à 78 Hz : (a) obtenu à $t_0 + \tau$ (L1), (b) obtenu à $t_0 + \tau + T/4$ (L2).

Le figure 5 montre une série d'interférogrammes (pris à L1 par une des 2 caméras) à différentes fréquences lorsque l'on passe sur un mode.

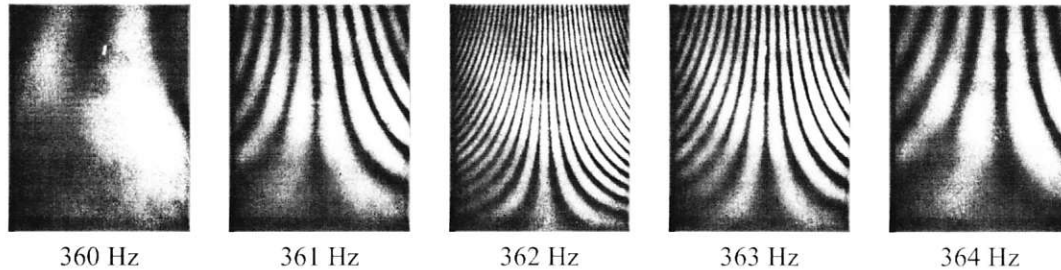


Figure 5. Interférogrammes de la plaque pour différentes fréquences autour d'une fréquence propre.

Après calcul de la phase et des déplacements D_1 et D_2 , et ce à différentes fréquences, on trouve l'amplitude de la réponse fréquentielle de la plaque (et du support) en fonction de la fréquence, comme le montre la figure 6 pour 2 points de la plaque.

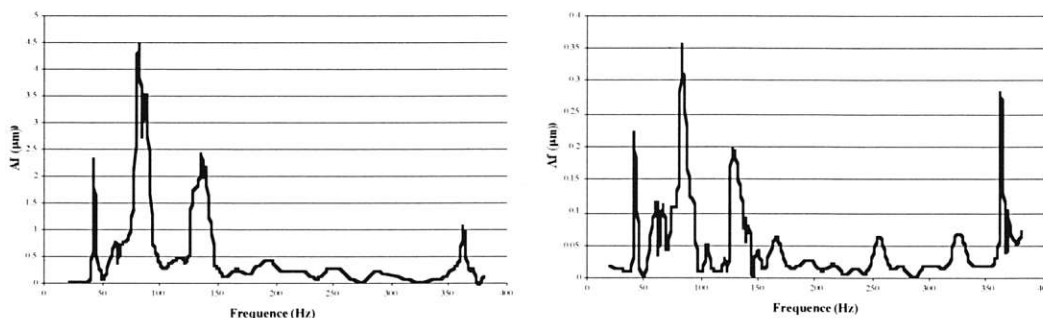


Figure 6. Amplitude de la réponse fréquentielle en deux points de la plaque.

V. Conclusions - Discussions

Nous avons montré qu'une caméra holographique dynamique basée sur un cristal photoréfractif était compatible avec une technique de mesure vibratoire basée sur un algorithme à 4 impulsions. Le caractère photoréfractif entraîne une réutilisabilité rapide de la caméra, ce qui permet d'effectuer un balayage en fréquence rapide. Nous estimons qu'un temps de 15 secondes est nécessaire pour effectuer une capture des interférogrammes aux 2 instants dans la période de vibration, incluant l'étape indispensable d'effacement holographique avant chaque nouvelle capture ainsi que la durée de sauvetage des images sur disque dur. Actuellement le traitement des données (calcul de phase, déroulage, calcul des déplacements D_1 et D_2 puis calcul de l'amplitude A_f) est l'étape qui prend le plus de temps car elle n'est pas encore automatisée, ce qui est en cours de développement actuellement.

L'instrument ci-dessus aurait certainement gagné en simplicité en utilisant un laser à 2 cavités donnant 2 impulsions à délais variables avec des énergies différentes, ce qui aurait permis d'éviter de changer la balance en énergie entre l'écriture et la lecture.

Dans l'avenir ce genre de système sera utilisé à beaucoup plus haute cadence, la seule limite étant le laser puisque les cristaux peuvent répondre jusque la nanoseconde. Il est donc envisageable d'enregistrer des hologrammes à très haute cadence pour étudier des phénomènes rapides ou transitoires.

VI. Références.

- [1] P. Smigielski, *Holographie industrielle*, Teknea (1994)
- [2] S. Nakadate, H. Saito, T. Nakajima, "Vibration measurement using phase-shifting stroboscopic holographic interferometry", *Opt. Acta* 33, p. 1295 (1986)
- [3] 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 (1998)
- [4] D.I. Farrant, G.H. Kaufmann, J.N. Petzing, J.R. Tyrer, B.F. Oreb, D. Kerr, "Measurement of transient deformations with dual-pulse addition electronic speckle pattern interferometry", *Appl. Opt.* 37, p.7259 (1998)
- [5] Ph. Fröning, G. Pedrini, H.J. Tiziani, F. Mendoza Santoyo, "Vibration mode separation of transient phenomena using multi-pulse digital holography", *Opt. Eng.* 38, p. 2062 (1999)
- [6] M.P. Petrov, S.I. Stepanov, A.V. Khomenko, *Photorefractive crystals in coherent optical systems*, Springer Series in Optical Sciences 59, Springer-Verlag, Berlin (1991)
- [7] 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.*, Vol 68, pp. 1073-1083 (1999)
- [8] Ph. C. Lemaire, V. S. Scaufaire, M. P. Georges, " Userfriendly and compact holographic camera based on photorefractive crystals. Applications in high accuracy metrology, IntSL 2000, Lausanne, 25-28 Sept. 2000
- [9] L. Labrunie, G. Pauliat, J-C. Launay, S. Leidenbach, G. Roosen, "Real-time double exposure holographic phase-shifting interferometer using a photorefractive crystal", *Opt; Comm.* 140, p. 119 (1997)
- [10] Ph. Delaye, G. Pauliat, G. Roosen, "Photorefractive real time interferometry applied to non destructive testing", *IntSL 2000, Lausanne, 25-28 Sept. 2000*
- [11] Marc P. Georges, Gilles Pauliat, Philippe C. Lemaire, Gérald Roosen, "Interférométrie holographique avec cristaux photoréfractifs en régime impulsif. Développements et résultats préliminaires", *10e séminaire SFO/HOLO3 : Nouveaux moyens optiques pour l'industrie*, Bordeaux, France, 18-19 November 1998