



Méthode de mesure de champs vibratoires par holographie optique numérique ultra-rapide

J. Poittevin^a, P. Picart^b, F. Gautier^b et C. Pézerat^b

^aIRT Jules VERNE, Chemin du Chiffault, 44340 Bouguenais, France

^bLAUM, UMR-CNRS 6613, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France

julien.poittevin@irt-jules-verne.fr

Les vibrations de structure peuvent être mesurées par une méthode optique telle que l'holographie numérique. Cette méthode permet une mesure du champ vibratoire avec une résolution spatiale élevée. Combinée à l'utilisation d'une caméra rapide, l'évolution temporelle de la vibration est enregistrée afin d'étudier des phénomènes instationnaires. Les paramètres contraignants la conception ont été répertoriés et une étude paramétrique basée sur une simulation numérique du procédé holographique complet permet l'optimisation du banc de mesure. Les résultats expérimentaux obtenus à partir d'une poutre suspendue excitée par un pot vibrant, à une haute cadence d'acquisition, confirment l'intérêt de l'approche proposée.

1 Introduction

De façon usuelle, les vibrations de structures sont étudiées en utilisant des accéléromètres ou un vibromètre-laser. Ces deux techniques fournissent des mesures ponctuelles. L'accéléromètre présente de plus l'inconvénient d'être intrusif. L'obtention d'une carte des variations spatiales du champ vibratoire, en amplitude et phase, nécessite de scanner la surface de la structure, ce qui implique une grande stationnarité du champ. Evitant tout balayage de la surface, l'holographie optique numérique [1]-[2] est une méthode qui permet une mesure sans contact du champ et a été appliquée, jusqu'à aujourd'hui, uniquement à des champs vibratoire stationnaires [1]-[3].

L'analyse des vibrations avec des techniques holographiques optiques a réellement commencé avec les travaux de Powell et Stetson [4]. Ils sont en effet les premiers à établir le principe de régime temps-moyenné qui permet de quantifier les niveaux vibratoires. Une grande variété d'applications sont possibles : d'une part la réponse vibratoire du tympan humain [5], de membranes de haut-parleur [6], de plaques vibrantes [5], et d'autres part l'analyse des modes vibratoire de structures.

D'autres régimes d'acquisitions peuvent également être utilisés pour étudier les vibrations : régime pulsé, régime stroboscopique [3], régime pseudo-pulsé, ou encore régime quasi-temps-moyenné [5]. Le régime stationnaire est un cas particulier. La caractérisation des structures dans des conditions de fonctionnement réelles nécessite une analyse dans le domaine temporel. Les vibrations de panneaux induites par des phénomènes hydro-élasto-acoustiques, des grincements et frottements sont des exemples typiques de situations ne pouvant pas être étudiées par une approche stationnaire.

Aujourd'hui, les performances des lasers et des capteurs CMOS donnent la possibilité d'obtenir une information spatio-temporelle. Ainsi, nous présentons le principe de la méthode basée sur l'holographie numérique à haute vitesse, adaptée à l'étude des problèmes de vibrations non stationnaires.

2 Principe de l'holographie optique numérique

L'holographie optique est basée sur le principe d'interférences d'ondes lumineuses cohérentes. Ces interférences contiennent la variation des propriétés de ces ondes. Dans notre cas, nous nous intéressons à la variation de trajet optique codée dans des franges d'interférences.

Un hologramme est une somme quadratique des ondes référence et objet. L'onde de référence a des caractéristiques initiales connues et elle n'est pas perturbée. L'onde objet est perturbée par l'objet qu'elle éclaire (Fig.1). L'information complexe, contenu dans les hologrammes numériques enregistrés, est extraite par Transformée de Fourier 2D [7].

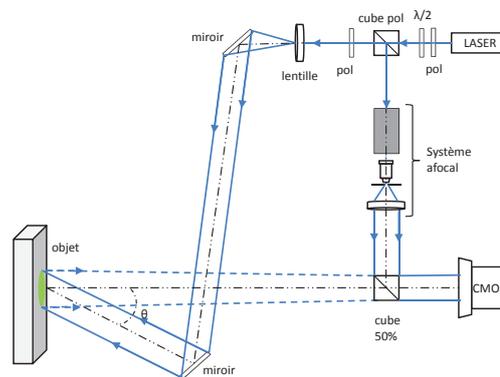


FIGURE 1 – Schéma du montage holographique

L'amplitude du champ vibratoire en tout point est alors calculée à partir des variations des phases optiques extraites des cartes de phase optique calculées.

En effet, la différence de phase optique entre deux hologrammes successifs est proportionnelle au déplacement de la structure entre ces deux instants [3]-[6].

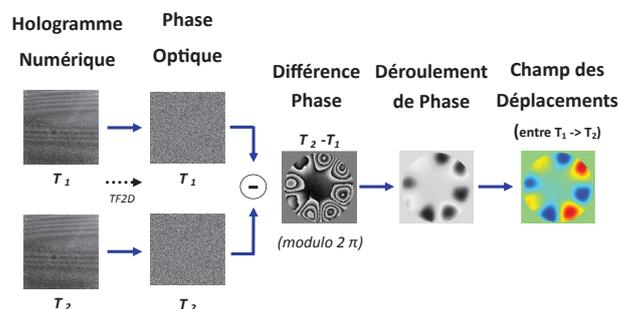


FIGURE 2 – Principe du post-traitement des hologrammes numériques

La séquence temporelle d'hologrammes enregistrée, la phase de chaque hologramme ainsi que les différences entre les cartes de phase successives sont calculées. Ensuite, un déroulement de la phase optique est effectué en s'appuyant sur la variation spatiale des sauts de

phase optique (Fig.2), la différence de phase étant calculée modulo 2π .

3 Simulation numérique

La méthode de mesure de champ vibratoire par holographie optique numérique ultra-rapide, est basée sur l'enregistrement d'hologrammes décrivant le comportement de l'objet.

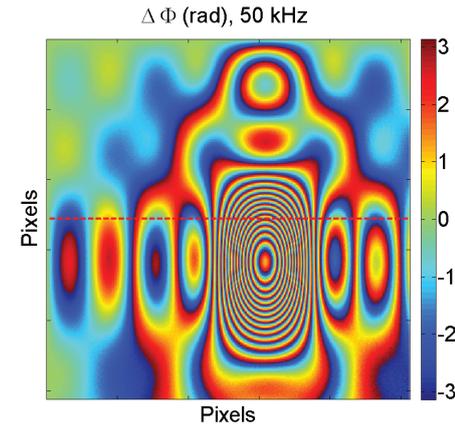
La numérisation, induite par le capteur, engendre un échantillonnage spatial et temporel lié à la taille et au nombre de pixels ainsi qu'à la cadence d'acquisition de la caméra. La simulation numérique mise en place a pour but d'évaluer l'influence de ces deux facteurs. Cette simulation prend en compte l'ensemble de la méthodologie : la simulation d'un champ vibratoire d'une structure, la reconstitution du champ des déplacements en considérant la propagation des ondes optiques modifiées par ce champ vibratoire et l'enregistrement des figures d'interférences.

L'échantillonnage temporel est caractérisé par deux éléments qui sont le temps d'exposition et le temps d'acquisition d'une image. Le temps d'exposition définit le temps au cours duquel les cellules photosensibles accumulent les photons, alors que le temps d'acquisition d'une image inclut le temps d'exposition et le temps de rafraîchissement de l'image. Afin d'évaluer l'influence de l'échantillonnage temporel, les paramètres de simulation suivants ont été définis : une plaque d'aluminium en appui simple à ces extrémités est excitée par un impact ponctuel [8]-[9]. L'excitation est générée avec une bande passante de 100 Hz - 20 kHz, afin de couvrir le spectre de l'audible. Les paramètres physiques sont une taille de 0,3 x 0,5 m, une épaisseur de 5 mm, un module d'Young de 70 GPa, un coefficient de poisson de 0,33 et un coefficient d'amortissement de 2.10^{-3} . Le champ de déplacement est obtenu après troncature de la base modale : tous les modes situés au dessus d'une fréquence de 20 kHz sont ignorés. La réponse calculée au moyen de cette troncature s'interprète comme la réponse à une excitation par une impulsion dont la largeur de bande est [0-20]kHz.

La Fig.3 montre un résultat obtenu à partir de la simulation d'un impact ponctuel sur une structure de type plaque aux conditions aux limites libre-libre. Le calcul du déplacement entre deux instants est obtenu à partir du protocole décrit en Fig.2. Nous nous intéressons aux cartes de différence de phase non déroulée (modulo 2π) afin d'illustrer l'influence de l'échantillonnage temporel.

Sur les Fig.3 a-b sont représentées deux cartes de différence de phase à des cadences d'acquisition différentes. Le facteur d'échantillonnage est ici jusqu'à 5 fois supérieur à la fréquence maximale de la troncature modale. Le nombre de franges lié aux sauts de phase optique est beaucoup plus importants pour la cadence à 50 kHz que pour celle à 100 kHz. Ceci s'explique par la sensibilité de la méthode, qui est dictée par la longueur d'onde optique ($\sim 0,5.10^{-9}$ m). En effet, le

(a)
Carte de différence de phase à 50 kHz



(b)
Carte de différence de phase à 100 kHz

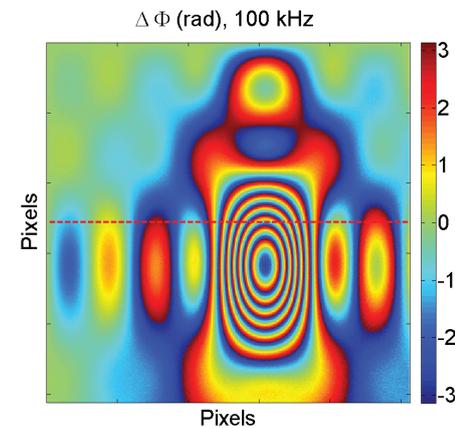


FIGURE 3 – Figures représentant la différence de phase optique (modulo 2π) entre deux hologrammes successifs sous différentes formes et configurations.

roulement de la phase optique est plus important lors que le déplacement entre deux instants est important, il est donc lié à la vitesse de déplacement.

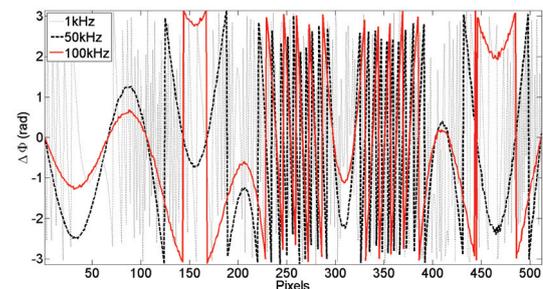


FIGURE 4 – Figure représentant la coupe des cartes de différence de phase (- - -) sur les cartes 3 pour trois cadences d'acquisition.

Ce nombre de sauts de phase est aussi visible sur la Fig.4, qui représente une coupe des cartes de différence

de phase des Fig.3.a-b.

Plus le nombre de sauts de phase est important, et plus le déroulement spatial de la phase s'avère compliqué et engendre des erreurs de reconstructions du champ de déplacement. L'échantillonnage à 1 kHz présenté (hors Shannon), montre une information de phase roulé un nombre de fois si important que son traitement spatiale devient impossible. On notera que du bruit de mesure peut également rendre le déroulement délicat. La cadence d'acquisition est donc un élément primordial dans la reconstruction spatiale du champ.

Le temps d'exposition est le second facteur temporel étudié à travers cette simulation. La Fig.3.d reprend les coupes de cartes de différence de phases lors de l'évaluation du déplacement entre deux instants.

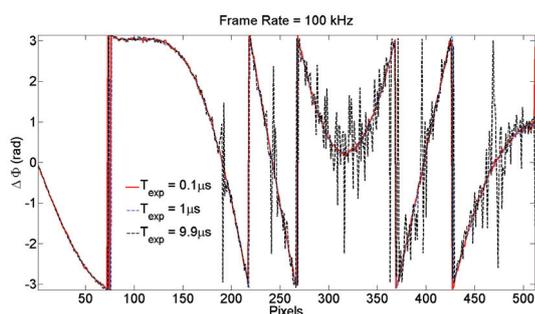


FIGURE 5 – Figure représentant la carte de différence de phase à une cadence de 100 kHz et pour différents temps d'exposition.

La cadence d'acquisition est fixée à 100 kHz et le temps d'exposition est variable. Ce résultat montre l'influence du temps d'exposition dans la reconstruction des différences de phase, en particulier pour la diminution du bruit. Ces choix des paramètres des temps d'exposition ($0,1\mu s$, $1\mu s$, $9,9\mu s$) sont liés aux possibilités technologiques actuelles des caméras ultra-rapides (par exemples : PHANTOM v711, PHOTRON SA-X2,...).

Notons également que près du point d'impact, la zone située entre les pixels [250 - 350], est plus sensible à l'échantillonnage temporel, car soumise à des variations temporelles très rapides. En effet, sur la Fig.4 une zone comportant de nombreux sauts de phases liés une grande variation spatiale du champ est observable. Sur la Fig.5, cette même zone est particulièrement bruitée avec un temps d'exposition de quelques μs . Ce constat permet d'envisager le développement d'algorithmes permettant de corriger localement les distorsions de reconstruction liés à un échantillonnage temporel mal anticipé et limité par les technologies actuelles. Un échantillonnage temporel maîtrisé et judicieux permet l'absence de sauts de phase bruités, difficiles à post-traiter par la suite lors du déroulement spatial de la phase optique.

4 Résultats expérimentaux

Des résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide du banc optique (Fig.6), en étudiant une poutre en polymère suspendue et excitée par une impulsion.

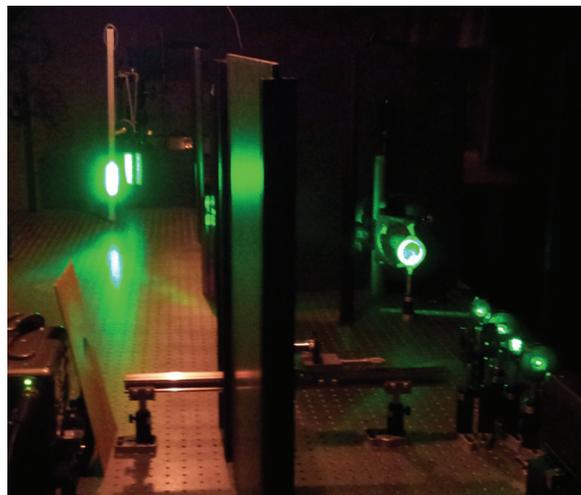


FIGURE 6 – Montage expérimental

La poutre est fixée en son centre à un pot vibrant générant un signal impulsionnel borné à 3kHz. La zone éclairée de la poutre représente une zone de 9 cm de longueur et 2 cm de largeur et se situe à 4 cm du point d'excitation.

Le capteur photosensible est paramétré pour acquérir des images avec une résolution de 128 x 512 pixels à une cadence de 8 000 images par seconde et un temps d'exposition de $10\mu s$. L'objectif est d'observer la propagation de l'onde le long de la poutre. Une séquence d'hologrammes est enregistrée et les différences de phases optiques sont calculées au cours du temps.

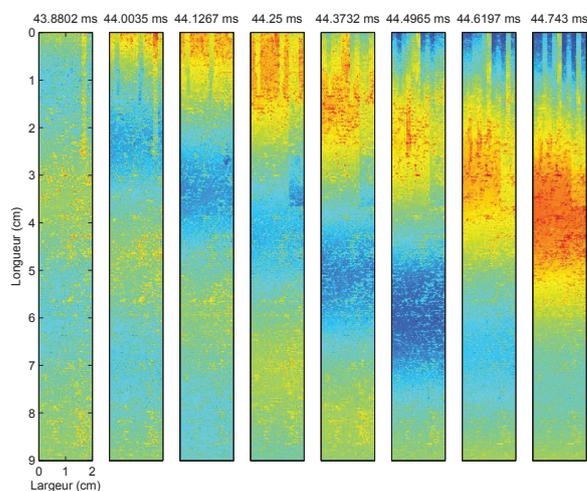


FIGURE 7 – Carte représentant l'évolution du déplacement de la poutre au cours du temps pour une poutre excitée par un signal transitoire

La Fig.7 montre des cartes de différence de phase reconstruite au cours du temps. Ces cartes montrent une propagation de fronts d'ondes émis par la source. La propagation de ces fronts d'ondes est visualisée le long de la zone éclairée de la poutre. La différence de temps entre deux 2 imagerie (cf. Fig.7) est de $125\mu s$.

5 Conclusion

Cet article présente quelques éléments de la conception d'un nouvel outil métrologique. L'holographie optique numérique permet un enregistrement synchrone de l'information spatiale et temporelle du champ vibratoire, ce qui constitue l'intérêt principal de la méthode. La simulation de l'ensemble de la technique de mesure permet d'une part d'identifier les paramètres clés contrôlant la précision de la mesure de l'amplitude vibratoire au cours du temps et d'autre part l'optimisation de ces paramètres. L'échantillonnage temporel est un facteur important dans la reconstruction de l'information spatiale. La validation expérimentale montre l'intérêt de cette approche, pour la compréhension de phénomènes instationnaires, et de manière non-intrusive.

Remerciements

Ces travaux de thèse de doctorat sont réalisés dans le cadre de la Chaire VIBROLEG "Vibroacoustique des structures légères" de l'IRT Jules VERNE.

Références

- [1] D. Gabor et al. A new microscopic principle. *Nature*, 161(4098) :777–778, 1948.
- [2] T. Kreis. *Holographic interferometry : Principles and methods*. 1996.
- [3] J. Leval. *Etude et développement de capteurs holographiques numériques pour l'analyse des vibrations*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, 2006.
- [4] Robert L Powell and Karl A Stetson. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction. *JOSA*, 55(12) :1593–1597, 1965.
- [5] M. Leclercq et al. Evaluation of surface acoustic waves on the human skin using quasi-time-averaged digital fresnel holograms. *Appl. Opt.*, 52(1) :A136–A146, Jan 2013.
- [6] P. Tankam. *Méthodes d'holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique*. PhD thesis, Université du Maine, 2010.
- [7] Pascal Picart and Julien Leval. General theoretical formulation of image formation in digital fresnel holography. *JOSA A*, 25(7) :1744–1761, 2008.
- [8] Arthur W Leissa. *Vibration of plates*. Technical report, DTIC Document, 1969.
- [9] Jean-Louis Guyader. *Vibrations des milieux continus*. Hermes Science, 2002.