

CFA/VISHNO 2016

Holographie optique numérique ultra-rapide pour les applications en vibroacoustique

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

^aENSIM-LAUM, Rue Aristote, 72000 Le Mans, France

^bLAUM - CNRS UMR 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France
julien.poittevin@univ-lemans.fr



LE MANS

Les vibrations de structure peuvent être mesurées par une méthode optique telle que l'holographie numérique. Cette méthode interférométrique permet une mesure du champ vibratoire avec une résolution spatiale élevée. Couplée à l'utilisation d'une caméra rapide, l'évolution temporelle de la vibration est alors enregistrée afin d'étudier des phénomènes instationnaires. Les nuisances sonores liés aux phénomènes de frottement par exemple sont des phénomènes peu reproductibles et nécessitent une analyse dans le domaine spatio-temporel. Nous présentons des résultats expérimentaux obtenus à partir d'un banc expérimental imitant le principe d'un essuie-glace sur un pare-brise, 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. Évitant tout balayage de la surface, l'holographie optique [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 vibratoires stationnaires [3, 4].

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 visage humain [5], de membranes de haut-parleur [3], 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 [6], régime stroboscopique [3], régime pseudo-pulsé [3], ou encore régime quasi-temps-moyenné [5]. 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. Les travaux menés ont montré l'intérêt et les performances de la méthode développée [7], ainsi que les conditions optimales d'enregistrement [8] nécessaires à la mesure plein champ. Ainsi, nous présentons le principe de la méthode basée sur l'holographie numérique à haute cadence, 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 Fresnel [9].

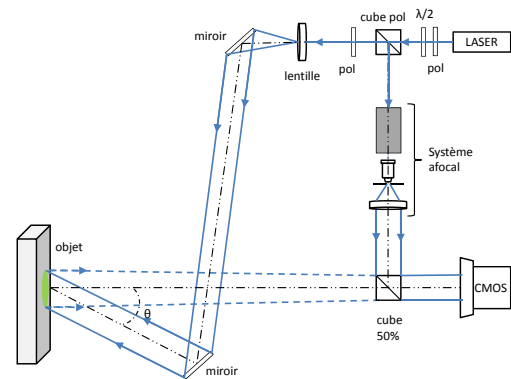


FIGURE 1 – Schéma du montage holographique

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, 10].

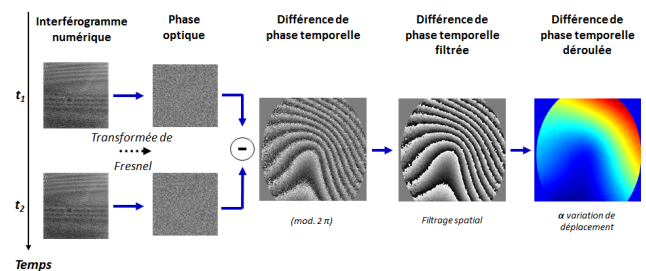


FIGURE 2 – Principe du post-traitement des hologrammes numériques

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 Application au diagnostic d'instabilité

Les nuisances sonores dans le domaine des transports sont induites par des sources de différentes natures : des bruits de moteur, des bruits de roulement, des bruits aérodynamiques et de multiples bruits parasites dans l'habitacle. Parmi ces bruits parasites induits par les contacts frottants entre pièces, les bruits de frottements sont de plus en plus étudiés. On peut citer : les crissements ou brouillements d'essuie-glaces, les crissements de freins, les grincements de pièces plastiques, le craquement de charnière, etc. Ici, on s'intéresse plus particulièrement aux bruits de frottement, qui ont fait l'objet de diverses travaux ces dernières années [11, 12, 13]. Ces derniers ont mis en évidence l'intérêt d'une mesure multipoints.

Le travail proposé ici a pour objectif de montrer la possibilité de mesurer la vibration d'une structure excitée par un élément mobile constitué d'un frotteur sur une plaque en verre. Cette excitation complexe n'étant pas ou peu répétable, seule une mesure plein champ permet une caractérisation détaillée de la vibration.

3.1 Mesure accélérométrique

Le banc de mesure pour cette étude est constitué d'une plaque en verre de dimensions 15 cm × 11 cm × 0,2 cm (L×l×h) encastrée sur deux de ses bords. Cette plaque est recouverte, sur l'une de ses faces, d'une fine couche de peinture couleur argent afin de la rendre opaque et réfléchissante.

De l'autre côté, un joint de caoutchouc est frotté sur la vitre, comme le ferait un essuie glace sur un vitrage automobile. La face arrière de la plaque est humidifiée à l'aide d'un pulvérisateur, et le frotteur va effectuer un mouvement sinusoïdal à une fréquence fixe. La sollicitation du frotteur est réalisée grâce au pot vibrant présenté en Fig.3.

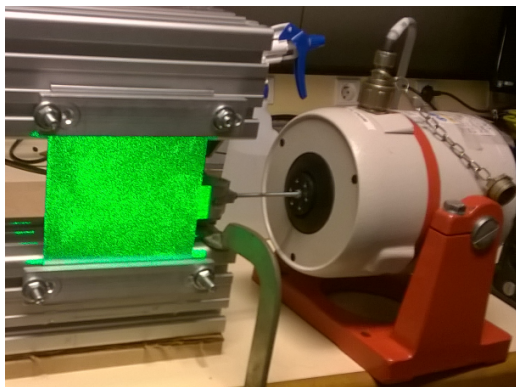


FIGURE 3 – Photographie du banc frottement muni d'une plaque en verre, d'un pot vibrant et d'un frotteur (arrière de la plaque).

Un accéléromètre est placé sur la face arrière de la plaque. Le signal d'accélération, en présence de crissement est représenté en Fig.4, pour une fréquence d'oscillation de 2 Hz.

On observe trois crissements au cours des quelques secondes enregistrées. En se focalisant sur la fenêtre [0-1] s, on remarque que le signal inclut deux aller-retours du frotteur. Une étude temps-fréquence du signal accélérométrique est ensuite présentée.

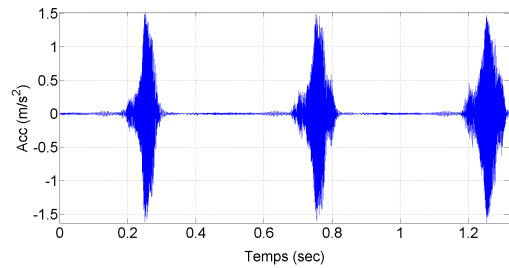


FIGURE 4 – Accélération mesurée en un point de la plaque, par un accéléromètre pour la plaque soumise à une excitation de type frottement.

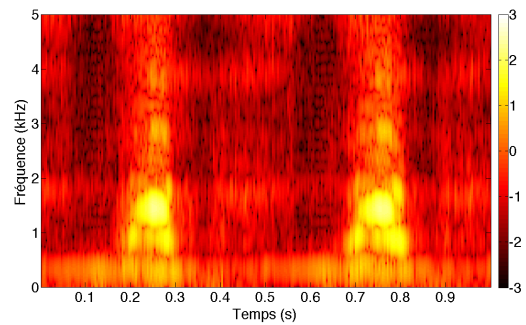


FIGURE 5 – Spectrogramme (en dB) du signal accélérométrique en un point.

Le spectrogramme présenté en Fig.5 montre une amplitude vibratoire large bande, comprise entre [500-2k] Hz.

A partir de cette première analyse, une étude similaire est réalisée à partir de la mesure plein champ temps-réel, basée sur l'holographie optique numérique.

3.2 Mesure holographique

Le banc optique est similaire aux précédents essais. Dans cette configuration, la caméra est réglée pour enregistrer à une cadence de 60 000 images par seconde, avec un temps d'exposition de 5 μ s et une résolution de 384 × 384 pixels. La fréquence d'oscillation du joint de caoutchouc est maintenant fixé à 4 Hz.

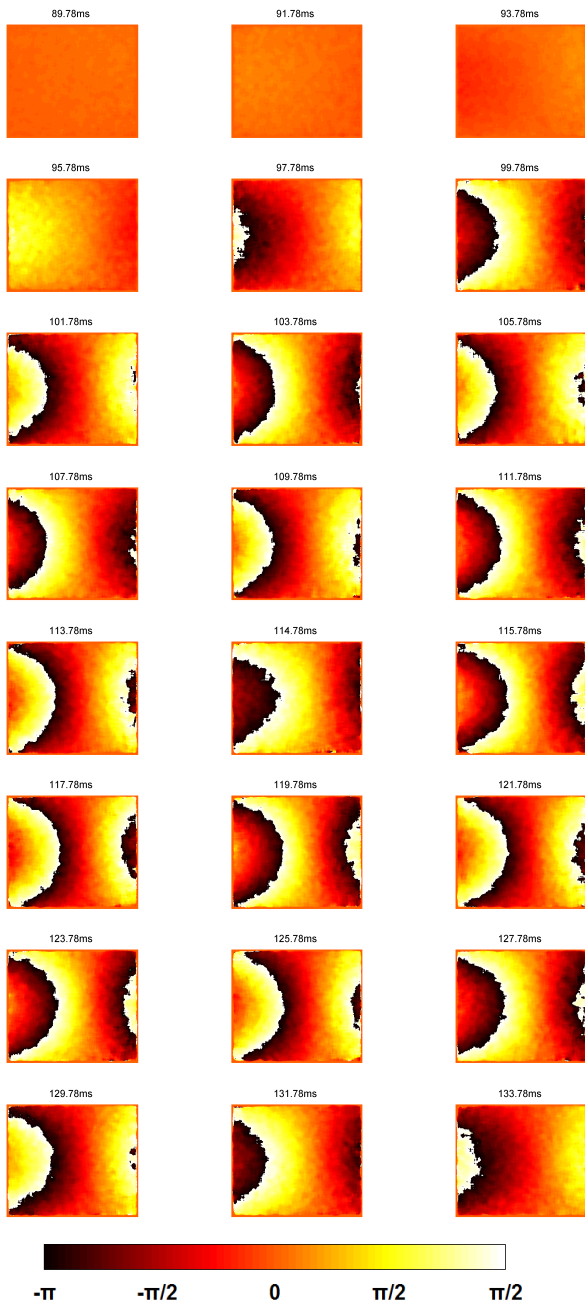


FIGURE 6 – Cartes de phase optique (mod.2π, en radian) au cours du temps de la plaque soumise à une excitation de type frottement.

La Fig.6 montre des cartes de phase optique du déclenchement et du développement de l'instabilité au cours du temps. En effet, lors des premiers instants présentés, il n'y a pas de déplacement visible, et progressivement une oscillation se met en place. L'amplitude des déplacements est plus importante sur les extrémités libres qu'au centre de la plaque, où une ligne nodale est identifiable. Malgré la complexité de l'excitation, la vibration semble pouvoir être décrite par un seul mode vibratoire. De ces cartes de phase, on extrait trois points arbitrairement sur la zone mesurée. Les signaux temporels de vitesse sont présentés en Fig.7.

La Fig.7 montre la vitesse vibratoire, mesurée par holographie optique, issue des trois points de mesure. Les trois enveloppes de signaux sont compatibles avec les signaux mesurés à l'accéléromètre (Fig.4).

La Fig.8 représente un zoom sur une instabilité présentée sur la Fig.7. Les trois signaux mesurés par la méthode holographique, sont d'amplitudes différentes et un faible

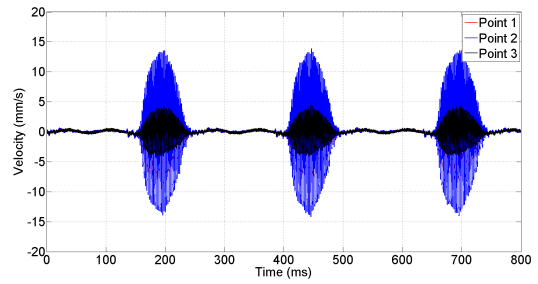


FIGURE 7 – Vitesse vibratoire (mm/s) mesurée par holographie optique, en différents points de la plaque soumise à une excitation de type frottement.

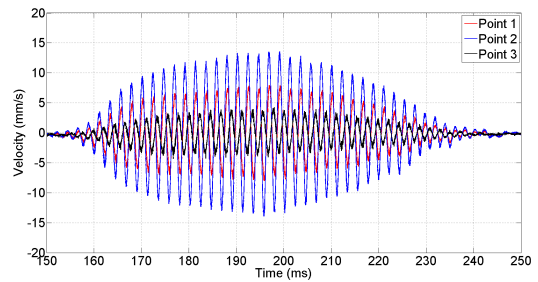


FIGURE 8 – Vitesse vibratoire (mm/s) mesurée par holographie optique, en différents points de la plaque soumise à une excitation de type frottement.

décalage temporel est observable. Ces différences sont dues à la position de ces points sur la zone étudiée. Les signaux sont peu bruités, et peuvent être utilisés dans une analyse temps-fréquence-espace. Pour cela, les spectrogrammes des trois points extraits de la mesure holographique sont calculés. Le spectrogramme du point 1 est présenté sur la Fig.9

Le résultat obtenu par la méthode holographique est comparable à la mesure obtenue à l'aide d'un accéléromètre. D'après la Fig.9, les enveloppes d'amplitudes sont similaires avec un maximum d'amplitude situé entre [500-2k] Hz. A noter que le maximum d'amplitude pour la mesure holographique est situé principalement autour de 500 Hz, ce qui peut s'expliquer par un chargement légèrement différent entre les deux configurations.

Les signaux mesurés ici peuvent alimenter des post-traitements pour des analyses quantitatives. En effet, suite aux aller-retours du frotteur, une excitation vibratoire est générée et sollicite la structure sur une large bande de fréquence. Ce phénomène est présent sur l'ensemble des points de mesure. On peut identifier une forte composante basse fréquence autour de 500 Hz, pour les trois points.

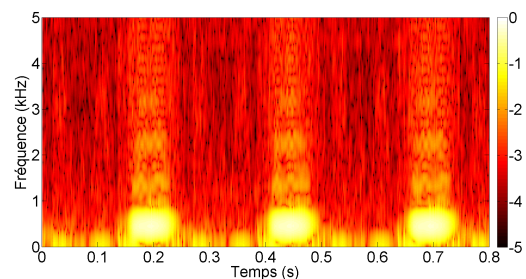


FIGURE 9 – Spectrogrammes (en dB) au point 1.

4 Conclusion

La méthode holographique a montré sa capacité à mesurer le champ des déplacements d'une structure suite à une excitation par frottement. Pour cela, un banc de mesure a été développé de façon à produire une instabilité vibratoire par frottement, similaire à celle que produirait un essuie-glace automobile. De plus, l'étude montre que l'holographie optique n'est pas uniquement une analyse qualitative. Cependant, les résultats exposés ici, ne montrent qu'une information sur le champ des déplacements lié à l'excitation par frottement. Afin de caractériser cette source, il serait par exemple intéressant de remonter à l'effort appliqué par le frotteur, à l'aide d'une méthode inverse vibratoire telle que la méthode RIFF [14, 15].

Remerciements

Cette étude a été effectuée dans le cadre de la Chaire VIBROLEG (Vibroacoustique des structures légères), financée par l'IRT Jules Verne (Institut de Recherche Technologique spécialisé dans l'étude des composites, matériaux métalliques et structures hybrides). Les auteurs associent les partenaires industriels et académiques de ce projet : Airbus, Alstom Power, Bureau Veritas, CETIM, Daher, DCNS Research, STX et l'Université du Maine.

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] RL. Powell and KA. Stetson. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction. *JOSA*, 55(12) :1593–1597, 1965.
- [5] M. Leclercq, M. Karray, V. Isnard, F. Gautier, and P. Picart. Evaluation of surface acoustic waves on the human skin using quasi-time-averaged digital fresnel holograms. *Applied Optics*, 52(1) :A136–A146, 2013.
- [6] P. Picart, J. Leval, F. Piquet, JP. Boileau, T. Guimezanes, and JP. Dalmont. Tracking high amplitude auto-oscillations with digital fresnel holograms. *Optics Express*, 15(13) :8263–8274, 2007.
- [7] J. Poittevin, P. Picart, C. Faure, F. Gautier, and C. Pézerat. Multi-point vibrometer based on high-speed digital in-line holography. *Applied Optics*, 54(11) :3185–3196, 2015.
- [8] J. Poittevin, P. Picart, F. Gautier, and C. Pézerat. Quality assessment of combined quantization-shot-noise-induced decorrelation noise in high-speed digital holographic metrology. *Opt. Express*, 23(24) :30917–30932, Nov 2015.
- [9] P. Picart and J. Leval. General theoretical formulation of image formation in digital fresnel holography. *JOSA A*, 25(7) :1744–1761, 2008.
- [10] P. Tankam. *Méthodes d'holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique*. PhD thesis, Université du Maine, 2010.
- [11] A. Elmaian. *Méthodologies de simulation des bruits automobiles induits par le frottement*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, France, 2013.
- [12] A. Elmaian, JM. Duffal, F. Gautier, C. Pezerat, and J. Gilbert. Automotive friction-induced noises. In *Acoustics*, pages 3143–3148, 2012.
- [13] A. Elmaian, JM. Duffal, F. Gautier, C. Pezerat, and J. Gilbert. Qualitative study of automotive friction-induced noises. In *ISMA2012-USD2012*, pages 3881–3890, 2012.
- [14] C. Pezerat. *Méthode d'identification des efforts appliqués sur une structure vibrante, par résolution et régularisation du problème inverse*. PhD thesis, INSA de Lyon, 1996.
- [15] C. Pezerat and JL. Guyader. Force analysis technique : reconstruction of force distribution on plates. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(2) :322–332, 2000.