

Interférométrie holographique photoréfractive : nouveaux développements et applications récentes

¹Cédric Thizy, ¹Marc Georges, ²Guy-Michel Hustinx, ²Philippe Lemaire

¹Centre Spatial de Liège - Université de Liège, Liege Science Park, B-4031 Angleur,
Belgique, tél : +32-(0)4-367666, courriel : mgeorges@ulg.ac.be

²Optrion S.A. Pôle d'Ingénierie des Matériaux de Wallonie, Boulevard de Colonster 4, B-
4000 Liège, Belgium, www.optrion-tech.com

RESUME

Les cristaux photoréfractifs permettent l'enregistrement holographique dynamique in-situ et une réutilisabilité infinie. Aussi ils possèdent des propriétés spécifiques que d'autres matériaux holographiques n'ont pas et qui peuvent être utilisées de manière avantageuse en interférométrie holographique. Depuis 15 ans, le CSL développe des techniques d'interférométrie holographique et des instruments basés sur des cristaux de $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO). Le comportement dynamique de ces derniers permet une grande souplesse d'utilisation de l'interférométrie holographique, à l'instar des techniques basées sur l'enregistrement numérique, tout en fournissant des interférogrammes de meilleure résolution que celles-ci (pas de bruit de speckle, pas de filtrage nécessaire). Par le passé, nous avons déjà présenté une large gamme d'applications en métrologie, contrôle non destructif et mesures vibratoires. Ici nous présentons des applications industrielles récentes obtenue avec une caméra holographique photoréfractive commercialisée. Cette dernière a été utilisée avec succès dans des applications très demandeuses, notamment en terme de résolution.

1. INTRODUCTION

Le support d'enregistrement holographique est un élément crucial de l'Interférométrie Holographique (IH) [1]. Si on considère généralement que la figure de mérite principale est la densité d'énergie d'écriture et l'efficacité de diffraction, d'autres spécificités tel l'auto-enregistrement et la réutilisabilité du matériau peuvent apparaître plus importante au niveau de l'applicabilité pratique de l'IH.

Les Cristaux PhotoRéfractifs (CPRs) [2] sont des alternatives intéressantes à d'autres matériaux d'enregistrement car ils sont auto-développants in situ et réutilisables indéfiniment. Dans ceux-ci, des charges sont photoexcitées par localement sous l'effet de la lumière. Il s'ensuit une migration de ces charges électriques sous l'effet de la photoconduction. Les charges sont piégées dans des défauts du cristal des zones non illuminées. Il s'ensuit la création d'un champ de charges d'espace entre les zones claires et sombres et qui va moduler l'indice de réfraction local par effet électro-optique. Dès lors une figure d'intensité résultant de l'interférence de deux ondes mutuellement cohérentes va donner lieu à une figure d'indice de réfraction (hologramme de phase). Ce processus est dynamique et réversible, il peut prendre place sous diffusion thermique, sous l'effet d'un champ électrique ou sous l'effet photovoltaïque (ou toute combinaison de ces 3 mécanismes).

En particulier, les CPRs appartenant à la famille des sillénites ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) and $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO)) ont été largement étudiés pour leur application en IH car ils sont parmi les plus sensibles comparativement aux autres familles de cristaux.

Le caractère dynamique de l'enregistrement photoréfractif fait en sorte que l'on peut développer des instruments holographiques qui sont aisés à l'utilisation (procédure d'enregistrement relativement rapide, pas de remplacement du support d'enregistrement) à l'instar des techniques basées sur l'enregistrement numérique, mais ici avec une meilleure qualité des interférogrammes, ce qui permet une résolution accrue (pas de bruit de speckle).

De plus, les CPRs possèdent des propriétés uniques que d'autres matériaux n'ont pas. En particulier, l'anisotropie de diffraction qui consiste en une rotation de la polarisation du faisceau diffracté par rapport à la polarisation du faisceau objet incident (et donc transmis). Le cristal possède donc un comportement demi-onde sur le faisceau diffracté. Un analyseur est alors placé derrière le cristal pour observer l'interférence des faisceaux diffracté et transmis.

Comme l'efficacité de diffraction est très faible dans les CPRs, l'anisotropie de diffraction permet l'égalisation de l'intensité des deux ondes au niveau du système d'observation placé derrière le cristal, et donc la maximisation du

contraste d'interférence (proche de 1), ce qui permet d'expliquer la très bonne qualité des interférogrammes obtenus.

Dans ce papier, nous présentons brièvement la caméra holographique photoréfractive et son principe de fonctionnement. Dans la suite nous passons en revue des applications récentes qui ont eu lieu dans divers projets du CSL ou lors de prestations industrielles d'Optrion.

2. PHOTOREFRACTIVE HOLOGRAPHIC CAMERA

Dans des articles précédents [4,5] nous avons présenté l'étude d'un prototype de caméra holographique photoréfractive utilisant un CPR sillénite. Le but était d'avoir un système transportable capable d'effectuer des mesures quantifiées de déplacements/déformations sur des objets diffusifs de typiquement $50 \times 50 \text{ cm}^2$ (sur base d'une puissance laser totale de 500 mW). Des développements ultérieurs ont débouché sur la réalisation d'une caméra holographique compacte, gardant le même niveau de performances que la version précédente [6]. Cet instrument consiste actuellement en un cylindre de 25 cm de long et 8 cm de diamètre, pour un poids de 1 kg. La lumière laser est amenée par une fibre optique monomode qui a été spécialement développée pour obtenir une transmission de 80% sur 5 m de distance avec une puissance d'entrée de 5 Watts. Le schéma de l'ensemble est montré à la Figure 1.

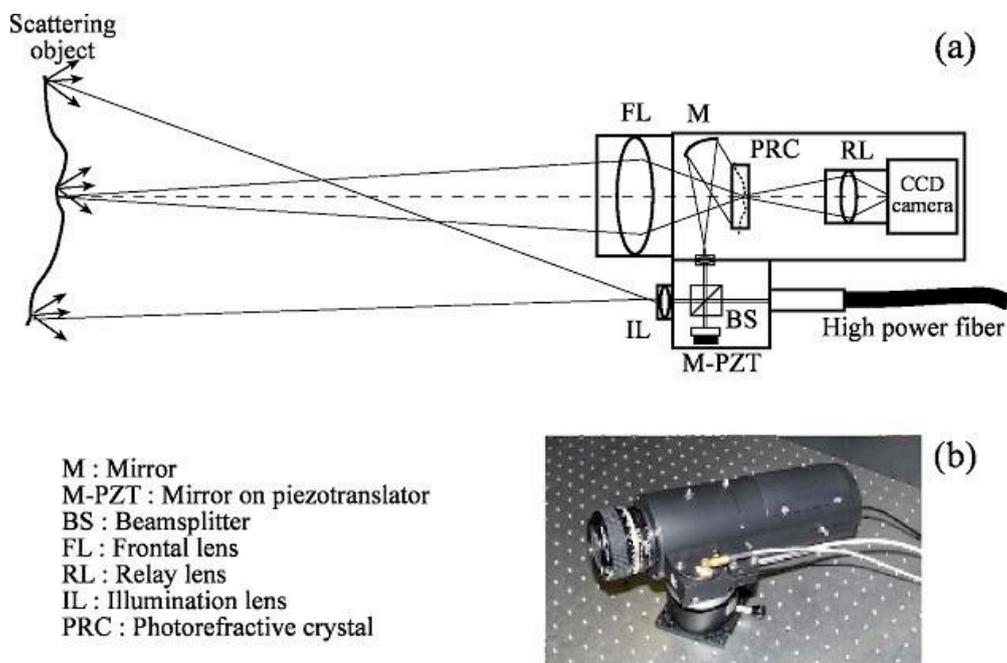


Figure 1. Caméra holographique compacte, schéma de principe (a) et image (b)

Le principe de fonctionnement est le suivant. Les faisceaux référence et objet sont continuellement incidents au cristal. L'enregistrement de l'hologramme s'effectue directement endéans le certain temps de l'effet photoréfractif. Ce temps dépend principalement de l'intensité de l'intensité de référence, qui peut être modulée. On le choisit et on le règle (dans certaines limites) en fonction des conditions extérieures. Généralement nous le fixons de 5 à 10 secondes dans des environnements de travail modérément stables (peu de vibrations et de turbulences de l'air, pas besoin de table optique antivibratoire). Ce temps de réponse étant le même à l'enregistrement qu'à la lecture, il ne doit pas être trop court afin de permettre l'utilisation du décalage de phase durant la capture holographique [4,5]. Lorsque l'objet s'est déplacé, l'hologramme est relu automatiquement (car le faisceau référence est toujours présent) et l'hologramme s'efface au profit d'un nouveau qui s'enregistre et correspond au nouvel état de l'objet (pour autant que celui-ci soit suffisamment stable. Il faut donc enregistrer les interférogrammes (qui s'effacent inexorablement) pour ne pas perdre l'information sur les changements de l'objet. Ce processus de lecture/écriture peut se répéter à l'infini avec un taux de rafraîchissement qui dépend évidemment du temps de réponse.

Nous avons montré que l'instrument s'adapte bien aux mesures quasi-statiques (avec application du décalage de phase) ou aux événements dynamiques (avec une analyse quantifiée basée sur l'addition d'une porteuse avec transformée de Fourier [5]). De nombreuses applications ont été montrées, en détection de défauts, impacts, délaminages [5,7]. Aussi de la métrologie pure peut être effectuée avec, entre autres, la mesure de coefficient de dilatation thermique [6] et la comparaison avec des modèles aux éléments finis [8]. Une revue des ces travaux passés se trouve à la référence 7. La forme de modes de vibrations peut aussi être mesurée lorsque l'on adjoint à l'instrument un mode de lecture stroboscopique synchronisé à l'excitation sinusoïdale de l'objet [9].

Ce qui est remarquable avec cette technique est la très haute qualité des interférogrammes et la densité des franges que l'on peut résoudre (sans recourir nécessairement à des caméras CCD à très haute résolution). Nous pouvons résoudre aisément 5 pixels/frange ce qui permet d'avoir une gamme de mesure étendue. Les plus petites valeurs mesurables ont été déterminées à 10-15 nm, principalement limitées par les perturbations extérieures, mais pas par l'effacement photoréfractif [5]. La surface observable dépend de la puissance d'illumination du laser, une bonne règle est que l'on peut travailler sur une surface typique de 50x50 cm² recouverte d'une poudre blanche et illuminée avec typiquement 400 mW (puissance totale du laser 500 mW).

3. APPLICATIONS RÉCENTES

Le système présenté ci-dessus est utilisée à la fois au Centre Spatial de Liège (CSL) et la start-up OPTRION. L'approche du CSL est de l'utiliser comme un outil pour différents projets (liés à l'espace, mais pas seulement) et d'assurer les nouveaux développements du capteur en fonction des applications, ainsi que dans la mise en œuvre de nouvelles applications. D'un autre côté, OPTRION commercialise le dispositif et l'utilise de manière routinière pour du service aux industriels.

Un premier exemple d'application est la métrologie de déplacement sur champ complet effectuée dans le cadre d'un projet financé par l'Agence Spatiale Européenne. Il consiste à améliorer les modèles aux éléments finis de structures de satellite au travers de la comparaison avec des mesures. Des pièces représentatives de celles réellement utilisées ont été considérées (aluminium, CFRP, nid d'abeilles, ...). Aussi, différentes stratégies de montages et interfaçages de ces pièces ont été étudiées. Ces ensembles ont été soumis à des sollicitations variées : thermiques, mécaniques, combinaison des deux.

Figure 2 montre un des montages avec une description schématique de la structure testée (cube fait de plusieurs panneaux attachés les uns aux autres). D'autres moyens de mesures ont été associés à la mesure holographique (thermographie, mesure des mouvements d'ensemble par théodolite, ...). La Figure2(c) montre un interférogramme d'un des panneaux soumis à un échauffement.

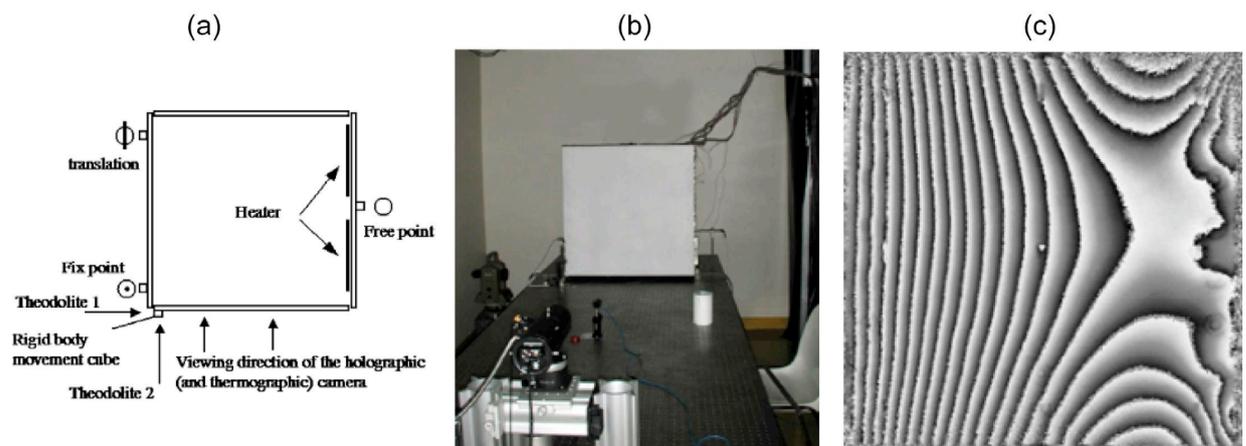


Figure 2. (a) Schéma de la structure (maquette représentative d'une structure de satellite cubique) with avec les différentes méthodes de mesure, (b) photo du montage de test (caméra holographique à l'avant-plan), (c) interférogramme d'un des panneaux après échauffement.

Parmi les nombreux résultats obtenus, celui montré à la Figure 3 fut assez surprenant et montre facilement la capacité de très haute résolution de notre technique. On peut y voir la déformation globale d'une structure sandwich soumise à un échauffement sur la face arrière. La peau en composite est si fine que l'on observe le nid

d'abeilles sous-jacent. Ce comportement fin n'avait pas été prédit par le modèles aux éléments finis, ce qui fut une information importante pour le projet.

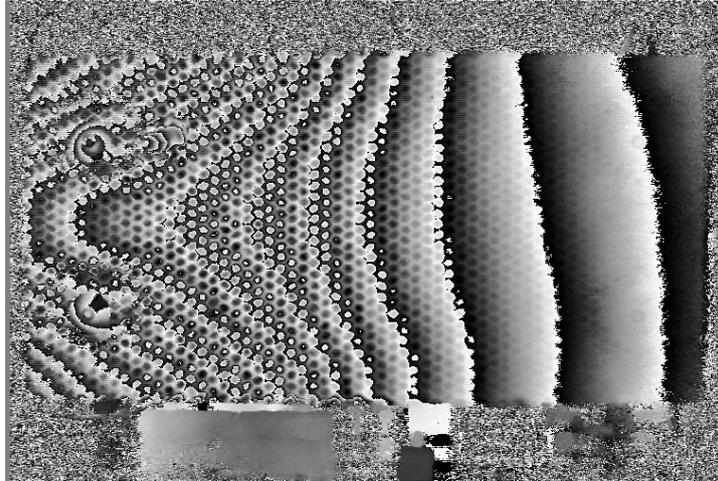


Figure 3. Interférogramme d'une structure sandwich (NIDA+CFRP) sous échauffement

Un autre exemple de métrologie de déplacement consistait à caractériser le comportement d'un banc laser embarqué sur satellite (développé par une grande compagnie européenne de l'aérospatiale) en regard de contraintes liées à son montage sur la plateforme du satellite ou à cause d'effets de gravité. La Figure 4(a) montre l'ensemble du set-up de mesure avec le banc laser horizontal et la caméra holographique l'observant par le dessus. Un premier test a consisté en vissant la partie supérieure de la baie du laser sur le reste. Un hologramme de référence est capté lorsque les deux pièces sont simplement en contact. Ensuite on scelle les deux parties en vissant en différents endroits au moyen d'un tournevis dynamométrique. La déformation résultant de cette opération est montrée à la Figure 5(a). Un autre test est la simulation d'effets gravifiques au moyen d'une charge mécanique contrôlable au centre du banc (Figure 4(b)). L'interférogramme obtenu dans ce cas est montré à la Figure 5(b).

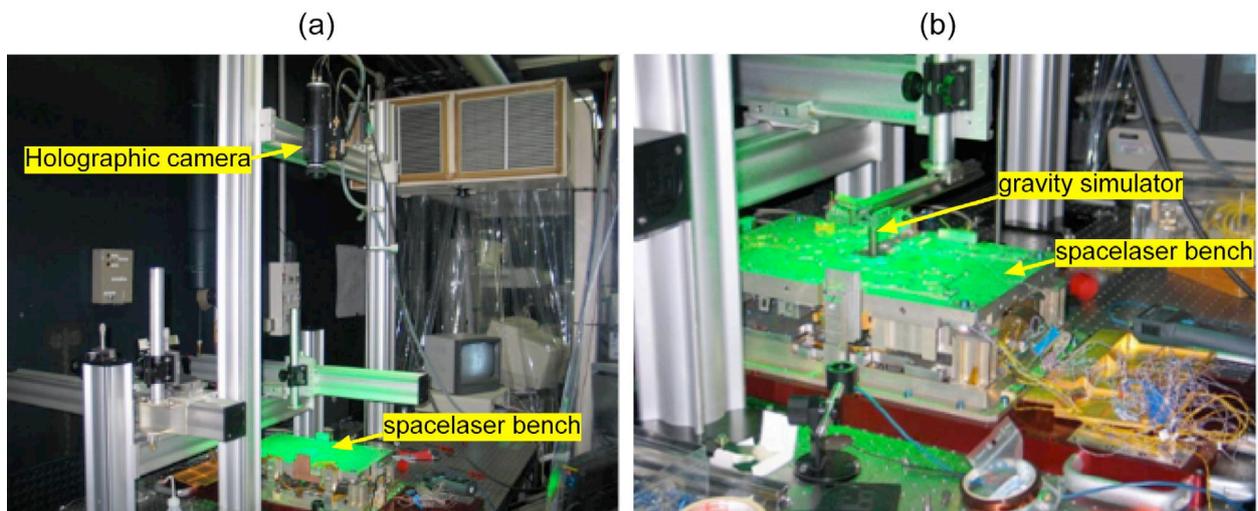


Figure 4. (a) Set-up de mesure d'un banc laser spatial, avec la caméra holographique sur le dessus., (b) détail de la structure testée avec un simulateur d'effet gravifique.

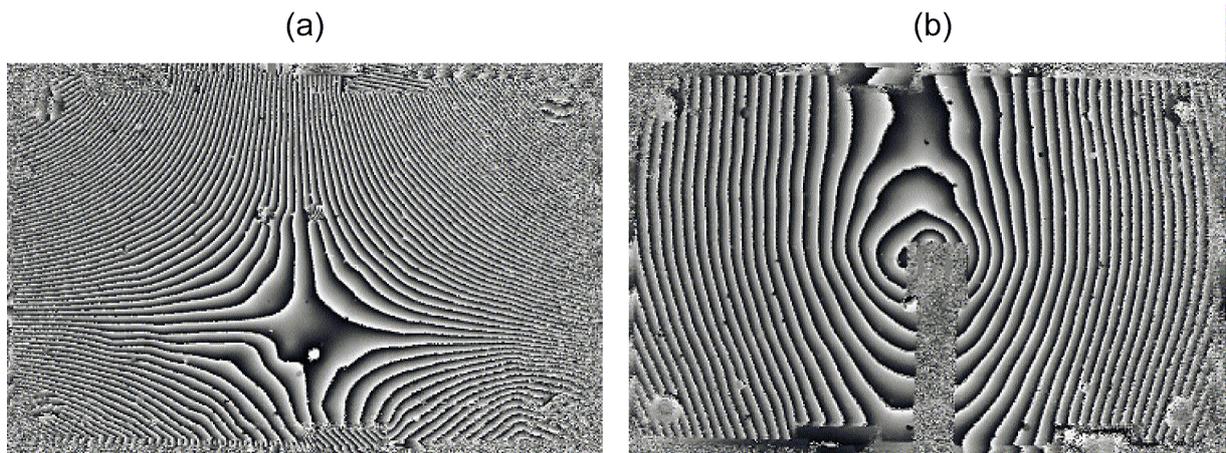


Figure 5. (a) Interférogramme de la déformation du banc laser subissant des contraintes de serrage, (b) Interférogramme d'une déformation liée à des effets gravifiques.

Le plus grand nombre d'applications de la société Optrion concerne les mesures de modes de vibration et la comparaison avec les modèles aux éléments finis, principalement dans le secteur aéronautique. Dans le passé nous avons déjà montré divers exemples d'aubes de compresseur subissant des excitations sinus et observés en régime stroboscopique. Ici nous présentons un résultat récent qui montre un segment d'aubes de redresseur. La Figure 6(a) montre le set-up de mesure avec la caméra holographique au-dessus, la Figure 6(b) montre l'objet dans son outil de montage et la Figure 6(c) montre le segment d'aubes de face.

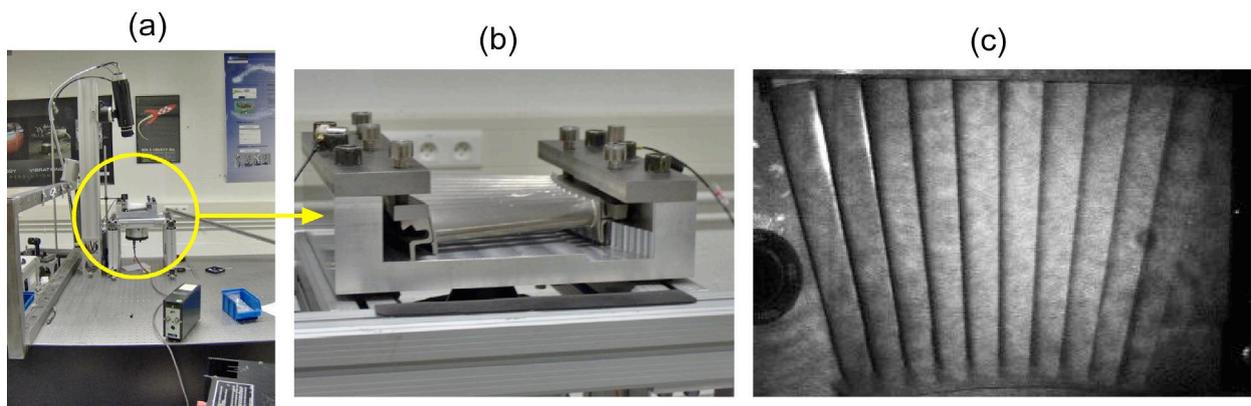


Figure 6. (a) Set-up de mesure avec la caméra holographique, l'objet et son outil de montage, le shaker en dessous. (b) l'objet et l'outil de montage. (c) segment d'aubes de redresseur.

La Figure 7 montre une série d'interférogrammes obtenus pour différentes fréquences d'excitation. On notera ici aussi l'excellente qualité des interférogrammes obtenus sans filtrage. Mentionnons aussi le caractère assez exotique d'un tel assemblage, avec des déplacements similaires pour toutes les aubes à certaines fréquences, et parfois complètement différents à d'autres.

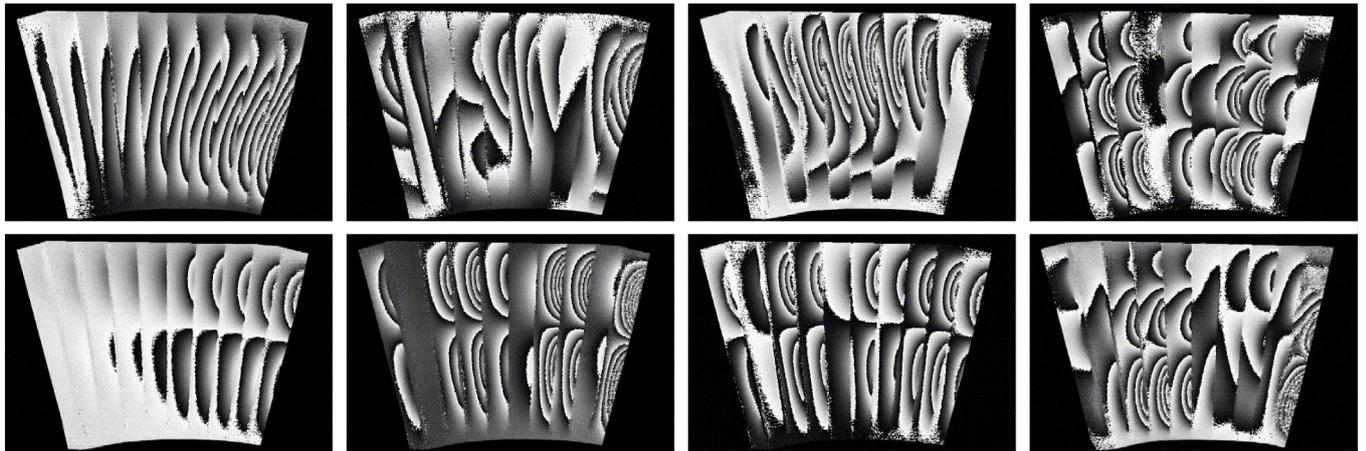


Figure 7. Interférogrammes d'un segment d'aubes de redresseur à différentes fréquences d'excitation.

Un dernier exemple d'application est la détection de défauts et fissures dans divers éléments utilisés par la société Hydroquébec. Ainsi des radiateurs et capacités ont été testés dans des halls de maintenance (hors conditions de laboratoire. Le radiateur était simplement couché sur le sol (Figure 8(a)) et la caméra observe différentes parties de la structure lorsque celle-ci subit une déformation lors d'une mise en pression de l'huile circulant à l'intérieur. Les Figures 8(b) et (c) montrent des interférogrammes typiques sur la zone d'intérêt #a.

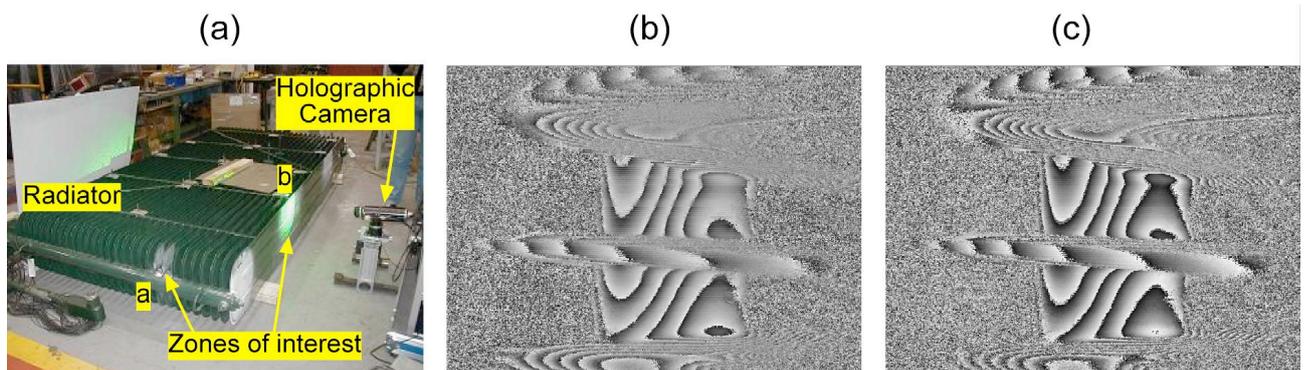


Figure 8. (a) Test d'un radiateur dans un hall de maintenance d'Hydroquébec.

Un autre test chez Hydroquebec consistait à détecter des fissures et des défauts dans des capacités. Dans ce cas-ci un échauffement était utilisé pour révéler le défaut. Les objets à tester se trouvaient dans les mêmes conditions que le radiateur. La Figure 9(a) montre un capacité typique, les Figure 9 (b) et (c) montrent la déformation de différentes parties après que l'objet ait subi un échauffement.

Ce dernier exemple montre que, malgré sa relative sensibilité aux perturbations extérieures (à cause du temps d'enregistrement des hologrammes) la technique peut être utilisée si l'endroit de la mesure est relativement calme, bien que ici hors laboratoire. Dans certains cas, la qualité des franges n'est pas très bonne, mais celles-ci peuvent tout de même être exploitées.

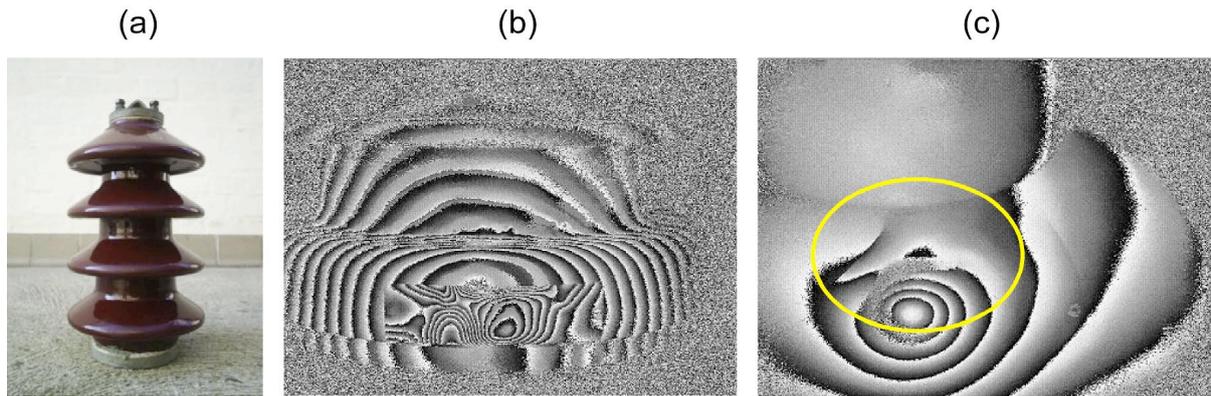


Figure 9. (a) Vue typique d'une capacité. (b) et (c) Interférogrammes obtenus après échauffement. (c) montre une fissure (b) montre le comportement différentiel de différentes parties.

4. CONCLUSIONS

Nous avons présenté les applications récentes de la caméra holographique photoréfractive que nous avons déjà présentée à maintes reprises. Celle-ci permet l'application de l'interférométrie holographique classique (sans speckle) avec un support d'enregistrement holographique auto-développant in situ et effaçable/réutilisable indéfiniment. Cet instrument est utilisé par des ingénieurs et techniciens non spécialisés en optique, avec des applications en métrologie de déplacements, contrôle non destructif et mesure vibratoire. Certaines des applications montrées ici ont été obtenues dans des environnements de travail non conçus pour des mesures holographiques.

La variété des applications montre que l'usage de l'interférométrie holographique n'est pas réservée qu'aux systèmes basés sur l'interférométrie de speckle. Même si la caméra requiert un environnement de travail modérément stable, sa grande qualité est la très haute résolution des résultats que ne permettent pas les autres techniques.

5. REFERENCES

- [1] Th. Kreis, *Holographic Interferometry : Principles and Methods.*, Akademie Verlag, Berlin, 1996
- [2] eds P. Günter and J.-P. Huignard, *Photorefractive Materials and Their Applications 1: Basic Effects*, Springer Series in Optical Sciences, Vol 113, 2006
- [3] 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
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] M.P. Georges, V. S. Scauftaire, Ph. C. Lemaire, "Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems", *Appl. Phys. B* 72, p. 761-765 (2001)
- [7] Ph. C. Lemaire, M.P. Georges, "Dynamic holographic interferometry : devices and applications", in *Photorefractive Materials and Their Applications 3: Applications*, eds P. Günter and J.-P. Huignard,, Springer Series in Optical Sciences, Vol 115, p223-251 (2007)
- [8] Ph. Lemaire and M. Georges, "Holographic photorefractive images storage for applied optical metrology by interferometry", Conference invitée, IUTAM Symposium on *Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics*, Poitiers, France, 31 Aug-4 Sept 1998, Tome 2, p. 1-15
- [9] M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Real-time stroboscopic holographic interferometry using sillenite crystals for the quantitative analysis of vibrations", *Optics Communications*, Vol. 145, p. 249-257 (1998)