

## HOLOGRAPHIE NUMERIQUE EN INFRAROUGE LOINTAIN – APPLICATIONS AEROSPATIALES

Marc Georges, Jean-François Vandenrijt, Fabian Languy, Cédric Thizy  
Centre Spatial de Liège, Liege Science Park, 4031 Angleur, Belgique  
mgeorges@ulg.ac.be

### MOTS CLES

Mesures de déformations, réflecteurs spatiaux, structures spatiales, matériaux composites, contrôle non destructif, lasers CO<sub>2</sub>, caméras thermiques à microbolomètres

### RESUME

L'holographie numérique en infrarouge lointain, utilisant un laser CO<sub>2</sub> émettant vers 10 μm et des caméras thermiques à microbolomètres, permet la mesure de grandes déformations et de s'affranchir des perturbations environnementales plus facilement qu'en lumière visible. Nous l'appliquons dans le cas de structures spatiales subissant des cyclages thermiques en régime cryogénique sous vide, ce qui induit des déplacements de grande ampleur. Nous passerons en revue les différentes expériences effectuées au Centre Spatial de Liège et discuterons des recherches en cours, notamment pour utiliser des longueurs d'onde plus grande (ondes Terahertz).

### I. INTRODUCTION

Les techniques holographiques en longueurs d'ondes visibles sont couramment employées pour mesurer le déplacement ou la déformation de la surface de structures diverses. Cependant, la faible longueur d'onde induit un critère de stabilité contraignant qui rend, dans certains cas, la mesure impossible dans de bonnes conditions. Pour parer à ces inconvénients, nous proposons l'utilisation d'une plus grande longueur d'onde afin de rendre les mesures moins sensibles aux perturbations extérieures. De plus, l'utilisation d'une plus grande longueur d'onde permet d'avoir une gamme de mesure de déplacement plus grande qu'en visible. Ainsi notre technique permet de combler un creux entre, d'une part, les techniques interférométriques en visible (très petits déplacements) et les techniques basées sur l'imagerie pour les plus grands déplacements (corrélation numérique d'images, etc..).

Pour cela, nous avons sélectionné l'utilisation du laser CO<sub>2</sub> émettant aux alentours 10 μm dans le domaine de l'infrarouge lointain (ou infrarouge thermique). L'enregistrement holographique est effectué par des caméras sensibles à ces longueurs d'onde, en particulier par la technologie des microbolomètres non refroidis sensibles dans la gamme de 8 à 14 μm.

L'application principale au Centre Spatial de Liège (CSL) visée par ces développements est la mesure des champs de déplacements de structures spatiales, réfléchissant spéculairement ou non, et qui sont soumises à des changements de température importants. Ceux-ci sont représentatifs de ce que ces structures vont subir dans leur cycle de vie dans l'espace et sont simulées dans des cuves à vide équipées de systèmes thermiques permettant une mise en chaud et froid par transferts conductif et/ou radiatif.

Différents projets de ce type ont eu lieu au CSL et nous les passerons en revue. L'holographie infrarouge permet aussi des applications intéressantes en contrôle non destructif car elle permet de combiner la mesure de déformation holographique à la mesure thermographique. Ceci est rendu possible par le fait que les hologrammes sont enregistrés par des caméras utilisées pour la thermographie. Nous montrerons des exemples d'une telle application. Enfin, nous évoquerons l'extension future de nos développements vers des longueurs d'onde encore plus grande sur base de la technologie des lasers Terahertz.

## II. L'HOLOGRAPHIE EN INFRAROUGE LOINTAIN POUR LE TEST DE RÉFLECTEURS SPATIAUX

Nous avons appliqué le principe de l'holographie numérique en configuration in-line pour profiter de toute la résolution du capteur. Nous utilisons une caméra à microbolomètre Variocam hr de la firme Jenoptik, avec un capteur à 640x480 pixels de 25  $\mu\text{m}$ . Le laser est un CO<sub>2</sub> de la firme VM-TIM de 8 W, stabilisé en température pour éviter le saut de modes caractéristique de ce type de lasers. La reconstruction holographique est basée sur le principe de Fresnel associé au décalage de phase qui permet de ne garder qu'un seul ordre de reconstruction.

Le réflecteur spatial (ici une parabole de 1.1 m de diamètre, avec une focale de 1.58 m) sera placé dans une cuve à vide du CSL. Etant donné que ni la caméra, ni le laser ne sont compatibles au vide, ces éléments seront placés hors de la cuve et les faisceaux passeront au travers de fenêtres en ZnSe. Le reste du montage (interféromètre et spécimen de test) sont placés dans la cuve.

Le principe du montage est montré à la Figure 1. Il est à noter que le réflecteur est illuminé de manière diffuse, assurant ainsi une projection de speckle qui, une fois réfléchi par le spécimen, constitue un front d'onde diffusant facilement utilisable comme faisceau objet. Nous avons étudié en détail une telle configuration [1], ainsi que la comparaison avec l'utilisation d'une illumination par un point source [2].

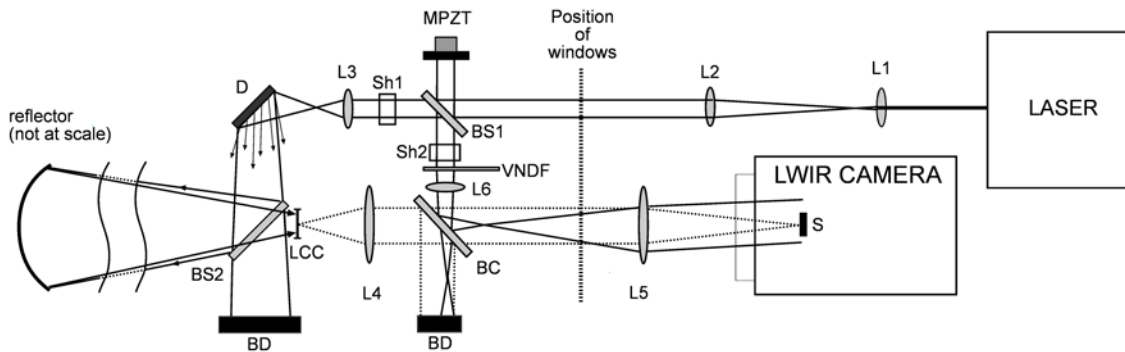


Figure 1. Schéma de principe de l'interféromètre à 10.6  $\mu\text{m}$

La figure suivante montre la cuve utilisée pour le test ainsi que l'implémentation du setup. En (d) et (e), respectivement l'interférogramme et la vue 3D de la déformation entre 224 K et 107 K

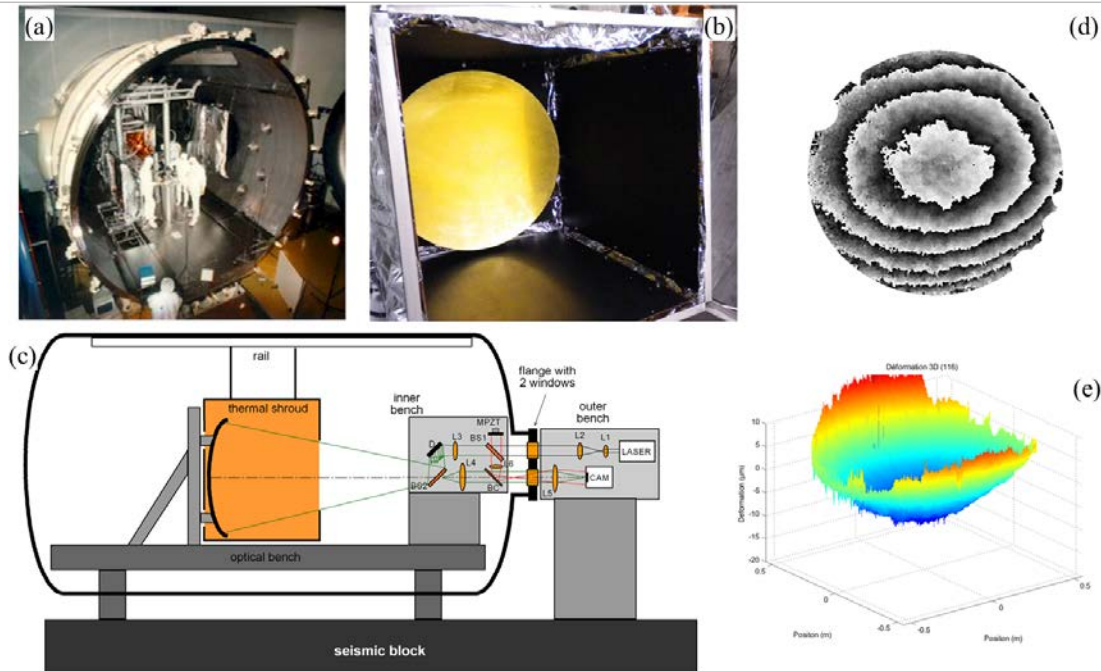
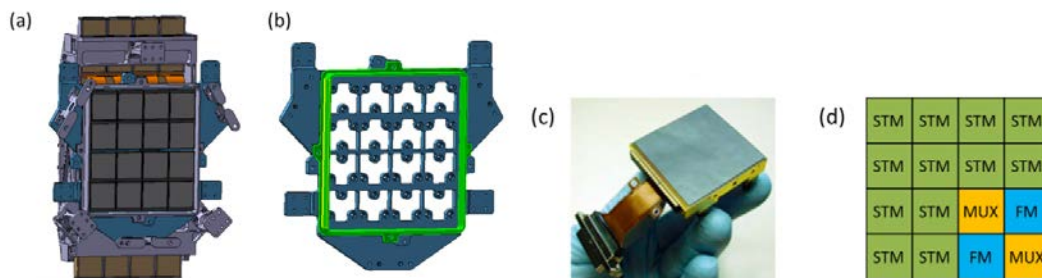


Figure 2. (a) Cuve du CSL pour le test, (b) réflecteur dans sa coquille thermique, (c) implémentation de l'interféromètre dans la cuve, (d) interférogramme obtenu durant le test cryogénique, (e) vue 3D de (d)

### III. L'HOLOGRAPHIE EN INFRAROUGE LOINTAIN AVEC SUIVI TEMPOREL POUR LE TEST DE DÉTECTEURS SPATIAUX SEGMENTÉS

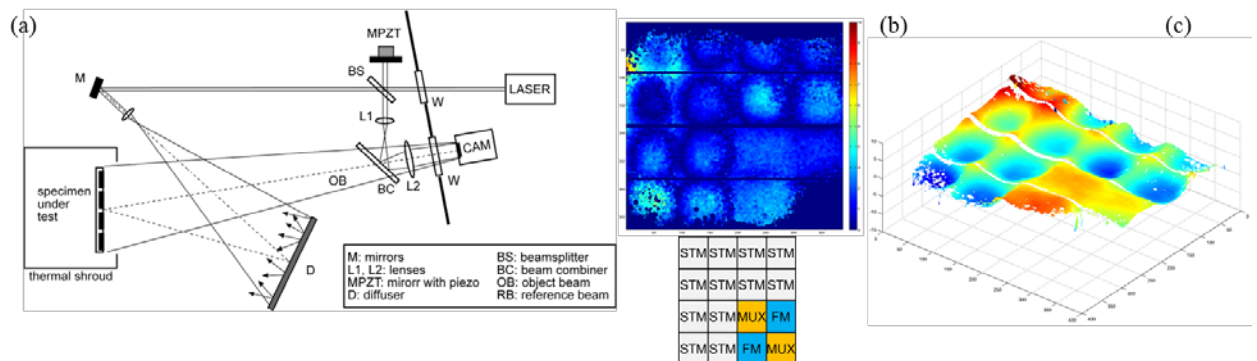
La future mission spatiale EUCLID comporte une série d'instruments d'observation dont un spectrophotomètre en proche infrarouge. Celui-ci utilise un détecteur composés d'une mosaïque de 4x4 éléments. Le CSL devait tester le comportement mécanique lors de tests cryogéniques. En particulier, il était demandé de déterminer la déformation de l'ensemble des détecteurs, de chacun de détecteurs, ainsi que les mouvements rigides (piston, rotation) de chaque détecteur. Les déplacements attendus étant de l'ordre de quelques dizaines de micron, nous avons considéré l'holographie numérique en infrarouge lointain, comme à la section II. Chacun des éléments de l'ensemble de détection pouvant évoluer séparément, nous avons associé à la technique de base le déroulage de phase temporel. Celui-ci consiste à enregistrer un grand nombre d'hologrammes et de reconstruire la phase en chaque pixel, indépendamment des pixels voisins. L'expérience est présentée en détails à la référence [3].

La figure 3 montre un schéma du spécimen à mesurer: (a) système complet et (b) le système d'attache des différents détecteurs, (c) un détecteur parmi les 16, (d) le type de détecteurs. FM signifie modèle de vol, STM est une modèle représentatif non fonctionnel mais dans un matériau identique au FM, et MUX est un modèle de vol sans fonctionnalité électrique.



**Figure 3.** (a) CAO de l'ensemble de détection, (b) structure mécanique, (c) modèle de vol d'un détecteur, (d) types de détecteurs utilisés pour le test.

Le principe du montage est montré à la Figure 4 (a). Comme pour la section II, la caméra et le laser sont en dehors de la cuve à vide, les faisceaux entrant et sortant de celle-ci au moyen de fenêtres (W). Contrairement à l'application précédente, la caméra est une Jenoptik Variocam HD, avec 1024x768 pixels de 17 µm et le laser est un Access Laser Co Merit-S de 8 W. Les figures (b-c) montrent la déformation résiduelle des détecteurs entre la 293K et 90K.



**Figure 4.** (a) Schéma de principe de l'interféromètre, (b)-(c) déformation des détecteurs.

### IV. L'HOLOGRAPHIE EN INFRAROUGE LOINTAIN POUR LA COMBINAISON AVEC LA THERMOGRAPHIE EN CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

L'utilisation de caméra thermique en holographie permet d'enregistrer simultanément le rayonnement des objets à température ambiante (thermogramme) et l'hologramme de ceux-ci lorsqu'un laser CO<sub>2</sub> vient les éclairer. Dans ce cas précis, le rayonnement thermique étant incohérent, il ne peut être reconstruit numériquement par le principe de l'holographie numérique. Dès lors, il faut utiliser un montage de type holographie-image ou interférométrie de speckle.

Sur ce principe, nous avons développé un interféromètre de speckle à décalage de phase, combinant un laser à CO<sub>2</sub> et une caméra à microbolomètres [4]. L'émission thermique de l'objet constitue un fond

continu sur lequel vient se superposer l'information holographique (specklegramme) lorsque le laser est allumé. Les deux informations sont ainsi fusionnées en tout point de la caméra. L'utilisation du décalage de phase permet de séparer les composantes thermiques et holographiques du signal [5]. La Figure 5 montre le cas d'une structure d'hélicoptère avec réparation circulaire en bas au centre du champ. L'ensemble est chauffé par une lampe. Il en résulte une déformation locale visible dans la déformation enroulée (c) et déroulée (d). Le changement de température réel est montré à en (a) et l'équivalent reconstruit par la technique en (b). La figure (e) montre une vue composite de la déformation avec en chaque pixel une coloration liée au changement de température.

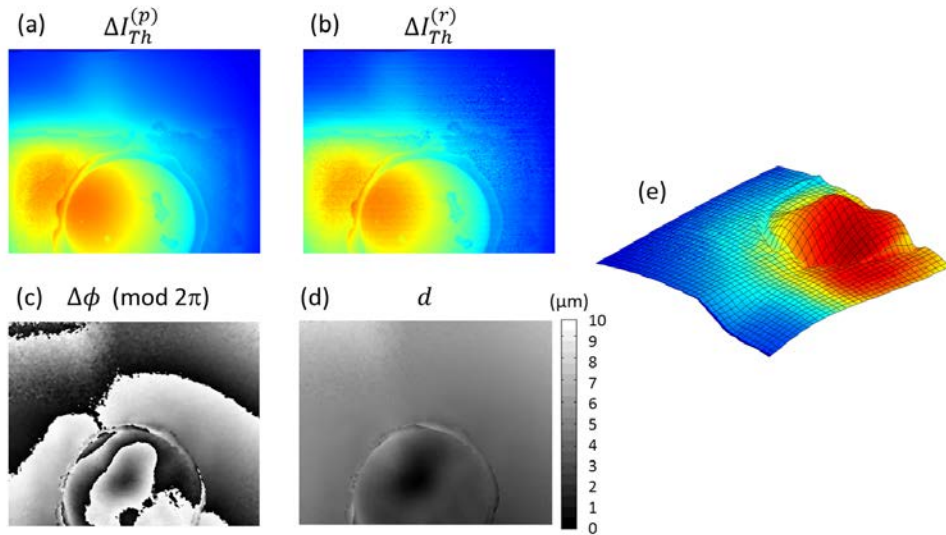


Figure 5. Séparation des composantes thermographiques et holographiques.

La combinaison des deux techniques permet des applications intéressantes, notamment dans l'évaluation du comportement thermo-mécaniques de structures diverses. Nous l'avons utilisée dans diverses applications du domaine aérospatial, présentée en détail aux références [5] et [6]. Un prototype d'instrument transportable a été développé et utilisé sur site industriel où diverses expériences de contrôle non destructif ont été faites. La figure 6 (b) montrer l'interférogramme obtenu sur une grande structure en composites après chauffage de la pièce par des lampes halogènes, et la figure (c) montre le thermogramme pris simultanément par le système combiné. Un défaut est visible au centre du champ.

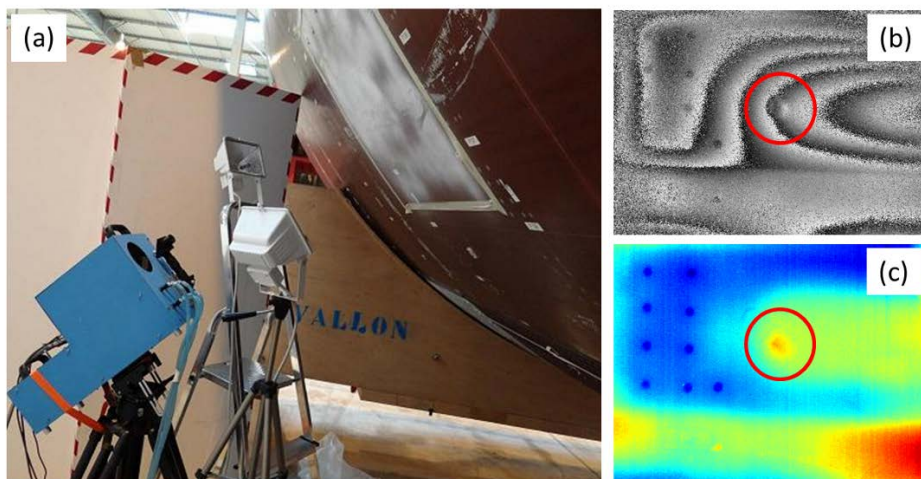


Figure 6. (a) Système de speckle infrarouge transportable sur site industriel.

Le capteur combiné a récemment été utilisé en analyse vibratoire sur shaker industriel où il a été comparé à la shearographie en lumière visible. L'intérêt de l'interférométrie de speckle en infrarouge est la possibilité d'observer les changements de température liés à la vibration, en même temps que les modes. Cependant, même si du point de vue interférométrique, les résultats étaient satisfaisants, nous

n'avons pas observé de changements thermiques, probablement dû au fait qu'ils étaient trop faibles pour être discernés par nos caméras [7].

## CONCLUSIONS

L'utilisation de l'infrarouge thermique en holographie est rendu possible par la démocratisation des caméras infrarouge et le prix moyen des lasers CO<sub>2</sub>. Leur association permet d'observer des déformations plus importantes qu'en visible, tout en limitant grandement l'impact des perturbations environnementales sur l'enregistrement holographique. Ainsi nous avons appliqué cette technique à diverses applications en spatial, en particulier pour la mesure de déformations de spécimens dans des tests cryogéniques.

D'autre part, l'infrarouge possède d'autres avantages, comme la possibilité de mesurer les variations de température simultanément à une déformation, dans diverses applications en mesures thermo-mécaniques et contrôle non destructif.

Actuellement, le CSL débute un projet où la longueur d'onde sera encore plus élevée, en particulier par l'utilisation de lasers émettant dans le domaine des ondes Terahertz (vers 100  $\mu\text{m}$ ), associées à des caméras à microbolomètres adaptées à ces longueurs d'onde.

## REFERENCES

- [1] Georges, M. et al (2013). Digital holographic itnerferometry with CO<sub>2</sub> lasers and diffuse illumination applied to large space reflector metrology. *Appl. Opt.*, **52**, A102-A116.
- [2] Vandenrijt, J-F, et al (2014). Long-wave infrared digital holographic interferometry with diffuser or point source illuminations for measuring deformation of aspheric mirrors. *Opt. Eng.*, **53**, 112309.
- [3] Vandenrijt, J-F. et al (2016). Digital holographic interferometry in the long-wave infrared and temporal phase unwrapping for measuring large deformations and rigid body motions of segmented space detector in cryogenic test. *Opt. Eng.*, **55**, 121723.
- [4] Alexeenko, I., et al (2013). Nondestructive testing by using long-wave infrared interferometric techniques with CO<sub>2</sub> lasers and microbolometer arrays. *Appl. Opt.*, **52**, A56-A67.
- [5] Georges, M, et al (2014). Combined holography and thermography in a single sensor through image-plane holography at thermal infrared wavelengths. *Opt. Exp.* **22**, 25517
- [6] Georges, M., (2015). Speckle interferometry in the long-wave infrared for combining holography and thermography in a single sensor. Applications to nondestructive testing: the FANTOM project. *Proc. SPIE* **9525**, 95251L
- [7] Languy, F., et al (2016). Vibration mode shapes visualization in industrial environment by real-time time-averaged phase-stepped electronic speckle pattern interferometry at 10.6  $\mu\text{m}$  and shearography at 532 nm. *Opt. Eng.*, **55**, 121704.