

Interférométrie holographique et de speckle en infrarouge thermique : développements actuels, applications et perspectives

M. Georges

*Centre Spatial de Liège-Université de Liège
Avenue du Pré Aily, 4031 Angleur – Liège, Belgique
e-mail : mgeorges@ulg.ac.be*

1. Introduction

L'interférométrie holographique et l'interférométrie de speckle [1] permettent d'observer les déplacements et déformations, notamment de structures subissant des contraintes thermiques et/ou mécaniques. La gamme de mesure et la résolution de ces techniques sont liées à la longueur d'onde du laser utilisé. En lumière visible (p.ex. avec un laser YAG doublé à 532 nm), les déplacements observables en configuration hors-plan vont de 20 nm à quelques microns, voire 20-30 microns, selon la qualité des interférogrammes et la résolution spatiale des systèmes de capture et d'observation. La stabilité requise par ces techniques lors de la capture de l'hologramme ou du specklegramme est aussi tributaire de la longueur d'onde. Ainsi afin d'assurer que la figure d'interférence entre les ondes référence et objet reste figée d'une fraction de longueur d'onde durant la capture, le montage, en ce compris l'objet, doit généralement être placé sur des tables optiques et dans des conditions de laboratoire.

L'utilisation d'une longueur d'onde plus grande, p.ex. 10,6 μm correspondant aux lasers CO₂, permet d'étendre la gamme de mesure vers les plus grands déplacements (typiquement d'un facteur 20 par rapport au visible), tout en relâchant les contraintes au niveau de la stabilité du montage.

Comme il n'existe pas de capteur holographique photochimique convaincant vers 10 μm , nous sommes tournés vers les techniques d'enregistrement numériques. Le premier exemple d'ESPI avec laser CO₂ a été montré par Løkberg et Kwon sur base de caméras pyroélectriques, qui ne permettait que l'acquisition d'objet en mouvement, en l'occurrence en vibration [2]. Dans notre cas, utilisons des caméras thermiques de type non refroidies à microbolomètres, sensible dans la bande 8-14 μm et qui permettent de capturer des images statiques ou en mouvement à une cadence de 50 Hz. Nous avons développé des techniques basées sur l'interférométrie de speckle et l'holographie digitale. Des développements préliminaires [3] seront présentés à la section 2 et nous y discuterons d'aspects particuliers à l'utilisation d'une longueur d'onde infrarouge lointaine, notamment le caractère spéculaire plus important qu'en visible et qui peut être dommageable pour le senseur thermique.

L'utilisation d'une longueur d'onde dans le domaine thermique entraîne des propriétés intéressantes. Ainsi un avantage important est que le fait d'utiliser des caméras thermographiques nous amène à obtenir simultanément à l'enregistrement holographique une image de fond correspondant à l'image thermique de l'objet observé. Nous allons présenter à la section 3 les développements du projet FP7 FANTOM dont l'objectif est le développement d'une technique de contrôle non destructif combinant thermographie et holographie dans un senseur unique.

Le caractère spéculaire de la réflexion à grande longueur d'onde sera abordé dans la section 4 qui concerne un projet ESA visant à la mesure par holographie digitale de déformation de réflecteurs spatiaux de grandes dimensions. Ces derniers sont naturellement réfléchissants et ne peuvent être recouverts de poudre diffusant la lumière. Dès lors nous sommes amenés à définir une technique permettant de travailler soit directement en spéculaire (sans endommager la caméra) soit à produire artificiellement du speckle par l'utilisation d'une source lumineuse étendue et diffusante. Nous appellerons cette technique la projection de speckle et l'appliquons pour la première fois à notre connaissance à l'holographie digitale dans le domaine infrarouge.

2. Premiers développements – Particularités du domaine infrarouge [3]

Pour qu'une surface réfléchisse de manière diffuse, il faut que sa rugosité soit de l'ordre ou plus grande que la longueur d'onde de la lumière incidente. En lumière visible, l'holographie est déjà confrontée à ce problème et il est courant de devoir déposer sur l'objet une poudre diffusante pour éviter les réflexions spéculaires qui saturent localement les détecteurs. Ce problème apparaît bien évidemment de manière plus importante lorsque l'on veut développer un système holographique à plus grande longueur d'onde. Si l'on éclaire une surface avec un faisceau laser divergent (pour couvrir toute la surface), il apparaît un pic spéculaire dans l'image. Si les angles d'illumination et d'observation sont tels que ce pic spéculaire entre dans la caméra, il y a une saturation qui va endommager le capteur. Une saturation locale par un laser CO₂ sur une caméra thermographique entraîne un endommagement extrêmement rapide et irréversible, ce que nos développements antérieurs en interférométrie à 10 μm nous avaient montrés. Nos premières investigations en interférométrie de speckle ont donc été tournées vers la configuration de mesure dans le plan (Figure 1) pour laquelle les angles d'incidence de l'éclairage sont importants et tels que le pic spéculaire ne rentre pas dans le système d'observation.

Pour augmenter le caractère diffus, nous avons utilisé la poudre blanche de ressuage que la plupart des holographistes utilisent en visible. La rugosité de surface de cette poudre est de quelques microns, ce qui permet d'avoir une composante diffuse suffisamment importante en dehors du pic spéculaire pour pouvoir être utilisée en interférométrie de speckle. L'avantage de cette configuration est que l'on ne doit pas injecter de faisceau référence susceptible d'endommager le senseur. Ainsi nous avons utilisé une caméra FLIR ThermoCam S45 (320x240 pixels de 38 μm).

De manière générale, en interférométrie de speckle, le specklegramme résultant de la superposition des ondes référence et objet ou entre deux ondes objet (comme c'est le cas dans la configuration dans le plan), peut s'écrire :

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_0(x, y) m(x, y) \cos\psi(x, y) \quad (1)$$

où $I_0(x, y)$ est l'intensité moyenne, $\psi(x, y)$ le déphasage entre les ondes qui interfèrent et $m(x, y)$ la fonction de contraste. La technique ESPI consiste à calculer un interférogramme comme étant la différence entre 2 specklegrammes du type (1) pris à 2 instants différents et entre lesquels l'objet a subi un déplacement ou changement de forme. L'argument du cosinus du second specklegramme diffère de $\Delta\psi(x, y)$ à cause du déplacement subi par l'objet, et dès lors l'interférogramme varie en fonction du déphasage $\Delta\psi(x, y)$. Pour obtenir des mesures quantifiées, nous appliquons la technique du décalage de phase sur chacun des specklegrammes, nous en calculons la phase $\psi(x, y)$ puis soustrayons les phases des différents specklegrammes afin de d'obtenir les interférogrammes qui nous permettent de déduire les champs de déplacement. La Figure 1(b) montre l'interférogramme de phase obtenu après application du décalage de phase. Le mouvement subi par l'objet est une rotation autour d'un axe normal au plan de l'objet.

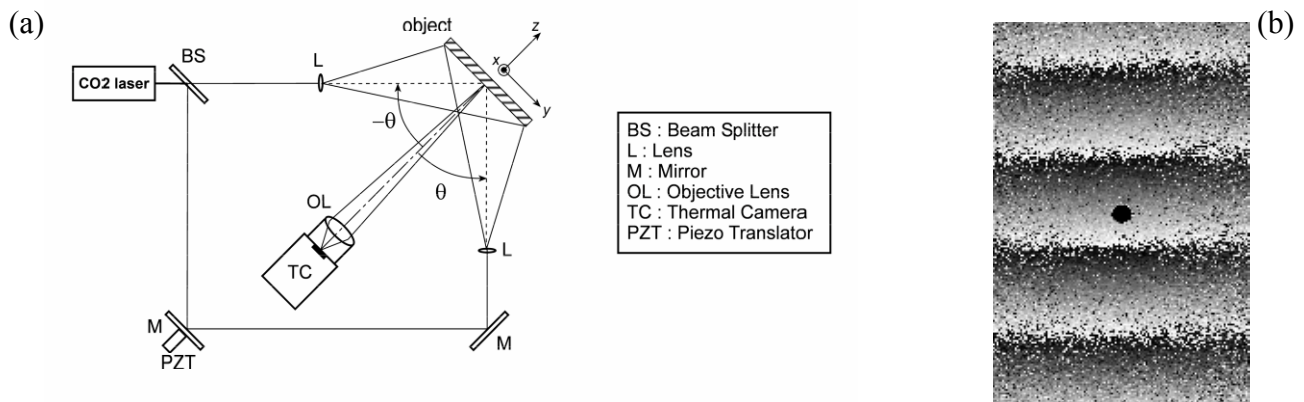


Figure 1. (a) Configuration ESPI dans le plan à 10 μm. (b) Interférogramme obtenu après rotation autour de l'axe z.

Par la suite, nous avons montré la possibilité de mesure hors-plan sur base de 2 configurations : l'ESPI hors-plan et l'holographie numérique sans lentille. Dans les deux cas, il faut s'arranger pour avoir un angle d'incidence tel que le pic spéculaire n'entre pas dans la caméra. Cependant la difficulté réside en l'introduction d'un faisceau référence. Pour ces expériences, nous avons utilisé une caméra CEDIP Jade II LWIR, 320x 240 pixels de 30 μm , pour laquelle nous avons la possibilité d'enlever l'objectif d'imagerie et nous l'avons remplacée par une lentille en ZnSe (IL) placée à une distance telle que nous pouvions amener un faisceau référence et l'injecter sur le senseur au moyen d'un combineur de faisceau (BC).

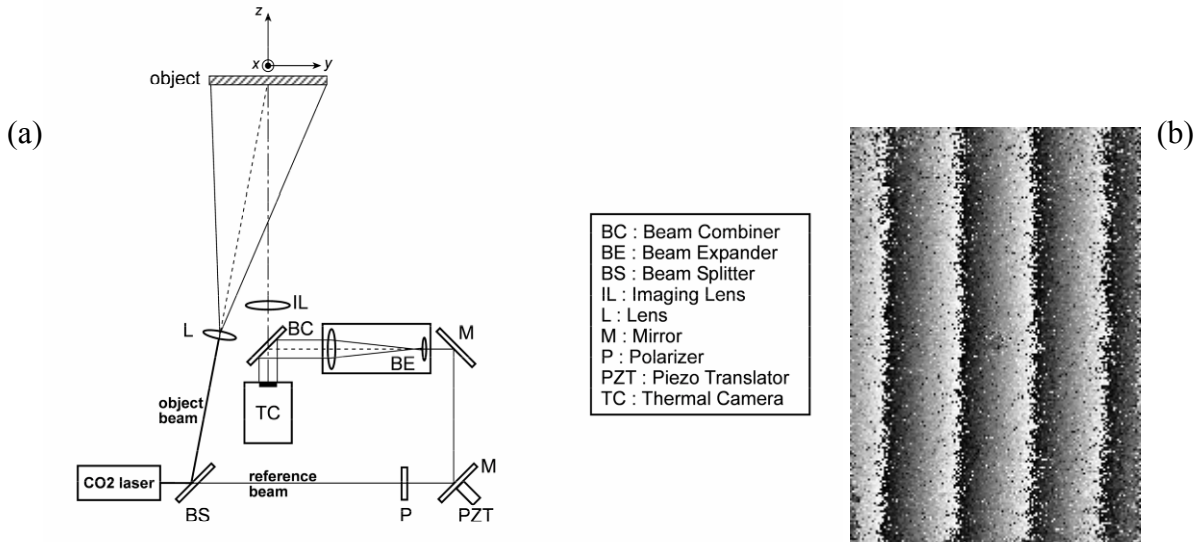


Figure 2. (a) Configuration ESPI hors-plan à 10 μm . (b) Interférogramme obtenu après rotation autour de l'axe x.

La seconde configuration hors plan concerne un montage d'holographie numérique sans lentille avec référence hors-axe et utilisant le principe de reconstruction de Fresnel [1,4] (Figure 3). Il est connu que le champ maximum observable est donné par l'angle β_{max} entre la référence et l'axe d'observation par la relation suivante

$$\beta_{\text{max}} \leq 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\Delta}\right) \quad (2)$$

avec λ la longueur d'onde et Δ la dimension des pixels.

Une des particularités du domaine infrarouge thermique en holographie digitale est que les rapports λ/Δ sont plus élevés qu'en visible. En effet, la longueur d'onde est typiquement 20 fois plus grande et les pixels sont de l'ordre 25 μm , voire moins pour les senseurs les plus récents. Ainsi l'angle admissible pour la caméra Jade est de l'ordre de 10°. En pratique, nous nous sommes limités à la reconstruction d'objets de 15 cm situés à 1 mètre du senseur, correspondant à des angles de 8.5°.

La Figure 4(b) montre la reconstruction numérique des différents ordres; l'image réelle utile (ordre+1) est entourée de pointillés. La Figure 4(a) montre l'objet considéré, monté sur une platine de rotation avec un miroir permettant une contre-mesure de rotation pour comparaison avec la mesure d'angle provenant des interférogrammes.

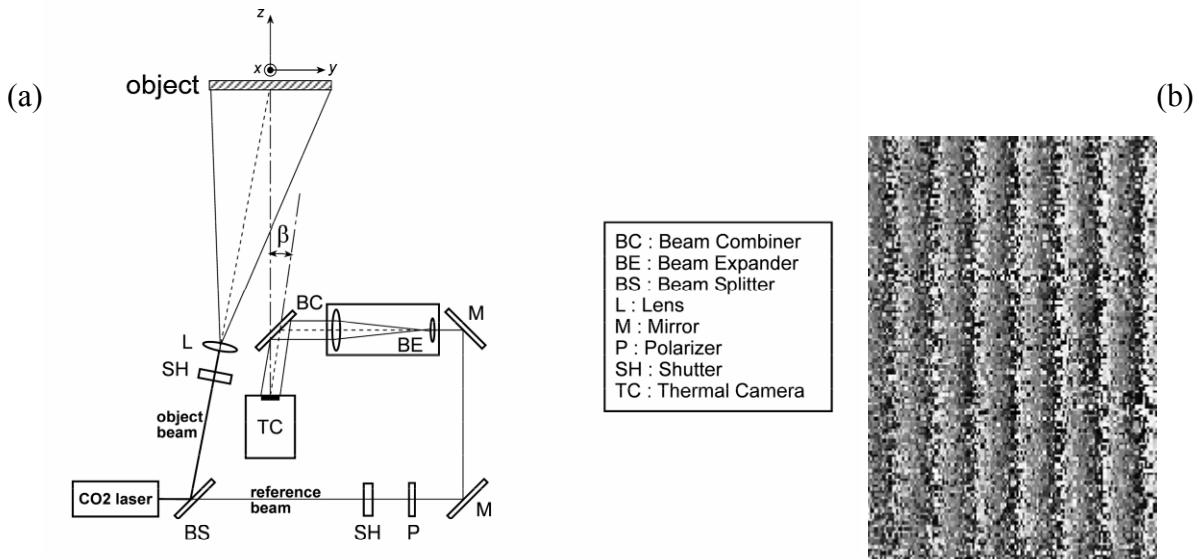


Figure 3. (a) Configuration holographie digitale sans lentille à 10 μm . (b) Interférogramme obtenu après rotation autour de l'axe x .

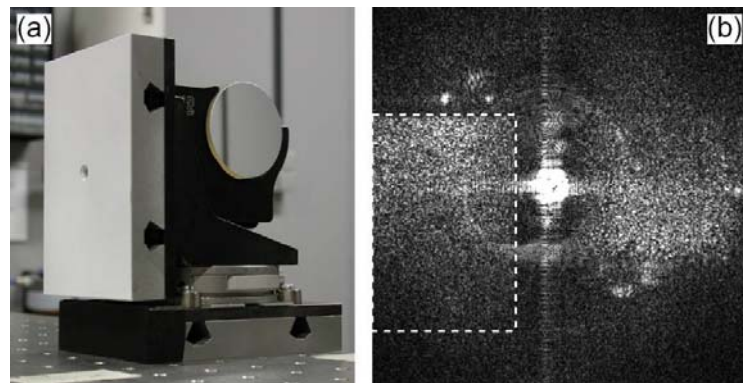


Figure 4. (a) Objet utilisé pour les mesures hors-plan. (b) Hologramme numérique reconstruit.

3. Projet FANTOM : combinaison thermographie-holographie

Le fait d'utiliser des caméras thermiques pour la capture de specklegrammes permet d'envisager de combiner la thermographie à l'holographie. En effet, le specklegramme contient dans son intensité moyenne un pied continu $I_{therm}(x,y)$ correspond à l'image thermique (thermogramme) auquel s'ajoute la partie utile du specklegramme provenant de l'interférence des ondes référence et objet. Ainsi, dans le specklegramme donné par l'équation (1), l'intensité moyenne et le contraste sont donnés par

$$I_0(x, y) = I_{therm}(x, y) + I_{obj}(x, y) + I_{ref}(x, y) \quad (2)$$

$$m(x, y) = 2\sqrt{I_{obj}(x, y)I_{ref}(x, y)} / I_0(x, y) \quad (3)$$

Le projet FANTOM vise au développement d'un senseur combinant thermographie et holographie pour pouvoir analyser des déformations d'origine thermo-mécaniques pour lesquelles le champ de température doit être connu. Les applications sont les tests structuraux sur des pièces aéronautiques en composites. Une autre application potentielle dans de telles structures est la détection de défauts qui peut s'effectuer soit par thermographie active (lampes flash, lampes modulées,...) soit par holographie (ou plus vraisemblablement par shearographie). Les deux techniques donnent des résultats complémentaires et de plus en plus de groupes cherchent à combiner les deux sur base de 2 senseurs séparés [5,6,7]. Dans notre cas, les deux s'intègrent de manière naturelle, assurant ainsi une corrélation parfaite entre les points de mesures de température et de déformation.

Dans une première phase du projet, nous nous sommes penchés sur la problématique de la réflectivité des surfaces généralement observées en aéronautiques [8]. Diverses structures représentatives (en terme de matériaux, de construction interne, de présence de défauts...) ont été fournies par un partenaire du projet. En particulier, on retrouve des échantillons en fibre de carbone, fibre de verre, kevlar, etc... Dans la plupart des cas, la rugosité avoisine les 10 μm , ce qui est bienvenu. Il existe cependant des cas, où le caractère spéculaire reste important et il sera nécessaire d'incliner légèrement les surfaces pour éviter tout endommagement du capteur. La Figure 5 montre quelques échantillons observés lorsqu'ils sont éclairés par un faisceau laser CO2 divergent. On voit bien le speckle sur les deux échantillons de gauche, tandis que sur celui de droite, pas suffisamment rugueux, on observe un pic spéculaire.

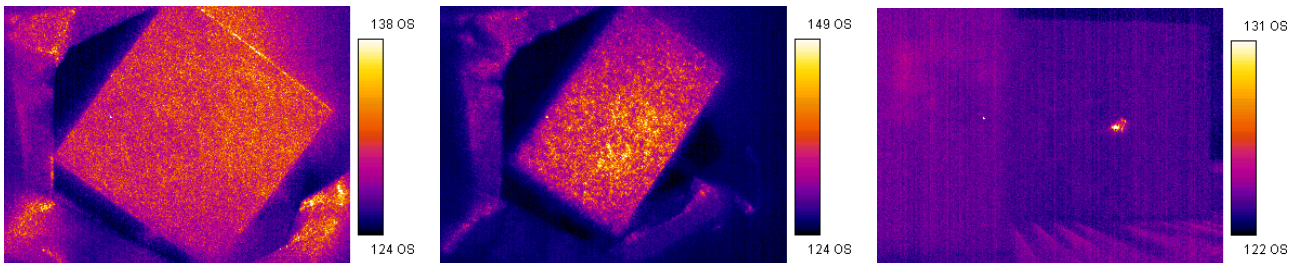


Figure 5. Image d'échantillons de structures aéronautiques en fibre de carbone, en fibre de verre.

Ceci nous a montré que la plupart des échantillons seraient observables par ESPI. Cependant, nous devons faire face inévitablement à des échantillons spéculaires. Ainsi nous devons étudier la possibilité de contourner le problème. La possibilité d'utiliser de la poudre n'est pas souhaitée car contraignante au niveau industriel. Dans une section ultérieure, nous montrerons qu'il est possible de générer artificiellement du speckle sur une surface spéculaire.

Par la suite, nous avons amélioré les expériences préliminaires présentées à la section précédente en considérant des composants de l'état de l'art (laser, composants optiques et caméra). Ainsi nous avons utilisé une caméra non refroidie à microbolomètres de la firme Jenoptik (VarioCAM hr, de 640x480 pixels). Les partenaires ITO (Univ. Stuttgart) et CSL ont étudié les différentes techniques holographiques (ESPI, holographie numérique et shearographie) en vue de la combinaison des mesures thermiques et de déformation.

Tout d'abord, la shearographie a été étudiée et a donné sans surprise des résultats de bonne qualité en détection de défaut sur une structure en composites stimulée thermiquement (Figure 6(a)). Cependant, la double image obtenue par cisaillement du front d'onde objet (shearogramme) ne permet pas d'obtenir une carte de température utilisable, car elle-même dédoublée. Dès lors, la shearographie ne présente pas d'intérêt dans ce cadre. Il n'est resté pas moins que les résultats présentés ici sont les premiers du genre. Ensuite, nous avons étudié l'holographie digitale. Il n'est plus question ici d'utiliser une configuration sans lentille. En effet, l'image thermique étant incohérente, il est impossible de la reconstruire numériquement. Dès lors, il faut utiliser un montage identique à l'ESPI avec lentille d'imagerie et utiliser un algorithme de reconstruction adéquat. Il fut déterminé qu'il était nécessaire de diminuer l'ouverture de l'objectif d'imagerie de la caméra thermographique afin de pouvoir séparer les ordres. Cela n'est possible qu'en ajoutant un diaphragme à celui présent, ce qui est perturbé grandement la mesure thermographique. L'holographie digitale n'est donc pas adaptée à ce propos. Cependant la technique donne des résultats de qualité acceptable du point de vue mesure de déformation et détection de défauts (Figure 6(b)).

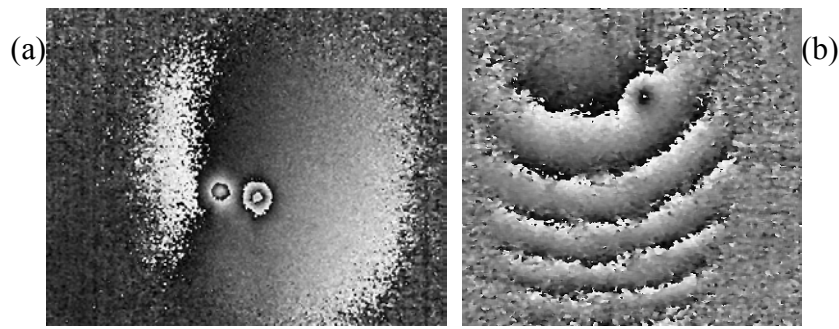


Figure 6. Interférogrammes obtenus à $10\ \mu\text{m}$ lors après chauffage d'une structure composite avec défaut : (a) par shearographie, (b) par holographie digitale

La technique ESPI a été finalement retenue. Le schéma du montage (Figure 7) diffère de celui présenté à la Figure 2(a) au niveau du combineur de faisceau référence qui est placé devant la caméra munie de son objectif d'imagerie. Nous avons appliqué la technique sur diverses structures de référence en composites. Ces échantillons sont placés en dehors de la table sur laquelle se situe le montage de mesure, et elles sont simplement posées en appui sur des tiges, ce qui montre le peu de précaution pris pour assurer la rigidité du montage, contrairement à ce que l'on fait en visible. La Figure 8 montre divers interférogrammes obtenus sur ces échantillons.

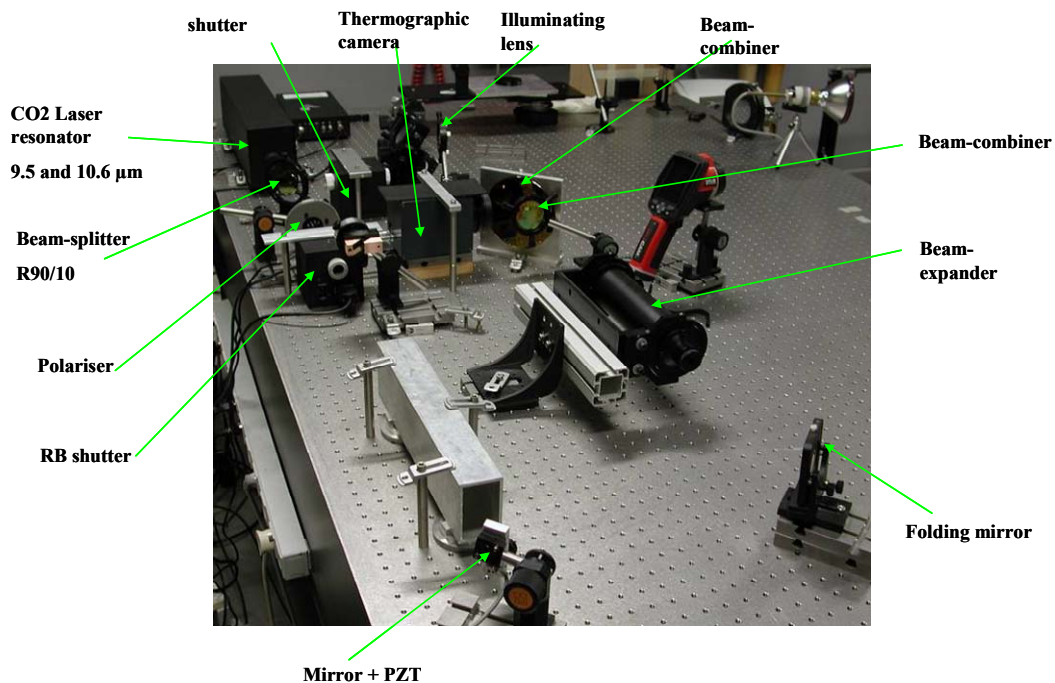


Figure 7. Photo du montage ESPI en infrarouge thermique. Les échantillons se trouvent hors de la table à une distance d'environ 2 mètres.

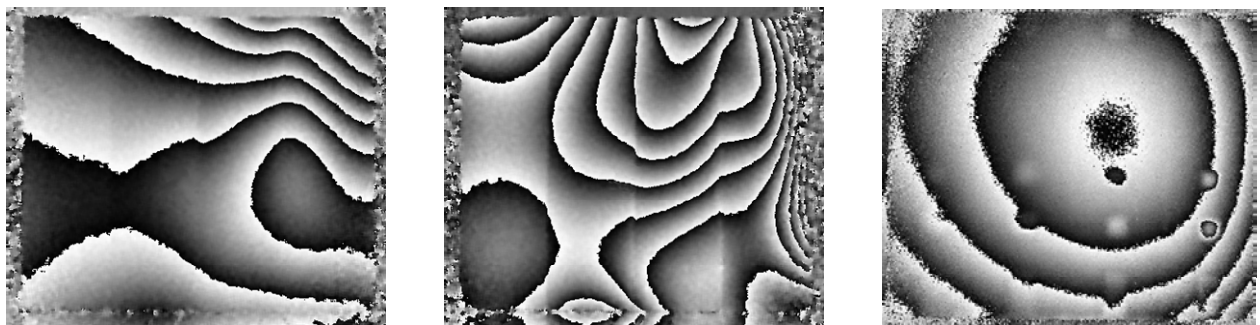


Figure 8. Interférogrammes de diverses structures en composite (à droite avec défauts internes) soumises à un échauffement.

Le découplage des champs de température et de déformation est rendu possible de différentes manières. Une première possibilité consiste à effectuer une mesure préliminaire du thermogramme sans le laser (obturateur laser fermé), puis nous capturons les specklegrammes avec décalage de phase un instant juste après, après avoir ouvert l'obturateur, permettant aux faisceaux objet et référence d'être présents sur le senseur. L'intervalle de temps entre les captures n'est que de quelques dizaines de millisecondes. Dans ce cas, on n'a pas de réelle simultanéité entre les informations de température et holographique, mais si les phénomènes que l'on mesure sont relativement lents (ce qui est le cas en tests structurels ou dans la plupart des applications concernant les déformées thermo-mécaniques en régime quasi statique), nous n'avons pas besoin d'une parfaite simultanéité entre les deux types d'informations. Cependant nous avons une correspondance pixel à pixel entre elles.

Une seconde possibilité consiste à utiliser le principe du décalage de phase pour en extraire les thermogrammes. Bien que la simultanéité soit meilleure avec les specklegrammes, le thermogramme calculé est empreint d'une certaine erreur liée à diverses sources de bruit que nous ne détaillerons pas ici. Actuellement nous travaillons à améliorer la qualité des thermogrammes recalculés sur base des specklegrammes. La Figure 9 montre un exemple obtenu sur une structure en composites et nid d'abeilles contenant une réparation (a). Nous avons chauffé la pièce avec des lampes infrarouges. Nous obtenons un interférogramme (d) entre 2 instants et qui permet de déduire une carte de déformation (e). Les thermogrammes correspondant au changement de température sont montrés aussi : en (b) le thermogramme réel correspond à une acquisition sans laser et celui en (c) est calculé sur base des specklegrammes décalés en phase et qui ont servi à calculer l'interférogramme (d) pour le champ de déformation. L'image (f) montre un compositage entre les champs de température et déformation.

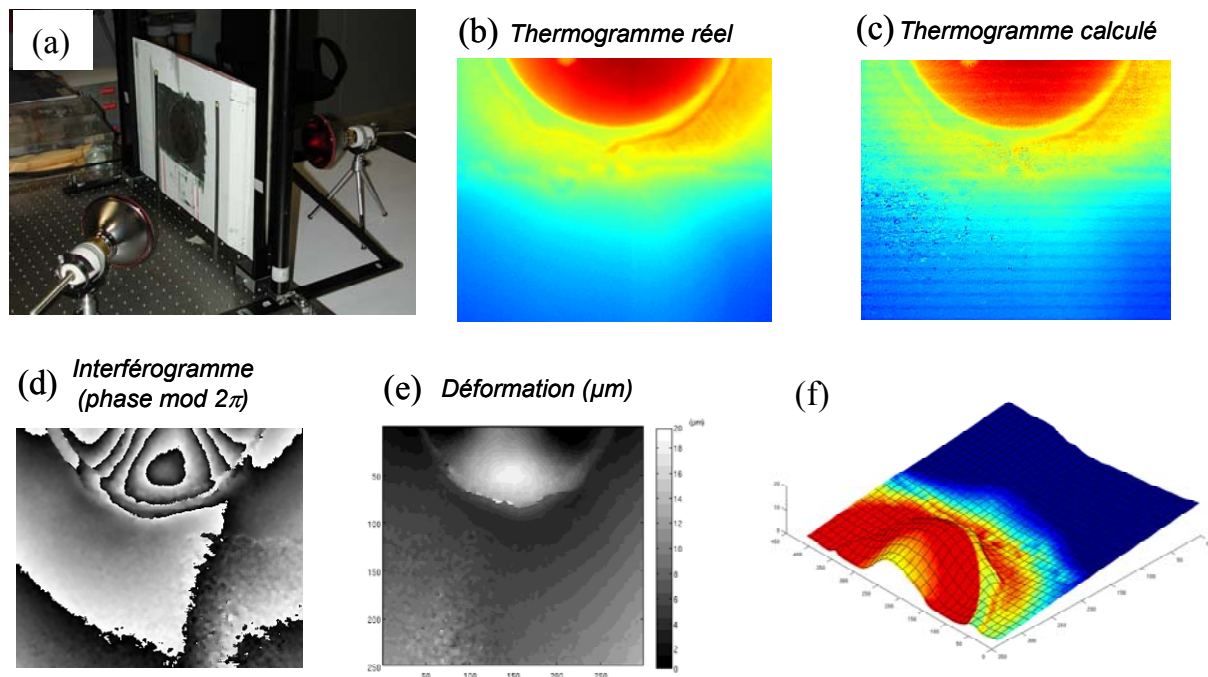


Figure 9. (a) Structure d'hélicoptère en composites et nid d'abeilles. Thermogrammes réel (b) (sans laser) et calculé sur base des specklegrammes (c); (d) interférogramme et (e) champ de déformation correspondant; (f) compositage des deux types d'information.

4. Projet Agence Spatiale Européenne sur le contrôle de larges réflecteurs spatiaux

Le CSL a démarré en 2009 en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles, un projet visant à développer une technique d'holographie digitale à 10 μm pour mesurer les grandes déformations de larges réflecteurs spatiaux (maximum 4 m de diamètre) qui sont soumis à des conditions environnementales rencontrées dans l'espace (cycles de température sous vide). Les structures à tester sont basées sur des technologies composites (CFRP) ou nouveaux matériaux (SiC, C-SiC, etc...) et

sont réfléchissantes spéculairement en visible et en infrarouge lointain. Ces structures étant des réflecteurs paraboliques ou elliptiques, les faisceaux d'illumination éclairent l'objet de manière très particulière et les rayons réfléchis sont récoltés au travers d'une pupille bien délimitée et arrivent au senseur d'image de manière extrêmement bien dirigée. En général, ces réflecteurs sont testés par interférométrie classique (mesure d'erreur de front d'onde) et nécessitent l'adjonction d'un élément coûteux (lentille correctrice ou null lens) qui est adapté au réflecteur testé et doit être positionné de manière extrêmement précise. Par le passé, le CSL a développé un interféromètre de Michelson avec un laser CO₂ et qui incorpore une lentille correctrice couteuse. Notre but est de s'affranchir de ce genre d'optique et d'utiliser une technique plus souple et moins couteuse. Nous développons donc une technique d'holographie digitale avec laser CO₂ qui doit utiliser au maximum des lentilles et composants de stock.

Il existe deux types de configurations de travail. Une première possibilité considère l'objet spéculairement (comme en interférométrie) mais, dans le cas d'asphériques et sans lentilles correctrices, nous devons récolter au mieux les faisceaux et les faire interférer avec une référence sur le senseur. Ceci n'est pas simple avec une parabole très ouverte, car le cercle de moindre confusion est relativement étendu et doit être réimagé par des optiques intermédiaires au niveau du senseur thermique. Une seconde possibilité consiste à éclairer l'objet par une source élargie et diffusante générant du speckle qui est projeté vers la surface de l'objet à tester et par un système d'imagerie classique par réflexion sur l'objet spéculaire. Ce dernier scénario a déjà été proposé par Hansen [9] qui a montré l'application de l'ESPI en lumière visible sur des miroirs. A notre connaissance, ceci n'a jamais été proposé en infrarouge lointain et en holographie digitale. Dans le projet, nous avons donc étudié la possibilité de projeter du speckle, avec les 2 techniques (ESPI et holographie digitale), tout d'abord en visible (pour se familiariser) et ensuite à 10 μm .

Pour s'affranchir du comportement spéculaire, nous observons le speckle produit par une surface diffusante intermédiaire et qui est réfléchi par l'objet spéculaire dont nous voulons mesurer les déplacements. La Figure 10(a) montre un schéma du montage en holographie digitale avec diffuseur éclairé par une partie du faisceau laser (en rouge) et qui interfère avec le faisceau référence (en vert) sur le senseur. La Figure 10(b) montre le réflecteur spéculaire situé hors de la table sur laquelle se trouve le montage optique, Figure 10(c), à une distance de 3 mètres de l'antenne, ce qui correspond au centre de courbure moyen de la parabole.

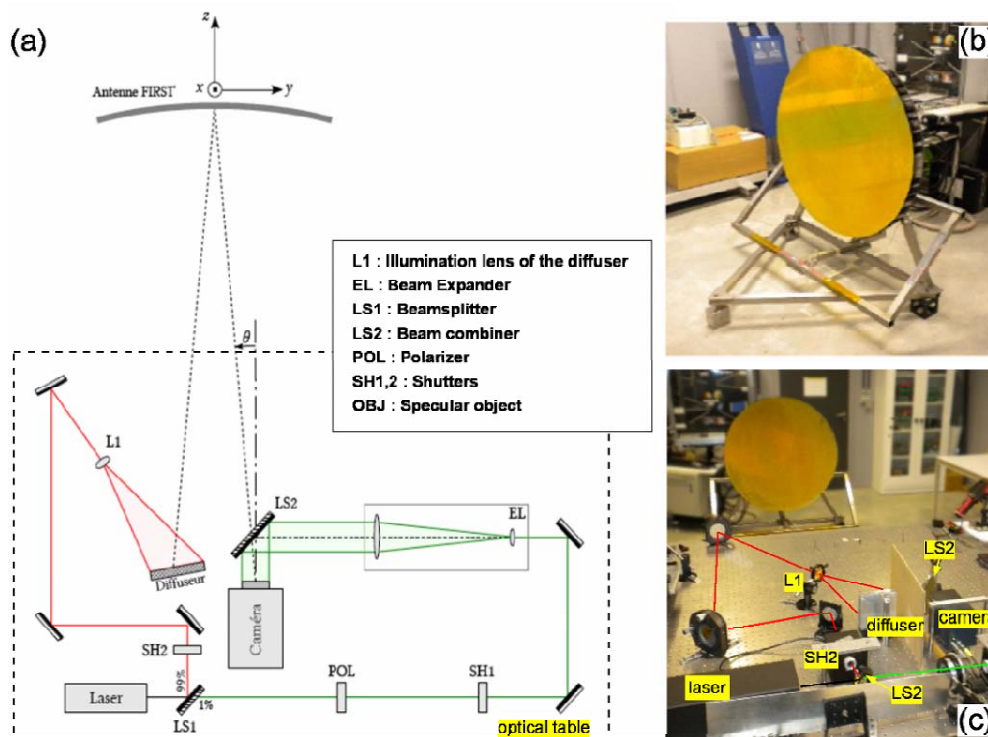


Figure 10. (a) Montage holographie digitale avec speckle projeté à 10 μm , (b) réflecteur testé situé hors de la table, (c) montage optique situé sur une table à 3 mètres du réflecteur

La Figure 11 montre les résultats obtenus après reconstruction numérique du front d'onde objet : après filtrage de l'ordre 0 en (a) et (c), respectivement module et différence de phase après rotation. On observe le recouvrement des ordres +1 et -1 car la résolution du capteur n'est pas suffisante pour séparer les ordres. A l'avenir nous travaillerons soit avec des capteurs thermiques megapixels apparus récemment sur le marché, soit nous envisageons l'utilisation d'un filtrage par décalage de phase, permettant de supprimer un des deux ordres, comme le montrent les figures (b) et (d). Dans tous les cas, l'image est tronquée dans le bas à cause de la présence de la table, ce qui sera aussi arrangé en pratique pour la suite.

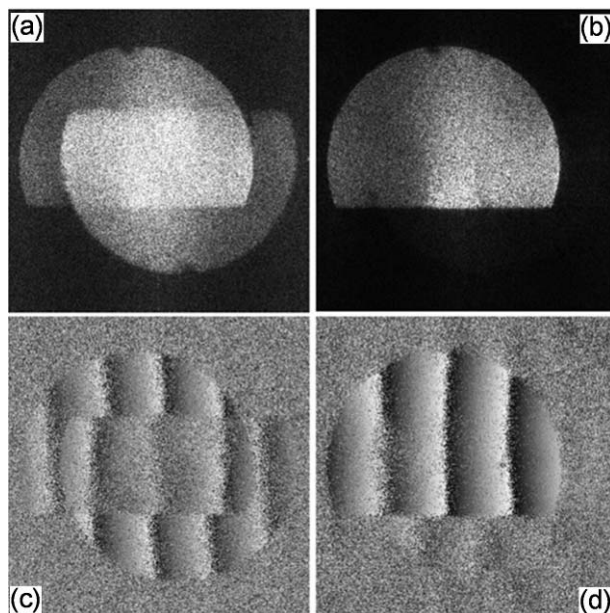


Figure 11. (a) module de l'image reconstruite de l'antenne; (b) idem avec décalage de phase; (c) and (d) différence de phase obtenue resp. avec (a) et (b) après une rotation.

5. Conclusion-perspectives

Nous avons montré que l'interférométrie holographique digitale et l'interférométrie de speckle étaient faisables à 10 μm , associant des lasers CO₂ avec des caméras thermographiques non refroidies (microbolomètres). Ces dernières sont de plus en plus fiables, leurs performances en termes de résolution spatiale, de niveau de bruit et de cadence image, augmentent sans cesse et le prix avoisine les 25 k€, ce qui rend la technique envisageable à un coût raisonnable.

Nous avons montré les expériences pionnières qui nous ont permis de cerner les difficultés de l'utilisation d'une longueur d'onde 20 fois plus grande que celles, en visible, que nous utilisons d'habitude. Ainsi nous avons montré que les différentes configurations de l'ESPI étaient faisables car la réflexion diffuse est non négligeable en dehors du pic spéculaire et du speckle existe et est utilisable à ces longueurs d'onde. Cependant il faut être vigilant pour écarter la composante de réflexion spéculaire hors du capteur car les caméras de type microbolomètres s'endommagent très facilement par des réflexions parasites à 10 μm .

Nous avons montré ensuite deux projets dont les objectifs sont différents. Le premier (projet FP7 FANTOM) consiste à combiner la thermographie et l'une ou l'autre des variantes de l'holographie (ESPI, shearographie) dans un même capteur à 10 μm car le capteur d'image est une caméra thermographique. Cette combinaison est rendue possible car l'interférence entre 2 ondes (objet et référence, p.ex.) contient un pied continu qui provient de la carte thermique de l'objet qui est acquise en même temps que l'information holographique (specklegramme). Nous avons montré que l'ESPI convient bien pour cette simultanéité temporelle et spatiale et qu'il est possible de découpler les informations de déformation et température pour des applications en évaluation de structures composites. Le projet FANTOM continue actuellement par le développement d'un prototype

instrumental compact et transportable qui sera utilisé sur site dans une ou plusieurs applications de tests structurels en fin de projet. Nous y ferons aussi usage d'une caméra thermographique refroidie basée sur la technologie MCT et qui est développée dans le cadre du projet.

Le second projet concerne le test de réflecteurs spatiaux de grandes dimensions et qui subissent des déplacements importants lors de cycles de température sous vide. La grande longueur d'onde permet aussi de s'affranchir des perturbations environnementales de type vibratoire qui sont souvent présentes dans ce genre de montages à grandes échelles. Dans le cas des réflecteurs spatiaux, la réflexion des surfaces est clairement spéculaire et les services d'assurance-qualité interdisent d'y apposer des poudres diffusantes. Dès lors nous avons montré une technique de "projection du speckle" appliquée à l'holographie digitale et qui s'avère fonctionnelle et sera appliquée dans un montage sous vide dans la suite du projet.

Il est à noter que la technique de projection du speckle peut aussi être appliquée au test des structures aéronautiques du projet FANTOM qui ne présenteraient pas de caractère diffusif suffisamment important.

6. Références

1. T. KREIS, *Handbook of Holographic Interferometry*, Wiley-VCH, Weinheim (2007)
2. O.J. LØKBERG, O. KWON, "Electronic speckle pattern interferometry using a CO₂ laser", *Opt. Las.Tech.*, pp. 187-192 (1984)
3. J-F. VANDENRIJT, M.P. GEORGES, "Electronic speckle pattern interferometry and digital holographic interferometry with microbolometer arrays at 10.6 micrometers", *Appl. Opt.*, Vol. 49, N° 27, pp. 5067-5075 (2010)
4. P. PICART, J. LEVAL, "General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.25, pp. 1744-1761 (2008)
5. J. GRYZAGORIDIS, D. FINDEIS, "Simultaneous shearographic and thermographic NDT of aerospace materials", *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 48, pp. 294-297 (2006)
6. E. HACK, "Combined Shearography and Thermography Measurements on Microelectronic Systems", *NDT.net* - April 2002, Vol. 7 No.04 (2002)
7. C. IBARRA-CASTANEDO, S. SFARRA, D. AMBROSINI, D. PAOLETTI, A. BENDADA, X. MALDAGUE "Diagnostics of panel paintings using holographic interferometry and pulsed thermography", *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol 7, pp. 85-114 (2010)
8. J-F. VANDENRIJT, C. THIZY, I. ALEXEENKO, I. JORGE, I. LOPEZ, I. SAEZ DE OCARIZ, G. PEDRINI, W. OSTEN, M. GEORGES, "Electronic Speckle Pattern Interferometry at Long Wave Infrared Wavelengths. Scattering Requirements", in *Fringe 2009*, Springer Verlag, Berlin, pp. 596-599 (2009)
9. R.S. HANSEN, "A compact ESPI system for displacement measurements of specular reflecting or optical rough surfaces", *Opt. Las. Eng.*, Vol 41, pp.73-80 (2004)