

# Interférométrie holographique sur base de cristaux photoréfractifs dynamiques et lasers à double impulsion : le projet européen PHIFE

M. Georges, C. Thizy, P. Lemaire<sup>1</sup>,  
G. Pauliat, G. Roosen<sup>2</sup>,  
I. Alexeenko, G. Pedrini<sup>3</sup>,  
S. Ryhon<sup>4</sup>,  
N. Coates, R. Kelnberger<sup>5</sup>,  
R. Schnitzer, N. Rümmler<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Centre Spatial de Liège, Avenue du Pré-Aily, B-4031 Angleur-Liège, Belgique. Email :mgeorges@ulg.ac.be

<sup>2</sup>Laboratoire Charles Fabry, Unité Mixte de l'Institut d'Optique, du Centre National de la Recherche Scientifique et de l'Université Paris Sud, Bâtiment 503, 91403 Orsay Cedex, France,

<sup>3</sup>Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart, Allemagne

<sup>4</sup>Optrion S.A., rue des Chasseurs Ardennais, B-4031 Angleur-Liège, Belgique,

<sup>5</sup>Innolas, Somers Road, Rugby CV22 7DG, Royaume-Uni

<sup>6</sup>Amitronics, An der Hartmühle 10, D-82229, Seefeld b. München, Allemagne

## Résumé

*Les cristaux photoréfractifs sont des supports holographiques dynamiques (auto-enregistrables, effaçables et indéfiniment réutilisables) qui permettent l'acquisition rapide d'hologrammes utilisables en interférométrie holographique. De plus, certaines de leurs propriétés cristallines permettent l'obtention d'interférogrammes de qualité incomparable.*

*Nous avons déjà présenté à maintes reprises les développements et applications d'instruments de métrologie basés sur ces cristaux avec des lasers continus. Des expériences préliminaires sur base de lasers à simple impulsion avaient aussi été montrées.*

*Nous présentons ici la suite de ces expériences et qui ont lieu dans le cadre du projet européen PHIFE "Pulsed Holographic Interferometer for the analysis of Fast Events". PHIFE a pour objectif le développement d'un instrument à champ complet fonctionnant avec un laser YAG Q-switch à double impulsion.*

## I. Introduction

Dans le passé, nous avons déjà présenté les développements en interférométrie holographique dynamique sur base des cristaux PhotoRéfractifs (PR). Tout d'abord avec des lasers continus<sup>1,2</sup>, ensuite avec des lasers à simple impulsion. Les cristaux PR étant sensibles aux longueurs d'onde bleu-vert, les lasers considérés sont généralement de type YAG. En impulsionnel, nous avons utilisé un YAG Q-switch (COHERENT Infinity) et présenté une technique de mesure vibratoire à 4 impulsions<sup>3</sup>.

Rappelons les principales caractéristiques intéressantes des cristaux PR. Contrairement aux supports holographiques classiques, ils permettent l'enregistrement holographique in-situ et sont effaçables, donc réutilisables indéfiniment et sans fatigue du matériau. D'autre part, les interférogrammes obtenus sont de très haute qualité (pas de bruit de speckle et donc pas de filtrage numérique nécessaire). Enfin, les temps d'enregistrement peuvent aller jusqu'à la nanoseconde.

Dans la suite nous présenterons les objectifs du projet européen PHIFE, la structure du projet et les résultats obtenus jusqu'à présent.

## II. Les objectifs de PHIFE

- Le projet PHIFE consiste en différentes étapes dont les principales sont :
- l'étude et le développement en laboratoire de systèmes de mesure holographiques utilisant des cristaux photoréfractifs, travaillant soit à 532 nm (cristaux BSO) soit à 1064 nm (cristaux AsGa, CdTe)
  - le développement d'une source laser de type YAG Q-switch double impulsion, taux de répétition de 25 Hz, délai et énergie variables entre impulsions.
  - le prototypage industriel d'un instrument incluant les deux segments ci-dessus
  - la démonstration du prototype dans des tests industriels aussi bien sur des objets opaques (mesure de déplacements en vibration ou sous choc) que sur des objets transparents (mesure des variations de densité de l'air en aérodynamique en soufflerie).

## III. Les résultats de laboratoire

Différentes techniques holographiques ont été étudiées par le CSL (à 532 nm), le LCFIO (à 1064 nm) avec l'appui d'ITO pour les systèmes d'acquisition rapides.

Premièrement, différentes configurations de cristaux ont été étudiées de manière comparée. Principalement on distingue deux phénomènes distincts et particuliers à deux configurations cristallines séparées. D'une part, nous avons le phénomène de couplage pour lequel les polarisations des faisceaux diffracté et transmis sont identiques. D'autre part, il y a l'anisotropie de diffraction pour lesquels les deux polarisations sont orthogonales entre elles. Pour observer l'interférence entre les deux, on doit alors placer un polariseur à la sortie du cristal.

Deuxièmement, une nouvelle géométrie d'enregistrement holographique (géométrie à 90°) a été introduite : elle consiste à faire entrer le faisceau référence par une face latérale du cristal<sup>4</sup>. Ceci a l'avantage de diminuer grandement le bruit de diffusion par des imperfections des faces du cristal et que l'on observe en géométrie classique, c-à-d pour un faisceau référence entrant par la même face que le faisceau objet.

Enfin, de nouvelles techniques de quantification du déplacement adaptées aux propriétés particulières des cristaux PR ont été développées. Ces techniques sont indispensables pour effectuer de la métrologie et doivent être adaptées au caractère impulsionnel du laser. Les deux techniques développées sont les suivantes.

### *a) Décalage de phase avec système à deux caméras :*

Le décalage de phase consiste à acquérir différents interférogrammes avec un saut de phase entre ceux-ci. Différents algorithmes existent en fonction du nombre d'images et du saut de phase induit artificiellement<sup>5</sup>.

En régime d'illumination continu, ces acquisitions sont séquentielles dans le temps, pour autant que le déplacement de l'objet soit stable durant la capture multiple. En régime impulsionnel, cette opération est impossible à effectuer et on doit avoir recours à différentes caméras observant le même champ et moyennant un décalage de phase entre les images.

Cette possibilité a déjà été étudiée précédemment par le Laboratoire Charles Fabry et était adaptée à la configuration cristalline de couplage. Un cube séparateur polarisant était positionné après le cristal PR et permettait l'observation de deux images de la même scène. Le caractère isotrope des polarisations après le cristal entraînait l'utilisation d'une lame à retard active (cellule de Pockels) qui circularisait la polarisation du faisceau référence lors de la

lecture holographique, ce qui amenait un décalage de phase de  $90^\circ$  entre les interférogrammes observés par les deux caméras.

Nous avons amélioré ce système en considérant la configuration cristalline d'anisotropie de diffraction. La figure 1 montre le schéma d'une caméra holographique utilisant un cristal de BSO (opération à 532 nm) et un système d'observation à deux caméras.

A la sortie du BSO, les polarisations diffractée et transmise sont orthogonales entre elles (anisotropie de diffraction), il suffit alors d'utiliser un cube séparateur non polarisant après le cristal et, les deux composantes étant présentes dans chaque bras après le cube, de déphaser une de celles-ci au moyen d'une lame quart d'onde correctement orientée dans un des bras.

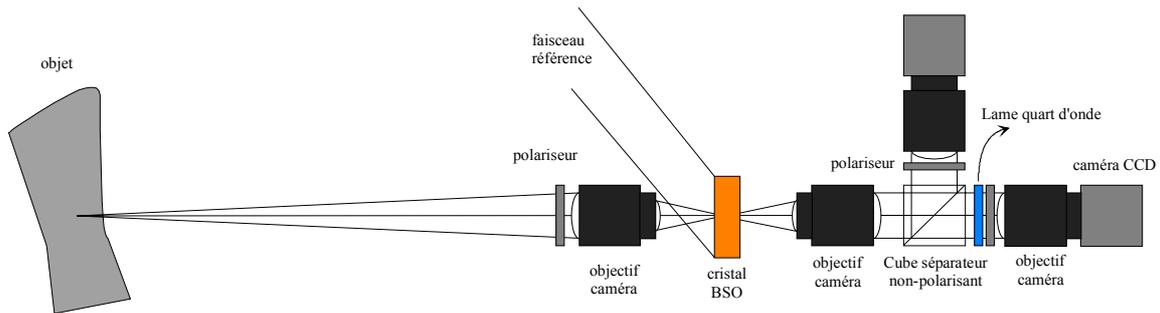


Figure 1. Schéma d'une caméra holographique avec système d'observation à 2 caméras et retard de phase (lame quart d'onde) dans un des bras pour décaler la phase.

Les figures 2 (a) et (b) montrent les images obtenues en régime continu par les deux caméras simultanément. On remarque bien le décalage de phase de  $90^\circ$  entre celles-ci. Moyennant l'acquisition préliminaire de l'intensité moyenne de l'image sans franges de déplacement, nous pouvons calculer la différence de phase due au déplacement (figure 2 (c)).

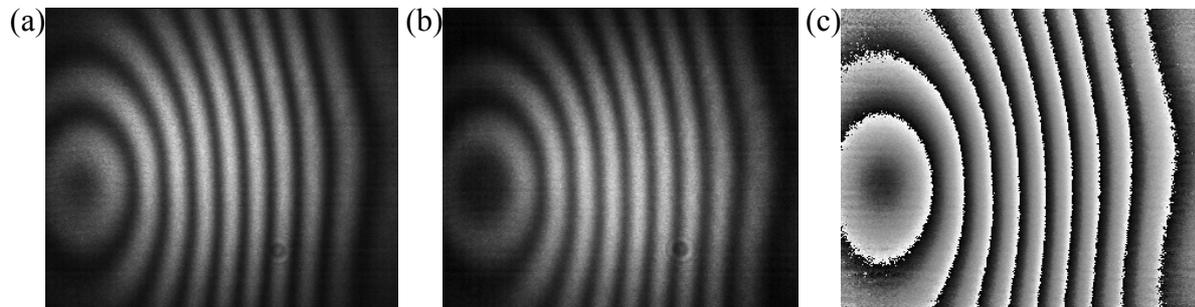


Figure 2. Méthode à décalage de phase : (a) et (b) interférogrammes obtenus par les deux caméras simultanément, (c) différence de phase (mod  $2\pi$ ) après calcul.

### b) Méthode à porteuse spatiale

Pour éviter l'utilisation de plusieurs caméras, des techniques basées sur l'utilisation d'une seule image existent aussi. La plus connue est celle qui consiste à introduire une porteuse spatiale dans les interférogrammes pour ensuite filtrer la différence de phase par transformée de Fourier<sup>5</sup>. La difficulté réside dans l'introduction d'une porteuse entre les deux impulsions lasers : il faudrait déplacer un élément optique en quelques microsecondes.

Une alternative élégante développée par le LCFIO est l'introduction passive d'une porteuse au moyen d'une lame biréfringente qui utilise les deux composantes orthogonales de polarisation après le cristal. Cette lame déphase les deux polarisations transversalement à la

direction du faisceau, ce qui induit un système de franges rectilignes dans une direction (figure 3(a)). Ce système de franges n'existe qu'en présence des faisceaux transmis et diffracté. Lorsque le diffracté est différent du transmis (objet déplacé/déformé), les franges rectilignes changent de direction localement ou globalement, et l'interfrange varie aussi (figure 3(b)). On obtient la différence de phase en appliquant la technique classique de filtrage de Fourier (figure 3(c)).

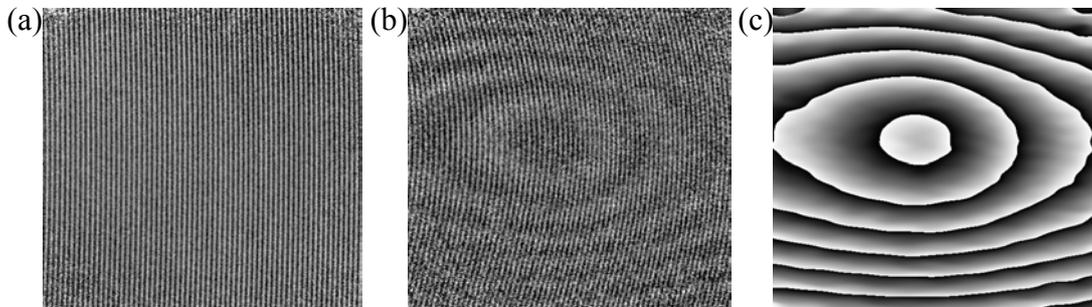


Figure 3. Méthode à porteuse spatiale : (a) franges porteuses seules, (b) franges porteuses incurvées à cause d'une déformation de l'objet, (c) différence de phase optique ( $\text{mod } 2\pi$ ) après filtrage de Fourier.

#### IV. Les résultats avec le prototype industriel

Un prototype industriel de démonstration a été construit. Il comprend le laser développé par Innolas et la tête holographique dessinée et fabriquée par Optrion sur base des concepts de CSL et LCFIO. Cette dernière est modulaire et s'accommode des deux longueurs d'onde délivrées par le laser. Certains éléments sont communs aux deux longueurs d'onde (le faisceau référence et sa ligne à retard), les éléments qui sont différents sont amovibles et interchangeables avec un minimum de manipulations et réajustements. Ces éléments sont les cristaux (BSO pour 532 nm et AsGa pour 1064 nm) et le système de séparation en deux bras dans l'imagerie à deux caméras (décalage de phase) qui est remplacé par la lame de calcite dans sa monture si l'on veut utiliser la technique à porteuse spatiale.

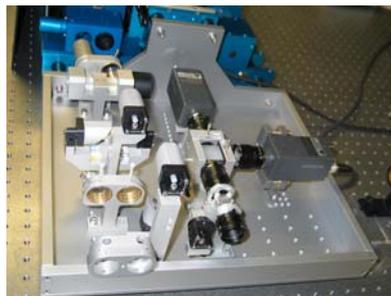


Figure 4. Photo du prototype industriel - version décalage de phase.

La figure 4 montre la tête holographique (à l'avant-plan) attachée à la structure du laser (à l'arrière-plan). Sur la gauche de la partie optique, on remarque les lignes verte et infrarouge parallèles avec leur sortie pour illuminer l'objet. A droite, nous avons les deux caméras et le cube séparateur polarisant.

Le principe de fonctionnement est le suivant : le laser 25 Hz double pulse tire en continu. La première impulsion enregistre l'hologramme de l'objet, tandis que la seconde quelques dizaines de microsecondes plus tard le relit (interférométrie holographique "temps réel"). La seconde paire d'impulsions 40 millisecondes plus tard permet de refaire la même chose, la

première impulsion de la paire 2 venant effacer l'hologramme de la paire 1. Pour éviter de la double exposition entre deux paires, nous utilisons un piézo attaché à un miroir du bras référence et qui incline celui-ci suffisamment pour que les hologrammes enregistrés par les paires successives n'interfèrent pas (grâce à la sélectivité angulaire du cristal). Ainsi nous sommes assurés d'avoir un système d'interférométrie holographique "temps réel" qui effectue des mesures à 25 Hz sans effet parasite de double exposition entre les paires de pulses.

Le système d'acquisition est équipé d'une mémoire d'images rapide qui permet l'acquisition simultanée sur les deux caméras. La mémoire interne permet de stocker 100 images à 25 Hz sur chacun des canaux. On peut ainsi réaliser des séquences de 4 secondes.

Nous avons entrepris une série de tests sur des cas d'étude classiques, nous en présentons succinctement deux ci-après.

Le premier concerne un circuit électronique excité par un shaker. Un balayage en fréquence fait apparaître les modes aux fréquences de résonance. L'intérêt du système impulsionnel dans le cas des vibrations, comparativement aux techniques plus classique telles le temps moyenné ou le temps réel stroboscopique, est qu'il est possible d'obtenir des interférogrammes même dans le cas des déplacements importants (millimétriques). Si nous avons trop de franges, il suffit de diminuer l'intervalle de temps entre les impulsions pour obtenir à nouveau moins de franges. Un autre avantage est la possibilité de faire des mesures d'amplitude et de phase au moyen d'une technique à impulsion multiple correctement synchronisée à la vibration<sup>3</sup>. La figure 5 montre quelques modes obtenus avec le circuit électronique. Nous avons ici utilisé le système à deux caméras et la ligne fondamentale du laser (1064 nm).



Figure 5. Modes de vibration d'un circuit électronique excité par shaker.

Le second exemple est celui de l'étude des chocs. Nous avons considéré une plaque en acier suspendue par deux coins (libre-libre). Un marteau vient frapper l'arrière de celle-ci. Le laser tirant en continu, on voit apparaître des modes différents à chaque image. La première image est obtenue juste avant le choc par le marteau. Dans cette expérience nous ne connaissons pas les intervalles de temps entre le moment où le marteau frappe la plaque et les impulsions de lecture et écriture. Dès lors cette apparition de modes est aléatoire. Ces résultats ne constituent en fait qu'une première démonstration du fonctionnement de la tête holographique. Dans la suite du projet, nous couplerons des outils annexes qui permettront d'effectuer une analyse de ce type de phénomène grâce à la connaissance des instants de tirs et de choc.

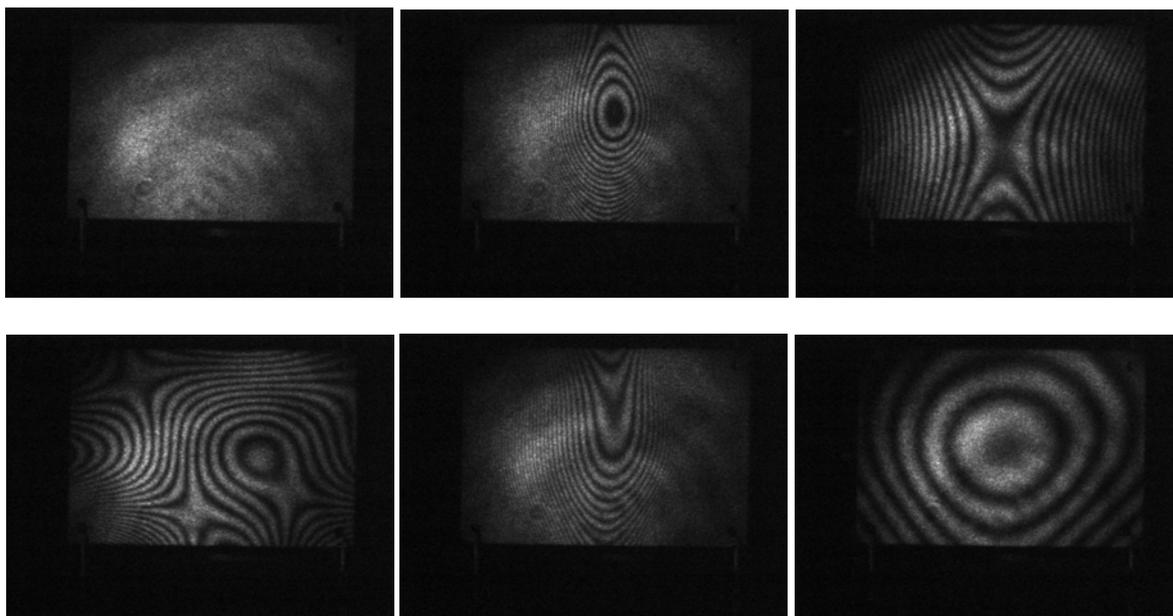


Figure 6. Quelques modes excités suite à un choc par un marteau sur une plaque d'acier suspendue. En haut à gauche, avant le choc par le marteau.

### Conclusion

Nous avons présenté les résultats obtenus jusqu'à présent dans le projet européen PHIFE qui vise au développement d'un instrument de mesure holographique à haute résolution basé sur des cristaux photoréfractifs et couplé à un laser double impulsion avec un taux de répétition de 25 Hz. Différentes techniques ont été mises au point et incorporées dans un prototype industriel modulaire. Ce dernier est en cours de test et les premiers résultats de ceux-ci ont été montrés. Il reste à faire l'intégration du segment logiciel qui permettra d'interpréter les résultats, en particulier la mesure de l'amplitude et la phase de vibration.

### Références

- 1) Marc P. Georges and Philippe 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., Vol 68, pp. 1073-1083 (1999)
- 2) Marc P. Georges, Véronique S. Scaufaire, Philippe C. Lemaire, "Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems", Appl. Phys. B 72, p. 761-765 (2001)
- 3) Marc Georges, Cédric Thizy, Philippe Lemaire, Gilles Pauliat, Gérard Roosen, "Mesure de vibrations par holographie dynamique multi-expositions", Actes du premier colloque francophone de la SFO : *Méthodes et techniques optiques pour l'industrie*, Biarritz, 21-24 Nov 2000, p25-30
- 4) Marc Georges, Gilles Pauliat, Evelin Weidner, Stéphanie Giet, Cédric Thizy, Véronique Scaufaire, Philippe Lemaire, Gérard Roosen, "Holographic interferometry with 90° crystal cut configuration", Trends in Optics and Photonics Series, Vol 87 on Photorefractive Effects, Materials and Devices, A.A. Sawchuk, ed., p. 511-516 (2003)
- 5) D. Robinson, G. Reid, eds., Interferogram analysis : digital fringe pattern measurement techniques, Institute of Physics, London (1993).
- 6) L. Labrunie, G. Pauliat, J-C. Launay, S. Leidenbach, G. Roosen, "Real-time double exposure holographic phase shifting interferometer using a photorefractive crystal", Opt. Comm. 140, pp. 261-317 (1997)