

Interférométrie holographique avec cristaux photoréfractifs en régime impulsionnel. Développements et résultats préliminaires.

Marc P. Georges^a, Philippe C. Lemaire^a, Gilles Pauliat^b, Gérald Roosen^b

^a Centre Spatial de Liège (CSL), Université de Liège, Parc Scientifique du Sart Tilman, 4031 ANGLEUR (LIEGE), Belgique, tél : ++32-4-367 66 68, fax : ++32-4-367 56 13, e-mail : mgeorges@ulg.ac.be

^b Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCF-IO), Unité associée au Centre National de la Recherche scientifique, Centre Scientifique d'Orsay, Bât. 503, BP 147, 91403 Orsay Cedex, tél : ++33-1-69358755, fax : ++33-1-69358700, email : gerald.roosen@iota.u-psud.fr

I. Introduction

Des caméras holographiques utilisant des cristaux photoréfractifs sillénites (BSO, BGO) comme support d'enregistrement sont présentées. Ces matériaux ont l'avantage d'être auto-développants *in situ* et indéfiniment réutilisables. Les cristaux utilisés ont été fabriqués par J-C Launay à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée (ICMCB) de l'Université de Bordeaux 1.

Récemment, CSL et LCF-IO ont présenté des prototypes de caméras holographiques transportables de ce type. La caméra de CSL (développée dans le cadre d'un projet EUCLID) utilise un laser continu (YAG pompé par diode, 532 nm, 500 mW) et est capable de mesurer des déplacements sur des objets de typiquement 50x50 cm². La caméra du LCF-IO (développée dans le cadre d'un projet BRITE-EURAM) peut travailler soit avec un laser continu ou un laser impulsionnel. Les travaux présentés concernent l'extension de tels dispositifs pour leur utilisation en régime impulsionnel avec des lasers YAG Q:switch doublés en fréquence. L'intérêt de ce régime est la possibilité de s'affranchir des perturbations environnementales à l'étape d'enregistrement. De plus, on peut envisager la métrologie de phénomènes rapides.

Nous présentons brièvement les systèmes existants dans la section II. A la section III, nous montrons quelques résultats préliminaires obtenus avec les deux systèmes et qui nous ont permis de définir une étude plus approfondie. La section IV est consacrée à l'étude menée actuellement et présente les derniers résultats. Dans la conclusion, nous évoquons enfin les perspectives futures.

II. Présentation des systèmes existants et motivation du travail

Les caméras holographiques photoréfractives développées au LCF-IO et au CSL font usage de la technique interférométrique du temps réel : un hologramme de l'objet est tout d'abord enregistré et, lors de l'étape de lecture, on observe la superposition du front d'onde restitué et du front d'onde provenant de l'objet et simplement transmis au travers du cristal. Les deux systèmes se distinguent cependant sur un point essentiel : la configuration cristalline. En effet, les cristaux de la famille des sillénites sont généralement taillés d'une manière particulière et selon l'orientation du cristal dans le montage, on peut faire apparaître deux propriétés généralement distinctes : l'anisotropie de diffraction (ou transfert de polarisation) et le couplage d'ondes (ou transfert d'énergie). La caméra de CSL fait usage du premier phénomène, la caméra du LCF-IO du second.

Dans le cas de l'anisotropie de diffraction, on place un polariseur à l'entrée du cristal et on oriente celui-ci de manière telle que le faisceau diffracté a une polarisation perpendiculaire à la polarisation du faisceau objet transmis. Les deux ondes sont donc séparées en polarisation et on observe leur interférence au travers d'un polariseur. L'avantage de l'anisotropie de diffraction est l'obtention d'interférogrammes de contrastes élevés puisque l'on peut égaliser les deux ondes interférant après le second polariseur. On peut montrer que l'efficacité de diffraction est maximisée lorsque le cristal est mince (typiquement 2,5 mm d'épaisseur pour des longueurs d'ondes vertes), ce qui est un avantage car de tels cristaux sont relativement aisés à obtenir avec une bonne qualité optique.

Dans le cas du couplage, les ondes en présence dans le cristal interagissent de sorte que l'énergie d'une des ondes peut être transférée vers l'autre à la sortie du cristal. Cela est un avantage lorsque l'intensité du faisceau objet est faible par exemple. Pour que ce couplage soit effectif, il faut cependant utiliser des cristaux relativement épais (1 à 2 cm) selon l'espèce et la longueur d'onde, ce qui est un inconvénient car de tels cristaux sont difficiles à produire. Par opposition à la configuration précédente, la diffraction est isotrope pour les épaisseurs de cristaux considérées.

II.1. Caméra holographique de CSL.

Ce système a déjà fait l'objet d'une présentation lors d'un précédent séminaire HOLO3 [1]. La figure 1 montre le schéma de cet instrument. Des détails quant à son développement sont donnés à la référence [2]. Sur base d'un laser continu d'une puissance de typiquement 400 mW, il permet d'observer des objets d'environ 50x50 cm², ceux-ci étant placés à une distance d'environ 1 mètre et recouverts d'une peinture blanche. Le temps de réponse de l'enregistrement holographique est de typiquement 8 à 10 secondes, ce temps étant déterminé par l'intensité totale des ondes au niveau du cristal. Il faut noter qu'avec des objets diffusants, cette intensité est généralement dominée par l'intensité du faisceau référence, soit typiquement 2 mW/cm² pour obtenir le temps mentionné ci-dessus. La caméra holographique fait usage de techniques de quantification de la phase telles le décalage de phase temporel [3] et la transformée de Fourier [4]. Les précisions de mesures atteintes sont de typiquement $\lambda/40$ (13 nm) sur les déplacements de l'objet. L'instrument a été employé dans de nombreux cas de figures : détection de défauts dans des structures composites (projet EUCLID-CEPA3-RTP3.1) [1], suivi de déformation sous contrainte thermique [4], mesure de modes de vibrations [5,6]. Toutes ces applications se sont faites sur base d'une lumière laser continue : lasers à Argon (514 nm) ou YAG (532 nm).

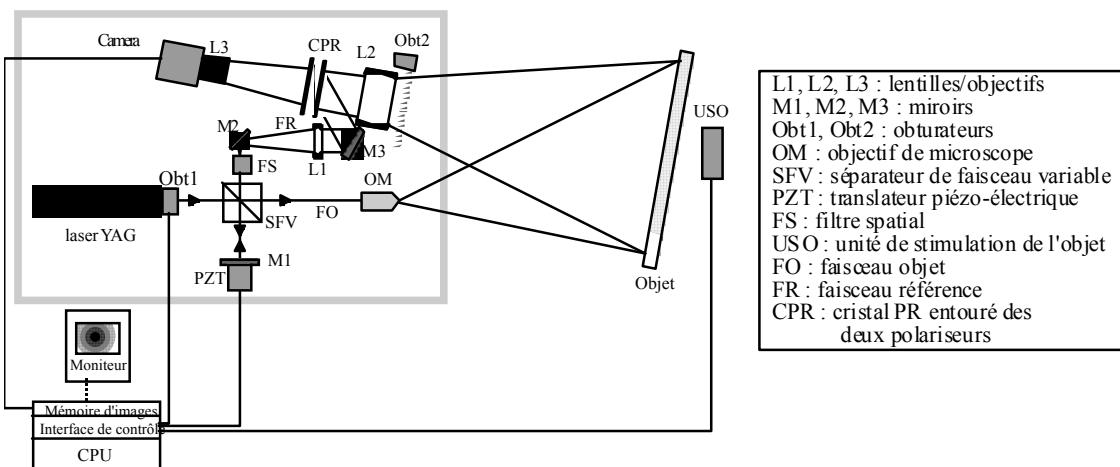


Figure 1.

II.2. Caméra holographique du LCF-IO.

Cet instrument a été développé dans le cadre du projet Brite-Euram BRE2-0364 dont l'objectif était la mesure de vibrations en régime impulsionnel sur base d'un laser à rubis. Ce dernier point introduisait une contrainte importante puisque les cristaux répondent mieux dans les longueurs d'onde bleues-vertes que rouges. Il a donc fallu faire développer (en l'occurrence par J-C Launay à l'ICMCH,) un cristal sillénite dont la réponse est améliorée pour le rubis (694 nm) grâce à un dopage au cuivre. Un schéma de l'instrument est montré à la figure 2. Des détails quant à son développement sont expliqués à la référence [7]. Une des grandes originalités du dispositif est l'utilisation d'une méthode de décalage de phase consistant en l'acquisition simultanée de deux interférogrammes décalés en phase par des caméras séparées. Lors de l'étape d'écriture, les faisceaux objet et référence ont une polarisation linéaire. Lors de la lecture, la polarisation du faisceau référence est circularisée tandis que celle du faisceau objet reste linéaire. Puisque l'on a isotropie de diffraction (configuration de couplage), la polarisation diffractée est circulaire et au travers d'un cube séparateur de polarisations après le cristal, on peut séparer l'image en deux composantes de polarisation perpendiculaires entre elles, soit déphasées de $\pi/2$. Cette méthode originale a été d'abord mise au point avec un faisceau ponctuel [8], puis calibrée sur un objet de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ à 514 nm [7]. Ensuite, une mesure de mode de vibration d'une aube de turbine a été effectuée avec un laser à rubis de 1 J/pulse [9], voir figure 3. Dans ce dernier cas, la qualité des interférogrammes est moins bonne qu'à 514 nm à cause de la réponse du cristal peu adaptée à cette longueur d'onde ainsi qu'au niveau de bruit provenant de la diffusion par le faisceau référence. Néanmoins, la précision obtenue est de typiquement $\lambda/15$ RMS ce qui est encore très acceptable pour les applications. L'interféromètre du LCF-IO est le premier exemple de caméra holographique photoréfractive destinée à des applications industrielles.

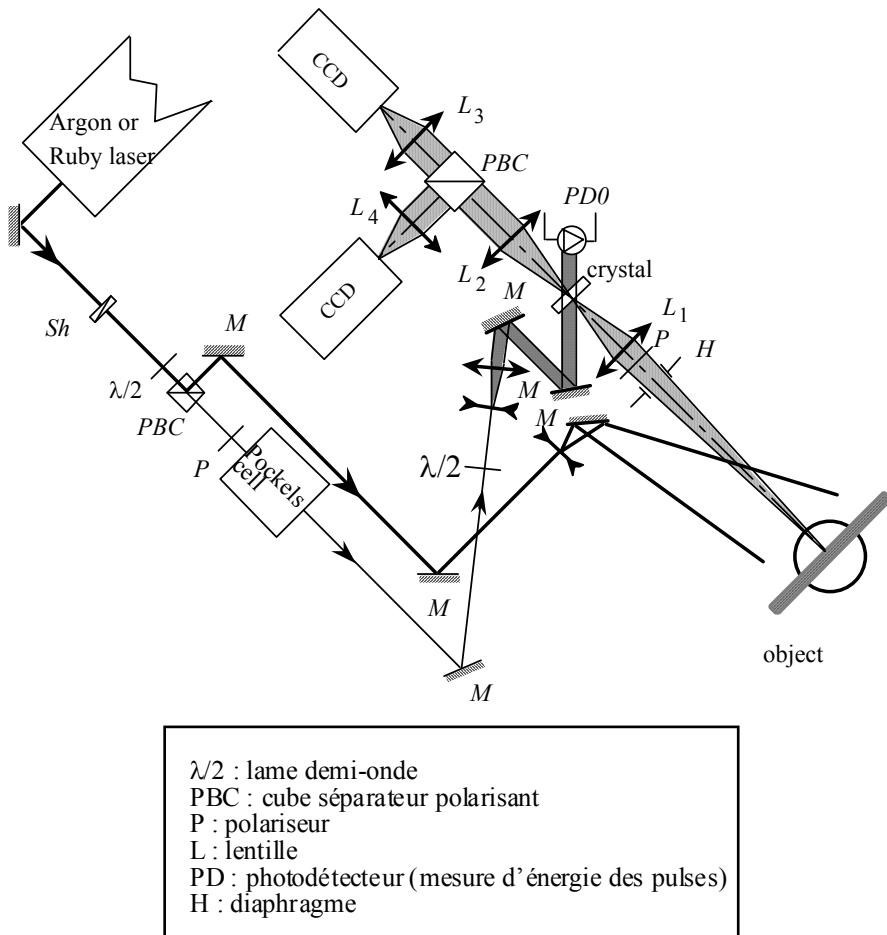


Figure 2.

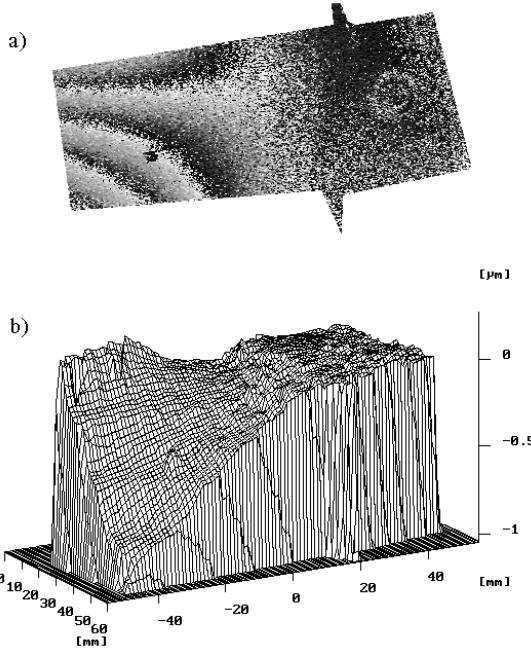


Figure 3. cfr référence [9]

La motivation du présent travail est la comparaison des deux systèmes utilisés avec un laser YAG impulsif naturellement le mieux adapté aux cristaux photoréfractifs. La philosophie adoptée par les deux groupes est le temps réel en deux impulsions : la première écrit l'hologramme, la deuxième le relit et observe l'objet simultanément.

La philosophie de ce travail est centrée sur la recherche de la configuration la plus adéquate au régime impulsif et l'apprentissage des contraintes de ce régime en regard des propriétés des cristaux photoréfractifs. En fonction des résultats obtenus ici, nous pourrons dans une étape ultérieure mieux orienter l'applicabilité de tels dispositifs à des applications concrètes de type industriel.

III. Expérience préliminaire

Une première expérience a été effectuée en collaboration avec HOLO3 qui a prêté ses installations et un laser impulsif YAG Q Switch donnant une énergie totale de 45 mJ par impulsion sur deux faisceaux séparés dans le laser après le doublement en fréquence. L'enregistrement sur photoréfractif permettant de d'amener l'essentiel de l'énergie par le faisceau référence, la plus grande part de l'énergie lui a été attribuée (30 mJ/impulsion à la sortie du laser). Cependant cela ne pas permettait d'enregistrer un hologramme à saturation sur base d'une seule impulsion lumineuse.

En effet, sur base d'expériences de caractérisation holographique, faites par LCF-IO et CSL notamment, la densité d'énergie incidente au cristal nécessaire pour y enregistrer un hologramme à saturation se situe entre 10 et 20 mJ/cm² dans le cas des cristaux BGO:Cu (BGO dopé au cuivre) utilisés par les deux systèmes ci-dessus. Dès lors, nous avons utilisé N impulsions successives (cadencées à 10 Hz), pour l'enregistrement. L'étape de visualisation étant faite avec l'impulsion N+1 après la stimulation de l'objet qui était faite sur les 100 ms séparant N et N+1. L'énergie d'éclairage de l'objet étant typiquement de 6 mJ, un objet de petite taille (5x5 cm²) a été utilisé. Dans ces conditions, on est proche des conditions énergétiques équivalentes rencontrées en continu sur un objet de 50x50 cm².

La figure 4 montre les interférogrammes de phase obtenus dans la configuration de couplage (montage LCF-IO) pour une rotation de l'objet-test et pour un nombre croissant d'impulsions d'écriture. Nous observons une amélioration de la qualité de l'enregistrement qui sature à partir de 4 impulsions. Ce résultat est en accord avec les prédictions concernant les énergies de saturation de l'enregistrement.

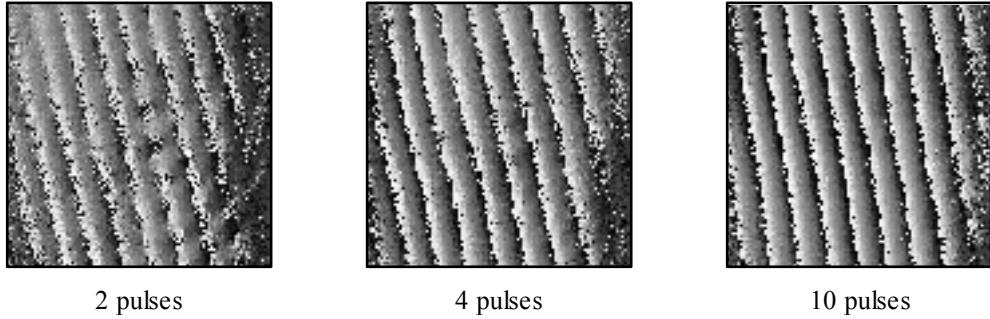


Figure 4.

La figure 5 montre le résultat équivalent obtenu dans la configuration d'anisotropie dans les mêmes conditions. A noter que l'on n'a pas le résultat en phase car il n'y a pas encore d'implémentation d'une méthode de quantification de phase équivalente dans cette configuration pour l'instant.

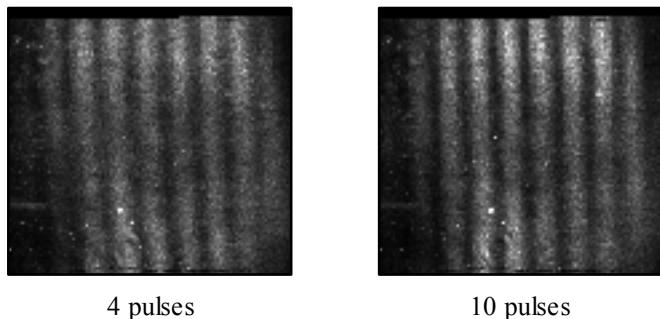


Figure 5.

Il a été observé lors de ces expériences, que les niveaux d'énergie entre les deux impulsions doivent être assez différents. En effet, il faut amener beaucoup d'énergie pour enregistrer l'hologramme à la première impulsion. Au second il faut décroître l'énergie pour ne pas saturer la caméra. A cet effet, une lame de densité optique est utilisée dans ce montage.

IV. Développements actuels

Le fil conducteur de l'étude actuelle consiste à analyser et optimiser les énergies des faisceaux durant les différentes étapes avec en vue une paramétrisation de l'énergie par impulsion en fonction du champ observé. Une première projection résultant des expériences antérieures indique une valeur de l'ordre du joule pour une surface de $50 \times 50 \text{ cm}^2$.

Comme nous venons d'en discuter ci-dessus, une expérience idéale d'interférométrie holographique impulsionale avec des cristaux photoréfractifs nécessite, d'une part, un laser de haute énergie pour amener l'énergie d'écriture en une seule impulsion et, d'autre part, un changement rapide du rapport des énergies à l'étape de lecture pour ne pas éblouir la caméra CCD. Deux solutions sont envisageables.

D'une part l'utilisation d'un laser à double cavité d'énergies adaptées. D'autre part l'emploi d'un laser avec

10e séminaire SFO/HOLO3 : Nouveaux moyens optiques pour l'industrie, Saint-Médard-en-Jalles, 18-19 Nov 1998

une énergie pulse à pulse constante, la distribution entre les faisceaux référence et objet et l'énergie totale étant gérée par des séparateurs variables changeant de configuration entre l'impulsion d'écriture et celle de lecture. Ce genre d'opérations peut se faire notamment par l'utilisation de modulateurs électro-optiques. La première solution est idéale car elle optimise le laser et permet de surcroît un délai variable entre les impulsions. A ce stade, et en fonction des lasers disponibles, nous avons opté pour la seconde alternative.

La figure suivante montre l'intégration de ce dispositif électro-optique dans la caméra holographique du CSL (cellules de pockels MEO1 et MEO2 et cubes séparateurs polarisants SFP1 et SFP2). Un système analogue est ajouté en amont de la caméra du LCF-IO.

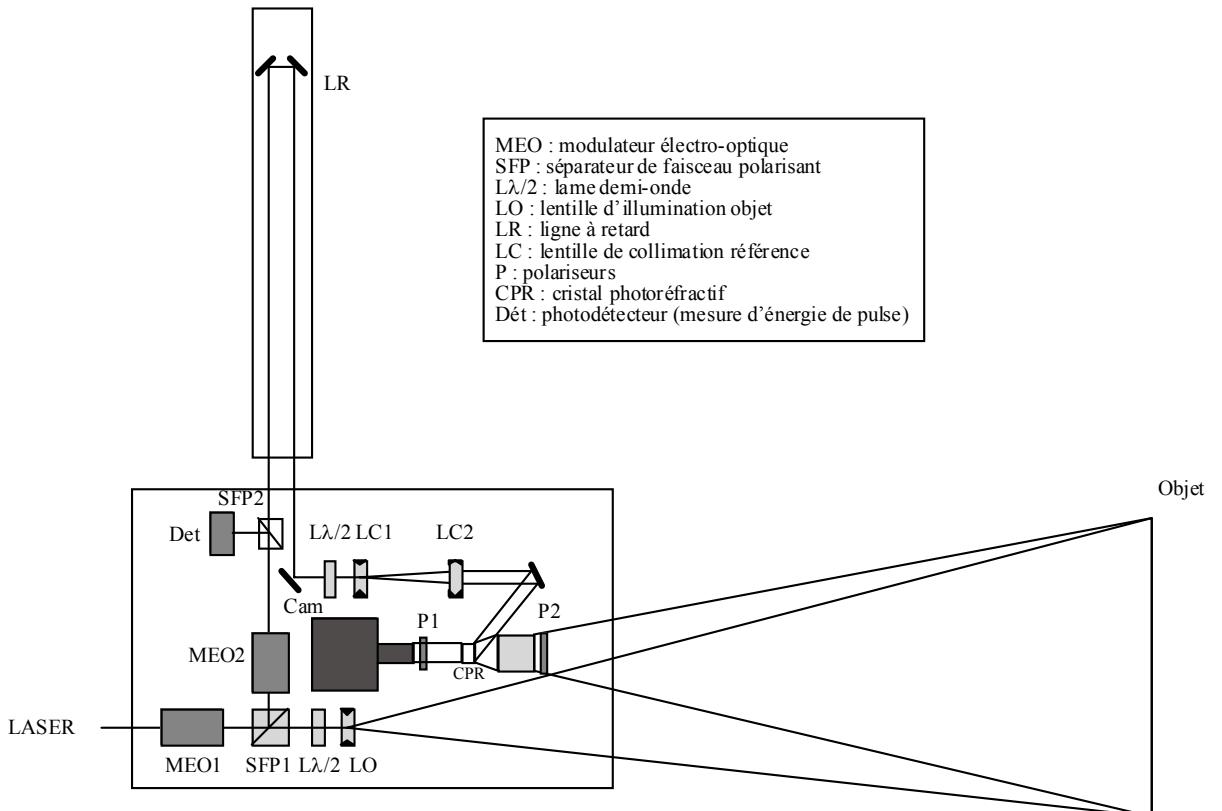
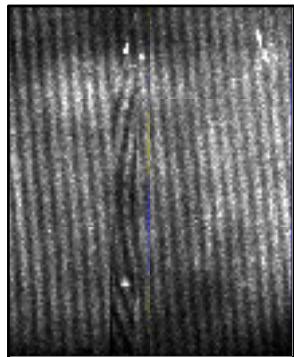


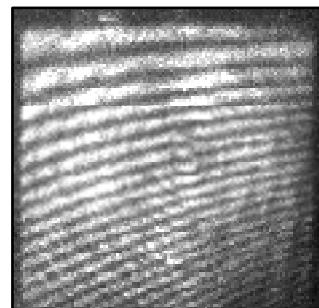
Figure 6.

A noter dans le schéma la présence d'une ligne à retard permettant d'adapter la longueur du chemin optique de la référence par rapport au chemin optique de l'objet, assurant ainsi un recouvrement temporel des impulsions au niveau du cristal.

La figure 7 montre les premiers résultats obtenus par chaque système sur un objet de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Dans le cas de la configuration de couplage, nous avons utilisé 200 mJ d'éclairement de l'objet et 20 mJ/cm^2 de référence lors de l'écriture, tandis que dans la configuration d'anisotropie, 240 mJ ont été utilisés pour l'éclairement objet et environ 10 mJ/cm^2 de référence. Ces chiffres sont des données préliminaires.



Couplage



Anisotropie

Figure 7.

V. Conclusion

Ces travaux montrent qu'il est possible d'utiliser les cristaux photoréfractifs pour l'interférométrie holographique en régime impulsionnel. La qualité des résultats est tout à fait suffisante pour des applications en contrôle non destructif et est en accord avec les expériences précédentes effectuées dans les deux instituts. Il se confirme que pour une surface typique de $50 \times 50 \text{ cm}^2$, l'énergie utile pour l'étape d'écriture est d'environ 1 J, tandis que durant l'étape de lecture, une énergie inférieure à 100 mJ est suffisante.

La suite des travaux a pour but d'affiner les réglages d'énergie dans les différents faisceaux. Ensuite, les aspects concernant la quantification de la phase et le champ de vue seront comparés pour les deux systèmes. Notamment, nous allons investiguer une technique de décalage de phase instantanée similaire à celle de l'instrument du LCF-IO mais qui soit adaptée à la configuration d'anisotropie de diffraction. Par ailleurs, il faut étudier la possibilité d'utiliser la transformée de Fourier qui est naturellement mieux adaptée au régime impulsionnel puisque ne nécessitant l'acquisition que d'un interférogramme. Néanmoins il faut mesurer l'impact de la structure d'éclairement généralement observée dans les faisceaux des lasers impulsionnels et qui peuvent générer des erreurs au niveau du calcul de la phase.

L'intérêt du support photoréfractif est sa possibilité d'enregistrer des hologrammes avec des intervalles temporels très courts et donc un stockage à plus haute cadence par rapport à des solutions purement électroniques puisque le signal d'interférence est obtenu par voie optique. L'utilisation de tels dispositifs pour l'analyse vibratoire sur un spectre de fréquences étendu est donc tout à fait possible de manière simple.

Références

- [1] Ph. Lemaire, M. Georges, "Les cristaux photoréfractifs de type sillénite comme support d'enregistrement en interférométrie holographique : originalités, potentialités et applications", 9ème colloque HOLO3/SFO sur *Les Applications Industrielles de l'Holographie et des Techniques Connexes*, Saint-Louis, France (Nov 1996)
- [2] Marc Georges, *Etude, développement et applications à l'interférométrie d'une caméra holographique dynamique basée sur des cristaux photoréfractifs du type sillénite*, Thèse de doctorat de l'Université de Liège, 30/03/98.

- [3] M.P. Georges, Ph.C. Lemaire, "Phase-shifting real-time holographic interferometry that uses bismuth silicon oxide crystals", *Appl. Opt.* **34** (32), pp. 7497-7506 (1995)
- [4] M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Holographic interferometry using photorefractive crystal : recent advances and applications", *Proc. SPIE* **2782** on *Optical Inspection and Micromeasurements I*, Besançon, France, pp.476-485 (1996)
- [5] M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Stroboscopic real-time holographic interferometry with photorefractive crystals applied to modal analysis", *Proc SPIE* **3098** on *Optical Inspection and Micromeasurements II*, Munich, FRG, pp. 241-250 (1997)
- [6] M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Real-time stroboscopic holographic interferometry using sillenite crystals for the quantitative analysis of vibrations", *Optics Comm.* **145**, pp. 249-257 (1998)
- [7] L. Labrunie, *Interféromètre holographique photoréfractif pour l'analyse en temps réel de vibrations*, Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 10/01/96
- [8] L. Labrunie, G. Pauliat, G. Roosen, J.C. Launay, "Simultaneous acquisition of $\pi/2$ phase-stepped interferograms with a photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystal : application to real-time double-pulse holography", *Opt. Lett.* **20** (15), pp. 1652-1654 (1995)
- [9] 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. 119-127 (1997)