



HAL
open science

Nouvelle technique de tomographie optique rapide pour une analyse résolue en temps de structures mécaniques

Pierre Morandi, Fabrice Bremand, Pascal Doumalin, Arnaud Germaneau,
Jean-Christophe Dupré

► To cite this version:

Pierre Morandi, Fabrice Bremand, Pascal Doumalin, Arnaud Germaneau, Jean-Christophe Dupré. Nouvelle technique de tomographie optique rapide pour une analyse résolue en temps de structures mécaniques. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440614

HAL Id: hal-03440614

<https://hal.science/hal-03440614v1>

Submitted on 22 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'un procédé de tomographie optique adapté à l'acquisition volumique rapide dans les structures mécaniques

P. MORANDI, F. BREMAND, P. DOUMALIN, A. GERMANEAU, J.C. DUPRE

*Axe "Photomechanics & Experimental Mechanics" de l'Institut Pprime
UPR 3346 SP2MI, Bd. Marie et Pierre Curie, téléport 2, BP 30179
86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France*

Résumé :

Nous présentons ici un nouveau procédé de tomographie optique adapté à l'acquisition volumique rapide en mécanique des solides. Cette méthode, basée sur le principe du découpage optique, utilise un feuillet laser en rotation couplée à un système d'acquisition 2D. Nous décrivons le principe de la méthode, le montage expérimental ainsi qu'un essai de déplacement de solide rigide. La qualité des volumes reconstruits est discutée qualitativement et les déplacements mesurés par corrélation d'images volumiques sont comparés à ceux obtenus via la méthode de tomographie optique classique en termes d'erreur moyenne et d'écart-type.

Abstract :

In this article, we present a new optical tomography process adapted for fast volume acquisition of mechanical structures. This method is based on the optical slicing principle and uses a rotating plane laser beam coupled with a 2D acquisition device. We present the principle of the method, the experimental setup and also a displacement test of a rigid specimen. The quality of reconstructed volumes is qualitatively discussed and measured displacements obtained by DVC (Digital Volume Correlation) are compared to those obtained using the classical optical tomography in terms of mean error and standard deviation.

Mots clefs: tomographie optique, acquisition volumique rapide, feuillet laser en rotation

1 Introduction

L'étude résolue en temps du comportement mécanique tridimensionnel interne d'une structure est requise dans certaines situations notamment celle d'une pièce soumise à un chargement variable au cours du temps. Afin d'obtenir une cartographie volumique des déformations, on distingue plusieurs étapes : l'acquisition des données, la reconstruction des volumes, et enfin la détermination des déformations réalisée soit par corrélation d'images volumiques (DVC : Digital Volume Correlation) [1, 2, 3] soit par suivi de marqueurs [4, 5, 6]. Les deux principales techniques d'acquisition volumique utilisées en mécanique des solides sont la Tomographie rayons X [1] et la Tomographie optique par balayage (OST: Optical Scanning Tomography) [2]. Le temps nécessaire pour acquérir un volume par ces deux techniques est de plusieurs dizaines de minutes, ce qui limite les études volumiques de ce domaine à des cas statiques [1, 8]. Dans le domaine de la mécanique des fluides, des techniques d'acquisition volumique rapides ont été développées notamment la 3D-PTV [5] ainsi que la Tomo-PIV [5]. La résolution spatiale [5] lors de l'acquisition et la qualité des volumes reconstruits permettent d'étudier le comportement des fluides mais sont insuffisantes pour des investigations au sein des structures solides notamment à cause des artefacts de reconstruction [5].

Nous présentons une nouvelle technique de tomographie par découpage optique utilisant un feuillet laser en rotation. Baptisée ORST (Optical Rotating Scanning Tomography) elle est adaptée à l'acquisition volumique rapide d'un matériau transparent diffusant. Après avoir décrit le principe de la méthode, nous expliquons le montage expérimental, la reconstruction des volumes ainsi que les essais réalisés. Pour finir nous discutons la qualité des volumes reconstruits ainsi que les résultats des mesures de déplacements (réalisés par DVC) d'un solide rigide.

2 Principe de la méthode

La méthode ORST est un procédé d'acquisition volumique qui utilise le principe de découpage optique mis en œuvre aussi bien dans le domaine de la mécanique des solides par la technique OST [2, 9] que dans le domaine de la mécanique des fluides [10]. Il consiste à éclairer une pièce solide transparente à l'aide d'un feuillet de lumière visible illuminant localement une tranche de cette pièce. Cette dernière est constituée de particules incluses dans une résine transparente permettant la diffusion de la lumière. Cette coupe visible de la pièce est alors enregistrée grâce à une caméra CCD.

Le procédé d'acquisition de la méthode ORST repose sur la mise en rotation du feuillet lumineux autour de son axe optique permettant d'enregistrer une série de coupes (non parallèles) de l'objet solide (figure 1) avec un pas angulaire constant. La continuité du mouvement de rotation permet d'enregistrer des volumes successifs en continu par rapport à la méthode OST qui utilise un feuillet en translation aller-retour [2] (problèmes d'inertie et de vibrations dus au changement de sens). Les images sont ensuite utilisées dans une phase de reconstruction des volumes durant laquelle les paramètres du système de scan sont requis notamment l'équation d'un feuillet laser initial ainsi que la position de son axe de rotation \mathbf{T} (figure 2) dans un repère objet défini.

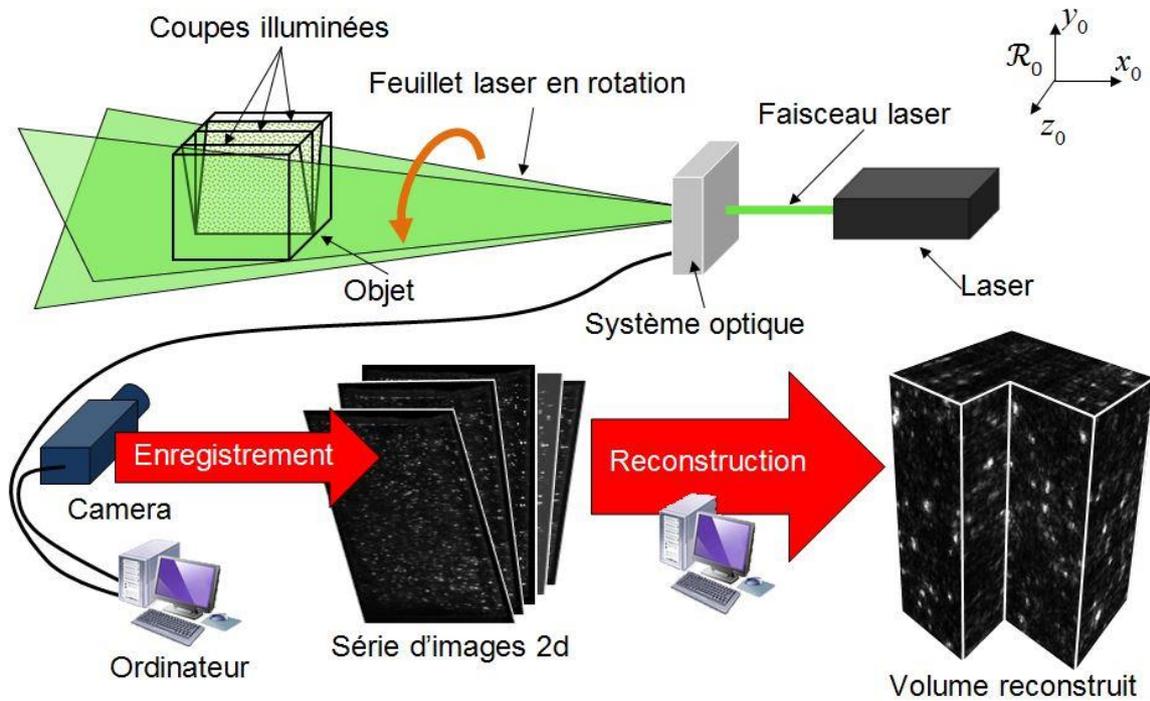


FIG. 1 – Principe de fonctionnement de la méthode ORST.

Pour déterminer ces paramètres, une procédure de calibration est nécessaire. L'axe de rotation \mathbf{T} du feuillet a une orientation proche de celle de x_0 , néanmoins en pratique il est nécessaire de le définir par un point $A(A_x, A_y, A_z)$ ainsi qu'un vecteur $\vec{T}(T_x, T_y, T_z)$ (figure 2) que nous déterminons au cours de cette phase. Nous définissons les relations entre les coordonnées d'un pixel $P(P_x, P_y)$ dans le repère caméra $\mathcal{R}_C(O_C, x_C, y_C)$ appartenant à l'image d'une coupe éclairée par un feuillet laser d'angle θ , les coordonnées d'un voxel $V(V_x, V_y, V_z)$ correspondant dans le repère objet $\mathcal{R}_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$ et le grandissement γ entre \mathcal{R}_C et \mathcal{R}_0 tels que :

$$V_x = \gamma P_x \quad (1)$$

$$V_y = \gamma P_y \quad (2)$$

$$V_z(\theta) = \psi_1(\theta)(V_x - A_x) + \psi_2(\theta)(V_y - A_y) + \psi_3(\theta) + A_z \quad (3)$$

Les paramètres $\psi_1(\theta)$, $\psi_2(\theta)$ et $\psi_3(\theta)$ sont les coefficients de l'équation (dans \mathcal{R}_0) d'un feuillet laser orienté d'un angle θ par rapport au feuillet laser initial. Ces coefficients utilisent les coordonnées du vecteur \vec{T} ainsi que les paramètres $\psi_1(0)$, $\psi_2(0)$ et $\psi_3(0)$ de l'équation du feuillet initial déterminés au cours de la procédure de calibration.

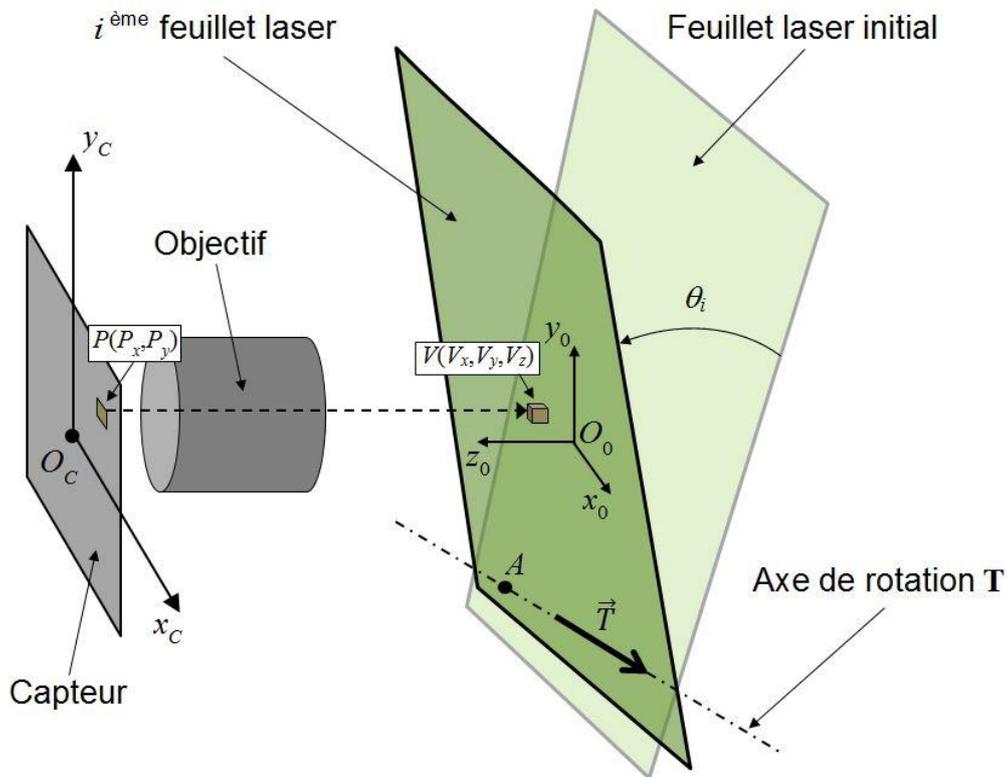


FIG. 2 – Principe géométrique de la méthode.

3 Mise en œuvre expérimentale

Les travaux présentés ici portent sur la faisabilité de mise en œuvre d'un tel procédé d'acquisition ainsi que sur l'étude de ses performances en termes de qualité de reconstruction et d'erreur de mesure sur un essai de déplacement subvoxel analysé par la méthode de corrélation volumique (DVC). C'est pourquoi nous avons mis en place un montage expérimental capable de produire et de mettre en rotation un feuillet laser avec un faible incrément angulaire ($<10^{-3}$ rad). Pour cela un système optique composé de 2 lentilles sphériques et d'une lentille cylindrique permet de générer un feuillet laser. La lentille cylindrique est fixée au centre d'un disque en aluminium de 200 mm de diamètre dont l'axe de rotation est confondu avec l'axe optique (figure 3). Sa circonférence est en contact avec une platine de translation micrométrique (figure 3) pilotée par un ordinateur permettant de générer un mouvement de rotation. Ainsi la mise en rotation de la lentille cylindrique (autour de son axe optique), positionnée en sortie du système optique, induit directement la rotation du feuillet laser avec une résolution angulaire de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4}$ radians. Ce système a été validé par suivi de marqueurs [4] pour garantir l'absence de glissement entre le disque et la platine et ainsi la régularité de position angulaire du feuillet laser au fil des scans successifs.

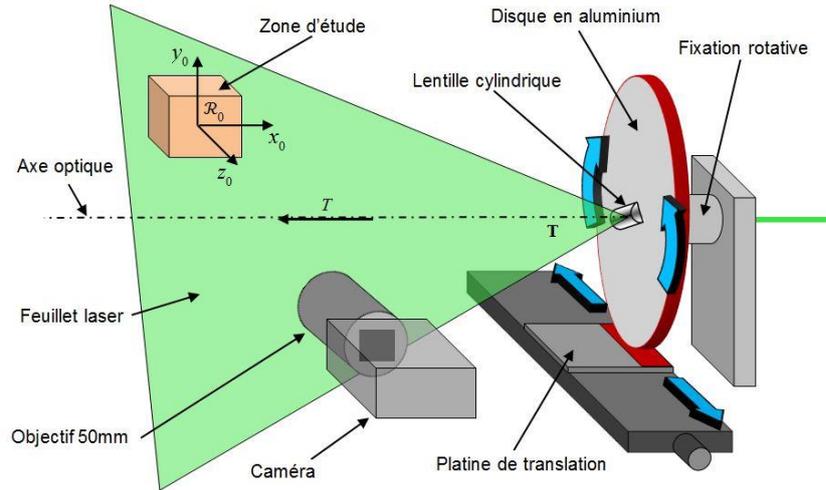


FIG. 3 – Montage expérimental du procédé d'acquisition ORST.

4 Reconstruction des volumes

À l'issue du scan d'un état mécanique d'une pièce, N images 2D sont enregistrées. Elles contiennent les informations lumineuses caractérisant la composition locale des N coupes de l'objet sous forme de niveaux de gris. Un angle θ_i ($1 \leq i \leq N$) est associé à chaque image, il correspond à l'angle du $i^{\text{ème}}$ feuillet laser par rapport au premier feuillet du scan ($\theta_i = 0$) appelé feuillet initial (figure 2). La reconstruction consiste à déterminer le pixel $P(P_x, P_y)$ ainsi que son image contenant la valeur du niveau de gris $g(V_x, V_y, V_z)$ à affecter à un voxel $V(V_x, V_y, V_z)$ sur une grille orthogonale régulière. En utilisant les relations (1) et (2) la détermination des coordonnées P_x et P_y du pixel est directe. Pour connaître l'image contenant P , nous devons calculer l'angle θ_i en utilisant la relation (3), mais son caractère non-linéaire impose une résolution via une méthode de minimisation (Newton-Raphson). Nous obtenons ainsi en pratique un angle calculé θ tel que :

$$\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1} \quad (4)$$

Le niveau de gris $g(V_x, V_y, V_z)$ associé à un voxel $V(V_x, V_y, V_z)$ est alors calculé par interpolation linéaire entre les niveaux de gris extraits des images i et $i+1$ par la relation suivante:

$$g(V_x, V_y, V_z) = \frac{g(V_x, V_y, V_z(\theta_{i+1})) - g(V_x, V_y, V_z(\theta_i))}{V_z(\theta_{i+1}) - V_z(\theta_i)} (V_z(\theta) - V_z(\theta_i)) + g(V_x, V_y, V_z(\theta_i)) \quad (5)$$

5 Essais et résultats

Pour évaluer les performances du procédé d'acquisition ORST, des essais de déplacement subvoxel d'un solide rigide ont été réalisés. Ils consistent à traduire une pièce de géométrie connue avec un incrément égal à $1/10^{\text{ème}}$ de voxel, puis à scanner son volume entre chaque déplacement. En considérant deux états initiaux (déplacement nul) ainsi qu'un déplacement maximum appliqué égal à 1 voxel, 12 volumes sont acquis pour une direction de déplacement donnée. À l'aide de platines de translation micrométriques manuelles, trois directions de déplacement sont étudiées séparément selon les axes du repère objet x_0 , y_0 , et z_0 . En procédant ainsi, nous pouvons étudier les erreurs de déplacements calculées par la méthode de corrélation volumique dans les trois directions. Nous avons réalisé les scans, avec une résolution spatiale de $80\mu\text{m}/\text{voxel}$, sur une éprouvette parallélépipédique de dimensions $35 \times 42 \times 24 \text{ mm}^3$ composée de résine époxy et de particules de polyamide incluses. Des volumes de $150 \times 150 \times 150 \text{ voxels}^3$ ont été reconstruits.

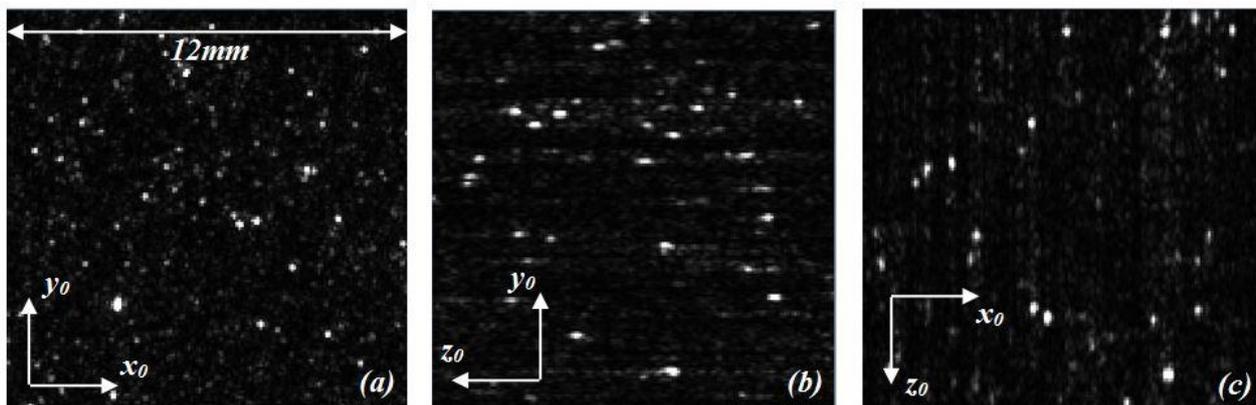


FIG. 4 – Coupes d'un volume reconstruit de $150 \times 150 \times 150$ voxels³, plans x_0y_0 (a), y_0z_0 (b), x_0z_0 (c).

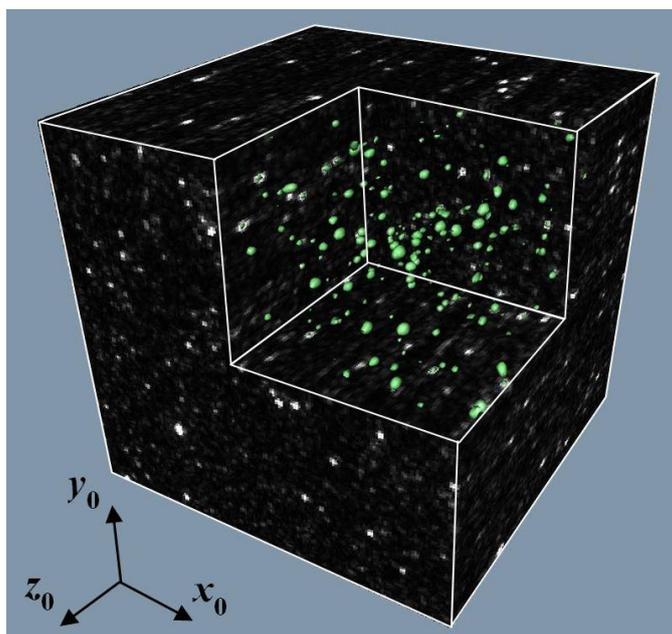


FIG. 5 – Volume reconstruit de $150 \times 150 \times 150$ voxels³ : représentation en niveau de gris et extraction des particules par seuillage sur un huitième du volume.

Visuellement nous pouvons constater que les volumes sont reconstruits sans artefact ou distorsion notable (figures 4 & 5) avec une répartition des niveaux de gris représentant correctement la répartition aléatoire interne des particules de polyamide. En examinant les trois coupes dans les plans principaux du repère objet (figure 4), nous observons un allongement des particules dans la direction z_0 . Ce phénomène de « traînée » est dû à l'épaisseur du feuillet laser et a été observé dans le cas de la méthode OST [2]. Les volumes ont ensuite été post-traités par DVC avec une taille de fenêtre de corrélation de 31^3 voxels et un pas de maillage de 10 voxels. Le graphique présenté (figure 6) montre les résultats obtenus par DVC permettant d'évaluer quantitativement les performances de la méthode ORST en termes d'erreur de mesure. Les amplitudes allant de -0.04 à 0.07 voxels sont relativement faibles et correspondent à celles observées dans le cas de la méthode OST [2].

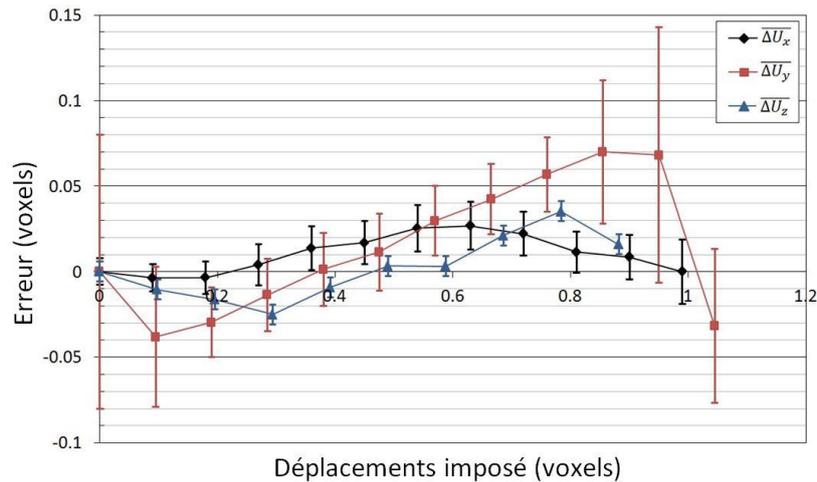


FIG. 6 – Erreurs de déplacements mesurés par DVC selon les directions x_0 , y_0 et z_0 .

6 Conclusion

La méthode ORST, basée sur un principe d'acquisition par découpage optique similaire à la méthode OST, propose une technique de scan innovante utilisant un feuillet laser en rotation. Celle-ci permet d'acquérir des volumes successifs avec un mouvement de balayage continu réduisant ainsi les problèmes d'inertie et de vibrations engendrés par un mécanisme de translation aller-retour du feuillet laser (OST). De la même manière que ceux obtenus par OST [2, 8] ou tomographie rayons X [1], la qualité des volumes reconstruits permet leur utilisation par la méthode de corrélation volumique pour l'établissement des champs de déplacements et de déformations. De plus, nous avons montré que cette technique n'introduit pas d'artefact de reconstruction significatif autre que l'allongement des particules dans la direction z_0 . Les erreurs de mesure de déplacement obtenues via DVC sont faibles et du même ordre de grandeur que ceux obtenus via OST ou tomographie rayons X [8]. Grâce à l'utilisation d'une caméra rapide, cette technique est capable d'effectuer des acquisitions volumiques résolues en temps sur des structures solides transparentes avec un système simple à mettre en œuvre.

Références

- [1] B.K. Bay, T.S. Smith, D.P. Fyhrie, M. Saad, Digital Volume Correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography, *Exp. Mech.*, 39, 217–226, 1999
- [2] A. Germaneau, P. Doumalin, J.C. Dupré, 3D Strain Field Measurement by Correlation of Volume Images Using Scattered Light: Recording of Images and Choice of Marks, *Strain*, 43, 207–218, 2007
- [3] G.E. Elsinga, B. Wieneke, F. Scarano, B.W. Van Oudheusden, Assessment of Tomo-PIV for three-dimensional flows, 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005
- [4] N. Bretagne, V. Valle, J.C. Dupré, Development of the marks tracking technique for strain field and volume variations measurements, *NDT&E International*, 38, 290–298, 2005
- [5] H.G. Maas, T. Putze, P. Westfeld, Recent Developments in 3D-PTV and Tomo-PIV, *NNFM*, 106, 53-62, 2009
- [6] K. Haldrup, S.F. Nielsen, F. Beckmann, J.A. Wert, Inhomogeneous plastic flow investigated by X-ray absorption micro-tomography of an aluminum alloy containing marker particles, *J Microsc.*, 222, 28–35, 2006
- [7] A. Germaneau, F. Peyruseigt, S. Mistou, O. Dalverny, P. Doumalin, J.C. Dupré, Verification of a spherical plain bearing finite-element model using scattered light photoelasticity tests, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 222, 647-656, 2008
- [8] A. Germaneau, Développement de techniques de mesure dans le volume : photoélasticimétrie 3D par découpage optique et corrélation volumique par tomographie optique et rayons X. Application à l'étude des effets mécaniques 3D dans les structures et les biomatériaux, Thèse de doctorat (2007)
- [9] C.H. Brüker, Digital particle image velocimetry (DPIV) in a scanning light-sheet: 3D starting flow around a short cylinder, *Exp. Fluids*, 19, 255-263, 1995