



HAL
open science

La corrélation d'images numériques pour le suivi de l'endommagement des optiques du Laser MégaJoule

Guillaume Hallo, Chloé Lacombe, Jérôme Néauport, François Hild

► To cite this version:

Guillaume Hallo, Chloé Lacombe, Jérôme Néauport, François Hild. La corrélation d'images numériques pour le suivi de l'endommagement des optiques du Laser MégaJoule. CFM 2022 - 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280158

HAL Id: hal-04280158

<https://hal.science/hal-04280158>

Submitted on 10 Nov 2023

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.

La corrélation d'images pour le suivi de l'endommagement des optiques du Laser MégaJoule

G. HALLO^{a, b}, C. LACOMBE^a, J. NEAUPORT^a, F. HILD^b

a. CEA, CESTA, F-33116, Le Barp, France - guillaume.hallo@cea.fr

b. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France - francois.hild@ens-paris-saclay.fr

Résumé :

Les installations laser de haute énergie dédiées aux expériences de fusion, comme le Laser MegaJoule (LMJ) ou la National Ignition Facility (NIF), sont limitées par l'endommagement laser de leurs dernières optiques. Une détection précise et précoce de la croissance des dommages est requise pour exploiter efficacement de telles installations. La résolution des images étant de l'ordre de grandeur de la taille des dommages à suivre, une mesure de diamètre n'est pas suffisante pour atteindre les objectifs de quantification de leur croissance. Récemment, il a été montré que le résidu de corrélation peut être utilisé pour contrôler l'endommagement laser. Les performances de deux indicateurs (résidu et diamètre) concernant la détection de l'amorçage et de la croissance des dommages laser sont comparées à haute et basse résolutions d'images sur un banc d'endommagement laser hautement instrumenté. Les résultats montrent que le résidu de corrélation est plus efficace pour détecter la croissance des dommages à une résolution inférieure au pixel que la mesure du diamètre à une résolution fixée. Le résidu de corrélation peut alors être considéré comme un indicateur efficace pour la surveillance des dommages laser avec une résolution inférieure au pixel.

Abstract :

High energy laser facilities designed for fusion experiments, such as Laser MegaJoule or National Ignition Facility, are limited by laser-induced damage on their final optics. Accurate and early detection of damage growth is required for successful operations of such facilities. Since the image resolution is about the size of damage sites to monitor, diameter measurement is not sufficient to meet the objectives of damage growth quantification. Recently, it was shown that correlation residual could be used to monitor laser-induced damage. The performance of both indicator (residual and diameter) are compared at high and low images resolutions using a highly instrumented laser damage setup. The results prove that correlation residuals are more efficient to detect sub-pixel laser damage growth than diameter measurements at a given resolution. The correlation residual is therefore a powerful indicator for monitoring laser-induced damage at sub-pixel scale.

Mots clefs : Corrélation d'Images Numériques (CIN), Endommagement, Laser MégaJoule, Résolution sous-pixelle

1 Introduction

Les installations laser de haute énergie comme la *National Ignition Facility* (NIF), le *ShenGuand-IV* (SG-IV) et le Laser MegaJoule (LMJ) ont pour but d'atteindre la fusion par confinement inertiel [1, 2, 3]. Une centaine de faisceaux laser ultraviolet multi-kilojoules pour une durée d'impulsion de quelques nanosecondes est utilisée. Ces conditions laser extrêmes induisent de l'endommagement des composants optiques en silice [4]. Un dommage amorcé croît après chaque tir dès que l'énergie laser est supérieure au seuil de croissance, qui est souvent atteint sur des installations laser destinées à la fusion [5]. Les performances de telles installations sont alors réduites par l'endommagement des dernières optiques [6]. Pour partiellement limiter cette difficulté, deux méthodes complémentaires ont été développées : la "réparation" des optiques par laser CO₂ et la diminution locale de la fluence des faisceaux laser [7, 8, 9]. Cependant, seuls les dommages plus petits que 750 µm peuvent être réparés et cette réparation nécessite d'enlever les optiques de l'installation. L'énergie du faisceau peut être réduite localement pour limiter la croissance des dommages critiques et ainsi contrôler le nombre de changement d'optiques. Il est donc nécessaire de détecter les sites endommagés et de quantifier leur croissance avant qu'ils n'atteignent la moitié de la limite de réparation (≈ 300 µm en diamètre).

Des images des dernières optiques sont acquises après chaque tir laser pour évaluer l'état d'endommagement des optiques en utilisant des systèmes d'imagerie similaires au NIF, SG-IV et LMJ [10, 11, 12]. Les optiques sont illuminées par leur tranche. Cette lumière éclaire les dommages qui diffusent la lumière. Une partie de cette lumière diffusée est collectée par le système d'imagerie à une distance de 8 m. La résolution des images (≈ 100 µm/pixel) n'est pas suffisante pour mesurer précisément le diamètre des dommages inférieurs à 300 µm. Cette faible précision sur la mesure du diamètre n'est pas compatible avec la quantification de la croissance des dommages requise pour une réparation efficace. Il a été proposé de s'appuyer sur les niveaux de gris mesurés pour estimer avec une meilleure précision la dimension des dommages [13]. Cependant, des perturbations comme des petits déplacements et des variations de niveaux de gris entre les images rendent l'utilisation des niveaux de gris peu précise sans correction préalable. Il a été proposé d'utiliser des techniques de Corrélation d'Images Numériques (CIN) pour recalibrer spatialement les images avec une résolution inférieure au pixel ainsi qu'une correction de brillance/contraste pour s'affranchir des variations de niveaux de gris à basses fréquences spatiales [14]. Ces corrections rendent possible la comparaison des variations de niveaux de gris de chaque pixel d'une image à l'autre. Le résidu de corrélation devient alors une fonction de l'endommagement et du bruit d'acquisition uniquement.

Le but de cette étude est de démontrer l'efficacité du résidu de corrélation en tant qu'indicateur d'endommagement que ce soit en termes d'amorçage ou de croissance. Pour cela, un banc d'endommagement laser hautement instrumenté a été utilisé pour acquérir des images à haute résolution spatiale (*i.e.*, 6.5 µm/pixel) d'une séquence d'endommagement d'un échantillon de silice. Les images à haute résolution ont été sous échantillonnées afin d'obtenir des images dont la résolution est proche de celle des images acquises au LMJ ou au NIF (*i.e.*, 100 µm/pixel). Le banc d'endommagement laser, appelé Moyen d'Endommagement Laser et Banc d'Analyse (MELBA), permet de reproduire les conditions de tirs laser LMJ avec un faisceau de 7 mm de diamètre. Le montage expérimental utilisé est décrit en partie 2. Les corrections appliquées aux images sont présentées en partie 3. Les performances du résidu de corrélation sont comparées à celle de la mesure du diamètre pour l'amorçage (partie 4.1) puis pour la croissance (partie 4.2).

2 Montage expérimental

Sur l'installation du Laser MegaJoule, les images des dernières optiques sont acquises par une caméra du Module Diagnostic Centre Chambre (MDCC) après chaque passage du faisceau laser. Le système d'éclairage est composé de 2 DELs vertes placées près d'une des tranches du composant optique. La lumière illumine la face endommagée du composant et les dommages diffusent la lumière. Une partie de cette lumière est collectée par le MDCC dont l'objectif crée une image de la face endommagée sur un capteur CCD. Les composants observés sont des blocs de silice de 40 cm × 40 cm pour 34 mm d'épaisseur. La configuration d'acquisition du MDCC est présentée en Figure 1(a). Une séquence est décomposée en 3 parties :

- Un faisceau laser ultraviolet nanoseconde carré de 35 cm de côté illumine le composant optique avec des fluences variant de 1 J cm^{-2} à 8 J cm^{-2} . A ces niveaux, l'amorçage et la croissance des dommages peuvent se produire [5].
- Le MDCC est placé au centre de la chambre d'expérience et orienté vers le composant à observer. Le système d'éclairage est allumé. Les dommages laser sont alors visibles. Une image de la face endommagée est acquise à une résolution spatiale de $100 \mu\text{m}/\text{pixel}$.
- Le système d'éclairage est éteint. Le MDCC est retiré de la chambre d'expérience pour laisser place au tir laser suivant.

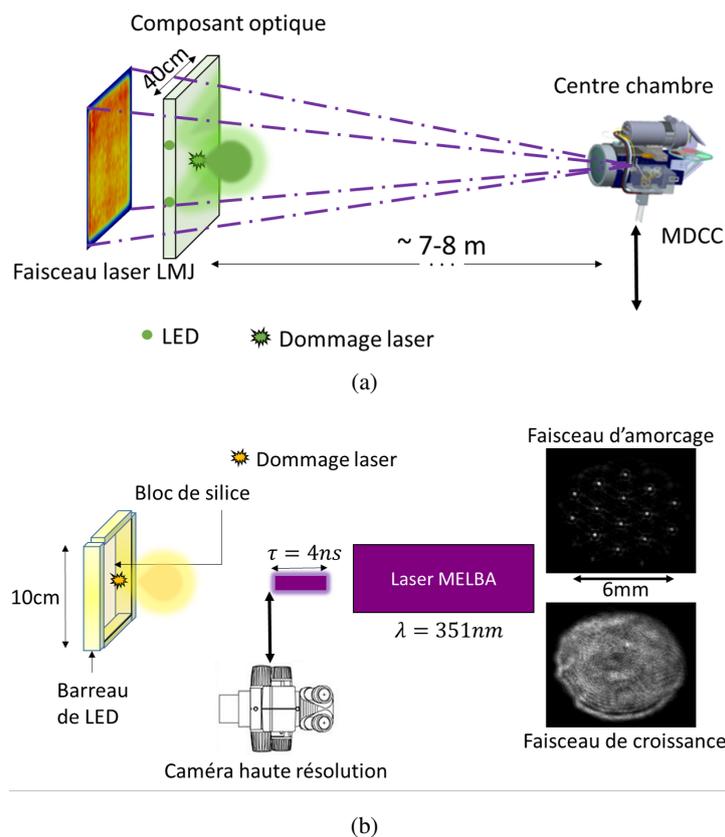


FIGURE 1 – (a) Système d'acquisition d'images d'endommagement MDCC au LMJ avec le chemin du faisceau laser représenté en tirets violets. (b) Montage expérimental MELBA avec les deux faisceaux laser disponibles pour l'amorçage et la croissance.

Le banc d'endommagement laser (MELBA) a été utilisé pour reproduire la séquence d'acquisition du MDCC avec une meilleure résolution (*i.e.*, $6.5 \mu\text{m}$). MELBA est composé d'un système d'éclairage intégré à la monture du bloc de silice, d'une caméra haute résolution qui peut être translatée entre chaque

prise d'image et d'une source laser ultraviolet nanoseconde (Figure 1(b)).

Afin de rendre possible l'utilisation des techniques de CIN pour les composants optiques du LMJ transparents et sans mouchetis, des marqueurs ont été réalisés par ablation de matière au laser CO₂ dans les coins du composant (rectangles verts sur la Figure 2(a)). Pour reproduire des marqueurs sur l'échantillon de silice de MELBA, des dommages laser ont été amorcés dans les coins de la surface imagée sur le bloc de silice (rectangles verts sur la Figure 2(b)). L'intensité du système d'éclairage et le temps d'exposition ont été choisis pour que les marqueurs ne saturent pas le capteur. Les marqueurs LMJ et MELBA ont le même but que le mouchetis noir et blanc largement utilisé en CIN [15].

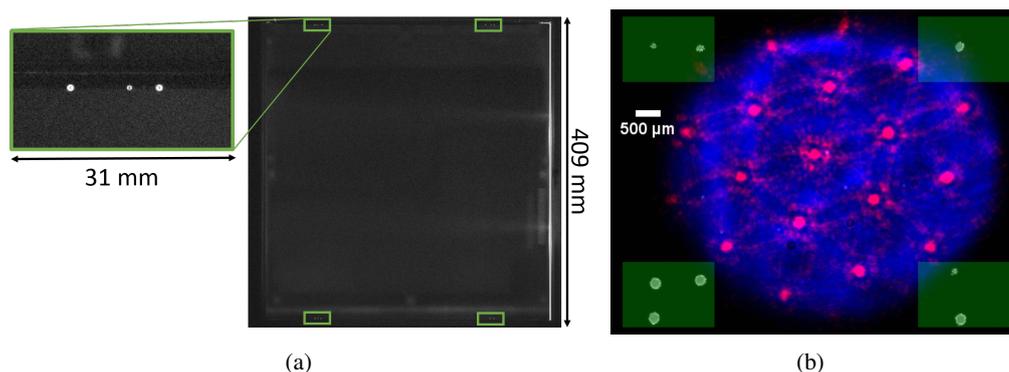


FIGURE 2 – (a) Image d'un composant optique acquise par le MDCC avec les marqueurs réalisés au laser CO₂ dans les rectangles verts. (b) Image composite du bloc de silice observé par la caméra MELBA. Les marqueurs sont visibles dans les rectangles verts. Le faisceau d'amorçage est affiché en magenta et celui de croissance en bleu.

Afin de comparer la mesure du diamètre au résidu de corrélation pour détecter l'amorçage et la croissance des dommages laser, des tirs laser nanoseconde ultraviolet ont été réalisés sur le bloc de silice en utilisant le banc MELBA. Deux configurations de tir ont été définies. La première consistait à amorcer des dommages laser avec un faisceau composé de points chauds où les fluences étaient localement supérieures à 30 J cm^{-2} (en magenta sur la Figure 2(b)). A ces fluences, la probabilité d'endommagement tend vers 1 [4, 5]. La seconde configuration (en bleu sur la Figure 2(b)) permettait de faire croître les dommages à l'aide un faisceau plus homogène spatialement avec des fluences allant de 1 J cm^{-2} à 9 J cm^{-2} alors que le seuil de croissance des dommages laser est de l'ordre de 5 J cm^{-2} pour une durée d'impulsion de 4 ns [16]. La séquence utilisée sur le banc MELBA vise à reproduire les conditions d'endommagement laser des optiques du LMJ mais aussi le déroulement d'acquisition des images de cet endommagement.

3 Correction des images d'endommagement

Des déplacements de caméra sont appliqués sur MELBA pour pouvoir effectuer les tirs laser sur le bloc de silice. Afin de s'assurer que les résidus mesurés sur les images ne rendent compte que l'endommagement, un algorithme d'appariement basé sur les principes de la CIN a été appliqué [15, 12]. L'hypothèse de la conservation des niveaux de gris utilisée en CIN s'écrit

$$I_0(\mathbf{x}) = I_t(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})), \quad (1)$$

avec I_0 une image référence, I_t l'image acquise après t tirs laser, \mathbf{x} la position d'un pixel, et \mathbf{u} le vecteur déplacement entre I_0 et I_t . L'objectif est d'estimer au mieux le champ de déplacement $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ qui

minimise, sur les 4 zones présentant des marqueurs (rectangles verts sur la Figure 2(b)), la norme L_2 du résidu de corrélation ρ défini par

$$\rho(\mathbf{x}) = I_0(\mathbf{x}) - I_t(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})). \quad (2)$$

Dans le cas présent, le champ de déplacement mesuré \mathbf{u} s'écrit comme une combinaison linéaire de translations horizontale et verticale dans le plan, d'une rotation autour de l'axe optique et d'une correction d'échelle. Une fois les amplitudes des déplacements élémentaires estimées sur les 4 zones de marqueurs, le champ de déplacement est appliqué à l'ensemble de l'image. Une série d'images a été acquise en appliquant des translations connues entre les images (sans tir laser) afin de valider le fonctionnement de l'algorithme de corrélation pour les 2 résolutions d'images (*i.e.*, 6.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ et 100 $\mu\text{m}/\text{pixel}$). Les images de résolution 100 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ont été obtenues en appliquant une agrégation d'un facteur 15 sur les images de résolution 6.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Aucune correction de brillance/contraste n'a été appliquée aux images acquises sur le banc MELBA.

4 Performance des indicateurs

Une série d'images a été acquise pour quantifier les performances du résidu de corrélation pour détecter l'amorçage et la croissance des dommages laser. Un tir laser a eu lieu entre chaque image. La première image, considérée comme référence de la série, ne contient que les marqueurs dans les quatre coins (Figure 3(a)). La seconde image a été acquise après l'amorçage d'une matrice de dommages avec configuration laser d'amorçage (Figure 3(b)). Les images suivantes sont prises après chaque tir laser avec la configuration de croissance (tir 110 pour la Figure 3(c)). Pendant la phase de croissance, les fluences laser ont été progressivement augmentées pour atteindre au maximum un niveau moyen de 8 J cm^{-2} , qui est proche des fluences qui peuvent affecter les dernières optiques des installations laser de haute énergie [17].

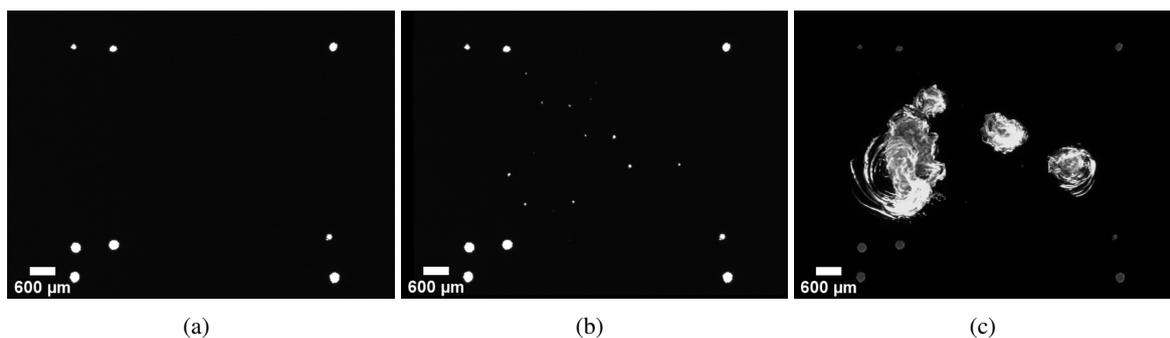


FIGURE 3 – Images acquises lors de la séquence d'endommagement sur MELBA (a) avant tir laser, (b) après le tir d'amorçage et (c) après 110 tirs de croissance. Les dynamiques d'affichage des images ont été modifiées pour rendre visibles les différents éléments (marqueurs, dommages amorcés et après croissance).

4.1 Amorçage

Un dommage est considéré comme détecté dès que le niveau de résidu d'un pixel dépasse le seuil minimal de détection. Ce seuil a été estimé sur la série d'images ayant servi à valider le fonctionnement de l'algorithme de corrélation. Le nombre de dommages mesurés à haute résolution donne la valeur vraie. Le diamètre équivalent d'un dommage, mesuré sur les images à haute résolution, est celui d'un disque

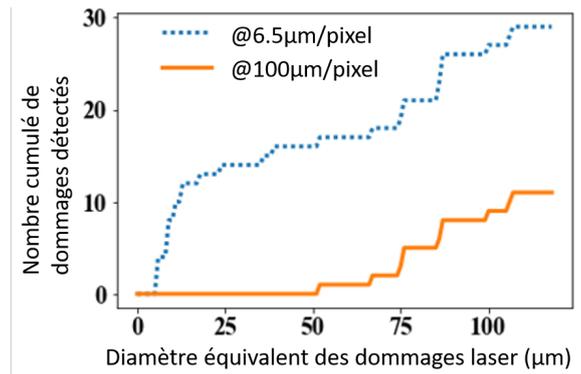


FIGURE 4 – Nombre cumulé de dommages amorcés et détectés à haute et basse résolutions d’images selon leur diamètre équivalent.

ayant la même surface que le dommage. La Figure 4 montre le nombre cumulé de dommages détectés après amorçage sur les images à haute résolution (pointillés bleus) et basse résolution (trait plein orange). Le diamètre du plus petit dommage détecté à basse résolution est d’environ 50 µm, ce qui correspond à la moitié de la taille d’un pixel dans le plan objet. La détection d’objet plus petit que la taille d’un pixel est donc atteinte.

4.2 Croissance

Parmi les 29 dommages amorcés, 4 ont crû durant la séquence de croissance (Figure 3(c)). Les diamètres équivalents des dommages croissants ont été mesurés à haute et basse résolutions d’images. Les valeurs de résidus ont été calculées sur des zones de 45×45 pixels centrées sur les dommages à haute résolution et de 3×3 pixels à basse résolution. La Figure 5(a) montre l’évolution des 2 indicateurs de croissance pour les 2 résolutions d’images. Sur cet exemple, la croissance du dommage est détectée en premier au tir 81 par le résidu de corrélation à haute résolution, suivi du diamètre à haute résolution et du résidu à basse résolution au tir 84. Le dernier indicateur à décrire la croissance du dommage est le diamètre à basse résolution. Pour les images à basse résolution, le diamètre indique le début de croissance 1 tir après le résidu de corrélation.

Les numéros de tir correspondant à la première détection de croissance pour les 4 dommages par les 2 indicateurs aux 2 résolutions sont indiqués sur la Figure 5(b). L’indicateur de croissance le plus précoce est le résidu de corrélation à haute résolution. Il convient de noter que le résidu de corrélation à basse résolution indique la croissance du dommage au même tir que le diamètre à une résolution 15 fois meilleure pour les 4 dommages étudiés.

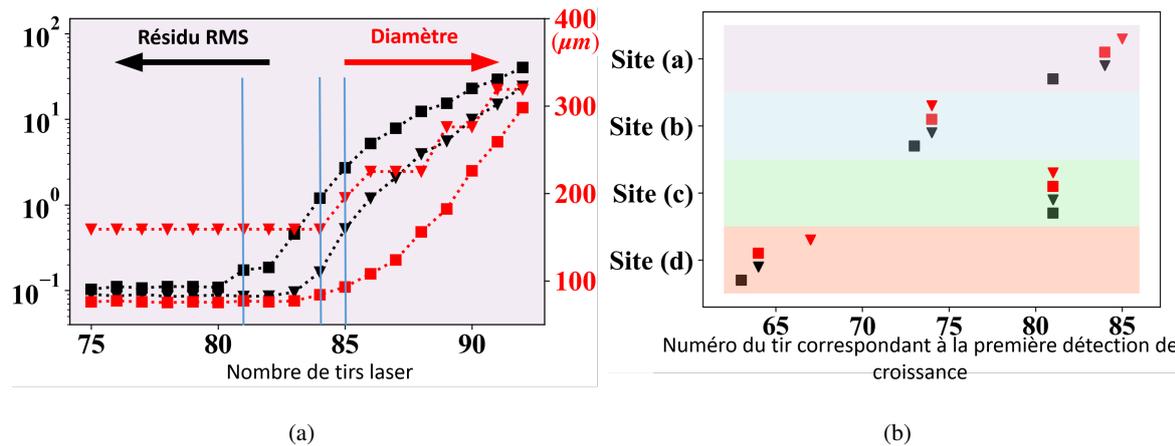


FIGURE 5 – (a) Evolution du diamètre (points rouges) et du résidu de corrélation (points noirs) mesurés à haute (symboles carrés) et basse (symboles triangles) résolutions d’images lors de la croissance du dommage. Les traits verticaux indiquent le numéro de tir pour lequel la croissance du dommage est détectée pour chaque indicateur de croissance pour les 2 résolutions d’images. (b) Numéro du tir correspondant à la première détection de la croissance des 4 dommages croissants selon les indicateurs de croissance utilisés aux 2 résolutions d’images.

5 Conclusion

Un banc d’endommagement laser hautement instrumenté a été utilisé pour démontrer l’efficacité du résidu de corrélation en tant qu’indicateur de croissance de l’endommagement induit par laser sur un échantillon de silice. Les résultats ont été obtenus pour deux résolutions d’images : celle accessible sur le banc d’endommagement et celle obtenue avec les systèmes d’imagerie d’endommagement utilisés sur les grandes installations laser de haute énergie comme le Laser MégaJoule ou le *National Ignition Facility*. Il a été montré que le résidu de corrélation peut être utilisé pour détecter précocement la croissance de dommages laser. Les performances du résidu de corrélation surpassent celles de la (très largement utilisée) mesure de diamètre pour les 2 résolutions d’images. Ce résultat ouvre la voie à une nouvelle et plus sensible approche pour détecter l’amorçage et la croissance des dommages laser en accord avec les besoins des installations laser de haute énergie.

Références

- [1] G. H. Miller, E. Moses, and C. Wuest, “The national ignition facility,” *Optical Engineering*, vol. 43, no. 12, pp. 2841–2853, 2004.
- [2] X. He and W. Zhang, “Advances in the national inertial fusion program of china,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 59, pp. 01009–, 2013.
- [3] J. Ebrardt and J. M. Chaput, “LMJ project status,” *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 112, no. 3, p. 032005, 2008.
- [4] L. Lamaignère, G. Dupuy, A. Bourgeade, *et al.*, “Damage growth in fused silica optics at 351 nm : refined modeling of large-beam experiments,” *Applied Physics B : Lasers and Optics*, vol. 114, no. 4, pp. 517–526, 2014.
- [5] K. Manes, K. R. Manes, M. L. Spaeth, *et al.*, “Damage Mechanisms Avoided or Managed for NIF Large Optics,” *Fusion Science and Technology*, vol. 69, pp. 146–249, 2016.

- [6] P. A. Baisden, L. J. Atherton, R. A. Hawley, *et al.*, “Large optics for the national ignition facility,” *Fusion Science and Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 295–351, 2016.
- [7] J. Folta, M. Nostrand, J. Honig, *et al.*, “Mitigation of laser damage on National Ignition Facility optics in volume production,” in *Laser-Induced Damage in Optical Materials : 2013* (G. J. Exarhos, V. E. Gruzdev, J. A. Menapace, D. Ristau, and M. Soileau, eds.), vol. 8885, pp. 138 – 146, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2013.
- [8] P. Cormont, P. Combis, L. Gallais, *et al.*, “Removal of scratches on fused silica optics by using a CO2 laser,” *Optics Express*, vol. 21, pp. 28272–28289, 11 2013.
- [9] L. Mascio-Kegelmeyer, “Machine learning for managing damage on NIF optics,” in *Laser-induced Damage in Optical Materials 2020* (C. W. Carr, V. E. Gruzdev, D. Ristau, and C. S. Menoni, eds.), vol. 11514, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020.
- [10] M. L. Spaeth, P. J. Wegner, T. I. Suratwala, *et al.*, “Optics Recycle Loop Strategy for NIF Operations above UV Laser-Induced Damage Threshold,” *Fusion Science and Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 265–294, 2016.
- [11] F. Wei, F. Chen, B. Liu, *et al.*, “Automatic classification of true and false laser-induced damage in large aperture optics,” *Optical Engineering*, vol. 57, no. 5, pp. 1 – 11, 2018.
- [12] G. Hallo, C. Lacombe, R. Parreault, *et al.*, “Sub-pixel detection of laser-induced damage and its growth on fused silica optics using registration residuals,” *Opt. Express*, vol. 29, no. 22, pp. 35820–35836, 2021.
- [13] A. Conder, J. Chang, L. Kegelmeyer, *et al.*, “Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility,” in *Optics and Photonics for Information Processing IV* (A. A. S. Awwal, K. M. Iftekharuddin, and S. C. Burkhart, eds.), vol. 7797, pp. 167 – 178, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010.
- [14] G. Hallo, C. Lacombe, J. Néauport, and F. Hild, “Detection and Tracking of Laser Damage Sites on Fused Silica Components by Digital Image Correlation,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 146, p. 106674, 2021.
- [15] M. A. Sutton, J.-J. Orteu, and H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements - Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Science, 2009.
- [16] R. A. Negres, M. A. Norton, D. A. Cross, and C. W. Carr, “Growth behavior of laser-induced damage on fused silica optics under UV, ns laser irradiation,” *Optics Express*, vol. 18, pp. 19966–19976, 09 2010.
- [17] M. Nicolaizeau and J.-L. Miquel, “LMJ status : fifth bundle commissioning and PW class laser coupling,” in *High Power Lasers for Fusion Research V* (A. A. S. Awwal and C. L. Haefner, eds.), vol. 10898, pp. 1 – 10, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019.