

Recyclage par laser des hublots du Laser Mégajoule

P. CORMONT - C. AMEIL - S. BOUILLET - A. BOURGEADE - P. COMBIS - T. DONVAL - D. HÉBERT -

L. LAMAIGNÈRE - J.-L. RULLIER / CEA – Cesta

T. DOUALLE - L. GALLAIS / Institut Fresnel, UMR 7249 CNRS – Aix-Marseille Université – Centrale Marseille

Après une première vie sur le Laser Mégajoule (LMJ), les composants optiques endommagés peuvent être utilisés à nouveau sur cette installation grâce à un procédé mis au point par le CEA et l'Institut Fresnel à Marseille. L'usinage effectué par laser CO_2 sur chaque zone endommagée donne un cratère propre, sans fracture. Pour garantir la tenue au flux spécifiée pour le LMJ, la technique a néanmoins nécessité quelques perfectionnements dans le choix des paramètres d'usinage, mais aussi par l'ajout d'une étape finale d'attaque chimique.

Sur le Laser Mégajoule, les conditions de fonctionnement ne peuvent empêcher l'apparition de dommages à la surface des hublots d'entrée de la chambre d'expérience. Un exemple de dommage est présenté sur la **figure 1**. Le dommage, généré par l'impulsion du laser, présente une fracturation sous-surfacique importante qui s'étend sous l'effet des impulsions suivantes. Sur le LMJ, un système d'observation permet de suivre l'évolution de la taille de ces dommages. Pour garantir sa résistance mécanique, le hublot doit être remplacé dès qu'une zone fracturée atteint un diamètre de quelques centimètres. Lorsque le hublot est enlevé de la chaîne laser, il n'est pas mis aux déchets, mais est recyclé suivant un procédé mis au point au CEA avec la collaboration de l'Institut Fresnel à Marseille.

Ce procédé utilise un laser CO_2 pour usiner localement le dommage. Le laser CO_2 émettant à $10,6 \mu\text{m}$, longueur d'onde à laquelle la silice est fortement absorbante, il fait fondre et évaporer la zone fracturée pour la remplacer par un cratère sans défaut et dont la forme a été choisie pour ne pas créer des modulations d'intensité importantes sur le faisceau LMJ [1]. La forme conique de ce cratère, visible sur la **figure 1c**, est obtenue en utilisant une tête d'usinage laser qui est composée de miroirs galvanométriques pour dévier rapidement le faisceau laser CO_2 et d'une lentille dite f-thêta qui assure la linéarité du déplacement du faisceau dans le plan focal en fonction de l'angle θ de déviation du faisceau laser. Typiquement, le temps d'usinage du cratère de la **figure 1c** est de quelques dizaines de secondes. L'absence de fracture après usinage laser ne garantit néanmoins pas encore la résistance au flux laser, car celle-ci est limitée par les contraintes dans le matériau et les fines particules éjectées lors de l'usinage.

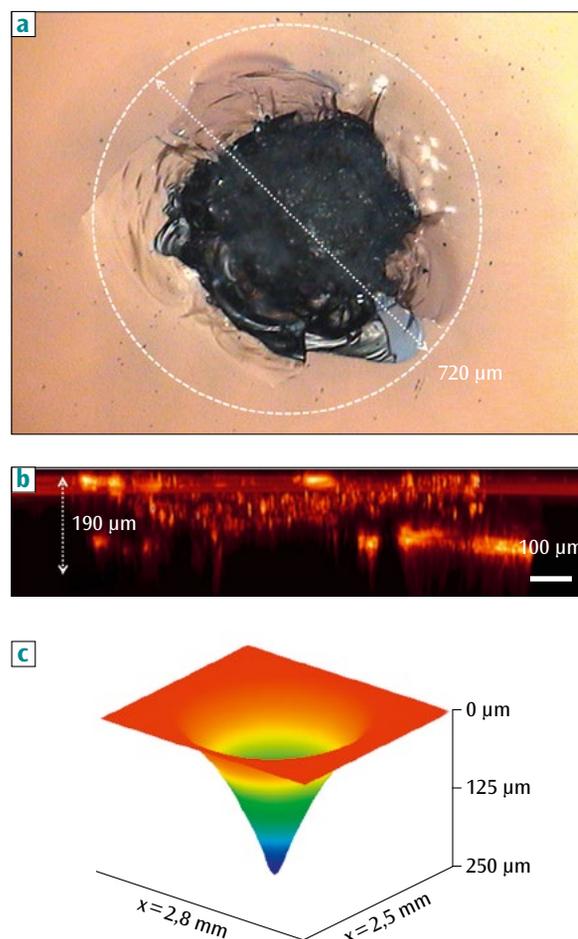


Figure 1. (a) Vue de dessus au microscope d'un dommage de hublot du Laser Mégajoule après plusieurs expériences lasers de puissance. (b) Vue de coupe au microscope confocal du même dommage que (a) : les points rouges indiquent les fractures sous la surface située au-dessus sur cette vue. (c) Image au microscope interférométrique en vue 3D du cratère de forme conique usiné par laser CO_2 , en vue du recyclage du hublot.

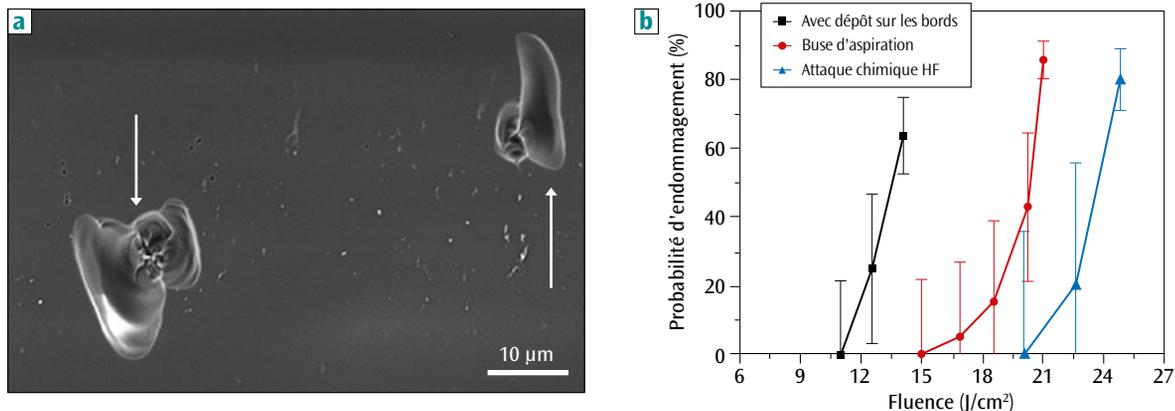


Figure 2. (a) Image au microscope électronique à balayage (MEB) d'une zone en périphérie d'un cratère. Les points blancs de dimensions submicrométriques sont les débris de la matière éjectée lors de l'usinage. Les dommages amorcés lors des tests de tenue au flux sont indiqués par des flèches blanches. (b) Résultats des tests de tenue au flux. Sur l'axe des abscisses est reportée la fluence de l'expérience laser de longueur d'onde 355 nm et de durée d'impulsion 3 ns. L'axe des ordonnées est le pourcentage de tirs laser ayant créé un dommage. La courbe en noir a été obtenue sur un cratère avec un nombre important de débris sur les bords, la courbe en rouge correspond à l'utilisation d'une buse pour aspirer une partie des débris et la courbe bleue a été faite sur des cratères après une attaque chimique à l'acide fluorhydrique (HF) pour enlever les débris. La fluence maximale sur le LMJ étant de 14 J/cm², le micro-usinage laser suivi d'une attaque chimique permet de redonner aux hublots une nouvelle vie.

Les contraintes sont provoquées par le refroidissement rapide de la silice après le passage du laser CO₂. Le recuit thermique dans un four à des températures d'environ 1 050 °C pendant plusieurs heures est une méthode connue pour enlever les contraintes dans le verre. Effectivement, les essais réalisés sur des cratères usinés par laser CO₂ montrent une amélioration de la tenue au flux après recuit [2]. Le relâchement des contraintes entraîne d'ailleurs une légère modification, inférieure au micromètre, de la forme du cratère, ce que les modélisations reproduisent parfaitement [2]. Cependant, cette méthode de recuit thermique n'est pas adaptée aux composants optiques du LMJ, qui doivent garder une très bonne planéité sur toute leur surface de 400 mm de côté. La réduction des contraintes a alors été recherchée, par une bonne interprétation et modélisation des principaux paramètres d'usinage, comme la durée d'irradiation et la puissance du laser. En effet, le modèle thermique permet de calculer la distribution de température dans le matériau pendant l'expérience laser avec ou sans mouvement du faisceau. Combinées avec une approche thermodynamique, ces simulations thermiques permettent de décrire les transformations de la silice lors de l'irradiation afin de prédire la morphologie des cratères formés dans le verre. D'autre part, la partie mécanique du modèle permet de simuler la position et la valeur des contraintes résiduelles [3], générées dans le matériau autour du cratère. Ces travaux ont permis de réduire ces contraintes jusqu'à ce qu'elles ne limitent plus la tenue au flux du cratère usiné.

Les particules éjectées posent aussi un problème sur la tenue au flux. Après éjection, elles se redéposent sur une couronne autour du cratère et sont autant de points d'amorçage de l'endommagement laser comme l'illustre la **figure 2**. Quelques essais avec des buses d'aspiration n'ont donné que des résultats mitigés notamment du fait qu'une distance supérieure à 10 mm est imposée entre la surface

optique et la buse d'aspiration, pour des raisons de mise en œuvre industrielle. L'attaque chimique a alors été envisagée pour éliminer ces particules. L'attaque chimique est en effet utilisée lors de la fabrication des composants optiques du LMJ pour éliminer les défauts absorbants de la couche de polissage. Les procédés mis au point récemment et brevetés par le CEA [4] permettent de limiter la déformation de surface lors de cette opération. Actuellement, de l'acide fluorhydrique est utilisé pour enlever environ un micromètre d'épaisseur sur l'optique. Les résultats des tests de tenue au flux présentés sur la **figure 2** valident le procédé pour une utilisation à pleine puissance sur le LMJ (fluence maximale de 14 J/cm²).

Le procédé de recyclage développé par le CEA combine donc une étape de micro-usinage des dommages pour supprimer les fractures et une étape finale d'attaque chimique pour enlever les résidus précurseurs d'endommagement. Ce procédé permet de redonner aux hublots une résistance proche de leur état initial et souvent suffisante pour qu'ils soient réutilisés sur le LMJ.

Références

- [1] T. DOUALLE *et al.*, "CO₂ laser microprocessing for laser damage growth mitigation of fused silica optics", *Opt. Eng.*, **56**, 011022 (2016).
- [2] T. DOUALLE *et al.*, "Effect of annealing on the laser induced damage of polished and CO₂ laser-processed fused silica surfaces", *J. Appl. Phys.*, **119**, 213106 (2016).
- [3] T. DOUALLE *et al.*, "Thermo-mechanical simulations of CO₂ laser-fused silica interactions", *J. Appl. Phys.*, **119**, 113106 (2016).
- [4] P. BELLEVILLE, P. CORMONT, S. LAMBERT, M. PFIFFER, «Procédé pour améliorer la tenue au flux laser d'un composant optique», demande de brevet français n°16 58944 déposée le 23 septembre 2016.