

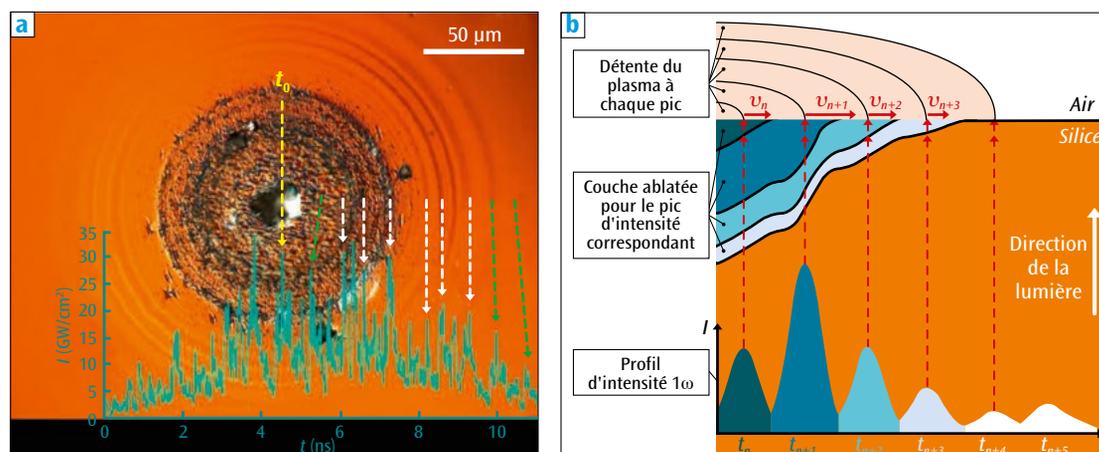
Impact des modulations temporelles d'un faisceau laser sur l'endommagement des optiques

P. GRUA - J.-L. RULLIER - M. CHAMBONNEAU - R. DIAZ - R. COURCHINOX - L. LAMAIGNÈRE / CEA – Cesta
J.-Y. NATOLI / Institut Fresnel, Unité mixte de recherche 7249 CNRS – Aix-Marseille université – Centrale Marseille

L'endommagement des optiques en silice lors du passage du faisceau laser doit être maîtrisé, car il constitue un poste de dépenses très important pour la maintenance des lasers de puissance tels que le Laser Mégajoule. Afin de mieux comprendre l'influence de la forme temporelle des impulsions laser sur l'endommagement en régime nanoseconde, des expériences utilisant des impulsions multimodes longitudinales [1], très fortement modulées dans les domaines infrarouge (1064 nm) et ultraviolet (355 nm), ont été réalisées. Elles ont permis de mettre en évidence des processus physiques impliqués dans l'endommagement laser jusqu'à présent non considérés, ce qui conduit *in fine* à une maîtrise accrue de l'endommagement laser.

Dans les gammes de densité de puissance engagées dans ces expériences, quelques dizaines de GW/cm^2 , l'interaction du faisceau laser avec un défaut nanométrique de l'optique crée un dommage de quelques dizaines de micromètres de diamètre sur la face de sortie du composant. À 1064 nm, les dommages amorcés présentent systématiquement une structure en anneaux concentriques (figures 1a et 2a). Cette structure est le résultat de l'interaction des pics successifs des impulsions multimodes longitudinales avec la surface de la silice. La figure 1b représente schématiquement la chronologie des événements. Un plasma est créé lors de l'interaction entre l'impulsion laser et les défauts. Il est éjecté dans l'air et fournit des électrons libres capables d'y déclencher la formation d'un front d'ionisation par

avalanche électronique et d'étendre le plasma à la vitesse v . Les électrons de haute énergie du plasma (de l'ordre de 50 eV) qui impactent la surface de la silice la rendent absorbante. Suit un mécanisme d'ablation de la silice [2] qui conduit à un creusement en escalier de la pièce optique, du cœur du dommage jusqu'à la surface, responsable de la morphologie des dommages en anneaux [3]. La vitesse d'expansion des anneaux est établie comme étant le rapport de la distance entre deux anneaux par le temps entre deux pics. L'évolution de cette vitesse en fonction de l'intensité entre deux pics successifs est reportée sur la figure 2c. En moyenne, elle est de l'ordre de 20 km/s, soit largement supérieure aux 5,9 km/s de la vitesse du son dans la silice, ce qui conforte le mécanisme d'expansion du plasma supporté par l'air.



Les mécanismes mis en évidence dépendent du milieu environnant : dans le vide, le processus d'ablation de la silice est dû à un plasma rampant se déplaçant à une vitesse de l'ordre de 10 km/s (**figure 2d**) conduisant à des dommages deux fois plus petits que ceux créés dans l'air (**figure 2b**) [4]. Les données sont ajustées par des lois reliant la vitesse v (en km/s) à la densité de puissance I (en GW/cm²), de la forme :

$$v = a \langle I \rangle^b$$

Les valeurs de l'exposant b sont issues de modèles physiques (1/3 dans l'air et 1/2 dans le vide) et sont en bon accord avec les expériences [3,4]. L'étude de la correspondance entre la morphologie des dommages et les profils temporels des impulsions permet de diviser le mécanisme d'endommagement laser en deux phases : une phase d'incubation du défaut jusqu'à l'instant d'éjection du plasma, noté t_0 sur le profil temporel de l'impulsion (**figure 1a**), à laquelle est associée la fluence F_{abs} , suivie de l'expansion du dommage durant la seconde partie du dépôt d'énergie à laquelle est associée la fluence F_{exp} . Ces deux fluences F_{abs} et F_{exp} sont reliées à la fluence totale incidente F_{tot} :

$$F_{tot} = F_{abs} + F_{exp} \text{ avec } F_{abs} = \int_0^{t_0} I(t') dt' \text{ et } F_{exp} = \int_{t_0}^{\infty} I(t') dt'$$

La **figure 3** montre que la taille des dommages varie linéairement avec la fluence d'expansion (F_{exp}) [4,5], ce qui permet de déduire indirectement la fluence d'incubation de chacun des défauts, riche

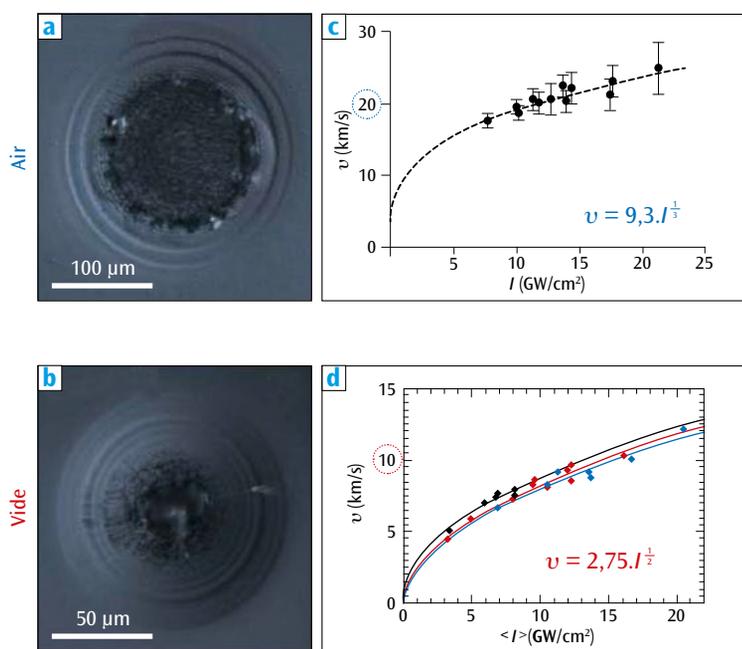


Figure 2. Colonne de gauche : morphologies des dommages dans l'air (a) et le vide (b), l'échelle est deux fois plus grande sur la figure (a). Colonne de droite : vitesse d'apparition des anneaux dans l'air (c) et le vide (d) en fonction de la densité de puissance laser I . Les vitesses, dont les valeurs expérimentales sont représentées par des points, sont de la forme $v = a \langle I \rangle^b$.

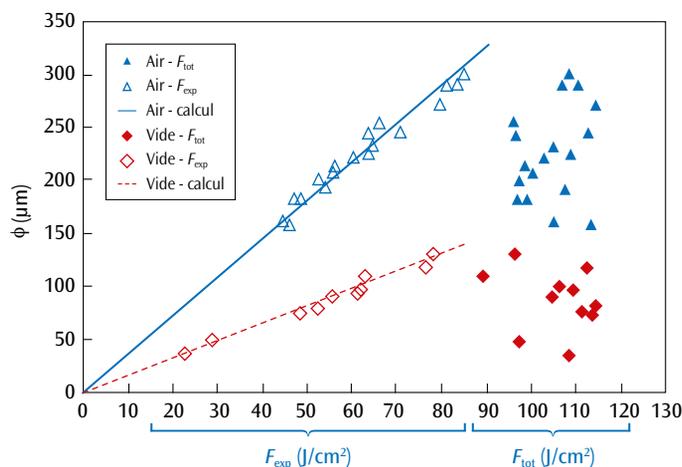


Figure 3. Diamètre ϕ des dommages reportés en fonction de la fluence laser totale F_{tot} ($\blacktriangle, \blacklozenge$), ainsi que de la fluence d'expansion F_{exp} (\triangle, \diamond). Le diamètre ϕ varie linéairement avec cette dernière alors qu'aucune corrélation n'apparaît entre ϕ et F_{tot} . À fluence égale, un dommage sous vide (en rouge) est environ 2 fois plus petit que dans l'air (en bleu).

d'information, à partir de la fluence incidente F_{tot} , parfaitement connue.

À 355 nm, ces impulsions modulées conduisent à moins de dommages qu'avec des impulsions non modulées (comportement dû à un recuit local des défauts par les multiples pics [6]); ils ne présentent pas les structures en anneaux vues à 1064 nm car les intensités engagées ne peuvent produire une avalanche électronique [3].

De tels travaux donnent un éclairage nouveau sur les mécanismes d'endommagement laser et contribuent à une plus grande maîtrise de la dégradation des optiques sur les lasers de puissance.

Références

- [1] R. DIAZ *et al.*, "Experimental evidence of temporal and spatial incoherencies of Q-switched Nd:YAG nanosecond laser pulses", *Appl. Phys. B*, **121**, p. 439 (2015).
- [2] P. GRUA *et al.*, "Role of suprathreshold electrons during nanosecond laser energy deposit in fused silica", *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 081902 (2014).
- [3] M. CHAMBONNEAU *et al.*, "Origin of the damage ring pattern in fused silica induced by multiple longitudinal modes laser pulses", *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 021121 (2014).
- [4] R. DIAZ *et al.*, "Influence of vacuum on nanosecond laser-induced surface damage morphology in fused silica at 1064 nm", *Appl. Surf. Science*, **362**, p. 290 (2016).
- [5] M. CHAMBONNEAU *et al.*, "Parametric study of the damage ring pattern in fused silica induced by multiple longitudinal modes laser pulses", *J. Appl. Phys.*, **117**, 103101 (2015).
- [6] R. DIAZ *et al.*, "Influence of longitudinal mode beating on laser-induced damage in fused silica", *Optics Lett.*, **39**, p. 674 (2014).