

PETAL, UN LASER PÉTAWATT DE HAUTE ÉNERGIE : PERFORMANCES EXPÉRIMENTALES ET MODÉLISATION

PETAL est un laser dédié aux expériences laser-plasma menées au centre de la chambre expérimentale du Laser Mégajoule (LMJ) pour la communauté académique. Il a déjà produit une impulsion de plus de 1 pétawatt (PW), soit 10^{15} W, en 700 femtosecondes (fs), soit $0,7 \times 10^{-12}$ s. La caractérisation du faisceau à un tel niveau de puissance a nécessité le développement de diagnostics spécifiques, mais aussi le recours à des codes de simulation. L'énergie produite est aujourd'hui limitée par la résistance au flux laser des miroirs de fin de chaîne. Une démarche expérimentale et de modélisation de ce processus a été engagée. Elle constitue le fondement d'une nouvelle solution technologique qui doit repousser cette limite de performance.

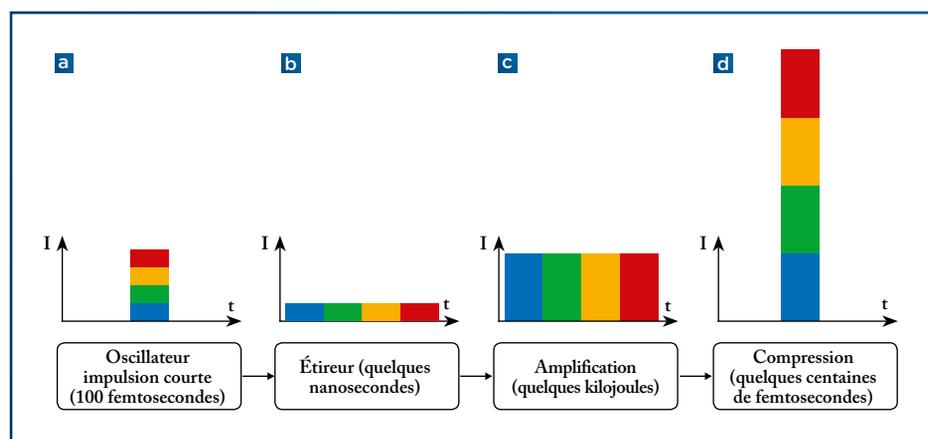
Le laser PETAL (PETawatt Aquitaine Laser) est caractérisé par l'énergie produite, de la classe kilojoule, et par la durée de ses impulsions, dix mille fois plus courte que celle du Laser Mégajoule (LMJ). L'architecture de sa section amplificatrice est ainsi proche de celle d'un faisceau du LMJ afin de pouvoir délivrer une énergie de plusieurs kilojoules. La mise en œuvre du principe de l'amplification dite à dérive de fréquence (figure 1), avec l'étirement de la durée de l'impulsion avant amplification puis sa compression après amplification, permet de véhiculer une telle énergie sur cible dans une impulsion de durée aussi courte. Le laser PETAL a été conçu et réalisé par le CEA, maître d'œuvre, pour le compte de la Région Nouvelle-Aquitaine, maître d'ouvrage, avec le soutien financier de l'État et de l'Union européenne.

MISE EN ŒUVRE ET MODÉLISATION DU LASER PETAL

La mise en route de PETAL s'est déroulée en différentes étapes. Tout d'abord, les points de fonctionnement des étages d'amplification ont été recherchés avec une source monochromatique, de type LMJ, puis avec des impulsions courtes à spectre large. Ensuite, un nouveau schéma de compression a été déployé et validé. Son originalité repose sur la subdivision du faisceau laser en quatre sous-pupilles dont les impulsions sont comprimées par quatre compresseurs indépendants 1. Ce schéma a nécessité une méthode d'alignement et des outils de réglage spécifiques afin de synchroniser à mieux que 50 fs (millionnièmes de milliardième de seconde) les impulsions en sortie des quatre compresseurs. Il s'agit également d'assurer un déphasage du faisceau, sous-pupille à

Figure 1

➔ Principe de l'amplification à dérive de fréquence 2 : (a) l'impulsion courte multi-longueurs d'onde est étirée temporellement (répartition dans le temps de ses longueurs d'onde) (c) pour permettre son amplification sans dommage. Puis, après amplification, elle est (d) comprimée à une durée proche de sa durée initiale pour produire le maximum de puissance sur la cible.



sous-pupille, qui reste inférieur à l'équivalent de 100 nm. Des diagnostics adaptés (de mise en phase, d'interférométrie spectrale, de spectrométrie 2D, de corrélation croisée monocoup, etc.) ont été développés pour mener les réglages et la caractérisation de l'impulsion comprimée.

Les diagnostics ne donnent cependant pas accès à l'ensemble des grandeurs physiques du faisceau, en particulier au couplage des dépendances spatio-temporelles, c'est-à-dire au fait qu'en différents points du faisceau la forme temporelle est différente. L'utilisation de codes de calcul, en particulier du code Miró, acronyme de Mathématiques et Informatique pour la Résolution des problèmes d'Optique, code 3D développé au CEA – DAM **3**, donne accès à une vision plus complète du faisceau. Le faisceau peut ainsi être modélisé depuis la source jusqu'à la tache focale avec un accès aux grandeurs physiques en tout point du laser. Toutes les informations disponibles sont intégrées dans ce modèle: profils de gain des amplificateurs, cartographies de transmission et de front d'onde des composants, etc. Pour la partie compresseur, tous les paramètres nécessaires sont ajoutés afin de reproduire la procédure de réglage expérimentale. Pour comparaison aux résultats de mesure de chaque expérience, les diagnostics laser sont aussi modélisés.

La modélisation du fonctionnement des voies de mesure sous Miró a permis de finaliser les réglages du laser et d'aboutir à un faible écart entre les mesures effectuées et les prévisions du calcul (**figure 2**) **4**. Ainsi, un faisceau véhiculant une puissance de 1,15 PW **1**, en 700 fs en sortie de compression, a été produit en 2015; la même année, le kilojoule à 1 ps a été dépassé à plusieurs reprises. Le dernier trimestre 2017 a été consacré à la réalisation des premières campagnes expérimentales.

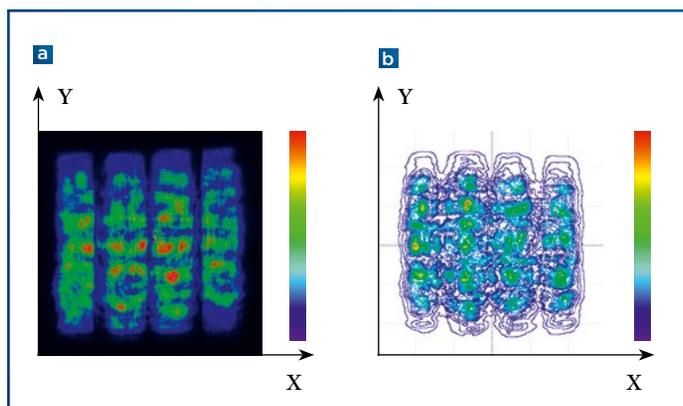


Figure 2

➔ Comparaison entre des profils spatiaux (a) expérimental et (b) simulé d'un faisceau qui subit une propagation non linéaire dans les voies de mesure. Les calculs sont faits avec le code Miró **3**; une quasi-concordance des profils spatiaux mesuré et calculé est observée.

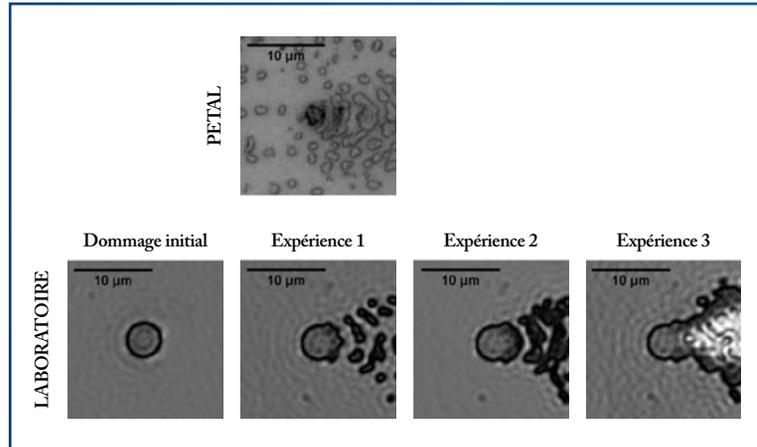


Figure 3

➔ Comparaison de l'endommagement observé sur un miroir testé sur PETAL avec la croissance d'un dommage réalisée et observée en laboratoire sur un échantillon. Des structures semblables sont observées.

MESURE ET MODÉLISATION DE L'ENDOMMAGEMENT DES MIROIRS

Lors des premiers transports du faisceau laser dans la chambre d'expériences, en 2015, les miroirs situés après le compresseur ont subi des endommagements. Lors des campagnes expérimentales suivantes, l'énergie du faisceau a donc été limitée à 400 J (équivalente à une puissance de 0,5 PW), pour éviter la croissance des dommages sur ces composants optiques. Les ajustements réalisés en 2015-2016 sur les traitements des miroirs permettent à ceux-ci de résister à des énergies de l'ordre du kilojoule au voisinage de la picoseconde: des miroirs de ce type remplaceront ceux actuellement sur chaîne lors d'une prochaine maintenance.

La valeur seuil de 400 J pour les miroirs actuellement utilisés a été évaluée à l'issue d'expériences d'amorçage et de croissance de dommages en laboratoire, menées sur des échantillons représentatifs des miroirs de transport PETAL dans un régime d'impulsion similaire.

Une modélisation du phénomène de croissance des dommages, confortée

par des essais conduits sur des dommages-types à géométrie simple (**figure 3**), a mis en évidence la dépendance de ce phénomène aux variations du champ électrique en surface des miroirs diélectriques. Une comparaison de ces résultats avec des observations d'un miroir endommagé de PETAL (**figure 3**) prouve le bien-fondé de cette démarche et démontre le bon accord entre la simulation et les expériences **5**. Ils servent aujourd'hui de point de départ au développement de nouvelles technologies de traitement à haute réflectivité plus résistant au flux laser. Cela devrait permettre de repousser la limite de la puissance délivrée sur cible à plusieurs pétawatts.

RÉFÉRENCES

- 1 N. BLANCHOT et al.**, "1.15 PW-850 J compressed beam demonstration using the PETAL facility", *Opt. Express*, **25**, p. 16957-16970 (2017).
- 2 N. BLANCHOT, C. ROUYER**, « Laser de puissance à impulsions ultrabrèves », *Revue chocs* n° 22, p. 43-52 (1999).
- 3 O. MORICE et al.**, "Miró: Complete modeling and software for pulse amplification and propagation in high-power laser systems", *Opt. Eng.*, **42**, p. 1530-1541 (2003).
- 4 H. COÏC et al.**, "Modeling of the petawatt PETAL laser chain using Miró code", *Appl. Opt.*, **56**, p. 9491-9501 (2017).
- 5 M. SOZET et al.**, "Sub-picosecond laser damage growth on high reflective coatings for high power applications", *Opt. Express*, **25**, p. 25767-25781 (2017).