

TECHNOLOGIES LASERS FUTURES

B. LE GARREC
CEA - Cesta

Le CEA - DAM s'intéresse à la technologie des lasers pour la fusion thermonucléaire. Pour le Laser Mégajoule (LMJ), les choix technologiques sont faits : le matériau laser est du verre phosphate dopé au néodyme. Pour les cellules de Pockels, comme pour les cristaux convertisseurs de fréquence, nous utilisons du KDP, éventuellement deutéré. En marge du programme LMJ, nous réfléchissons à des architectures et à des matériaux lasers susceptibles de délivrer des énergies de l'ordre du mégajoule, avec une cadence de fonctionnement de 10 Hz. Pour accéder à ces cadences, il faut développer de nouveaux matériaux adaptés à des charges thermiques élevées.



Il est communément admis que la cadence de fonctionnement des lasers va croître, car c'est une nécessité pour réaliser un "générateur" d'énergie (ou *driver*) pour la fusion (il faut tendre vers une gamme de cadences de 5 à 10 Hz). Dans le même temps, ces lasers intéressent d'autres applications industrielles et militaires. Il existe déjà plusieurs programmes : Mercury (au Lawrence Livermore National Laboratory, USA), Halna (à Osaka, Japon), et LUCIA (à l'École polytechnique, France) [1], [2], [3] qui visent, dans un premier temps, des performances de 100 J à 10 Hz pour un seul faisceau. Nous profitons déjà des acquis des grands systèmes lasers NIF et LMJ, mais il faut aussi provoquer des ruptures technologiques. Certaines de ces ruptures sont déjà amorcées :

- faisceaux nanosecondes et picosecondes, pour combiner attaque directe (*compression*) et allumage rapide (*combustion*), grâce à des structures "amplificateur-fin de chaîne" adaptées à la génération et à l'amplification d'impulsions courtes ;
- accordabilité en longueur d'onde, en générant les harmoniques du faisceau fondamental pour maîtriser le comportement des interactions laser-plasma avec des diagnostics performants ;
- maîtriser la tache focale (*nécessité du lissage*) ;
- profiter de l'effet de stockage dans les lasers à solide ;
- utiliser des concepts validés et éprouvés, comme l'amplification à multiples passages, le filtrage, et la correction de surface d'onde.

Le domaine de fonctionnement (et par conséquent, l'ensemble des performances) doit être raisonnable vis à vis des limitations technologiques, sinon le coût de fonctionnement devient rapidement exorbitant. Ces limitations sont : l'endommagement laser et les effets non-linéaires ; l'effet *Kerr* responsable de l'autofocalisation du faisceau, l'effet *Brillouin* qui génère une onde de pression dans les optiques, et l'effet *Raman* qui diminue l'énergie du faisceau par les vibrations de l'azote de l'air. Sur le NIF et sur le LMJ, nous atteignons les dimensions maximales (faisceau de 37 cm de côté) avec des composants de section droite maximale de 44 cm. Au dessus, il faut impérativement bloquer les effets transverses néfastes en générant des pertes à la périphérie du composant.

Nous préférons des technologies à base de mosaïques plutôt que d'investir dans la fabrication de grands composants optiques, car le coût d'investissement des grands équipements de polissage ou de découpe est très élevé. C'est déjà le cas des réseaux de compression : après une tentative de réseaux de 1 m de diamètre, toutes les nouvelles réalisations sont basées sur des assemblages à mosaïques de réseaux de taille plus modeste [4].

D'autre part, augmenter la cadence suppose la capacité à dissiper la puissance perdue par effet thermique. Il n'est pas question d'utiliser le verre phosphate dopé au néodyme des plaques des lasers NIF et LMJ, ni le KDP des cellules de *Pockels* et des convertisseurs de fréquence. Il faut impérativement trouver d'autres matériaux.

Les nouveaux matériaux lasers : les céramiques transparentes

Par rapport au pompage par lampes, le pompage par diodes lasers présente de nombreux avantages, grâce à une largeur spectrale d'émission compatible avec les raies d'absorption des matériaux lasers et une mise en forme spatiale aisée. Si le matériau laser a un temps de stockage très long, nous stockons plus d'énergie à puissance donnée, et ce fonctionnement est très favorable pour les diodes lasers (*car la limitation en puissance crête est liée à la densité de courant maximale supportable dans la jonction*). Nous avons donc intérêt à augmenter le cycle utile (*rapport durée d'impulsion sur période*), avec, comme seule contrainte, la puissance moyenne à évacuer sous forme thermique (*cette remarque est valable pour les diodes de pompage, et pour le milieu laser lui-même*).

Comparons le matériau grenat YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) dopé à l'ytterbium Yb , et un verre phosphate (*type Hoya LHG-8 ou Schott LG-770*) dopé au néodyme Nd . Le premier matériau (Yb : YAG) permet de stocker l'énergie 3 fois plus longtemps que le second, il dissipe 4 fois moins d'énergie, et il est 5 fois plus conducteur. Il est donc beaucoup mieux adapté pour supporter une forte puissance moyenne. En général, nous dimensionnons les composants du laser en tenant compte des contraintes mécaniques par rapport à la rupture du matériau. Pour les lasers utilisés pour la fusion, la qualité de la tache focale est très importante, et c'est la capacité de correction de la surface d'onde qui est le critère dimensionnant.

De nombreux matériaux présentent des propriétés intéressantes que nous cherchons à quantifier en définissant des figures de mérite de façon pertinente [5]. Depuis quelques années, le dopant ytterbium a supplanté le dopant néodyme. Nous sommes passés d'un système laser à 4 niveaux (*l'ion néodyme trivalent*) à un système laser qui est à la fois à 3 niveaux (*comme l'ion chrome trivalent des premiers lasers à rubis*) et à 4 niveaux, car son comportement dépend de la population des niveaux bas, donc de la température du matériau (*figure 1*).

En dix ans, les japonais sont devenus les leaders incontestés du domaine des céramiques lasers transparentes, avec les travaux d'Ikesue du Japan Fine Ceramic Center de Nagoya, et ceux de Yanagitani de Konoshima Chemical [6], [7]. La puissance moyenne délivrée par un seul système laser à base de céramique transparente (*grenats et sesquioxydes*) est passée de quelques dizaines de milliwatts en 1995, à 67 kW dans le cadre du programme américain *Heat Capacity Laser*, avec des céramiques YAG dopées au néodyme (Yb : YAG) de dimensions $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$ fabriquées par Konoshima (*figure 2*).

Il faut aussi pouvoir disposer de cellules de *Pockels*, de rotateurs de *Faraday* (*pour faire des interrupteurs optiques,*

et des fonctions "anti-retours" de façon à isoler les tronçons amplificateurs les uns des autres), et de convertisseurs de fréquence. A part le *DKDP*, il n'y a aujourd'hui aucun matériau disponible dans des dimensions importantes (*le KDP absorbe trop à $1 \mu\text{m}$*). Certains candidats sont très intéressants, mais ont du mal à percer (*par exemple l'oxoborate YCOB - ($Y_3Ca_4B_3O_{10}$)*). Nous savons qu'il est impossible de réaliser des céramiques transparentes avec des matériaux non cubiques. Il faut donc trouver d'autres solutions.

Architecture et rupture technologique radicale : une architecture "tout fibre"

Avons-nous atteint les limites avec des installations de la taille du NIF et du LMJ ? Est-ce raisonnable d'envisager des systèmes avec encore plus de faisceaux ? Un concept d'architecture à fibres a été introduit pour les pilotes du NIF et du LMJ, et a été validé avec succès. Il concerne essentiellement les étages "bas", où l'énergie par impulsion n'excède pas le microjoule. Aujourd'hui, nous atteignons le millijoule, ce qui permet d'envisager des puissances moyennes de 100 W (*voire 1 kW en continu*). Ce concept présente de nombreux avantages : propagation guidée, peu de composants optiques et uniquement de petites dimensions, pompage par diodes fibrées, lissage intégré, puissance moyenne facile à dissiper, absence de réglage, multiplexage possible, redondance possible avec commutation rapide entre voies, grande souplesse d'architecture.

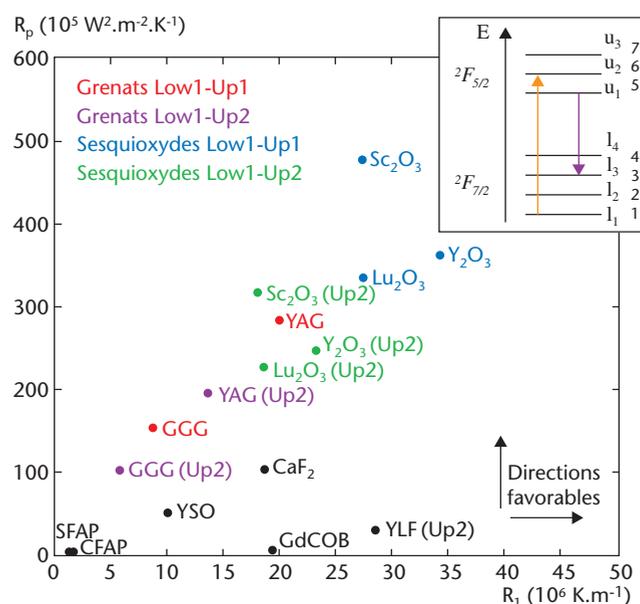


Figure 2

Classement des matériaux dopés à l'ytterbium, en fonction de deux figures de mérite. Le paramètre de focale thermique est en abscisses, et le paramètre de résistance à la puissance de pompage en ordonnées. Ces paramètres représentent le comportement du matériau quand il fonctionne à forte énergie et à haute cadence [5].

S'il est communément admis que les lasers du futur seront pompés par des diodes lasers (*même si leur coût est encore prohibitif pour les grands systèmes*), il est nécessaire de trouver les bons matériaux amplificateurs. La voie céramique est très prometteuse pour les amplificateurs, mais il y a encore beaucoup de chemin à faire pour les convertisseurs de fréquence et les cellules de *Pockels*. À moins qu'une rupture technologique radicale intervienne, comme cela a été proposé au dernier congrès IFSA, au Japon, avec une architecture laser "tout fibres" pour un générateur d'énergie (*driver*) de fusion.

Références

- [1] A. J. BAYRAMIAN et Al., "Operation of the Mercury laser; test bed for DPSSL IFE driver technology", IFSA 2003, p. 563-567 (2003).
 [2] T. KAWASHIMA et Al., "HALNA-100 DPSSL driver project for inertial fusion energy", IFSA 2003, p. 568-571 (2003).

[3] G. L. BOURDET et Al., "The LUCIA project: a High Average Power Ytterbium Diode Pumped Solid State Laser Chain", SPIE Proceeding 5478, p. 4-7 (2003).

[4] J. ZUEGEL, S. BORNEIS, C. BARTY, B. LE GARREC, C. DANSON et Al., "Laser challenges for fast ignition", *Fusion Science and Technology*, **49**, p. 453-482 (2006).

[5] O. CASAGRANDE, "Étude théorique et expérimentale de l'architecture d'un laser à solide monocristallin ou céramique dopé ytterbium pour la génération d'impulsions de grande énergie à haute cadence", Thèse de l'École polytechnique (2007).

[6] A. IKESUE, "Fabrication and optical properties of high performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid state lasers", *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, p. 1033-1040 (1995).

[7] M. SEKITA, H. HANEDA, S. SHIRASAKI, T. YANAGITANI, "Optical spectra of undoped and rare earth doped (Pr, Nd, Eu, and Er) doped transparent ceramic $Y_3Al_5O_{12}$ ", *J. Appl. Phys.*, **69**, p. 3709-3718 (1991).

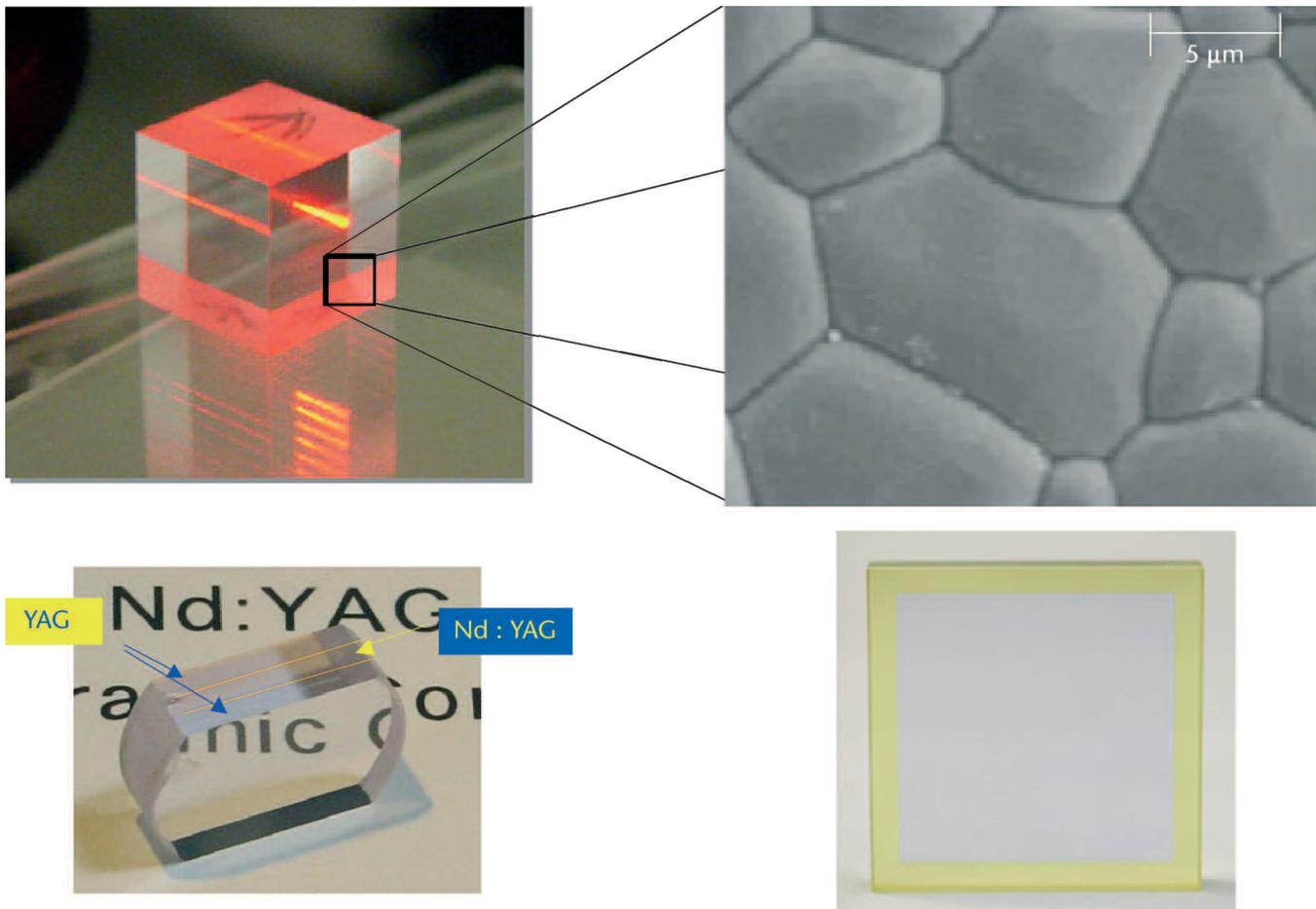


Figure 2

Quelques exemples de céramiques :

- en haut à gauche : cube de *Nd* : YAG ;
- en haut à droite : structure typique obtenue au microscope électronique à balayage ;
- en bas à gauche : un sandwich YAG non dopé, YAG dopé *Nd*, YAG non dopé ;
- en bas à droite : une plaque (10 cm de côté) de *Nd* : YAG avec son bardage (*cladding*) en *Sm* : YAG