

AVANCÉE MAJEURE DANS LA FUSION INERTIELLE PAR LASER

Christophe Simon-Boisson, christophe.simonboisson@fr.thalesgroup.com

Credit: John Jett, LLNL



La production d'une énergie décarbonée dans des conditions sûres et sans génération de déchets dangereux représente un enjeu crucial à l'heure du réchauffement climatique et de son accélération du fait des activités humaines. La fusion nucléaire, qui se produit naturellement au cœur du soleil et des étoiles, répond à tous ces critères et représente en quelque sorte le Graal de l'énergie.

De nombreuses expériences ont été mises en place depuis plusieurs décennies et 2 principales filières ont émergé, celle de la fusion magnétique recourant largement à des systèmes appelés « tokamaks » et celle de la fusion par confinement inertiel dont la plupart des schémas font appel à des lasers de très haute énergie. Les deux principales installations de fusion par confinement inertiel utilisant des lasers sont le NIF (National Ignition Facility) basé à Livermore en Californie et le LMJ (Laser MegaJoule) basé au centre CEA-CESTA du Barp à proximité de Bordeaux (figure 1). Ces deux installations sont exploitées principalement pour des applications défense au profit de la garantie de la sûreté et de la fiabilité des armes nucléaires de la dissuasion.

Elles contribuent, en couplage avec les supercalculateurs les plus performants du moment, aux programmes intitulés « simulation » qui permettent de reproduire le comportement d'armements nucléaires sans devoir réaliser d'essais en vraie grandeur. Le but de ces installations n'est donc pas majoritairement dévolu à l'obtention d'énergie de fusion même si elles sont également mises à disposition de la communauté scientifique internationale, pour des expériences de recherche académique notamment en relation avec la physique des plasmas.

La production d'énergie de fusion est plutôt jusqu'à présent l'apanage de la filière de la fusion magnétique dont le projet emblématique est ITER, grand projet international réunissant l'Union Européenne, les Etats-Unis, la Russie, le Japon, la Chine, l'Inde et la Corée.

L'installation est actuellement en construction sur le site de Cadarache dans le Sud de la France et le premier plasma est attendu pour 2025 tandis que le fonctionnement en régime entièrement nominal est prévu d'ici à 2035.

Néanmoins un résultat très récent [1] (il a été annoncé en Août 2021) obtenu sur l'installation NIF représente une avancée majeure pour la perspective de production d'énergie de fusion à une échéance raisonnable et est de nature à conforter le choix de la technologie de confinement inertiel utilisant des lasers pour produire de l'énergie de fusion. Le résultat dont il est question est la production par une capsule de « combustible » (un mélange de 2 isotopes de l'Hydrogène, le Deuterium et le Tritium) d'une énergie de fusion de 1.3 MegaJoule alors que le laser du NIF avait délivré 1.9 MegaJoule à la cible au sein de laquelle se trouvait la capsule. Cela veut donc dire que le fonctionnement observé correspondait à 70% de l'atteinte du « breakeven », c'est-à-dire le moment où le combustible délivre plus d'énergie qu'il ne lui en est apporté. Aucune expérience, toutes technologies confondues, ne s'était approchée autant du breakeven.

Cela étant, les physiciens s'accordent à dire que du point de vue de la physique, le breakeven aurait été significativement dépassé car seule une partie de l'énergie produite par le laser du NIF atteint la capsule de Deuterium-Tritium (D-T). Cela s'explique par le schéma adopté sur le

« un résultat très récent obtenu sur l'installation NIF représente une avancée majeure pour la perspective de production d'énergie de fusion à une échéance raisonnable et est de nature à conforter le choix de la technologie de confinement inertiel utilisant des lasers pour produire de l'énergie de fusion. »

NIF, tout comme sur le LMJ d'ailleurs : il est appelé « indirect-drive » car l'énergie du laser n'est pas directement transférée à la capsule de combustible. Cette capsule est placée dans un cylindre appelé « Hohlraum » dont les parois internes sont recouvertes d'or. Les 192 faisceaux laser du NIF sont focalisés sur l'entrée de la cible et sont convertis en rayonnement X lorsqu'ils se réfléchissent sur les parois du Hohlraum pour échauffer et comprimer suffisamment la capsule de D-T (100 millions de °C et 100 milliards de fois la pression atmosphérique) afin de créer les conditions nécessaires à la fusion nucléaire. Cependant, dans ce schéma, des pertes interviennent aussi bien dans le processus de conversion du rayonnement laser en rayonnement X que dans la part de ce dernier contribuant effectivement à la compression de la capsule de combustible, une partie des rayons X contribuant notamment à chauffer les parois du Hohlraum. L'estimation actuelle issue des modèles est que sur les 1.9 MJ émis par le laser, seuls 230 kJ contribueraient effectivement à la compression de la capsule [2]. Dans ces conditions le breakeven aurait donc bien été atteint et même nettement

dépassé. En tout cas cela représente un progrès considérable (augmentation d'un facteur 8) par rapport au résultat de début 2021 où 170 kJ avaient été produits, déjà un record à l'époque. Ceci est le résultat d'une combinaison de plusieurs modifications, dont une très légère augmentation des dimensions du Hohlraum et une augmentation plus nette du diamètre de la capsule de combustible. Ces résultats ont été présentés à la conférence annuelle de l'American Physics Society Division of Plasma Physics et des publications vont paraître prochainement dans les journaux scientifiques.

Bien sûr, les étapes sont encore nombreuses d'ici à la disponibilité de réacteurs de fusion opérationnels pour la production d'énergie. Cela concerne aussi bien le champ de la science, notamment pour la sélection d'un schéma optimal de fusion par confinement inertiel (plusieurs approches sont en

compétition), que celui de la technologie et en particulier l'augmentation du taux de répétition et surtout du rendement des sources laser car l'impact du rendement énergétique est essentiel, notamment pour l'évaluation du coût de l'électricité produite.

Il n'empêche que l'impulsion est belle et bien donnée et, s'il en fallait une preuve, plusieurs initiatives privées ont vu le jour récemment pour développer la production d'énergie de fusion à base de lasers, y compris en utilisant un combustible comme le mélange Proton-Bore, qui présente l'avantage de conduire à un processus de fusion aneutronique.

Affaire à suivre de près donc, et après tout cela est peut-être assez logique, puisque la fusion nucléaire par confinement inertiel est historiquement la toute première application du laser, ayant été proposée dès 1960 [3], seulement quelques jours après la première observation d'une émission laser. ●

EN SAVOIR +

[1] National Ignition Facility experiment puts researchers at threshold of fusion ignition | Lawrence Livermore National Laboratory (llnl.gov)

[2] Physics - Ignition First in a Fusion Reaction (aps.org)

[3] The Birth of the Laser and ICF | Lawrence Livermore National Laboratory (llnl.gov)

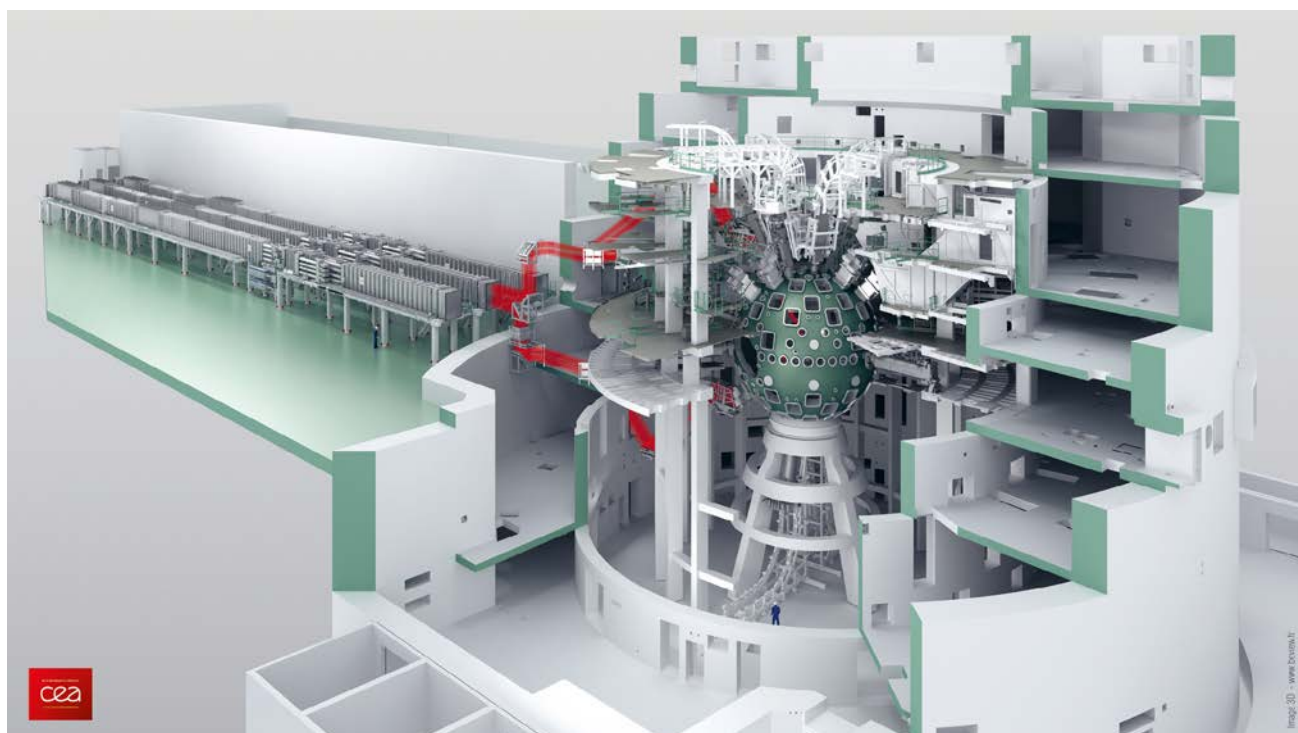
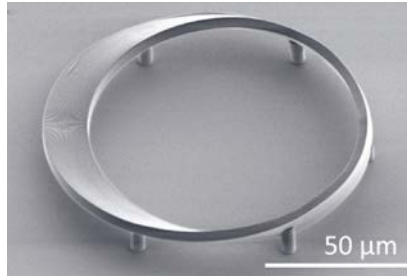


Figure 1. Vue d'ensemble de l'installation Laser MegaJoule du CEA-CESTA. Laser Mégajoule - © CEA-BEVIEW

Ruban de Möbius et photonique non-euclidienne

L'impression 3D par laser (Direct Laser Writing) permet de fabriquer n'importe quelle forme d'objet tridimensionnel à partir de résines polymères. Depuis quelques années, il est possible de fabriquer des microcavités lasers de qualité optique en dopant la résine avec un colorant laser. Une équipe de chercheurs de l'ENS Paris-Saclay, du C2N, du LMOPS et de l'Université de Lanzhou s'est intéressée à des microlasers en forme de ruban de Möbius. Après avoir exploré différentes techniques de fabrication 3D, puis étudié les cubes et les pyramides, cette équipe a réalisé qu'il était aussi possible de fabriquer des surfaces courbes en 3D, c'est-à-dire



des résonateurs lasers de taille typique 100 μm , dont l'épaisseur est de l'ordre du micron. Le ruban de Möbius était un premier choix naturel, car sa topologie originale (un seul bord et une seule surface non orientable) laissait prévoir des propriétés photoniques étonnantes.

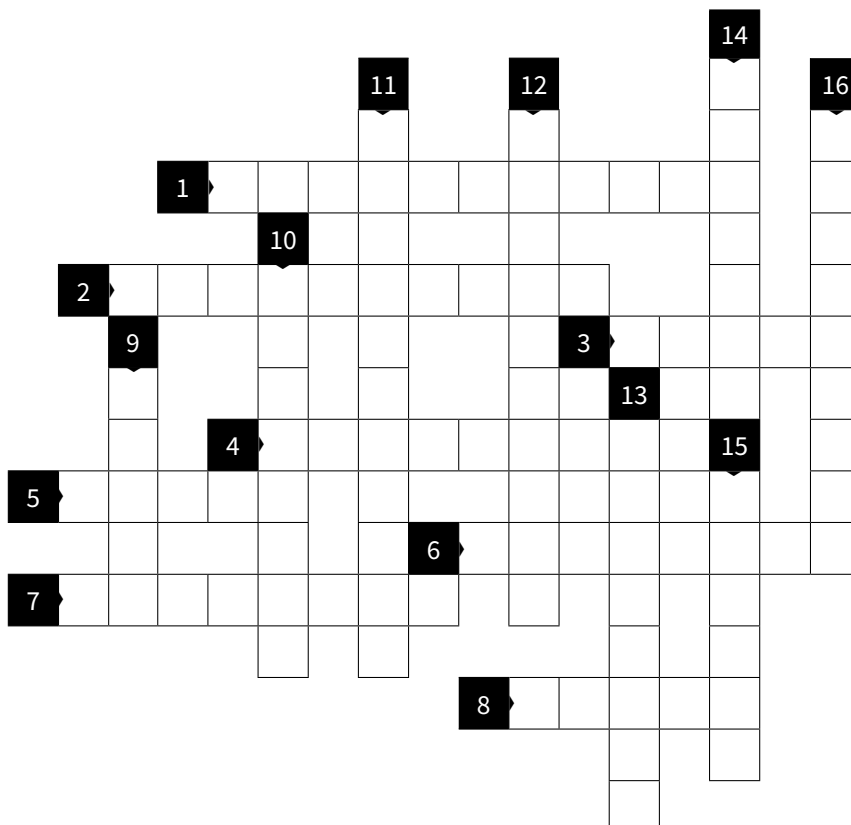
En espace libre, la lumière se déplace en ligne droite. Dans ces surfaces courbes dont l'indice de réfraction reste homogène et isotrope, on s'attend à ce qu'elle suive une géodésique, c'est-à-dire par définition le plus court chemin entre deux points sur la surface. Dans un article récent, cette équipe a montré par des expériences et des simulations FDTD 3D que les modes lasers suivent des géodésiques périodiques sur le ruban de Möbius. La « photonique non-euclidienne » réserve certainement d'autres surprises. ●

REFERENCE

Y. Song et al., "Möbius Strip Microlasers: A Testbed for Non-Euclidean Photonics," *Phys. Rev. Lett.* **127**, 203901 (2021)

MOTS CROISÉS SUR L'OPTIQUE EN MILIEUX COMPLEXES

Par Philippe ADAM



- 1 Ô C'est Top !
- 2 Effet sous ou hyper radiant
- 3 Orientation abrégée
- 4 Régime difficile à suivre
- 5 Effet billard sur la diffusion
- 6 Plus qu'une en diffusion
- 7 Difficile à localiser
- 8 Aléatoire dans les milieux complexes ?
- 9 Fonction de base
- 10 Moyen libre
- 11 Outil d'analyse
- 12 Sans interaction
- 13 Sonde des profondeurs
- 14 Il a sûrement un grain !
- 15 Modèle diffusant
- 16 Rayonnement primordial

SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM

