

L'ignition : un pas décisif pour la fusion

Sébastien LE PAPE

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, École polytechnique - Institut Polytechnique de Paris, CEA, Sorbonne Université, 91128 Palaiseau cedex, France

<https://doi.org/10.1051/photon/202211716>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Cinquante ans après la première publication de John Nuckolls décrivant le principe de la Fusion par Confinement Inertiel à l'aide de lasers de puissance, l'ignition a été atteinte sur le National Ignition Facility (NIF) au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Dans la nuit du 5 décembre 2022, des réactions de fusion ont dégagé 3,15 MJ d'énergie nucléaire, pour 2,05 MJ d'énergie laser, soit un gain de l'ordre de 150 %.

L'énergie libérée dans une réaction de fusion est directement reliée à la différence de masse entre les atomes fusionnant - deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium - et le produit de cette fusion - un atome d'hélium et un neutron - conformément à la formule d'Albert Einstein $E=mc^2$.

Produire ces réactions de fusion est un vrai défi car les noyaux doivent vaincre une répulsion naturelle due à leurs charges toutes deux positives. Pour contrer cette répulsion, il faut apporter au milieu fusible une quantité d'énergie élevée en le chauffant à des températures extrêmes, de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius. Si l'on veut que l'énergie dégagée par les réactions de fusion soit supérieure à l'énergie investie pour les initier, il faut que la quantité de neutrons produits soit suffisante ; un critère établi par John Lawson dit que le produit entre la densité du milieu et la durée durant laquelle les noyaux restent proches (temps de confinement) doit alors être le plus grand possible. Dans le cas de la Fusion par Confinement Inertiel, avec des temps de confinement assez courts, de l'ordre de 0,1 milliardièmes de secondes, la densité du milieu doit être de l'ordre de mille fois la densité du solide.

Pour atteindre ces conditions, un grand nombre de faisceaux laser irradient les parois internes d'un cylindre en or/uranium appauvri d'un centimètre de longueur et, en les chauffant, transforment ces parois en plasmas émetteurs de rayonnement X. Ces rayons X implosent alors de manière sphérique une capsule de diamant, d'environ 2 millimètres de diamètre, par effet fusée, à une vitesse avoisinant les 400 km/s. Le milieu fusible deutérium-tritium contenu dans la capsule est comprimé et, en son centre, porté à la bonne température.

Les premières expériences sur le NIF, de 2009 à 2012, n'ont pas été concluantes, avec un dégagement d'énergie neutronique de seulement quelques kJ. Les faibles performances de ces implosions furent alors imputées à la présence d'instabilités hydrodynamiques, liées à des non-uniformités d'irradiation, agissant comme des glaçons dans un bol d'eau chaude, refroidissant le point chaud et empêchant de fait un grand nombre de réactions de fusion de se produire. Une fois ce problème identifié, des modifications

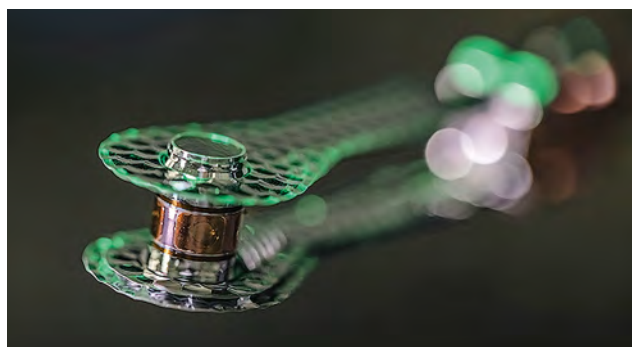


Figure 1 : Cible tirée sur le NIF. © National Ignition Facility

apportées à la forme temporelle de l'impulsion laser ont permis de multiplier par 10 les performances de ces implosions (2013-2016). Les années suivantes (2017-2019), avec l'avènement des capsules en diamant remplaçant les capsules en plastique utilisées au préalable, ont vu le rendement du four à rayons X et la symétrie de l'implosion grandement améliorés, ce qui a, à peu de choses près, permis de définir la cible actuelle. Néanmoins ces implosions souffraient encore d'un refroidissement intempestif du point chaud, dû non plus à la croissance d'instabilités hydrodynamiques mais à la qualité de fabrication des capsules en diamant. La présence de cavités de taille micronique à l'intérieur de leur paroi a ainsi pendant longtemps réduit la performance des implosions en induisant l'injection dans le point chaud d'éléments non fusibles ou froids.

Un capillaire en verre de 10 microns de diamètre, servant à remplir la capsule avec le combustible Deutérium-Tritium (DT), était également à l'origine d'un mélange néfaste ; en réduisant sa taille de 10 à 5 puis 2 microns de diamètre, la masse de carbone ou de DT froid injecté lors de l'implosion a été réduite, conduisant aux performances actuelles.

Ces 13 années de recherches sur le NIF ont donc permis d'atteindre l'ignition en alliant compréhension des phénomènes physiques dégradant les performances (instabilités hydrodynamiques, interaction laser-plasma, symétrie de l'implosion) et amélioration de l'ingénierie de l'ensemble cible/laser (augmentation de l'énergie laser et contrôle de sa mise en forme temporelle, capsule en diamant, capillaire en verre).

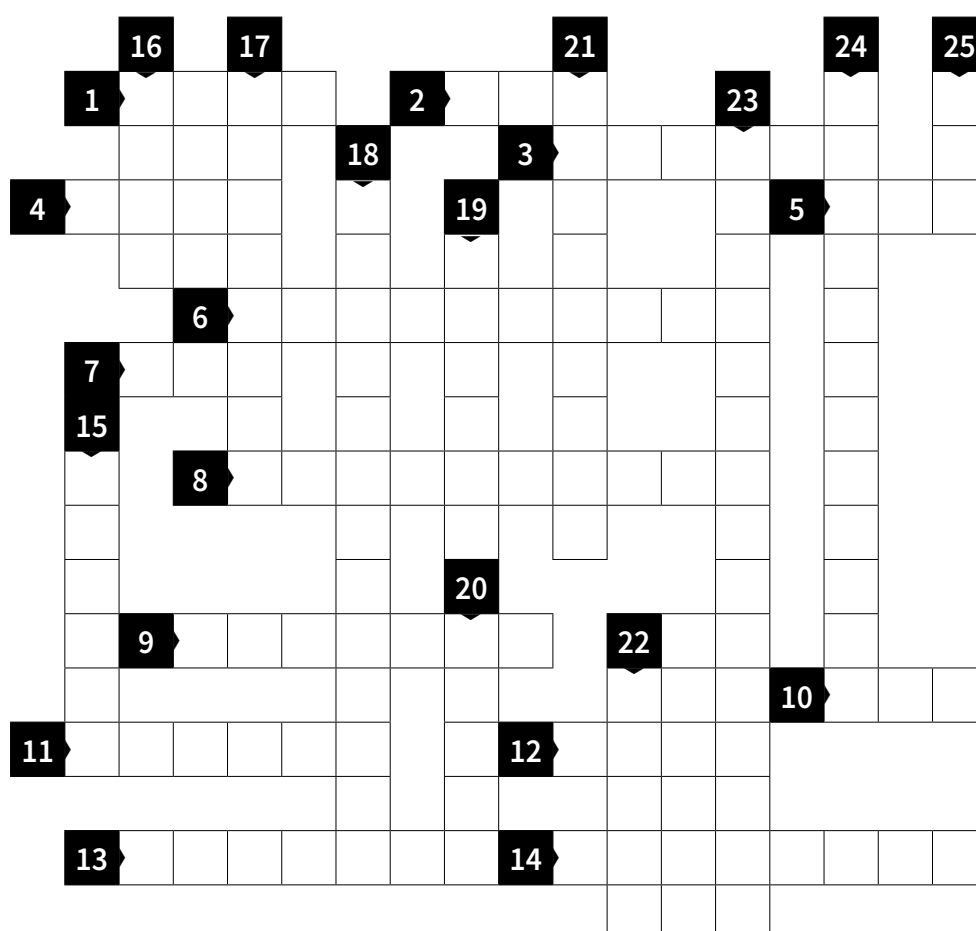
Le NIF est une installation laser conçue initialement pour des applications défense, tout comme le Laser Mégajoule à Bordeaux. Pour

envisager la fusion comme source d'énergie viable, de nombreux points d'ingénierie restent à résoudre : augmenter la cadence de tir des lasers pour atteindre 10-15 tirs par seconde, réduire le coût des cibles utilisées, réfléchir avec la communauté de la fusion par confinement magnétique aux problèmes de résistance des matériaux

dans ces environnements extrêmes et enfin augmenter de manière significative l'énergie de fusion générée par chaque implosion (à environ 100 fois l'énergie laser pour que le processus soit rentable). Atteindre l'ignition n'est que la première étape sur la longue route vers la fusion pour l'énergie, mais il s'agit une étape cruciale. ●

MOTS CROISÉS SUR LE THÈME DE L'ASTROPHOTONIQUE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Technologie pour détecteurs et capteurs | 14 | Couple satellitaire |
| 2 | Opère à Pasadena ... et dans l'espace | 15 | Mesure le bruit ambiant... de l'univers |
| 3 | Peut être aussi adaptative | 16 | Opérateur spatial français |
| 4 | Un œil à quelques millions de kilomètres | 17 | Qualifie une station alternative et périodique |
| 5 | Grand Photonicien Spatial ! | 18 | Cacher ce disque que je ne saurais voir |
| 6 | Peut qualifier une enfance atmosphérique agitée | 19 | Astronome américain... télescopique |
| 7 | Prend le problème sous le bon angle | 20 | Les Piliers de la Création en est une célèbre |
| 8 | Vivier de sœurs jumelles pour la Terre | 21 | Pionnier de l'imagerie électronique |
| 9 | Monde lointain | 22 | Optical Payload for Lasercomm Science |
| 10 | Fenêtre pour observer | 23 | Technique spatialisée avec LISA |
| 11 | Configuration télescopique | 24 | Découpage d'image par région d'intérêt |
| 12 | Les surfeurs sur site n'échappent pas à son objectif | 25 | Orbite à 400 km au-dessus de nos têtes |
| 13 | Œil de poisson dans l'espace | | |