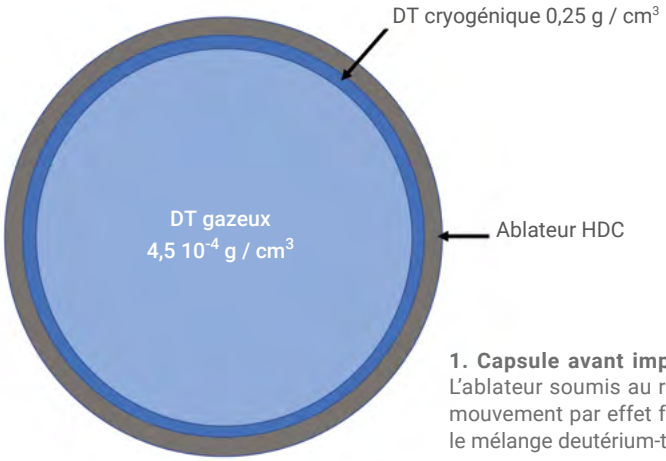
Une étape sur la voie de la fusion nucléaire par laser

Jean-Louis Bobin (jeanlouisbobin741@gmail.com)
LULI/LAPD Sorbonne Universités, tour 23, étage 4, casier 128, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

Fin 2022, pour la première fois dans une expérience de fusion nucléaire contrôlée, on a franchi un seuil de parité énergétique. C'était un évènement espéré de longue date par les chercheurs du domaine, qui a été reproduit depuis à plusieurs reprises et amélioré. Au-delà de ce résultat brut, ces expériences ont validé des concepts comme l'allumage d'un point chaud central et la propagation d'une onde de chaleur entretenue par la réaction thermonucléaire.



1. Capsule avant implosion (source LLNL). L'ablateur soumis au rayonnement est mis en mouvement par effet fusée afin de comprimer le mélange deutérium-tritium (DT).

Le 5 décembre 2022, au cours d'une expérience de fusion nucléaire menée auprès de la *National Ignition Facility* (NIF), laser de la classe Mégajoule implanté au laboratoire de Livermore (LLNL) en Californie, un seuil de parité énergétique (*scientific energy breakeven*) a été dépassé pour la première fois. Les chercheurs travaillant sur le confinement inertiel depuis la fin des années 1960 [1] s'étaient fixés cette marque de parcours : une énergie de fusion nucléaire supérieure ou égale à l'énergie lumineuse contenue dans le rayonnement laser irradiant une cible. Elle a été franchie avec 3,15 mégajoules (MJ) d'énergie de fusion obtenus à partir de 2,05 MJ d'énergie ultraviolette répartie en 192 faisceaux.

Ce résultat s'inscrit dans la déjà longue histoire des recherches sur la fusion nucléaire contrôlée. Celles-ci empruntent deux itinéraires principaux bien distincts mais qui ont en commun la température à laquelle un mélange deutérium-tritium (DT) doit réagir : 10^8 K (10 keV). Dans ces conditions, le milieu réactif est un plasma complètement ionisé. En confinement magnétique, la densité est très basse : 10^{20} particules/m^3. Ce plasma est isolé de toute paroi par un champ magnétique dans une configuration qui permet un régime quasi continu. Telle est la voie suivie par le projet ITER [2], entre autres.

Dans le confinement inertiel, idéalement, une boule de quelques dizaines de microgrammes de combustible DT est comprimée de façon adiabatique, en des temps qui se comptent en nanosecondes, jusqu'à obtenir des conditions de densité (10^4 fois le liquide) et de température (10 keV) propres à amorcer une réaction thermonucléaire explosive qui libérera son énergie avant la dislocation du système. Par la densité de flux d'énergie qu'il est possible d'atteindre en focalisant le faisceau, un laser impulsionnel est un outil bien adapté pour provoquer la succession des phases de compression, réaction et détente qui sont la transposition à la fusion nucléaire du fonctionnement bien connu des moteurs à combustion interne.

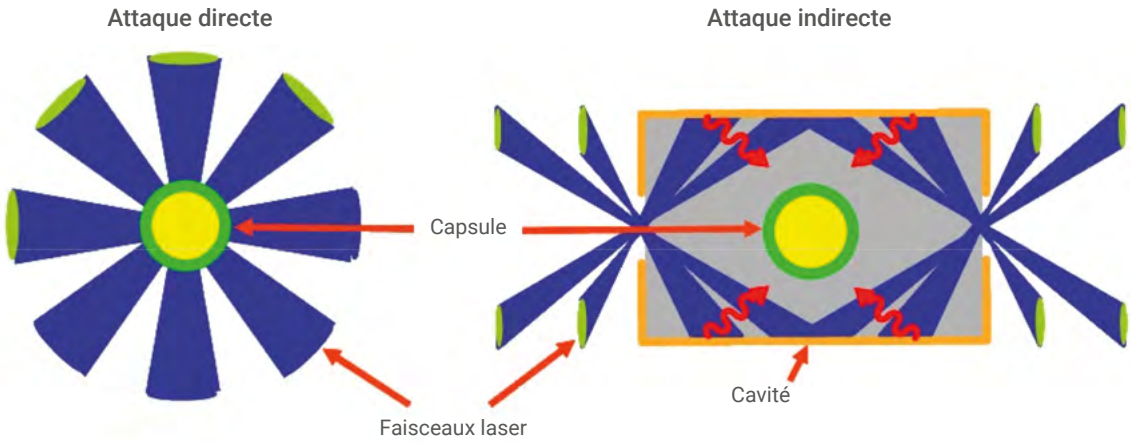
Confinement inertiel par laser

Le principe en est étudié depuis les années 1960 avec l'aide de simulations numériques, mais il n'est apparu dans la littérature scientifique ouverte qu'en 1972 [3]. Pour le mettre en œuvre, le laboratoire de Livermore a développé un programme de lasers à verre au néodyme de plus en plus puissants jusqu'à l'installation NIF mise en service en 2009 : 192 faisceaux en parallèle transportant une impulsion mise en forme et de durée 1 nanoseconde[(a)].

En 2022, il s'est produit une véritable avancée scientifique dont l'essentiel et plus encore les détails sont absents des communiqués officiels et des compte rendus de presse. Précédées par un article de 2022 sur un essai prometteur de 2021 [5], les publications scientifiques [6] parues depuis sont évidemment beaucoup plus riches en informations et révèlent, en plus de la simple parité énergétique, une indiscutable percée.

Au-delà de quelques dizaines de kilojoules et *a fortiori* au niveau de puissance atteint par NIF (> 3 000 térawatts), la cadence des tirs laser est faible : un par jour, plutôt la nuit, et encore, pas tous les jours. Les capsules

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683022



2. Irradiation d'une cible en modes direct (à gauche) et indirect (à droite) : dans ce dernier cas, à la suite de l'impact des faisceaux laser sur sa face interne, la cavité est remplie de rayonnement thermique à une température de plusieurs millions de degrés. Le diamètre des capsules sphériques est inférieur ou égal à 2 mm. Source CEA.

contenant le DT sont des objets de structure assez complexe (figure 1) pour leur petite taille et requièrent des matériaux rares comme le diamant dopé au tungstène (HDC pour *high density carbon*) mis en œuvre à l'unité en Allemagne par la seule entreprise au monde capable de les produire. En conséquence, peu d'essais sont consacrés à un programme de fusion contrôlée. Ils sont fortement instrumentés de façon à extraire de chaque tir le maximum d'informations et d'enseignements.

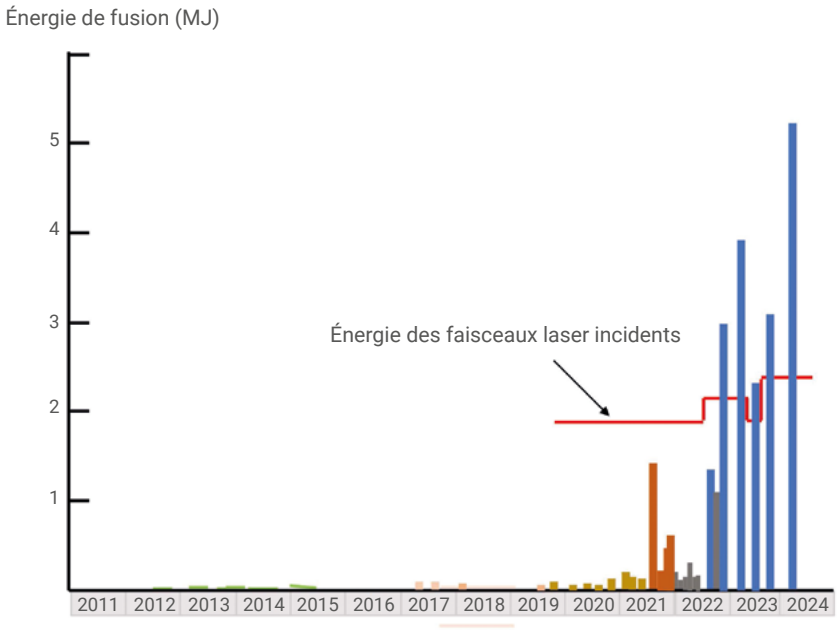
Les compressions de capsules à l'origine des récents succès ont été faites en mode indirect (figure 2) : les faisceaux laser à la longueur d'onde ultraviolette de 351 nm, obtenue par triplement de fréquence à partir de la radiation infrarouge du verre au néodyme, irradient la surface interne d'une cavité cylindrique et c'est le rayonnement secondaire émis par le plasma ainsi créé qui assure la compression. Le procédé a l'avantage de garantir l'uniformité d'éclairement de la surface de la capsule à imploser, mais cela au détriment du rendement global.

Il est en effet capital de préserver la symétrie sphérique de la capsule pendant toute la durée de la phase d'implosion. Or, la moindre irrégularité dans l'éclairement comme le moindre écart à la sphère dans les interfaces seraient sources d'instabilités hydrodynamiques détruisant cette symétrie et inhibant ainsi le processus thermonucléaire.

Des expériences significatives

La figure 3 montre un historique de l'énergie de fusion obtenue au cours de différentes expériences effectuées en mode indirect depuis 2011. Pour obtenir le saut quantitatif amorcé en 2021, le travail d'optimisation a porté d'une part sur la forme temporelle des impulsions laser et d'autre part sur le dessin des cibles. La structure complexe et le choix des matériaux de ces dernières doivent favoriser le transfert d'énergie vers la poussée qui produira la compression tout en minimisant les causes d'instabilités nuisant à cette même compression. L'augmentation, obtenue entre 2021 et 2024, de l'énergie libérée montre toute l'importance de l'optimisation de l'architecture des cibles qui, mieux que la légère variation de l'énergie laser, fait la différence.

Les résultats obtenus à partir du 5 décembre 2022 sont significatifs [6]. Ils apportent la preuve que dans une petite partie de la masse de DT comprimée, l'énergie libérée par les réactions nucléaires a permis l'emballement local de celles-ci, avec l'allumage d'un point chaud. Les derniers résultats (voir >>>



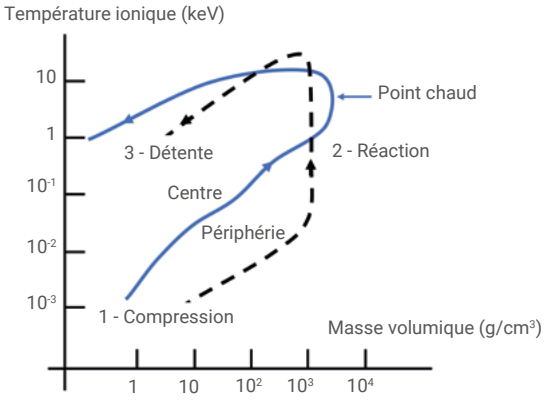
3. Historique des expériences de fusion inertielle menées auprès de NIF jusqu'aux premières ignitions. Les couleurs des barres d'histogramme correspondent à différentes architectures de cible. D'après Mark Herrmann (LLNL) et Physics Today.

>>>

tableau 1), qui font état d'un gain en énergie de l'ordre de 4, montrent que l'inflammation s'est propagée au-delà du foyer initial sous la forme d'une onde de chaleur entretenue par la réaction.

Ainsi a-t-on commencé à détecter des effets qui jusque-là avaient été observés uniquement dans les simulations numériques. Les codes des premières années 1970 [7] permettaient de calculer les trajectoires thermodynamiques attendues du centre et de la périphérie de la boule comprimée (figure 4) dans une configuration simple : sphère de DT initialement à l'état solide attaquée directement par le rayonnement laser. Cette évolution vers l'allumage du processus thermonucléaire vaut aussi pour des capsules structurées et une attaque indirecte. Les récentes expériences ont fait suivre au centre et à son voisinage proche des trajectoires thermodynamiques semblables à celles de ces anciennes simulations.

L'étape suivante est que l'allumage de point chaud, que l'on pourrait qualifier de « proto ignition », se propage à une fraction importante du combustible ce qui, toutes choses égales par ailleurs, décuplerait au moins l'énergie libérée par la fusion et validerait définitivement le principe du confinement inertiel. L'essentiel pour y parvenir sera de maitriser encore mieux les instabilités qui déforment la sphère au cours du processus de compression.



4. Trajectoires thermodynamiques de compression, réaction, détente, calculées en 1972 à Livermore au moyen du code LASNEX, au centre et à la périphérie d'une sphère de DT. La brutale montée en température de la couche externe est due à l'arrivée d'une onde de chaleur issue du point chaud central et entretenue par la réaction thermonucléaire.

Perspectives

Était-il justifié que Jennifer M. Granholm, ministre en charge du Département de l'Énergie (DOE) des États-Unis d'Amérique, annonce *urbi et orbi* le 13 décembre 2022, au cours d'une conférence de presse retransmise sur la toile, le résultat obtenu quelques jours auparavant ? Plutôt non, si l'on s'en tient au seuil de parité énergétique, marque de parcours à l'intérêt scientifique limité, mais parlante pour le grand public et les décideurs politiques. Mais plutôt oui, car il a été prouvé que lors de ce premier succès conforté par les essais suivants, un allumage (*ignition*) de la réaction thermonucléaire s'est effectivement produit et qu'une onde de chaleur a commencé à se propager.

L'avenir dira si l'évènement du 5 décembre 2022, reproduit et amélioré en 2023, 2024 et 2025, peut être considéré comme le pendant, pour la fusion thermonucléaire par la voie inertielle, du 2 décembre 1942 date de la première réaction en chaine de fission obtenue sous la direction d'Enrico Fermi. Au-delà de ces succès, cette voie vers la fusion nucléaire contrôlée en est toujours au stade des recherches, loin d'un développement conduisant à une production d'électricité commercialisable.

Cependant, on vient d'assister au lancement récent de quelques « start-ups » visant explicitement la commercialisation de réacteurs à fusion, qu'ils soient à confinement magnétique ou inertiel. Dans le domaine inertiel, First Light Fusion [8] au Royaume Uni ou GenF [9] en France sont soutenus l'une par le gouvernement britannique, l'autre par le CEA et Thales. Si leur démarche peut paraitre encore prématurée au vu de l'état de la science, elles sont le signe d'une belle vitalité en mettant, à temps complet, des équipes jeunes et dynamiques sur le chemin escarpé de la fusion thermonucléaire par confinement intertiel. ▮

1• G. Velarde and N. Carpintero Santamaria, *Inertial Confinement Fusion : A Historical Approach by Its Pioneers* (ICF : HAP), Foxwell and Davies, (2007) ; Jean-Louis Bobin, *Insaisissable Graal, la fusion thermonucléaire par laser au temps des pionniers (1962-1975)*, EDP-Sciences (2023).

2• J. Jacquinot, *Reflets de la Physique* **32** (2013) 19

3• J.H. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen, G. Zimmerman, *Nature* **239** (1972) 139

4• S. Liberatore *et al.*, *Phys. Plasmas* **30** (2023)122707

5• H. Abu-Shawareb *et al.*, (Indirect Drive ICF Collaboration), *Physical Review Letters* **129** (2022) 075001

6• H. Abu-Shawareb *et al.*, (Indirect Drive ICF Collaboration[(b)]). *Physical Review Letters* **132** (2024) 065102; O.A. Hurricane *et al.*, *Physical Review Letters* **132** (2024) 065103.

7• J.H. Nuckolls, in *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, H.J. Schwarz, H. Hora, ed. vol. 3B (1973) 399

8• https://firstlightfusion.com/

9• https://genf-systems.com/fr/

	2022	2023			2024		2025	
Énergie laser (MJ)	2,05	2,05	1,9	2,2	2,2	2,2	2,05	2,2
Énergie de fusion (MJ)	3,15	3,88	2,4	3,4	5,2	4	5	8,4
Gain	1,5	1,9	1,3	1,5	2,4	1,8	2,4	3,8

Tableau 1. Tableau des *ignitions* montrant l'évolution du gain au cours des essais successifs.

(a) De conception voisine, le laser mégajoule (LMJ) exploité par la Direction des Applications Militaires du CEA n'atteindra les mêmes niveaux de performances qu'après 2027. Cependant, des résultats significatifs en matière de fusion inertielle y ont déjà été obtenus [4].

(b) Plus de 1000 coauteurs classés par ordre alphabétique.