

Progrès marquants dans la compréhension de la fusion par confinement inertiel en attaque directe

S. LAFFITE - B. CANAUD - V. BRANDON - J.-L. BOURGADE - T. CAILLAUD - F. GIRARD - O. LANDOAS - S. LEMAIRE - L. MASSE - P. E. MASSON-LABORDE - F. PHILIPPE - C. REVERDIN - V. TASSIN / CEA – DAM Île-de-France
 G. LEGAY / CEA – Valduc
 M. TEMPORAL / ENS Cachan
 J. DELETTREZ - V. GLEBOV - T. MICHEL - W. SEKA / Laboratory for Laser Energetics, Rochester, États-Unis

Des progrès marquants dans la connaissance de la physique de l'implosion des cibles laser ont été récemment enregistrés grâce à des études complémentaires, expérimentales et numériques. D'une part, une campagne expérimentale dédiée à l'étude de l'implosion, sur le laser Omega à Rochester, a permis de prouver notre capacité à maîtriser une implosion ablative. D'autre part, la recherche systématique de points de fonctionnement à haut gain, par des simulations sur des familles de cibles, a permis de préciser les conditions d'inflammation.

La fusion par confinement inertiel consiste à comprimer fortement une capsule millimétrique en plastique contenant un mélange de deutérium et de tritium (DT). Si la compression est suffisante et si les instabilités ne dégradent pas trop la capsule, les atomes de deutérium et de tritium fusionnent, produisant une énergie importante. Deux voies sont suivies à l'heure actuelle pour mettre en condition le DT. Soit on comprime directement la capsule par des faisceaux laser disposés le plus symétriquement possible : c'est l'attaque directe ; soit on utilise les faisceaux laser pour chauffer une cavité en or qui va produire suffisamment de rayons X pour comprimer la capsule en son centre : c'est l'attaque indirecte.

Des progrès notables en attaque directe ont été réalisés dans l'installation laser Omega à Rochester, aux États-Unis. En particulier une expérience, pilotée par le CEA et intitulée Chronomix, a permis de tester la stabilité de l'implosion vis-à-vis de sa résistance à tous types de défauts, générés soit par l'illumination laser, soit par la cible [1]. La **figure 1** compare le « bang-time » (instant d'émission neutronique) prévu par les modèles théoriques avec celui effectivement mesuré pour différentes conditions. On peut constater le très bon accord et donc le haut niveau de prédictibilité de l'implosion caractéristique de l'attaque directe.

La maîtrise de la chronométrie des implosions étudiées lors de la campagne Chronomix se vérifie quelle que soit la forme de l'impulsion. En revanche,

la stabilité de l'implosion dépend clairement de la forme de l'impulsion.

Une impulsion courte, parce qu'elle dépose plus d'entropie dans la coquille, conduit à des configurations stables. Les performances mesurées de la cible, en premier lieu la production neutronique, sont alors très proches, 80 % environ, de la prévision. À l'inverse, pour une impulsion laser mise

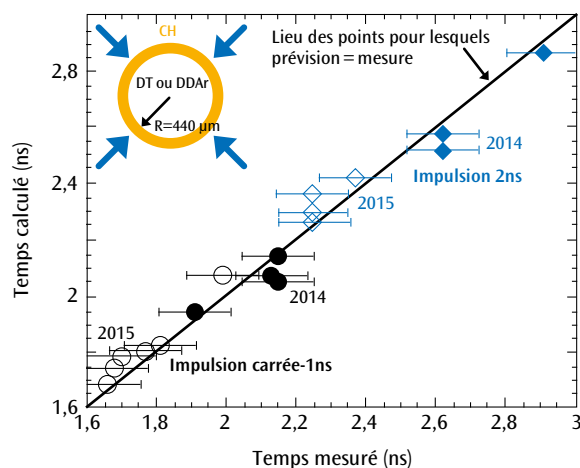


Figure 1. Instants d'émission neutronique, ou « bang-time », calculés en fonction des « bang-time » mesurés, pour des impulsions carrées de 1 ns et 26 kJ (cercles foncés et clairs) et pour des impulsions mises en forme, de 1,5 ns ou 2 ns (11 ou 23 kJ) (losanges foncés et clairs). Le « bang-time » est la mesure la plus directe de la vitesse d'implosion. L'excellent accord entre la prédiction et la mesure prouve la bonne maîtrise d'une implosion ablative à cette échelle.

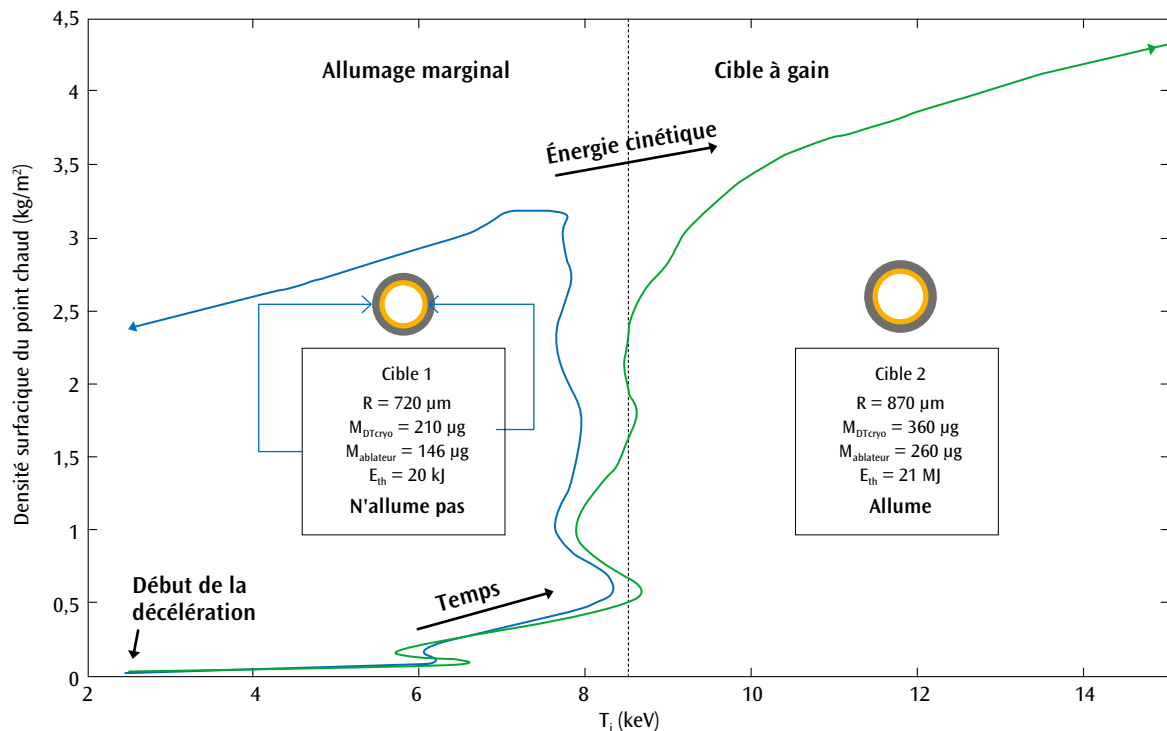


Figure 2. Densité surfacique du point chaud ρ , en fonction de la température du point chaud T_i , montrant les chemins thermodynamiques dans le plan (T_i, ρ) pour deux cibles homothétiques correspondant à un rapport d'aspect initial $A=3$ et une vitesse d'implosion $v=300$ km/s. Une des cibles ne va pas allumer tandis que l'autre, pourtant très voisine au démarrage, va brûler : à gauche, la cible la plus petite (rayon $R=720$ μm) avec 146 μg de matériau ablateur (en gris sur le schéma de la cible) et 210 μg de deutérium-tritium cryogénique (en orange) ne parvient pas à s'allumer, tandis que l'autre, pourtant très voisine au démarrage (respectivement 870 μm , 260 μg et 360 μg), va brûler et donner 21 MJ d'énergie thermonucléaire contre 20 kJ pour celle de gauche.

en forme, plus longue, la configuration devient plus instable et les performances calculées trop optimistes. Le nombre de neutrons mesuré ne représente plus alors que 25 % de la prédiction.

Toute la question est d'arriver à allumer les réactions de fusion, à partir d'un point chaud, de manière à produire plus d'énergie que ce que l'on a investi (notion de gain). Or, l'allumage du point chaud est un mécanisme à seuil qui dépend de l'inverse de la vitesse d'implosion à la puissance dix, du paramètre d'entropie (coefficient adiabatique) au cube, du carré du rapport des pressions dans le combustible froid et le point chaud, et enfin des conditions d'inflammation du point chaud (dépendant elles-mêmes de la température du point chaud et de sa densité surfacique) au cube. Une étude systématique [2], basée sur des calculs à partir de familles de cibles homothétiques et de différents rapports d'aspect, a permis de préciser ces paramètres et de bien distinguer les différentes conditions d'allumage. Le chemin thermodynamique parcouru par le point chaud durant la phase de décélération a été étudié en détail au cours du temps pour toutes ces cibles [3] (figure 2). Il apparaît clairement une séparation entre les cibles allumant marginalement et les cibles à gain, pour une même famille homothétique définie par sa vitesse d'implosion.

En conclusion, ces études complémentaires, expérimentales et numériques ont permis des progrès marquants dans la connaissance de la physique de l'implosion. D'une part, le choix d'une campagne spécifique dédiée à l'étude de l'implosion a permis de prouver notre capacité à maîtriser une implosion ablative à l'échelle Omega. D'autre part, la recherche systématique de points de fonctionnement à haut gain, entreprise depuis plusieurs années, a fourni un éclairage prometteur sur le fonctionnement d'une cible et notamment sur les conditions d'inflammation du point chaud. Ces deux études s'inscrivent dans la stratégie pour l'implosion de cibles sur le LMJ dont elles constituent un des éléments du programme.

Références

- [1] S. LAFFITE *et al.*, "Time history prediction of direct-drive implosions on the Omega facility", *Phys. Plasmas*, **23**, 012706 (2016).
- [2] V. BRANDON, B. CANAUD, M. TEMPORAL, R. RAMIS, "Low initial aspect-ratio direct-drive target designs for shock- or self-ignition in the context of the laser Megajoule", *Nucl. Fusion*, **54**, 083016 (2014).
- [3] V. BRANDON, B. CANAUD, M. TEMPORAL, R. RAMIS, "Thermodynamic properties of thermonuclear fuel in inertial confinement fusion", *Laser & Particle Beams*, **34**, p. 539-544 (2016).