

UN NOUVEAU PROCÉDÉ D'ALLUMAGE POUR LA FUSION INERTIELLE PAR LASER

G. SCHURTZ, X. RIBEYRE, M. LAFON

CENTRE LASERS INTENSES ET APPLICATIONS (CELIA), UMR 5107 UNIVERSITE DE BORDEAUX 1, CNRS ET CEA - CESTA

Parmi les différentes voies qui sont suivies dans le but d'obtenir la fusion thermonucléaire par confinement inertiel (FCI), celle de l'allumage par chocs est particulièrement bien adaptée aux exigences d'un futur réacteur. Cette approche est développée au laboratoire CELIA, avec des premiers résultats prometteurs.



La recherche dans le domaine de la FCI est motivée par des objectifs propres à la Défense, mais aussi par le projet de produire un jour de l'électricité d'origine thermonucléaire à l'échelle industrielle. Au-delà de la démonstration prochaine de gains thermonucléaires de plusieurs dizaines d'unités par les installations NIF (*États-Unis*) et LMJ (*France*), la communauté scientifique vise à présent à définir ce que serait un futur réacteur expérimental. L'exigence de hauts gains, obtenus à des cadences de tir de quelques Hz, conduit à privilégier la compression du combustible par irradiation directe (*par opposition à l'attaque indirecte où on utilise le rayonnement thermique produit dans une cavité*). Or, l'attaque directe supporte mal les vitesses d'implosion élevées indispensables à l'allumage spontané par point chaud central. La mise au point de procédés d'allumage de cibles implosées à basse vitesse est donc essentielle pour la faisabilité de la fusion inertielle pour l'énergie. L'allumage rapide au moyen d'un laser de classe Petawatt [1] est un de ces procédés. Un schéma alternatif d'allumage purement hydrodynamique est actuellement considéré comme également prometteur : c'est l'allumage par chocs, proposé par Betti *et al.* [2].

Principe de l'allumage par chocs

Une cible implosée à basse vitesse est stable, mais ne s'allume pas spontanément, faute d'une pression suffisante en son centre en fin de compression. Un moyen d'augmenter sélectivement la pression au point chaud est de lancer un choc convergent dans la cible, peu avant l'instant de stagnation. En effet, la pression d'un tel choc augmente à mesure qu'il converge, pratiquement de manière inversement proportionnelle au rayon. Lorsque le choc convergent entre en collision avec le choc divergent qui résulte de la stagnation des couches centrales, la pression s'accroît brutalement, jusqu'à un facteur 6 dans les conditions optimales. Cette surpression est transmise au point chaud et porte ce dernier aux conditions d'allumage. L'impulsion laser qui engendre un tel choc doit comporter un pic final de forte puissance (*figure 1*).

Allumage par chocs à basse énergie : la cible de base du projet HiPER

Le projet européen HiPER (High Power laser Energy Research facility) a pour objet de démontrer la faisabilité de la fusion inertielle pour l'énergie. Il s'articule autour d'une cible de base, constituée de 0,6 mg d'un mélange équimolaire de deutérium-tritium (DT) et implosée au moyen d'une impulsion laser nanoseconde de 180 kJ [3]. Nous avons réalisé une série de simulations hydrodynamiques d'implosion et d'allumage de cette cible en faisant varier la puissance et l'instant d'envoi du choc. Les résultats de cette étude sont présentés sur la *figure 2*, où nous pouvons observer que l'allumage se produit à partir d'une puissance laser absorbée de 50 TW, sous réserve d'une parfaite chronométrie. À mesure que la puissance transmise à la cible augmente, l'intervalle temporel à l'intérieur duquel l'impulsion d'allumage peut être déclenchée s'élargit. Pour 80 TW absorbés (160 TW, 64 kJ incidents), nous constatons qu'une énergie thermonucléaire supérieure à 18 MJ est obtenue pour une fenêtre temporelle large de 250 ps. Dans ce cas, l'énergie laser totale est 244 kJ, ce qui porte le gain de cette cible à 80.

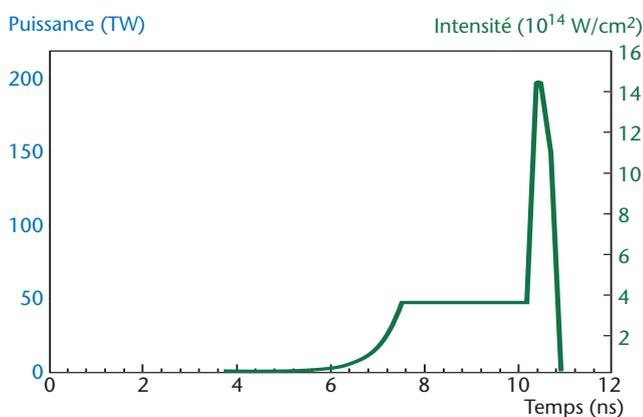


Figure 1
Mise en forme temporelle de l'impulsion laser requise pour l'allumage par choc.

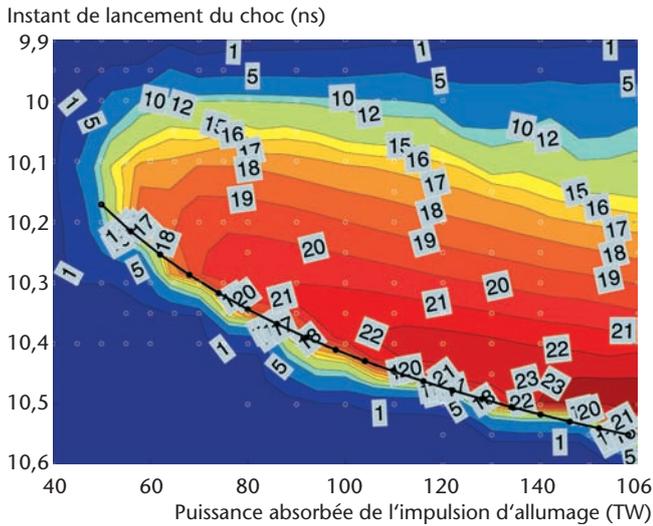


Figure 2 Iso-énergie thermonucléaire (indiquée en MJ dans les carrés gris) en fonction de l'instant de lancement du choc et de la puissance de l'impulsion d'allumage.

Différents effets limitatifs, comme les instabilités de rétro-diffusion et la production d'électrons suprathermiques, ont été analysés, et ne semblent pas présenter de risque majeur [4]. En particulier, le gain de cible apparaît peu sensible aux défauts d'uniformité du pic d'allumage, y compris dans le cas limite d'une irradiation bipolaire. Par ailleurs, l'instabilité de *Rayleigh-Taylor* qui se développe à la stagnation est remarquablement modérée par le choc, dont le transit à l'interface du point chaud provoque une inversion partielle des perturbations. La simulation perturbée présentée sur la figure 3 prédit un rendement thermonucléaire identique à celle du cas parfaitement symétrique.

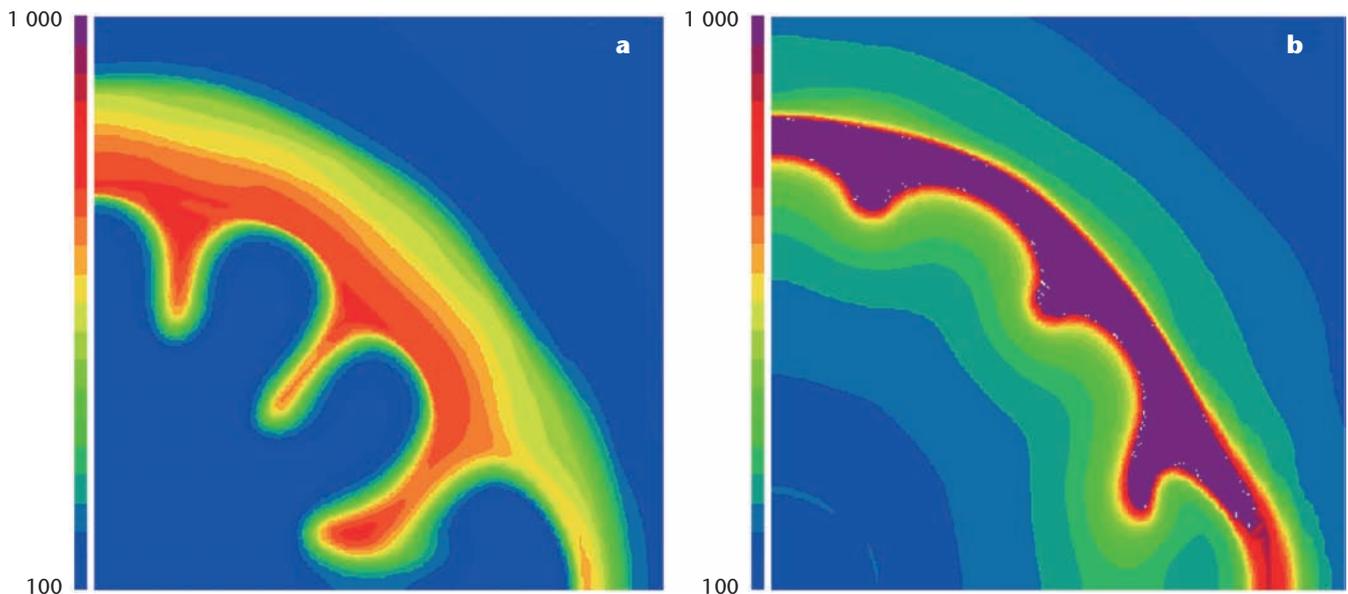


Figure 3 Iso-densité du combustible ($g.cm^{-3}$) lors de la stagnation, pour une implosion perturbée selon le mode de Legendre $l = 12$ (code CHIC - CELIA).

Conclusion

Ces premières études soulignent les potentialités du procédé d'allumage par chocs. Ce procédé permet d'espérer des gains élevés avec une sécurité hydrodynamique accrue. Il est singulièrement tolérant à l'instabilité de *Rayleigh-Taylor* au point chaud et s'accommode de conditions d'irradiations peu symétriques. La base physique de l'allumage par choc est l'hydrodynamique induite par laser, domaine pour lequel la communauté scientifique dispose de codes validés. Les cibles allumées par choc sont simples, et, par comparaison aux cibles d'attaque indirecte ou aux cibles d'allumage rapide avec cône de conversion, bien mieux adaptées à une production en masse et à une injection cadencée en chambre d'expérience, ce qui est un atout essentiel pour *HiPER*.

Références

[1] M. TABAK *et al.*, "Ignition and high gain with ultra-powerful lasers", *Phys. Plasmas*, **1**, p. 1626-1634 (1994).
 [2] R. BETTI *et al.*, "Shock Ignition of Thermonuclear Fuel with High Areal Density", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 155001 (2007).
 [3] S. ARZENI *et al.*, "Targets for direct-drive fast ignition at total laser energy of 200–400 kJ", *Phys. Plasmas*, **14**, 052702 (2007).
 [4] X. RIBEYRE *et al.*, "Shock ignition: an alternative scheme for *HiPER*", *Plasmas Phys. Control. Fusion*, **51**, 015013 (2009).

a Sans choc d'allumage, la compression du point chaud est fortement dégradée sous l'effet de l'instabilité de *Rayleigh-Taylor*.
 b Assemblage final de la même cible soumise à un choc d'allumage.