

Cible d'ignition et instabilités laser-plasma

La prise en compte des effets néfastes générés par l'interaction laser-plasma dès la conception des cibles d'ignition est indispensable pour assurer le succès des premières expériences de fusion sur l'installation Laser Mégajoule (LMJ). Pour la première fois, à l'aide de lois d'échelle et de simulations hydrodynamique-radiatives, des cibles d'ignition en attaque indirecte ont été conçues avec le souci constant de contraindre le design afin de limiter les instabilités laser-plasma responsables de ces effets. L'amplification de ces instabilités est directement proportionnelle à l'éclairement laser, donc aux dimensions des taches focales. Nous montrons que l'augmentation de la surface des taches focales ne permet pas de réduire proportionnellement les gains d'amplifications linéaires car l'optimisation globale de la cible impose des compromis qui modifient les conditions hydrodynamiques, celles-ci intervenant directement dans le calcul du gain.

S. Laffite • P. Loiseau CEA - DAM Île-de-France

Le laser mégajoule (LMJ), en construction au Barp, près de Bordeaux, est un grand instrument de physique dédié au programme Simulation du CEA - DAM. Un des objectifs assigné à l'installation est de réussir la production d'énergie nucléaire dans une cible fusible, plusieurs fois supérieure à l'énergie investie – l'ignition – dans une géométrie d'irradiation appelée attaque indirecte. Dans ce schéma, le milieu fusible est contenu dans une bille de rayon millimétrique. Celle-ci est placée au centre d'une cavité longue d'un centimètre, dont les parois sont composées d'uranium et d'or, remplie d'un gaz composé d'hélium et d'hydrogène.

La réussite de l'ignition repose sur la maîtrise de la propagation des faisceaux laser dans le plasma chaud – c'est-à-dire des températures de l'ordre du keV – contenu dans la cavité. L'interaction des lasers avec le plasma génère des instabilités paramétriques, telles que les rétrodiffusions Raman et Brillouin stimulées, nuisant à la symétrie d'irradiation et diminuant l'énergie effectivement transmise aux parois, représentant un risque majeur d'échec.

Dans une étude publiée récemment [1], nous proposons une méthode de conception de cibles pour la fusion par confinement inertiel (FCI) en attaque indirecte sur le LMJ [2,3], avec la prise en compte des instabilités générées lors de l'interaction laser-plasma. La conception est réalisée en deux étapes. La première consiste à déterminer les pointés du laser, les lois de puissance, les dimensions de la cavité (ou *hohlraum*) et les matériaux

utilisés pour la paroi et pour le gaz interne, ceci afin d'assurer une bonne symétrie d'irradiation et une compression isentropique du combustible. La seconde étape est une phase d'optimisation afin de limiter le risque lié aux instabilités laser-plasma. Elle est réalisée *a posteriori via* des estimations des gains linéaires d'amplification des rétrodiffusions

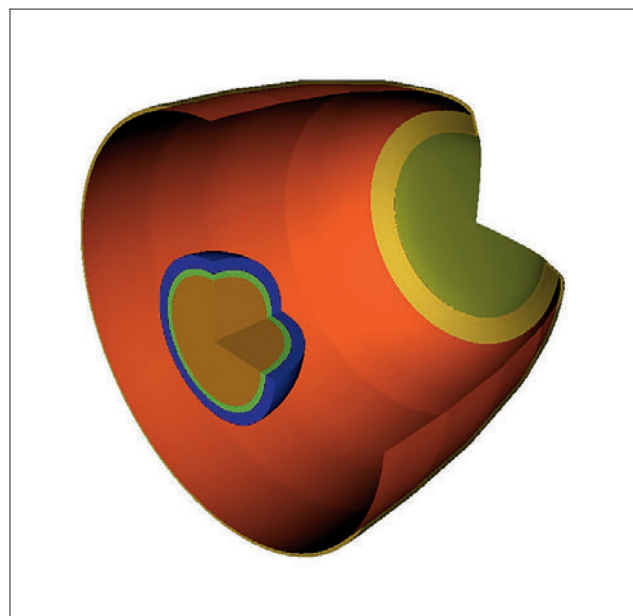


Figure 1. Schéma d'une demi-cavité de cible pour l'ignition. La paroi de la cavité, ici de forme rugby, est constituée d'un mélange U/Au, la capsule contenant le DT [solide et gazeux] est au centre.

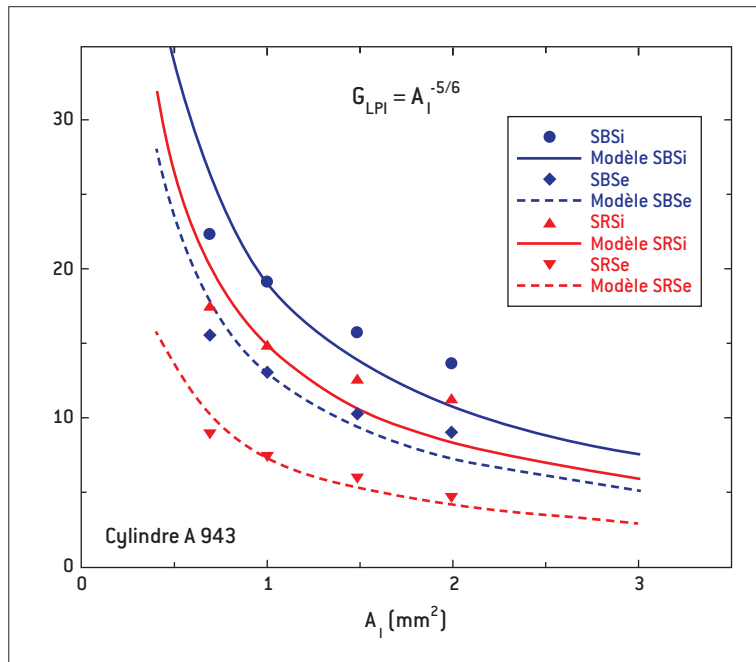


Figure 2. Gains linéaires Brillouin (SBS) et Raman (SRS) calculés le long des parcours internes (33,2°) et externes (49°) en fonction de la surface de la tache focale définie à 3% de l'intensité moyenne. Les points correspondent aux simulations et les lignes aux lois d'échelle, pour un hohlraum [ici de forme cylindrique].

Raman et Brillouin stimulées, ces deux phénomènes représentant le plus grand risque d'échec de l'ignition [4]. La diffusion Raman est la diffusion de l'onde laser sur les ondes plasmas électroniques, alors que la diffusion Brillouin correspond à celle sur les ondes acoustiques ioniques. Ces deux étapes sont réalisées pour chaque configuration envisagée, une configuration étant définie par la forme de la cavité, la capsule contenant le combustible et les performances laser étant figées.

La méthode que nous avons mise au point nous a permis de définir une configuration optimale avec une forme de cavité dite *rugby* [5] pour la capsule fusible de référence (figure 1). Les performances laser demandées, 260 TW et 0,9 MJ, permettent d'atteindre une température radiative de 300 eV dans l'enceinte contenant la cible, cette dernière dégageant 20 MJ d'énergie de fusion. L'estimation du risque lié aux instabilités laser-plasma est faite en calculant des gains d'amplifications linéaires le long du parcours des faisceaux. La configuration *rugby* (figure 1) se révèle particulièrement intéressante par rapport à un cylindre car elle minimise l'énergie laser nécessaire et maximise la symétrie d'irradiation pour un même risque lié aux instabilités paramétriques [5].

Nous avons aussi étudié dans quelle mesure l'augmentation de la surface des taches focales laser pouvait limiter le risque lié aux instabilités. Pour chaque surface considérée et pour chaque configuration

envisagée, une étape de conception a été faite. À l'aide de bilans d'énergie et de simulations, nous avons pu déterminer des lois d'échelle permettant d'estimer le gain d'amplification en fonction de la surface de la tache focale et de l'énergie laser. Il apparaît que le bénéfice attendu, lié à la réduction du gain par diminution de l'intensité moyenne, est non linéaire. En effet, augmenter la surface des taches focales implique des trous d'entrée laser plus importants ce qui se traduit entre autres par plus de pertes d'énergie correspondant au rayonnement X sortant de la cavité. Nous en déduisons ensuite une surface limite, acceptable en terme d'énergie investie, de l'ordre de 2 mm², à partir de laquelle le gain d'amplification atteint quasiment son asymptote (figure 2).

RÉFÉRENCES

- [1] S. LAFFITE, P. LOISEAU, "Design of an ignition target for the laser megajoule, mitigating parametric instabilities", *Phys. Plasmas*, **17**, 102704 (2010).
- [2] J. EBRARDT, J.-M. CHAPUT, "LMJ Project status", *J. Phys.: Conf. Ser.*, **112**, 032005 (2008).
- [3] C. CHERFILS *et al.*, "Progress on LMJ targets for ignition", *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **51**, 124018 (2009).
- [4] N. MEEZAN *et al.*, "Erratum: 'National Ignition Campaign Hohlraum energetics'", *Phys. Plasmas*, **17**, 109901 (2010).
- [5] M. VANDENBOOMGAERDE *et al.*, "Une cavité en forme de ballon de rugby pour le LMJ", *Chocs Avancées 2008*, p. 14-15 (2009).