

Expériences d'instabilités laser-plasma sur la LIL

C. ROUSSEAU - G. HUSER - M. CASANOVA - P. LOISEAU - E. ALOZY - B. VILLETTE - R. WROBEL / CEA – DAM Île-de-France
O. HENRY - D. RAFFESTIN / CEA – Cesta

Les instabilités provoquées dans le plasma lors de la propagation du quadruplet (4 faisceaux laser) de la Ligne d'intégration laser (LIL) ont été étudiées expérimentalement dans des plasmas millimétriques et chauds. En délivrant 15 kJ en 6 ns à une longueur d'onde de 0,35 μm dans des cavités remplies de gaz, ce quadruplet, prototype du Laser Mégajoule (LMJ), excite les instabilités de rétrodiffusion Raman et Brillouin jusqu'à des niveaux atteignant 30 % de l'énergie laser incidente. Ces expériences simulent au mieux l'interaction d'un quadruplet du LMJ pour les futures expériences d'implosion.

Dans le schéma d'implosion par attaque indirecte d'une cible de fusion par confinement inertiel, les faisceaux laser traversent plusieurs millimètres de plasma avant de convertir leur énergie en rayonnement X sur la paroi d'or de la cavité. Il convient donc d'optimiser cette conversion X en contrôlant le lieu de dépôt et en maximisant la puissance laser déposée. À forte intensité laser, la propagation devient instable à cause des instabilités paramétriques, parmi lesquelles les rétrodiffusions Raman et Brillouin stimulées. La diffusion Raman (resp. Brillouin) stimulée est le couplage d'ondes pour lequel le battement de l'onde laser avec sa propre diffusion sur les perturbations électroniques du plasma (resp. ioniques) est en phase avec ces mêmes perturbations, ce qui provoque une rétroaction instable. La perte d'énergie issue de ces rétrodiffusions n'est pas correctement prédite par les calculs actuels. Les expériences d'interaction sont donc indispensables et sensibles au détail de l'interaction propre à chaque couplage laser-plasma. Celles réalisées sur l'installation LIL montrent que ces aspects énergétiques ne sont pas négligeables, car jusqu'à 30 % de l'énergie laser incidente est réfléchiée par ces instabilités, entraînant une fraction d'énergie transmise insatisfaisante après 4 mm de propagation.

Le quadruplet de la LIL, regroupant 4 faisceaux élémentaires, était le prototype laser destiné à être reproduit en masse pour le laser LMJ. En délivrant des impulsions de 15 à 20 kJ dans l'ultraviolet (0,351 μm), ce laser était le plus énergétique d'Europe. Outre l'optimisation des performances laser, la LIL a permis de développer et tester les

diagnostics plasma conjointement aux expériences pour préparer les campagnes auprès du LMJ. Parmi celles-ci, la propagation d'une impulsion laser énergétique et longue, focalisée à l'aide de réseaux à travers un plasma chaud de plusieurs millimètres, était étudiée en fonction du type de lissage optique en usage sur la chaîne, le lissage optique visant à réduire la croissance des instabilités [1].

Pour produire un plasma long et homogène représentatif d'une expérience sur le LMJ, des tubes en or renfermant du gaz ont été utilisés (pentane C_5H_{12} à une atmosphère, produisant une densité électronique de 10^{21} cm^{-3} après ionisation). Le laser ne rencontre pas de plasma d'or, car celui-ci est confiné dans le tube par la pression cinétique du gaz chauffé. Deux longueurs ont été produites, 1,5 et 4 mm, de façon à observer macroscopiquement l'influence de la longueur d'homogénéité sur le développement des instabilités.

Les puissances réfléchies Raman et Brillouin sont collectées dans l'ouverture du quadruplet et analysées spectralement. L'évolution de l'hydrodynamique du plasma, donnée par le spectre Raman en fonction du temps, est en bon accord avec les calculs numériques. En plus de la transmission laser, des mesures d'énergie diffusée à grand angle et des puissances du flux X complètent le bilan énergétique du plasma. Celui-ci est éclairé par une impulsion laser de 6 ns qui se compose d'un palier de 3 ns à puissance réduite (1 TW) destiné à le préchauffer. L'interaction proprement dite a lieu à 4,5 TW pendant 2 ns, et la température électronique atteint 2,5 keV environ. Dans le lissage optique, l'influence du modulateur de phase à 14 GHz,

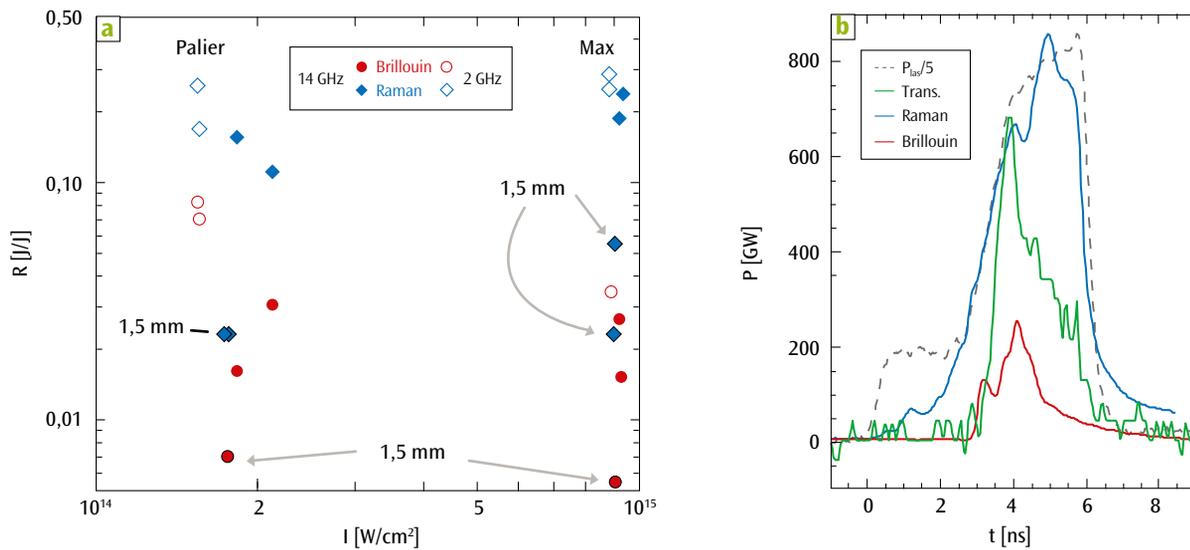


Figure 1.

Expériences en tubes gazeux de longueur 1,5 mm (indiqués sur la figure) ou 4 mm (sans indication) : (a) réflectivités R (rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie laser) Raman et Brillouin intégrées durant le palier de l'impulsion (vers $2 \cdot 10^{14}$ W/cm^2) et le maximum de l'impulsion. La réflectivité est minimale pour un lissage laser avec modulateur à 14 GHz (symboles pleins) plutôt qu'à 2 GHz (symboles vides). La baisse significative des instabilités dans les plasmas courts de 1,5 mm est remarquable ; (b) puissances laser incidente (divisée par 5), transmise, Raman et Brillouin mesurées dans l'ouverture du quadruplet, pour une cible de 4 mm.

qui réduit le temps de cohérence du laser inhérent à la croissance des instabilités, a été systématiquement testée au cours des expériences.

La **figure 1a** représente la réflectivité des instabilités en fonction de ce lissage, pour les tubes gazeux.

Sur cible de 4 mm, elle atteint 25-30 % au total, dont moins de 5 % de rétrodiffusion Brillouin. En réduisant cette longueur à 1,5 mm, la rétrodiffusion Raman chute très sensiblement autour de 5 % (moins de 1 % de Brillouin est mesuré), ce qui montre qu'elle est excitée sur toute la longueur du plasma, une évidence qui s'est aussi manifestée sur le laser américain NIF [2]. Un exemple de relevé en plasma long des puissances laser, Raman, Brillouin et transmission est donné sur la **figure 1b**. La réflectivité Raman est prépondérante (20 %) durant les 2 ns où la puissance laser est maximale, à l'inverse du Brillouin qui s'écroule bien avant la fin de l'impulsion, ce qui est cohérent avec l'accroissement continu de la température ionique qui amortit cette instabilité. En revanche, la baisse brutale de la transmission laser bien avant la fin de l'impulsion n'est pas compatible avec la réduction attendue de l'absorption laser due à l'accroissement de la température électronique. De plus, la transmission, très faible durant les premières nanosecondes, atteint seulement 11 % de l'énergie laser incidente. En plasma court (1,5 mm), elle atteint 35 %, ce qui reste faible si l'on se réfère aux condi-

tions hydrodynamiques attendues. La transmission croît cependant rapidement avec la température électronique, qui sera plus élevée sur le LMJ.

Les diagnostics complets de la LIL ont permis d'établir le bilan énergétique de l'interaction en plasma long. L'hydrodynamique complexe du plasma est bien reproduite par les codes de simulation. Par ailleurs, les mesures simultanées des instabilités laser-plasma et de la transmission permettent d'améliorer les modèles de physique qui sont incorporés dans les codes numériques pour interpréter ces expériences.

Références

- [1] C. ROUSSEAU, G. HUSER, P. LOISEAU, M. CASANOVA, E. ALOZY, B. VILLETTE, R. WROBEL, O. HENRY, D. RAFFESTIN, "Laser parametric instability experiments of a 3ω , 15 kJ, 6-ns laser pulse in gas-filled hohlraums at the Ligne d'Intégration Laser facility", *Phys. Plasmas*, **22**, 022706 (2015).
- [2] R. P. J. TOWN, M. D. ROSEN, P. A. MICHEL, L. DIVOL, J. D. MOODY, G. A. KYRALA, M. B. SCHNEIDER, J. L. KLINE, C. A. THOMAS, J. L. MILOVICH *et al.*, "Analysis of the National Ignition Facility ignition hohlraum energetics experiments", *Phys. Plasmas*, **18**, 056302 (2011).