

MODÉLISATION DES INSTABILITÉS DANS LES PLASMAS DU FUTUR LMJ

P. LOISEAU, O. MORICE, D. TEYCHENNÉ, M. CASANOVA, S. HÜLLER*, D. PESME*
CEA - DAM - Île-de-France, *CNRS - CPT École polytechnique

La modélisation réaliste des instabilités paramétriques affectant la propagation des faisceaux lasers dans une cavité conçue pour le Laser Mégajoule (LMJ), en configuration d'attaque indirecte, constitue un défi majeur pour l'atteinte de l'ignition. La difficulté principale de cette modélisation réside dans le fait que le comportement de ces instabilités est sensible à de nombreux paramètres, en particulier à l'évolution hydrodynamique du plasma. La propagation du faisceau laser, en prenant en compte l'hydrodynamique complète du plasma et les instabilités, est réalisée via la plateforme HERA. Les premières études dans le cas d'un plasma inhomogène multidimensionnel ont mis en évidence une perte de cohérence des ondes transmises et rétrodiffusées, qui se traduit par un élargissement de l'ouverture de chacune de ces ondes.



Un des risques potentiels majeurs d'échec de l'attaque indirecte est la perte de contrôle de la propagation des faisceaux lasers pendant leur propagation dans la cavité. Cette perte est consécutive à l'apparition d'instabilités paramétriques, qui se développent au cours de la propagation d'un laser de forte puissance dans un plasma. Ces instabilités peuvent conduire à l'éclatement du faisceau incident, ou à des diffusions importantes du rayonnement, provoquant des défauts d'irradiation de la cible de DT et des pertes importantes d'énergie. Connus depuis longtemps, ces phénomènes sont un domaine actif d'études théoriques et expérimentales car il n'est pas encore possible de prévoir quantitativement leur degré de nuisance. Ces instabilités sont sensibles, non seulement aux grandeurs caractéristiques du plasma (*température, densité de matière, vitesse d'écoulement*), mais aussi aux gradients de ces grandeurs, à l'éclairement laser, et à l'évolution hydrodynamique du plasma. De plus, ces instabilités ont des temps de croissance de l'ordre de la picoseconde, des échelles spatiales de l'ordre du micron, alors que le laser possède un temps de cohérence de l'ordre de plusieurs picosecondes et que le plasma évolue sur plusieurs millimètres pendant plusieurs centaines de picosecondes.

L'apparition de codes d'interaction laser-matière simulant la propagation d'un faisceau laser réaliste dans des plasmas chauds de grandes dimensions [1] a ouvert la voie à une modélisation globale de l'ensemble de ces phénomènes.

En même temps, les techniques dites de lissage optique appliquées aux lasers de puissance se sont généralisées. Le lissage optique contrôle les formes spatiale et temporelle de la tache focale. Ainsi, les premiers codes d'interaction ont combiné la description du faisceau optiquement lissé et sa propagation dans un plasma homogène. Les premières études de propagation se sont cantonnées à la transmission propre du faisceau à travers le plasma. Elles ont montré que le lissage optique réduit les instabilités conduisant à l'éclatement du faisceau (*filamentation*), ou à sa contraction (*autofocalisation*). Mais ce n'est que récemment que des codes simulant, à la fois, la propagation, la rétrodiffusion, et l'évolution hydrodynamique du plasma ont vu le jour. Le code HERA [2], développé au CEA - DAM - Île-de-France, en est l'illustration. Nécessairement parallèle, du fait des différentes échelles spatio-temporelles des mécanismes mis en jeu, il simule l'interaction laser-matière sur des plasmas millimétriques, et sur des centaines de picosecondes, en 3D.

L'année 2006 a marqué une étape importante pour le code HERA. Il a montré son aptitude à simuler des plasmas réalistes, y compris des cavités réduites dans le contexte du LMJ. La modélisation actuellement utilisée prend en compte la propagation du faisceau laser, sa rétrodiffusion de type *Brillouin*, et l'hydrodynamique complète du plasma dans la limite isotherme. Les premières applications du code ont mis en évidence un nouveau phénomène [3] qui donne une interprétation

plausible du désaccord persistant entre les niveaux de rétrodiffusions prévus par la théorie et ceux mesurés expérimentalement. Ce mécanisme, appelé "incohérence induite", est provoqué par la "diffusion Brillouin stimulée" dans un plasma inhomogène en vitesse. Il se traduit par un élargissement prononcé de l'ouverture des ondes rétrodiffusées et transmises, et par l'apparition d'incohérences spatiale et temporelle. Cet effet n'est pas associé au creusement de densité par la force pondéromotrice [4], mais par l'inhomogénéité propre du plasma. La figure 1 illustre l'impact de ces différents mécanismes sur la transmission dans un plasma représentatif d'expériences réalisées au Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), à l'École polytechnique. Nous avons réalisé trois simulations différentes :

- sans le terme lié au creusement pondéromoteur (*SBS seul*) ;
- sans le terme lié à la diffusion Brillouin en milieu inhomogène (*SF seul*) ;
- avec les deux termes précédents (*SF+SBS*).

Les résultats montrent que :

- la transmission n'est pas limitée à l'ouverture incidente, dans le cas où seule la diffusion Brillouin est prise en compte ;
- la prise en compte simultanée de la diffusion Brillouin et de l'autofocalisation exacerbe cet étalement de la lumière. Ceci est aussi vrai en rétrodiffusion.

L'élargissement de l'onde rétrodiffusée peut atteindre des valeurs telles que plus de la moitié de la puissance rétrodiffusée est en dehors de l'ouverture initiale du faisceau : les mesures qui sont, en général, limitées au cône d'ouverture du faisceau incident ne sont plus représentatives du taux de rétrodiffusion réel.

Actuellement, seule la diffusion Brillouin stimulée est prise en compte. Les travaux suivants porteront sur l'instabilité Raman, et sur l'amélioration de la modélisation du plasma, en particulier sur le transport des électrons. Ces résultats récents et prometteurs démontrent que l'hydrodynamique du plasma est un élément essentiel pour l'estimation du degré de dangerosité des instabilités paramétriques dans les futures cavités LMJ.

Références

- [1] A. J. SCHMITT, "The effects of optical smoothing techniques on filamentation in laser plasmas", *Phys. Fluids*, **31**, p. 3079 (1988).
- [2] P. BALLEREAU, M. CASANOVA, F. DUBOC, D. DUREAU, H. JOURDREN, P. LOISEAU, J. METRAL, O. MORICE, R. SENTIS, "Simulation of the Paraxial Laser Propagation coupled with Hydrodynamics in 3D Geometry", à paraître dans *J. Scient. Comput.* (2007).
- [3] P. LOISEAU, O. MORICE, D. TEYCHENNÉ, M. CASANOVA, S. HÜLLER, D. PESME, "Laser-beam smoothing induced by stimulated Brillouin scattering in an inhomogeneous plasma", *Phys. Rev. Lett.*, **97**, p. 205001 (2006).
- [4] A. J. SCHMITT, B. B. AFEYAN, "Time-dependent filamentation and stimulated Brillouin forward scattering in inertial confinement fusion", *Phys. Plasmas*, **5**, p. 503 (1998).

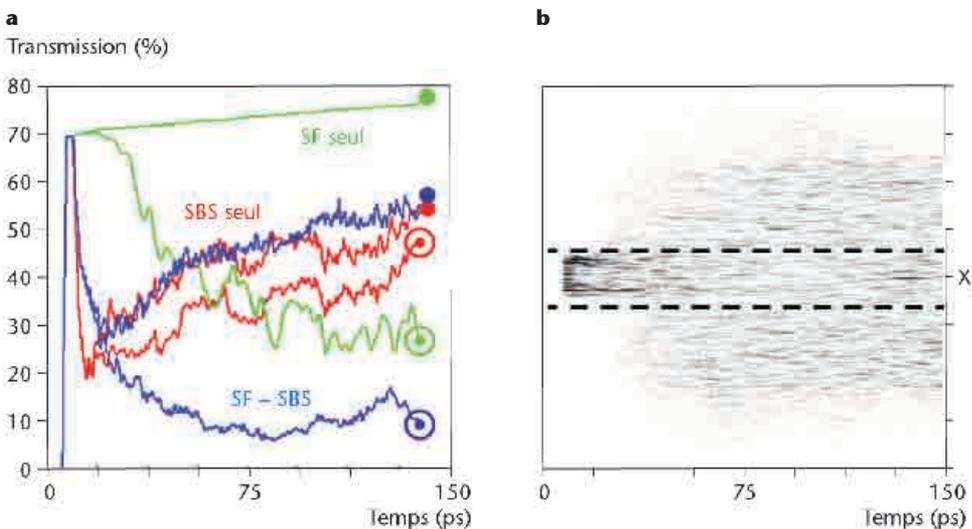


Figure 1

Évolution temporelle de la lumière transmise

a Évolution temporelle de la lumière transmise (à gauche). ⊙ indique une intégration dans le cône d'ouverture uniquement, et ● une intégration sur tout le domaine transverse ;

b Évolution temporelle de la puissance transmise en champ proche en fonction de la dimension transverse, en sortie de la boîte de simulation, après 1,2 mm de propagation. Les deux lignes en pointillés délimitent l'ouverture initiale du faisceau incident.