

Modélisation du transfert d'énergie entre faisceaux laser pour la fusion

A. DEBAYLE - S. DEPIERREUX - D. J. Y. MARION - C. NEUVILLE - P.-E. MASSON-LABORDE - P. LOISEAU - M. CASANOVA / CEA – DAM Île-de-France

C. BACCOU - K. GLIZE - C. LABAUNE / Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), UMR 7605 CNRS – CEA – École polytechnique – Université Pierre-et-Marie-Curie, Palaiseau

S. HÜLLER / Centre de physique théorique, UMR 7644 CNRS – École polytechnique, Palaiseau

Les expériences de fusion nucléaire par confinement inertiel mettent en œuvre un grand nombre de faisceaux laser se croisant dans un plasma. Les échanges d'énergie laser susceptibles de s'y produire ont récemment été pris en compte au moyen d'un modèle simplifié. Validé par des simulations particulières de référence, ce modèle a permis avec succès l'interprétation d'une expérience de croisement de faisceaux réalisée au Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI).

La fusion thermonucléaire par confinement inertiel consiste à comprimer fortement une capsule millimétrique contenant des isotopes de l'hydrogène, jusqu'à atteindre des températures et densités extrêmes permettant la fusion des noyaux atomiques. Dans le schéma dit d'attaque indirecte, la capsule est située au centre d'une cavité en or. La pression initiant la compression est due au rayonnement X produit lors de l'interaction entre les lasers et la paroi de la cavité. La compréhension et la modélisation de la propagation et de l'interaction des lasers avec le plasma sont donc essentielles, afin d'estimer au mieux l'énergie nécessaire pour atteindre la fusion thermonucléaire de la cible. À ce jour, la modélisation précise des lasers dans la cavité, prenant en compte à la fois les effets hydrodynamiques et cinétiques, reste difficilement atteignable malgré les puissances de calcul actuelles. Cependant, le développement de modèles simplifiés permet de pallier ce problème, comme la suite de cet article le montre en ce qui concerne l'échange d'énergie entre faisceaux laser.

Lorsque deux ou plusieurs faisceaux laser se croisent dans un plasma, un réseau d'interférence apparaît, comme illustré sur la [figure 1a](#). La figure d'interférence créée par le battement des lasers imprime alors une modulation des densités ionique et électronique, comme un réseau, *via* la force dite pondéromotrice, qui est proportionnelle au gradient d'intensité. Pour des lasers de fréquences légèrement différentes dans le référentiel du plasma, le réseau de densité se déplace. Lorsque la vitesse de ce déplacement est proche de la vitesse du son, il se crée une résonance avec une onde acoustique qui dévie les photons du laser de haute fréquence dans la direction du laser de basse fréquence : c'est l'échange

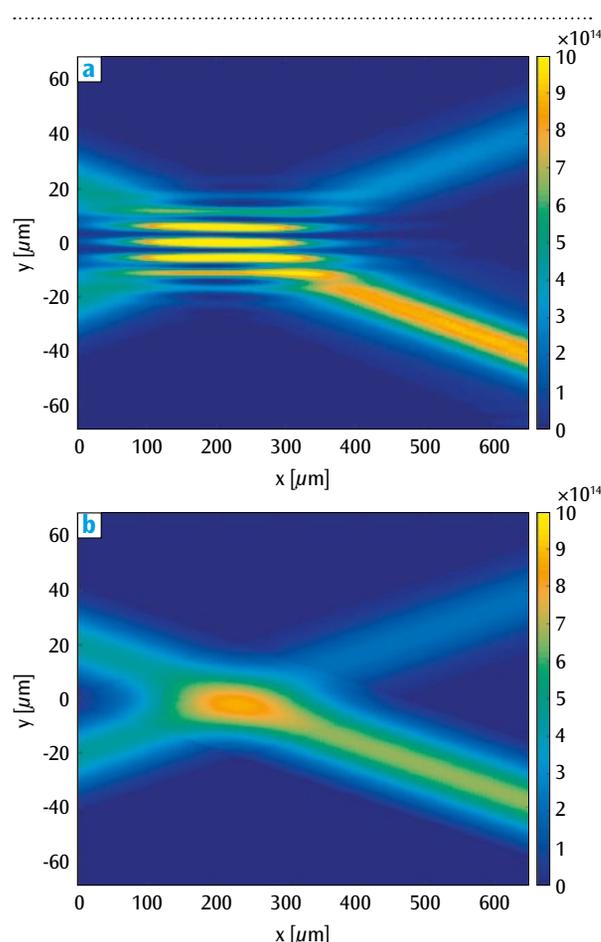


Figure 1. Intensités en W/cm^2 de deux lasers se croisant dans un plasma d'hydrogène calculées avec un code cinétique particulaire (a) et évaluées avec le code Sechel (b). Sur ces figures apparaît le transfert d'énergie d'un laser à l'autre (l'intensité diminue sur l'un, augmente sur l'autre). Le nouveau code Sechel, avec lequel le calcul est 50 000 à 100 000 fois plus rapide qu'avec le code cinétique, permet de reproduire correctement ce transfert.

d'énergie par croisement de faisceaux. Ce phénomène a notamment lieu quand des faisceaux laser de même fréquence se croisent dans un plasma en expansion, dont la vitesse transverse au réseau d'interférence est proche de la vitesse du son (selon l'axe y dans le cas de la **figure 1a**). Le code Sechel [1], pour Simulateur des échanges d'énergie laser, a été développé pour résoudre les équations tridimensionnelles associées au modèle de transfert d'énergie entre un grand nombre de faisceaux laser. Ce code prend en compte la polarisation de chaque faisceau laser ainsi que l'échange non linéaire susceptible de modifier les distributions en intensité des lasers.

Pour valider le code Sechel, les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'une simulation cinétique, dans le cas simple du croisement entre deux faisceaux de fréquences légèrement différentes dans un plasma homogène. Les intensités des faisceaux (**figure 1**), qui se propagent de la gauche vers la droite, sont tracées dans le plan de croisement. Le faisceau de plus basse fréquence récupère une partie significative de l'énergie de l'autre faisceau. La comparaison de la simulation cinétique (**a**) à Sechel (**b**) montre un accord plus que raisonnable au regard des approximations faites pour construire le modèle, la simulation cinétique ayant nécessité 2000 cœurs de calcul pendant 24h, contre 32 cœurs pendant moins d'une minute pour Sechel.

Pour comprendre les effets transitoires d'échange d'énergie ainsi que la déformation des intensités laser, une expérience de croisement entre deux faisceaux dans un plasma en expansion a été réalisée au LULI [2]. Un faisceau dit de chauffage est utilisé pour faire exploser une feuille de Mylar (**figure 2**). Dans un second temps, un faisceau nanoseconde (ns) et un picoseconde (ps) de même fréquence sont croisés dans la zone où le plasma se détend vers la

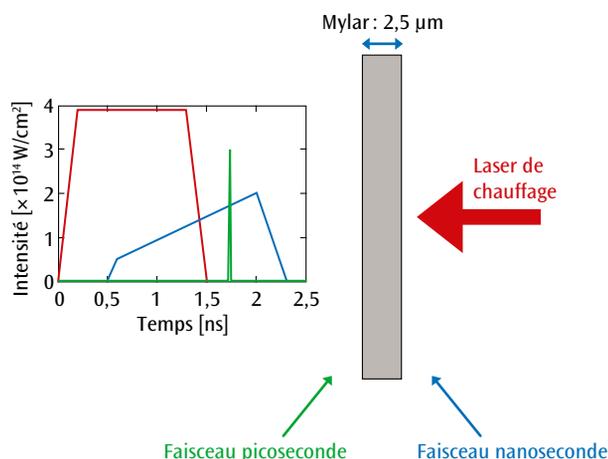


Figure 2. Schéma expérimental du croisement de faisceaux. Le laser de chauffage (en rouge), fait exploser la feuille micrométrique de Mylar, puis deux autres faisceaux, nanoseconde (bleu) et picoseconde (vert), se croisent dans le plasma en expansion. La synchronisation des faisceaux est indiquée dans le graphique.

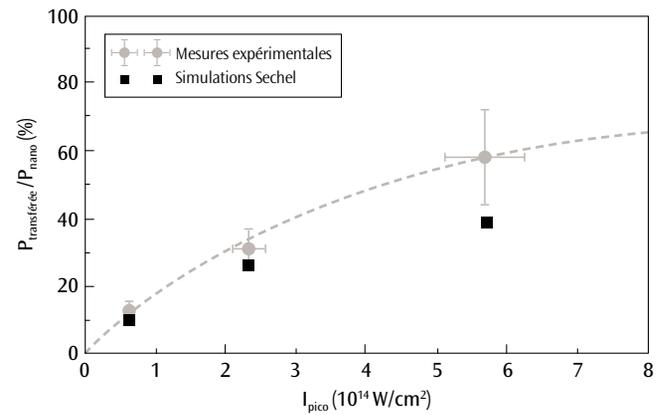


Figure 3. Ratio des puissances laser échangées entre les faisceaux picoseconde et nanoseconde en fonction de l'intensité laser du faisceau picoseconde de durée 12 ps. La courbe en pointillés illustre la tendance des points expérimentaux. La puissance échangée, jusqu'à 60 % ici, croît avec l'intensité laser et est correctement reproduite par le modèle Sechel.

droite à la vitesse du son. Dans ce cas de figure, les faisceaux ps et ns sont respectivement décalés vers le rouge et vers le bleu dans le référentiel du plasma. L'échange d'énergie se produit donc du faisceau ns vers le faisceau ps. Ce résultat est bien illustré sur la **figure 3** par l'évolution de la puissance transférée en fonction de l'intensité du faisceau ps pour une durée d'interaction de 12 ps. La puissance échangée croît avec l'intensité laser et est correctement reproduite par le modèle. De très grands échanges d'énergie peuvent avoir lieu – ici jusqu'à 60 %. L'expérience a par ailleurs démontré pour la première fois que les propriétés spatiales des taches laser sont bien modifiées après échanges – une caractéristique également reproduite par Sechel [2].

En résumé, un nouveau modèle a été développé pour décrire l'échange d'énergie laser lors du croisement de faisceaux. Le code associé a été validé numériquement avec des simulations particulières, lourdes à mettre en œuvre, mais incluant toute la physique en jeu. Le code a ensuite été utilisé avec succès pour interpréter une expérience de croisement de faisceaux de même fréquence dans un plasma en écoulement. Cette dernière a permis d'étudier l'évolution temporelle et spatiale du transfert d'énergie, et de montrer que, outre les échanges d'énergie potentiellement importants (~60 %), l'échange d'énergie induit une déformation de la tache laser.

Références

- [1] D. MARION, A. DEBAYLE, P.-E. MASSON-LABORDE, P. LOISEAU, M. CASANOVA, "Modeling crossed-beam energy transfer for inertial confinement fusion", *Phys. Plasmas*, **23**, 052705 (2016).
- [2] C. NEUVILLE *et al.*, "Spatial and transient effects during the amplification of a picosecond pulse beam by a nanosecond pump", *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 145001 (2016).