

# Introduction de l'interaction laser-plasma non linéaire dans un code hydrodynamique pour la fusion par confinement inertiel

A. COLAITIS - G. DUCHATEAU - X. RIBEYRE - Y. MAHEUT - G. BOUTOUX - L. ANTONELLI - P. NICOLAI - D. BATANI - V. T. TIKHONCHUK / Centre lasers intenses et applications (CELIA), Unité mixte de recherche 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux, Talence

L'interaction de faisceaux laser avec les plasmas nécessite la description d'une grande variété de processus physiques qui ont lieu sur de multiples échelles spatiales et temporelles. Afin de rendre compte de ce système complexe, une nouvelle description de l'interaction laser-plasma pour les codes hydrodynamiques a été formulée, elle repose sur la décomposition des faisceaux laser en des sous-faisceaux gaussiens. Cette approche permet de décrire la distribution d'intensité laser dans le plasma et d'introduire des modèles réduits d'interaction laser-plasma non linéaire pour l'échange d'énergie entre faisceaux croisés et la génération d'électrons suprathermiques. Ces modèles ont été appliqués à l'étude du schéma d'allumage par choc pour la fusion par confinement inertiel (FCI) en attaque directe. On observe un effet significatif de l'interaction laser-plasma non linéaire, qui modifie les seuils d'allumage.

L'état de l'art de la description de la propagation laser aux grandes échelles repose sur des modèles réduits compatibles avec les performances des ordinateurs modernes. La plus commune est celle du tracé de rayon, qui décrit le faisceau laser par des fagots de rayons infiniment minces qui obéissent aux lois de propagation de l'optique géométrique. Dans les situations où les effets collectifs et les couplages non linéaires sont peu importants ( $I\lambda^2 \lesssim 5 \cdot 10^{13} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2/\text{cm}^2$  où  $I$  est l'intensité laser et  $\lambda$  la longueur d'onde), les méthodes fondées sur l'optique géométrique sont suffisamment précises et numériquement efficaces: elles décrivent correctement la réfraction du laser et le chauffage du plasma par absorption collisionnelle. Dans le schéma d'allumage par choc pour la FCI en attaque directe, un pic d'intensité en fin d'impulsion laser est utilisé pour lancer un choc comprimant efficacement le cœur de la cible et initiant ainsi les réactions de fusion nucléaire. Dans ce cas, le paramètre d'interaction  $I\lambda^2$  devient relativement grand et donne lieu à des effets non linéaires. La modélisation de l'interaction laser-plasma nécessite alors la connaissance de l'amplitude du champ électrique et de la direction du front d'onde, quantités qui ne sont pas accessibles par l'optique géométrique. La physique de l'interaction laser-plasma linéaire et non linéaire est alors

souvent décrite par des modèles *ad hoc* qui limitent la compréhension des processus physiques mis en jeu et la capacité prédictive de ces outils numériques.

Afin de remédier à ces limitations, nous avons adapté la méthode de l'optique géométrique complexe paraxiale (PCGO) au cas des plasmas chauds. L'équation obtenue pour le front d'onde

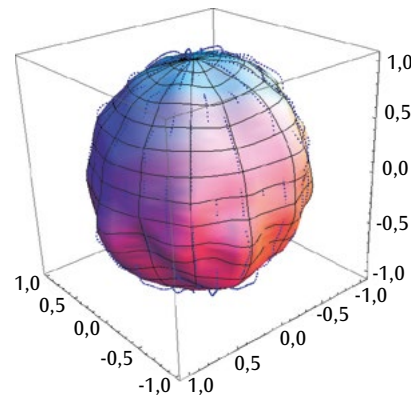


Figure 1.

Lors de l'implosion d'une cible pour la fusion par confinement inertiel (FCI), celle-ci peut perdre sa symétrie sphérique initiale à cause d'inhomogénéités de l'éclairement laser et du transfert d'énergie entre faisceaux croisés (CBET).

inclut les informations sur sa courbure et l'intensité du champ, décrit comme le mode fondamental gaussien dans l'approximation paraxiale, avec comme axe principal de propagation un rayon de l'optique géométrique. Ce modèle, étendu aux faisceaux non gaussiens, a été spécifiquement formulé dans le cadre d'un code hydrodynamique lagrangien et implémenté dans le code CHIC du CELIA [1].

En se basant sur cette nouvelle formulation de propagation laser, deux modèles qui permettent de prendre en compte l'interaction laser-plasma non linéaire ont été proposés: (i) le transfert d'énergie entre faisceaux croisés (CBET), qui résulte de la diffraction de la lumière laser sur des fluctuations de densités induites par le gradient d'intensité laser; (ii) le couplage du champ laser avec les ondes plasma électroniques qui génèrent des électrons suprathermiques lorsqu'une instabilité paramétrique est excitée.

La formulation du CBET repose sur la discrétisation de la zone d'interaction par de nombreux transferts d'énergie élémentaires entre sous-faisceaux gaussiens, à l'aide d'un modèle analytique écrit en régime stationnaire. Cette formulation a été validée par comparaison avec des résultats théoriques et numériques obtenus à l'aide d'un code de référence [2]. Une application de ce modèle à la dynamique d'une implosion de cible a souligné l'influence du CBET sur la convergence et la symétrie des cibles de FCI en attaque directe [3], comme illustré sur la figure 1.

La description de la génération d'électrons suprathermiques par l'interaction laser-plasma non linéaire à l'échelle hydrodynamique possède deux composantes [4,5]: le transport et le dépôt d'énergie des faisceaux d'électrons rapides dans le plasma, et le transfert d'énergie laser vers des sources d'électrons à partir du modèle optique PCGO. En considérant les cas d'électrons rapides générés par des instabilités paramétriques, des modèles réduits permettant de calculer leur flux et leur énergie moyenne ont été proposés. Ce modèle couplé a été appliqué à l'analyse de la phase finale d'implosion de cibles pour l'allumage par choc, qui est associée à un régime d'interaction fortement non linéaire. Les simulations avec le modèle couplé suggèrent que les électrons rapides générés durant le pic d'intensité laser renforcent la pression du choc d'allumage, comme illustré sur la figure 2, mais aussi préchauffent significativement la coquille, causant la pollution du point chaud avant l'arrivée du choc. Cela provoque une augmentation importante des pertes radiatives et augmente l'énergie que le choc doit déposer pour allumer la cible.

Ces résultats démontrent l'importance de modéliser les processus d'interaction non linéaire dans la conception d'une cible d'allumage par choc efficace et réaliste. Les applications potentielles de ce modèle ne sont pas limitées aux études de FCI, et sont utiles à l'étude des expériences d'interaction laser-cible dans les régimes correspondant aux instabilités considérées ici.

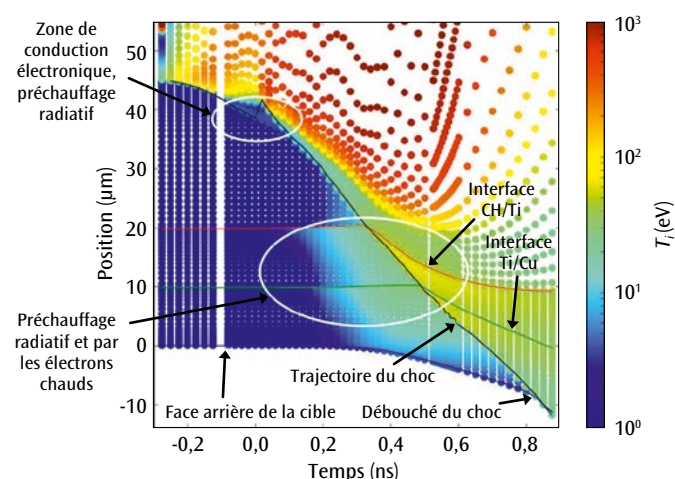


Figure 2.

Évolution en position et en temps de la température ionique  $T_i$  pendant l'implosion d'une cible. L'excitation d'instabilités paramétriques donne lieu à la formation d'électrons suprathermiques qui, après transport, déposent leur énergie dans le plasma. Ce dépôt induit localement des variations de température et donc de pression qui modifient la dynamique du choc. Sa trajectoire est représentée par la ligne noire, le changement de pente (donc de vitesse du choc) montrant l'influence des électrons suprathermiques.

## Références

- [1] A. COLAITIS *et al.*, "Towards modeling of nonlinear laser-plasma interactions with hydrocodes: the thick-ray approach", *Phys. Rev. E*, **89**, 033101 (2014).
- [2] A. COLAITIS *et al.*, "Crossed beam energy transfer: assessment of the paraxial complex geometrical optics approach versus a time-dependent paraxial method to describe experimental results", *Physics of Plasmas*, **23**, 032118 (2016).
- [3] A. COLAITIS *et al.*, "Modeling of the cross-beam energy transfer with realistic inertial-confinement-fusion beams in a large-scale hydrocode", *Phys. Rev. E*, **91**, 013102 (2015).
- [4] A. COLAITIS *et al.*, "Coupled hydrodynamic model for laser-plasma interaction and hot electron generation", *Phys. Rev. E*, **92**, 041101 (2015).
- [5] V. T. TIKHONCHUK *et al.*, "Physics of laser-plasma interaction for shock ignition of fusion reactions", *Plasma Phys. and Control. Fusion*, **58**, 014018 (2016).