

Nouveaux mécanismes d'injection pour les accélérateurs laser-plasma

X. DAVOINE / CEA – DAM Île-de-France

S. CORDE - R. LEHE - C. THAURY / Laboratoire d'optique appliquée (LOA), ENSTA-Paristech – École Polytechnique – CNRS, Palaiseau

Grâce à leur grande compacité et aux caractéristiques uniques des faisceaux d'électrons qu'ils génèrent, les accélérateurs laser-plasma sont envisagés pour de nombreuses applications, comme la production de rayons X pour la radiographie dans des contextes industriel ou biomédical. Cependant, afin de contrôler les propriétés des faisceaux accélérés avec une précision suffisante pour les applications, il est important de bien maîtriser l'injection initiale des électrons dans la structure accélératrice, appelée onde de sillage, qui est créée lors de l'interaction laser-plasma. Deux études récentes réalisées en collaboration avec le LOA ont permis d'une part d'améliorer la compréhension des mécanismes d'injection, et d'autre part de proposer de nouvelles techniques d'injection. Ces résultats ouvrent la voie à la production de faisceaux plus reproductibles et de meilleure qualité.

Les accélérateurs d'électrons à sillage laser (**figure 1**) présentent des champs accélérateurs de trois ordres de grandeur supérieurs à ceux des accélérateurs conventionnels, ce qui permet de les miniaturiser considérablement. Mais, bien que diverses applications soient déjà envisagées, en particulier pour l'imagerie X à très haute résolution, ces accélérateurs laser-plasma souffrent généralement d'une mauvaise stabilité: chaque faisceau diffère du précédent, réduisant ainsi la reproductibilité de l'expérience. De plus, il est souvent difficile d'obtenir à la fois une très

bonne qualité de faisceau et une charge conséquente. Afin de dépasser ces limites, des travaux menés en collaboration avec le LOA ont conduit à la découverte de deux nouveaux mécanismes d'injection d'électrons dans un accélérateur à sillage laser: l'auto-injection longitudinale [1] et l'injection optique transverse [2].

Auto-injection longitudinale

Avant de pouvoir être accéléré par l'onde de sillage, le faisceau d'électrons doit d'abord être injecté dans celle-ci. La méthode d'injection la plus

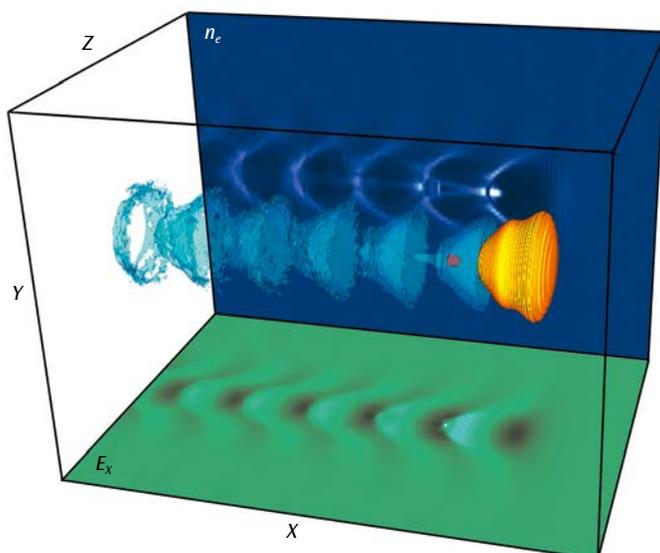


Figure 1. À l'image d'un bateau créant une vague dans son sillage, un faisceau laser ultra-intense et ultra-court (orange) se propageant dans un plasma peu dense peut créer une onde plasma (modulation de la densité électronique) de grande amplitude dans son sillage (bleu). Un champ électrique accélérateur (vert) est associé à cette onde plasma. Un faisceau d'électrons (rouge) se propageant avec cette onde peut être accéléré à de très grandes énergies.

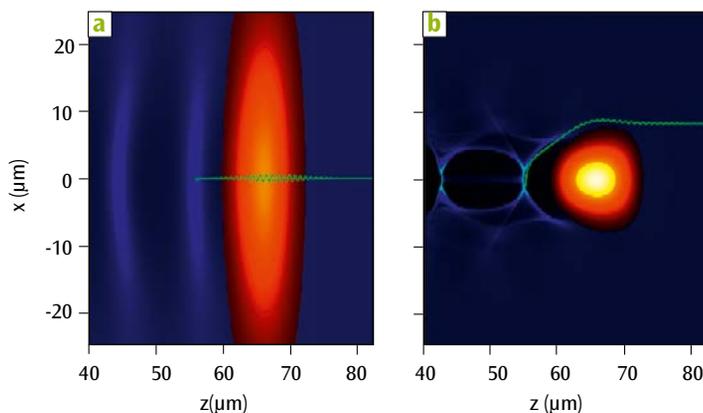


Figure 2. Principe de l'auto-injection longitudinale (a) et transverse (b). Les électrons injectés (trajectoires représentatives en vert) partent de la droite, se font dépasser par le laser (rouge), et sont injectés à l'arrière de la première arche (onde de sillage en bleu).

simple à réaliser expérimentalement est l'auto-injection: avec des paramètres laser et plasma adaptés, une fraction des électrons du plasma peut gagner assez de vitesse lors du passage du laser pour être injectés et former un faisceau. Nous avons démontré [1] que le terme d'auto-injection englobe en réalité deux mécanismes distincts: les auto-injections transverse et longitudinale.

Seule l'auto-injection transverse était connue jusqu'à maintenant. Dans ce cas, les électrons injectés proviennent du bord de l'onde de sillage (figure 2b). Ces électrons contournent le faisceau laser puis sont injectés sur l'axe, à l'arrière de la première arche de l'onde plasma, dans une zone où le champ accélérateur est maximal. Cette injection est très sensible aux petites fluctuations de la forme du faisceau laser, ce qui dégrade la stabilité.

L'auto-injection longitudinale, caractérisée au contraire par l'injection d'électrons provenant de l'axe et traversant le faisceau laser (figure 2a), a pu être mise en évidence à l'aide de simulations 3D et observée expérimentalement pour la première fois au LOA [1]. Une modification de la densité ou longueur du plasma permet de passer d'un type d'injection à l'autre. Au-delà de la découverte de ce nouveau mode d'injection, nous avons montré que celui-ci permettait d'améliorer sensiblement la stabilité de l'accélérateur.

Injection optique transverse

Afin de bien contrôler et stabiliser l'injection, il peut aussi être avantageux de recourir à l'injection optique. Cette technique consiste à utiliser un second faisceau laser qui, en entrant en collision avec le premier, perturbe le mouvement des électrons et provoque l'injection. Jusqu'à maintenant, seule une perturbation du mouvement longitudinal des électrons était recherchée. Nous avons montré

à l'aide de simulations qu'il est parfois préférable de créer une perturbation transverse [2]. Cette injection optique transverse permet d'accélérer un grand nombre d'électrons (100 pC) tout en garantissant que le faisceau possède une très bonne émittance (0,17 mm.mrad). Que ce soit dans des simulations ou des expériences, de telles émittances, paramètre essentiel des faisceaux de particules, n'avaient été atteintes avec des accélérateurs laser-plasma que pour des faisceaux de petite charge, environ dix fois plus faibles.

Perspectives

Parmi les priorités actuelles de l'accélération laser-plasma figurent le développement d'un accélérateur stable et simple à réaliser, et l'amélioration de la qualité des faisceaux produits. L'auto-injection longitudinale, qui ne nécessite pas de second faisceau laser tout en conduisant à une bonne stabilité, permet de répondre au premier objectif. L'injection optique transverse répond quant à elle au second, grâce aux faisceaux de faible émittance et grande charge qu'elle permet de générer. Ces résultats sont un progrès en vue de l'utilisation de ces accélérateurs pour des applications.

Références

- [1] S. CORDE *et al.*, "Observation of longitudinal and transverse self-injections in laser-plasma accelerators", *Nat. Commun.*, **4**, 1501 (2013).
- [2] R. LEHE *et al.*, "Optical transverse injection in laser-plasma acceleration", *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 085005 (2013).