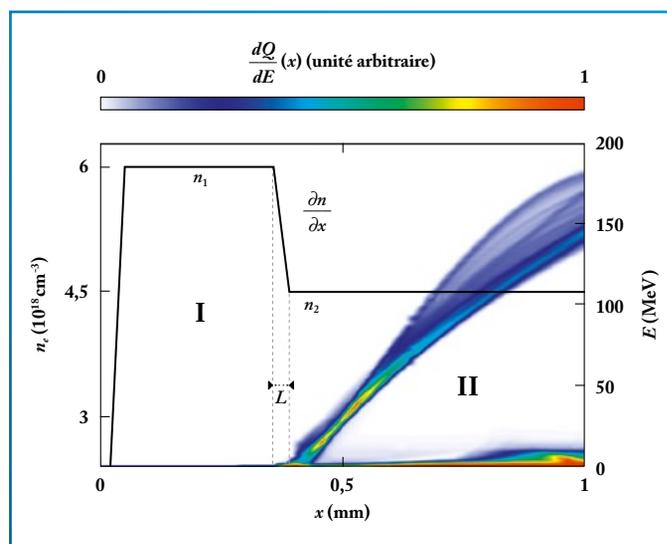


# OPTIMISATION D'UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS DANS UN ACCÉLÉRATEUR LASER-PLASMA

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 sonder des phénomènes physiques ultrarapides ou radiographier des objets avec une très bonne résolution spatiale. Cependant, afin d'ajuster les propriétés des faisceaux accélérés suivant l'application envisagée, il est important de développer et caractériser des solutions permettant de manipuler et contrôler leur production. À cette fin, une étude **1** a permis de montrer, à l'aide d'une simulation numérique, que la simple modification des propriétés d'un gradient de densité électronique généré dans la cible plasma permet de régler un grand nombre de caractéristiques du faisceau produit, telles que sa charge, sa durée, sa qualité spectrale ou son émittance transverse.

La focalisation d'un faisceau laser ultra-intense et ultracourt sur un jet de gaz conduit à la création d'un plasma peu dense par ionisation du gaz, dans lequel le faisceau laser peut se propager. Une onde plasma, caractérisée par une modulation de la densité électronique et par la génération d'un champ électrique longitudinal de grande amplitude, est alors générée dans le sillage du laser. Ce champ électrique, qui peut être de trois ordres de grandeur supérieur à ceux des accélérateurs conventionnels, est capable d'accélérer un faisceau d'élec-

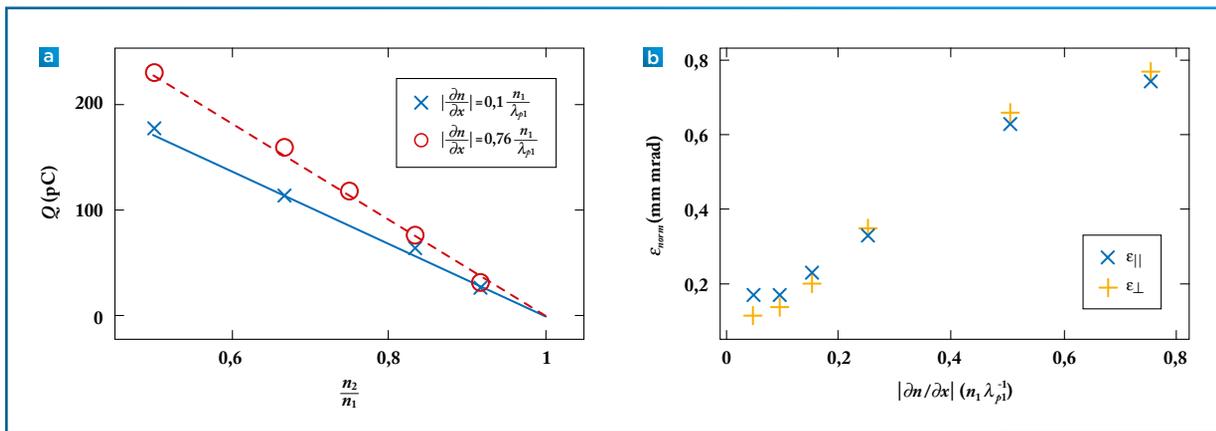
trons à de très fortes énergies sur de très petites distances; une énergie de 4 GeV a aujourd'hui été atteinte expérimentalement sur moins de 10 cm. Cette compacité, ainsi que la taille micrométrique et la durée femtoseconde ( $10^{-15}$  s) des faisceaux générés représentent les principaux intérêts de ces accélérateurs laser-plasma. La volonté de mieux contrôler la génération du faisceau d'électrons a conduit à proposer la technique dite d'injection par gradient **2**, qui a déjà été mise en œuvre dans de nombreuses expériences. Les diverses applications envisagées



**Figure 1**  
➔ Principe de l'injection d'électrons par gradient de densité. Profil de densité électronique  $n_e$  (courbe noire) traversé par le laser et distribution des électrons  $dQ/dE$  (carte de couleur) en fonction de la position  $x$  du faisceau dans le plasma et de l'énergie cinétique  $E$  des électrons. Le gradient descendant entre les régions I et II (respectivement de densité  $n_1$  et  $n_2$ ) provoque l'injection d'électrons, qui sont ensuite accélérés à haute énergie lors de la traversée de la région II.

**Figure 2**

➔ (a) Évolution de la charge électronique injectée en fonction du saut de densité  $n_2/n_1$ , pour deux valeurs différentes de la pente  $\partial n/\partial x$  du gradient. (b) Évolution de l'émittance transverse du faisceau en fonction de la pente  $\partial n/\partial x$  du gradient, avec  $\epsilon_{||}$  et  $\epsilon_{\perp}$  les émittances parallèle et perpendiculaire à la polarisation du laser ;  $\lambda_{p1}$  correspond à la longueur d'onde du sillage dans la région I de densité  $n_1$  (voir figure 1).



nécessitent de plus de pouvoir optimiser un nombre croissant de propriétés du faisceau. Notre travail a montré **1** que l'adaptation de cette méthode d'injection par gradient est un moyen d'atteindre cet objectif.

La structure plasma accélératrice, c'est-à-dire l'onde de sillage, se propage à la même vitesse que le faisceau laser qui la génère. Avant de pouvoir être accéléré à haute énergie, un faisceau d'électrons doit d'abord être injecté dans cette structure accélératrice, c'est-à-dire atteindre la vitesse de l'onde afin de rester à l'intérieur de celle-ci. Ce processus d'injection est similaire à celui qui consiste à prendre un train en marche : plus le train est rapide et plus il est difficile d'y monter. Or, dans les plasmas peu denses considérés ici, le laser est ralenti par le plasma, mais il se propage tout de même à une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide. Le faisceau d'électrons doit donc atteindre une vitesse relativiste avant de pouvoir être injecté puis accéléré à haute énergie par l'onde de sillage. Cette condition n'est pas triviale à remplir, car c'est une fraction des électrons du plasma, initialement au repos, qui doit être ainsi préaccélérée. Les électrons du plasma sont naturellement accélérés lors de leur courte interaction avec le faisceau laser et avec l'avant de l'onde de sillage, mais bien souvent, cette accélération n'est pas suffisante pour

provoquer l'injection. Cependant, dans l'image du train, si celui-ci ralentit fortement, alors il est plus facile d'y monter, même en courant moins vite. L'utilisation d'un gradient de densité (figure 1) suit ce principe : faire ralentir l'onde plasma afin de faciliter l'injection d'électrons en son sein. Ce ralentissement est dû à la modification de la longueur d'onde de l'onde de sillage lorsque la densité du plasma décroît. Il provoque l'injection d'une manière localisée et contrôlée, comme on peut le vérifier sur la figure 1 : les électrons énergétiques en fin d'accélération ( $E > 150$  MeV) sont issus de la petite zone où se trouve le gradient.

Divers procédés expérimentaux permettent déjà de créer des profils plasma présentant un gradient, tout en contrôlant partiellement certaines propriétés, comme la longueur et la pente.

Cependant, il existe encore peu d'études sur la conséquence d'une variation des propriétés du gradient sur les faisceaux accélérés. Des simulations réalisées avec le code Calder-Circ ont montré qu'un grand nombre de caractéristiques du faisceau pouvaient être ajustées et contrôlées en choisissant correctement ces valeurs. En particulier, la charge et la durée du faisceau augmentent avec l'amplitude du saut de densité induit par le gradient, et son émittance transverse – qui quantifie la qualité de la distribution transverse du faisceau – se dégrade (car elle augmente) avec la pente, comme le montre la figure 2. La qualité spectrale dépend de manière plus complexe des différentes propriétés du gradient.

Ces résultats seront très utiles pour la conception et la compréhension de futures expériences d'accélération d'électrons par laser.

## RÉFÉRENCES

- 1** H. EKERFELT, M. HANSSON, I. GALLARDO GONZÁLEZ, X. DAVOINE, O. LUNDH, "A tunable electron beam source using trapping of electrons in a density down-ramp in laser wakefield acceleration", *Sci. Reports*, **7**, 12229 (2017).
- 2** S. BULANOV *et al.*, "Particle injection into the wave acceleration phase due to nonlinear wake wave breaking", *Phys. Rev. E*, **58**, R5257 (1998).