

Contrôle « tout optique » des faisceaux d'électrons accélérés par sillage laser

En raison des forts champs électrostatiques qu'ils peuvent supporter, les plasmas sont des milieux de choix pour réaliser des accélérateurs de particules extrêmement compacts. La méthode du « sillage laser » consiste à utiliser une impulsion laser courte et intense pour exciter une onde électrostatique dans un plasma de très basse densité. Les champs accélérateurs ainsi créés peuvent atteindre 100 GV/m – à peu près quatre ordres de grandeur de plus que dans les cavités accélératrices conventionnelles ! Pour accélérer de la sorte un faisceau électronique de bonne qualité (forte charge, faible dispersion en énergie, faible émittance, bonne stabilité...), encore faut-il être capable « d'injecter » les électrons dans le champ de sillage avec une grande précision. Les travaux expérimentaux conduits au Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) et les modèles numériques développés au CEA - DAM Île-de-France ont permis de réaliser des progrès significatifs dans ce domaine au cours des dernières années.

E. Lefebvre • X. Davoine • A. Beck CEA - DAM Île-de-France

C. Rechatin • J. Faure • V. Malka Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA / CNRS / École Polytechnique

Lors de sa propagation dans un plasma peu dense, une impulsion laser brève (quelques dizaines de femtosecondes) et extrêmement intense (plus de 10^{18} W/cm²) expulse les électrons qu'elle rencontre et crée ainsi dans son sillage une onde électrostatique de grande vitesse de phase et de forte amplitude : les champs produits peuvent atteindre une centaine de GV/m, ce qui dépasse de plusieurs ordres de grandeurs les limites technologiques des accélérateurs conventionnels. Ces « accélérateurs laser-plasma », très compacts, font l'objet d'intenses recherches et sont de mieux en mieux maîtrisés [1].

Pour produire des faisceaux d'électrons présentant une faible dispersion en énergie, il faut contrôler finement l'injection des particules dans l'onde de sillage. Une méthode originale, reposant sur l'utilisation d'un second faisceau laser dirigé tête-bêche avec l'impulsion créant le sillage, peut assurer cette fonction d'injection (figure 1). Dans cette technique dite de « collision d'impulsion », la seconde impulsion laser crée, lors de son croisement avec la première, une onde de battement qui perturbe le mouvement des électrons du plasma (figure 1b). Certains d'entre eux gagnent alors une impulsion longitudinale suffisante pour permettre leur piégeage

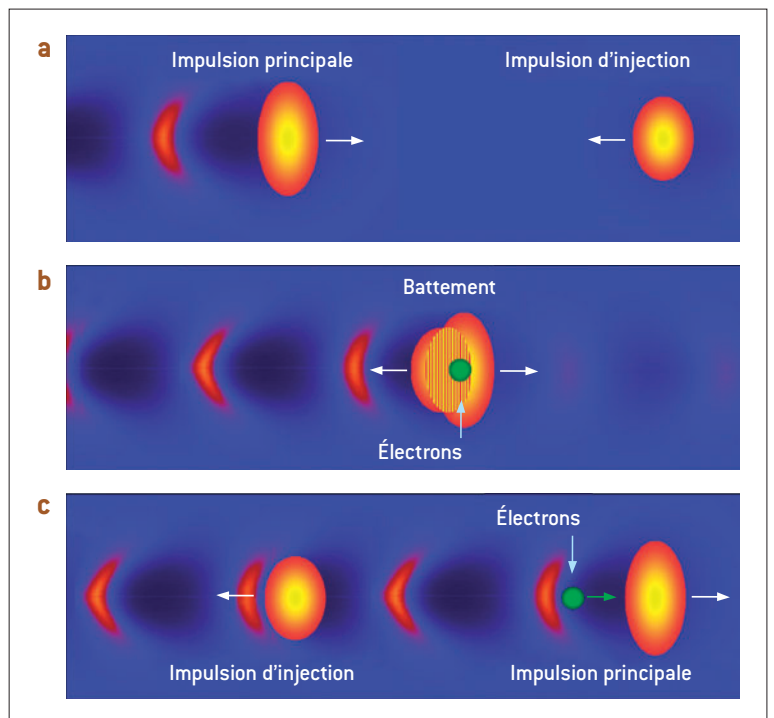


Figure 1. Les trois phases de l'accélération laser-plasma avec collision. La carte de couleur correspond à la densité électronique et les ellipses jaunes aux impulsions laser contra-propagatives, représentées avant (a), pendant (b) et après (c) leur collision.

dans l'onde de sillage et leur accélération à haute énergie (figure 1c). La première démonstration expérimentale de cette méthode a été réalisée au LOA il y a quelques années [2], permettant d'obtenir des faisceaux d'électrons stables et présentant une faible dispersion en énergie. En jouant sur le lieu de croisement des deux impulsions dans le plasma, on fait varier la distance d'accélération des particules après leur injection, ce qui fournit un bouton de réglage simple de l'énergie finale du faisceau. La possibilité de varier la charge du faisceau via la polarisation des deux ondes laser a aussi été démontrée.

La simulation numérique de cette interaction à haute intensité laser requiert des outils tenant compte à la fois de ses aspects cinétiques, relativistes, et multi-dimensionnels. Le code CALDER, développé au CEA, est donc bien adapté pour décrire cette physique, et a été utilisé pour simuler, à échelle 1 – c'est-à-dire en géométrie 3D et avec les distances, densités et temps caractéristiques de l'expérience – la situation rencontrée au LOA. Ces calculs ne sont rendus possibles que par le recours à des calculateurs massivement parallèles, tels Téra 10 ou les machines du CCRT. L'analyse de ces simulations montre une bonne concordance entre expériences et calculs, illustrée sur la figure 2 sur l'énergie des électrons accélérés [3].

Le faisceau d'électrons accéléré dans l'onde de sillage modifie subtilement l'amplitude de l'onde, selon le phénomène dit de « beamloading ». En dissociant l'excitation de l'onde de sillage (par la première impulsion laser) et l'injection dans celle-ci d'une quantité variable d'électrons (à l'aide de l'impulsion contra-propagative), le schéma de collision d'impulsions a permis la première observation expérimentale du « beamloading » dans un accélérateur laser-plasma. Ces mesures se sont à nouveau révélées en bon accord avec les simulations CALDER [4].

Les modèles théoriques indiquent que, pour accélérer des paquets d'électrons de plus forte charge tout en préservant une bonne résolution en énergie, il est nécessaire de contrôler le profil temporel du paquet d'électrons. En jouant sur l'intensité, la durée et le profil spatial du faisceau contra-propagatif, nous avons démontré, par le calcul, que les trajectoires des électrons pouvaient

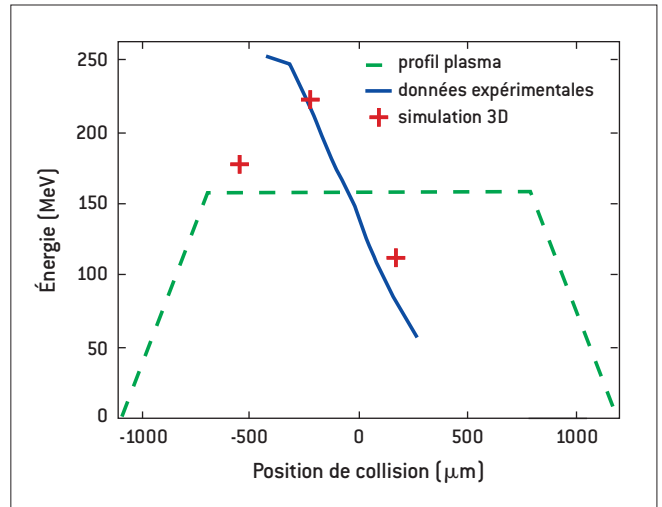


Figure 2. Variation de l'énergie finale des électrons avec le lieu de collision des impulsions. Résultats expérimentaux et simulations 3D.

être contrôlées [5] de façon à produire, à volonté, des profils de courant plats ou piqués vers l'avant ou vers l'arrière de l'onde de sillage. Ce contrôle « tout optique » des faisceaux accélérés, que nous espérons maintenant confirmer expérimentalement, pourrait bouleverser le champ d'applications des accélérateurs laser-plasma.

RÉFÉRENCES

[1] V. MALKA, J. FAURE, Y. GAUDUEL, E. LEFEBVRE, A. ROUSSE, K. TA PHUOC, "Principles and applications of compact laser-plasma accelerators", *Nature Physics*, **4**, p. 447-453 [2008].

[2] J. FAURE, C. RECHATIN, A. NORLIN, A. LIFSCHITZ, Y. GLINEC, V. MALKA, "Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses", *Nature*, **444**, p. 737-739 [2006].

[3] X. DAVOINE, E. LEFEBVRE, J. FAURE, C. RECHATIN, A. LIFSCHITZ, V. MALKA, "Simulation of quasimonoenergetic electron beams produced by colliding pulse wakefield acceleration", *Phys. Plas.*, **15**, 113102 [2008].

[4] C. RECHATIN, X. DAVOINE, A. LIFSCHITZ, A. BEN ISMAIL, J. LIM, E. LEFEBVRE, J. FAURE, V. MALKA, "Observation of beam loading in a laser-plasma accelerator", *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 194804 [2009].

[5] X. DAVOINE, E. LEFEBVRE, C. RECHATIN, J. FAURE, V. MALKA, "Cold optical injection producing mono-energetic, multi-GeV electron bunches", *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 065001 [2009].