

X. Vaisseau, M. Touati, S. Hulin, P. Nicolai, R. Nuter, D. Batani, J. Breil, J.-L. Feugeas,  
P. Forestier-Colleoni, C. Fourment, L. Giuffrida, V. T. Tikhonchuk, J. J. Santos  
Centre lasers intenses et applications (CELIA), UMR 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux, Talence

A. Morace, S. Fujioka  
Institute of Laser  
Engineering, Osaka  
University, Japon

F. N. Beg  
University of  
California, San Diego,  
États-Unis

M. Nakatsutsumi, S. D. Baton  
Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI),  
UMR 7605 CNRS – CEA – École polytechnique – Université  
Paris-Saclay, Sorbonne Universités, Palaiseau

R. Fedosejevs, S. Kerr  
University of Alberta,  
Canada

H. S. Mclean  
Lawrence Livermore National  
Laboratory, États-Unis

H. Sawada  
University of Nevada,  
États-Unis

# EXPÉRIENCE DE COLLIMATION D'UN JET D'ÉLECTRONS RELATIVISTES PAR LE CARBONE VITREUX

La fusion nucléaire est une réaction entre noyaux atomiques légers qui s'associent pour créer un noyau atomique plus lourd en dégageant de l'énergie. Les conditions pour qu'elle se réalise sont difficiles à atteindre, car la température et la densité doivent être extrêmes. La fusion par confinement inertiel consiste à utiliser des lasers pour qu'une bille de combustible nucléaire atteigne ces conditions. Dans la stratégie dite d'allumage rapide, la phase de compression est découplée de la phase de chauffage. L'expérience décrite ici montre que l'utilisation d'un matériau très spécifique, le carbone vitreux, permet d'améliorer l'efficacité de la phase de chauffage. Cela s'explique par la plus grande résistivité du carbone vitreux, qui améliore la collimation du jet d'électrons responsable du transfert d'énergie entre le laser et le combustible comprimé.

L'allumage rapide **1** utilise un laser picoseconde pour déposer une grande quantité d'énergie dans le cœur dense d'une bille préalablement comprimée. Malheureusement, le laser ne peut pénétrer jusqu'au cœur et il est stoppé à

la surface. Cependant, il est possible d'utiliser les électrons comme vecteurs du transfert d'énergie entre la surface et le cœur. Afin de minimiser la distance que ces électrons auront à parcourir, la bille est pourvue d'un implant conique creux qui pointe vers le cœur. Une fois

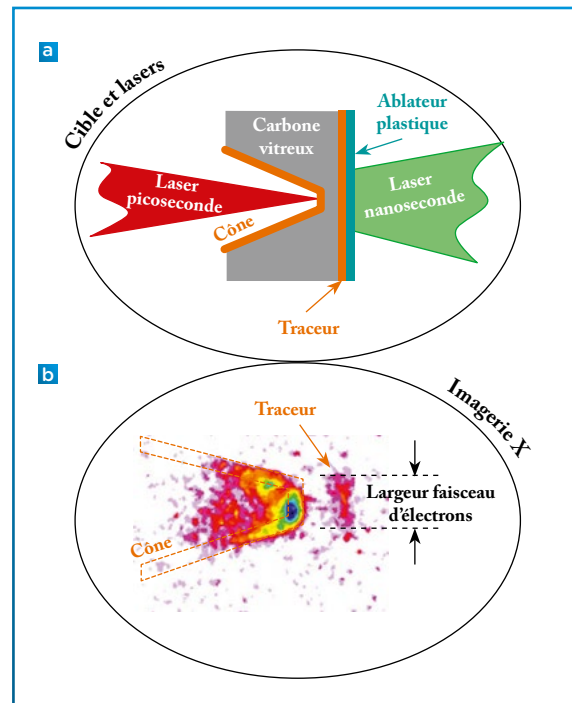
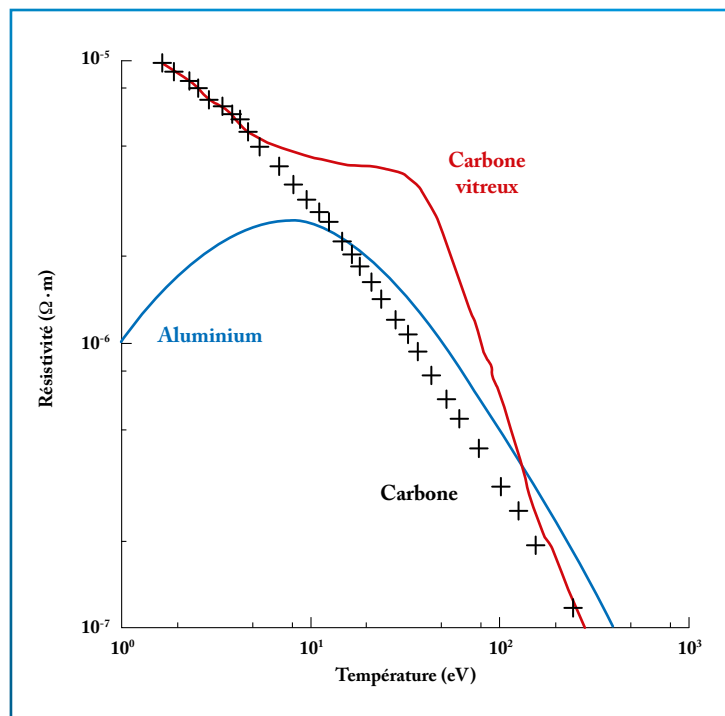


Figure 1

(a) Schéma de la cible avec ses différents composants, et géométrie d'irradiation par les deux lasers. Le laser nanoseconde comprime la cible par la droite. Le laser picoseconde génère un jet d'électrons rapides à la pointe du cône par la gauche. Le cône et le traceur sont en cuivre, matériau qui émet un rayonnement caractéristique au passage d'électrons rapides. (b) Imagerie X du cuivre chauffé par le passage des électrons. La largeur de la zone d'émission à la position du traceur est comparable à la largeur de la pointe du cône : ainsi, grâce au carbone vitreux, le jet d'électrons garde sa taille.

Figure 2

2 Courbes de résistivité de différents matériaux testés dans les simulations; la température indique l'énergie des électrons. La résistivité du carbone vitreux (courbe en rouge), plus élevée que celle d'un autre carbone (croix noires) ou de l'aluminium (courbe en bleu), explique pourquoi la collimation du jet d'électrons est meilleure qu'avec un autre matériau, grâce à un champ magnétique plus puissant qui confine mieux les électrons.



la compression atteinte, le faisceau laser accélère les électrons de la pointe du cône vers le cœur sous forme d'un jet. Il est primordial d'en limiter l'éclatement lors de sa propagation dans la zone de transfert, longue alors d'une centaine de microns. Dans l'expérience réalisée sur l'installation LULI2000 2, à Palaiseau, des cibles reproduisant la géométrie de l'allumeur rapide ont été utilisées (figure 1a). Un cône creux en cuivre a été enfoncé dans un bloc de carbone de telle sorte qu'il reste 50  $\mu\text{m}$  entre la pointe du cône et la face de sortie du carbone. Sur cette face, un traceur de cuivre a été déposé puis une couche de plastique qui sert d'ablateur. La cible est irradiée successivement par deux faisceaux laser distincts. Un premier faisceau de longue durée (3 nanosecondes) comprime la cible du côté du plastique, en direction du cône. Un second faisceau de plus courte durée (1 picoseconde) crée un jet d'électrons de la pointe du cône vers le plastique. Or, le cuivre émet un rayonnement X caractéristique lorsqu'il est traversé par des électrons rapides. Ainsi, la taille du jet d'électrons est mesurée, à l'aide d'un système d'imagerie adapté, lorsqu'il tra-

verse d'abord le cône puis le traceur. Une image de ce type (figure 1b) montre que la taille du jet d'électrons ne change pas entre la pointe du cône et le traceur.

La simulation numérique reproduit cette expérience et montre que la collimation est directement liée au choix du matériau. Elle est forte avec du carbone vitreux, forme de carbone la plus amorphe, par opposition au diamant qui en est la forme la plus cristalline, parce qu'il présente une résistivité électrique très élevée 3 (figure 2). Or, un jet d'électrons induit un champ magnétique azimuthal

(tournant autour du jet) qui tente de le collimater. Plus la résistivité du matériau est élevée, plus ce champ est puissant et plus les électrons sont contraints autour de l'axe de propagation du jet.

Cette expérience a démontré que l'ajout d'un implant en carbone vitreux au bout du cône dans les futures cibles dédiées à l'allumage rapide permettra d'en améliorer les performances. Une confirmation à pleine échelle pourra être envisagée sur l'installation Laser Mégajoule-PETAL qui possède les deux types de faisceau laser adéquats.

## RÉFÉRENCES

- 1 M. TABAK *et al.*, "Ignition and high gain with ultrapowerful lasers", *Phys. Plasmas*, **1**, p. 1626 (1994).
- 2 X. VAISSEAU, A. MORACE, M. TOUATI, M. NAKATSUTSUMI, S. D. BATON, S. HULIN, P. NICOLAÏ, R. NUTER, D. BATANI *et al.*, "Collimated Propagation of Fast Electron Beams Accelerated by High-Contrast Laser Pulses in Highly Resistive Shocked Carbon", *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 205001 (2017).
- 3 P. MCKENNA *et al.*, "Effect of Lattice Structure on Energetic Electron Transport in Solids Irradiated by Ultraintense Laser Pulses", *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 185004 (2011).