

ACCÉLÉRATION DE PROTONS PAR IMPULSION LASER ULTRA-BRÈVE ET ULTRA-INTENSE

E. LEFEBVRE, L. GREMILLET, R. NUTER
CEA - DAM - Île-de-France

Depuis le milieu des années 80, avec le développement de l'amplification d'impulsions lasers à dérive de fréquence, les chercheurs sont capables de soumettre la matière à des champs électromagnétiques de plus en plus intenses, sur des temps extrêmement brefs, de l'ordre d'une trentaine de femtosecondes. Soumise à un tel éclairage, la surface de toute cible matérielle est immédiatement ionisée et transformée en plasma dans lequel l'impulsion incidente va être partiellement absorbée. Les mécanismes physiques responsables de cette absorption conduisent à l'accélération d'électrons et d'ions du plasma jusqu'à des énergies cinétiques de plusieurs dizaines de MeV. Ces faisceaux de particules très intenses peuvent avoir plusieurs applications intéressantes.

Des accélérateurs miniatures créés par laser

À des éclairages de l'ordre de 10^{13} à 10^{15} W/cm², l'interaction laser-matière conduit à une élévation régulière de la température du milieu. Aux éclairages de l'ordre de 10^{19} W/cm², que les impulsions lasers ultra-courtes permettent de produire, elle s'accompagne aussi de la production d'électrons très énergétiques – jusqu'à plusieurs dizaines, voire une centaine de MeV – qui sont émis vers l'intérieur de la cible. De nombreux mécanismes sont susceptibles d'accélérer ces électrons à de telles énergies. Pour la plupart, ils trouvent leur source dans la forme complexe que prend la trajectoire d'un électron soumis à un champ laser de grande amplitude. Au-delà d'éclairages de l'ordre de 10^{18} W/cm², notamment, le champ électromagnétique communique une impulsion relativiste à la particule, ouvrant la voie à une grande richesse de phénomènes [1].

Ces électrons énergétiques, produits en grand nombre au point d'impact de l'impulsion laser, peuvent aisément traverser une cible de quelques microns d'épaisseur. Au fur et à mesure qu'ils débouchent en face arrière de la cible et s'échappent dans le vide, le potentiel électrostatique du plasma augmente, rappelant vers la cible une fraction des électrons. Nous arrivons rapidement

à une situation où les électrons forment un nuage diffus autour de la cible dense, en équilibre avec le potentiel électrostatique qu'ils ont créé en s'échappant du plasma (figure 1). Aux interfaces entre la cible et le nuage d'électrons, un champ électrostatique de très forte amplitude est établi (plusieurs TV/m). Il accélère les ions présents au voisinage de ces interfaces jusqu'à des énergies de plusieurs MeV [2]. Si une couche de protons a été déposée sur la face arrière de la cible – volontairement, ou du fait d'une pollution de cette surface par des espèces hydrogénées – ces ions plus légers seront préférentiellement ionisés et accélérés dans le champ de charge d'espace. Les faisceaux de protons ainsi produits, très directs, peuvent emporter jusqu'à quelques pour cent de l'énergie laser incidente.

Derrière l'apparente simplicité de la description qui précède, se cache une physique complexe, qui fait l'objet de nombreuses études. Pour explorer des mécanismes aussi non-linéaires, se déroulant sur des échelles de temps et d'espace qui défient souvent la mesure, la simulation numérique est un outil irremplaçable. Dans ce domaine d'éclairages lasers élevés, les phénomènes sont par nature cinétiques, et ne relèvent donc pas d'une description fluide comme c'est souvent le cas en physique des plasmas lasers. Les logiciels de simulation doivent donc décrire, de manière couplée, l'évolution des champs électro-

magnétiques et des fonctions de distributions particulières dans le système modélisé. Quelle que soit la méthode numérique utilisée, cela représente une quantité de calcul colossale, qui n'est à la portée que de gros calculateurs scientifiques, massivement parallèles. Depuis dix ans, avec le code CALDER, développé spécifiquement pour les machines parallèles du CEA - DAM, nous disposons d'un outil numérique puissant, multidimensionnel, très bien adapté à l'étude des phénomènes cinétiques accompagnant l'interaction laser-plasma. Ce code trouve donc des applications aussi bien dans l'étude des éclaircissements relativistes que dans une gamme de flux plus modeste, caractéristique de la fusion par confinement inertiel.

Des collaborations durables se sont mises en place entre notre groupe, spécialisé dans la simulation numérique de l'interaction à haute intensité, et les équipes expérimentales principales de ce domaine en France : le Laboratoire d'optique appliquée (ENSTA), le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (École polytechnique), et le groupe de physique à haute intensité (CEA/IRAMIS). Les résultats expérimentaux obtenus sur les installations de ces équipes sont précieux pour valider notre modélisation, et, en retour, la simulation numérique fournit des indications essentielles sur les phénomènes en jeu, qui échappent souvent à la mesure, et suggère des pistes d'améliorations pour les expériences.

Une interaction optimale avec des cibles nanométriques

Il y a trois ans, en modélisant l'accélération ionique à partir de cibles denses et minces, nous avons mis en évidence une augmentation de l'énergie des ions produits quand l'épaisseur de la cible est réduite jusqu'à des valeurs sub-micrométriques [3]. Il était difficile de mettre cette conjecture à l'épreuve, car la technologie laser ne permettait pas, alors, de réaliser des expériences

avec des cibles aussi fines : celles-ci étaient trop perturbées par le piédestal de l'impulsion laser (*ce piédestal est une impulsion lumineuse beaucoup moins intense que l'impulsion principale, la précédant de plusieurs centaines de picosecondes, et susceptible d'endommager la cible avant l'arrivée de l'impulsion principale, ruinant ainsi toute possibilité d'accélération ionique*). Rapidement, heureusement, des impulsions lasers suffisamment "propres" ont été obtenues. Elles ont permis à plusieurs laboratoires de réaliser des expériences avec des cibles d'une centaine de nanomètres d'épaisseur [4], [5]. Toutes ces expériences concluaient alors à une efficacité supérieure de l'accélération avec ces cibles ultra-minces. Des énergies de protons de l'ordre de 5 à 6 MeV ont pu être obtenues avec des intensités lasers qui, sur des cibles plus massives, ne produisaient que des particules bien moins énergétiques, de l'ordre de 2 MeV. D'autres pistes sont actuellement à l'étude dans notre groupe pour améliorer encore l'accélération ionique. Nous envisageons, par exemple, d'utiliser une rampe de densité contrôlée, créée devant la cible par un faisceau laser secondaire, afin d'augmenter l'efficacité du couplage laser-cible et la production des électrons relativistes.

Des applications médicales et scientifiques variées

Parallèlement à l'amélioration de la source de particules, nos réflexions portent aussi sur les applications de ces accélérateurs miniatures. Durant leur propagation dans une cible secondaire, solide ou plasma, les protons énergétiques vont se ralentir, par le biais des collisions qu'ils effectuent sur les électrons et les ions du milieu. Ils peuvent aussi, quand ces collisions ne sont pas élastiques, participer à des réactions nucléaires avec des atomes de la cible et créer des isotopes radioactifs. Cette dernière possibilité a motivé l'étude des sources d'ions accélérés par laser pour produire des isotopes radioactifs médicaux.

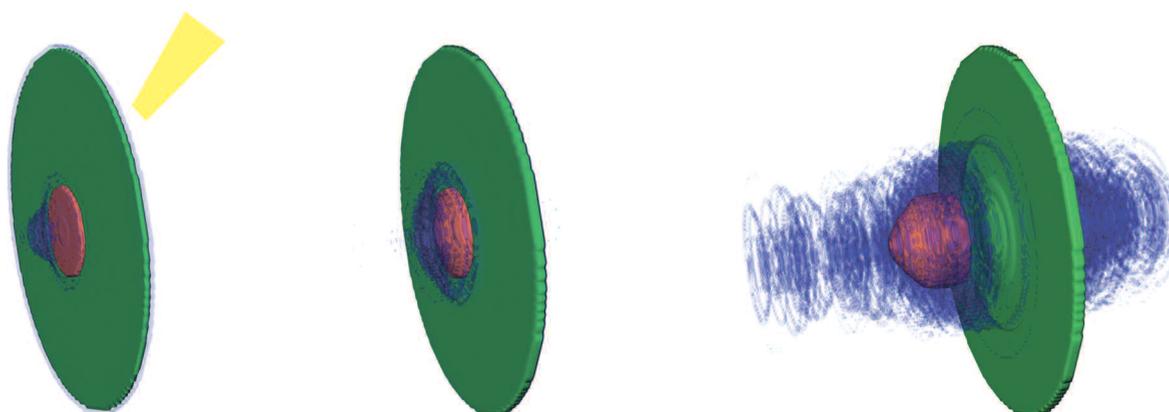
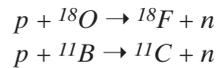


Figure 1

Accélération de protons à partir d'une cible mince irradiée par un faisceau laser intense.

Une fine couche de protons (rouge) est déposée sur une cible solide mince (vert). Une impulsion laser courte et intense frappe la cible du côté opposé au dépôt de protons, accélérant des électrons (bleu) à des énergies relativistes. Ces électrons traversent la cible et établissent un champ électrostatique de forte amplitude sur la face opposée à l'impact laser, accélérant les protons qui s'y trouvent. Au cours de l'accélération, la couche de protons se détend et se bombe, sous l'effet des non-uniformités du champ accélérateur.

Les isotopes radioactifs les plus fréquemment utilisés pour les examens de tomographie par émission de positrons, tels que le fluor 18 ou le carbone 11, sont, classiquement, produits à l'aide de faisceaux de protons réagissant avec des cibles d'oxygène 18 ou de bore 11, selon les réactions :



Les protons utilisés pour ces réactions sont accélérés à des énergies d'une vingtaine de MeV par des cyclotrons. Tout en étant de taille modeste, ces machines posent des contraintes de radioprotection qui freinent leur diffusion en milieu hospitalier. L'accélération de protons par laser de haute intensité a donc été envisagée comme moyen alternatif pour produire ces faisceaux de protons. Il y a quelques années [6], nous avons réalisé des simulations numériques détaillées de l'accélération ionique et des réactions nucléaires provoquées par ces protons dans une cible d'oxygène 18. Nous avons montré que la quantité d'isotopes produite varie, en fonction de l'intensité laser sur cible I , selon une loi de puissance : $\approx I^{2.7}$ (figure 2). Mais il est apparu très difficile d'atteindre, avec cette méthode, des rendements compétitifs avec le mode de production actuel utilisant des accélérateurs conventionnels.

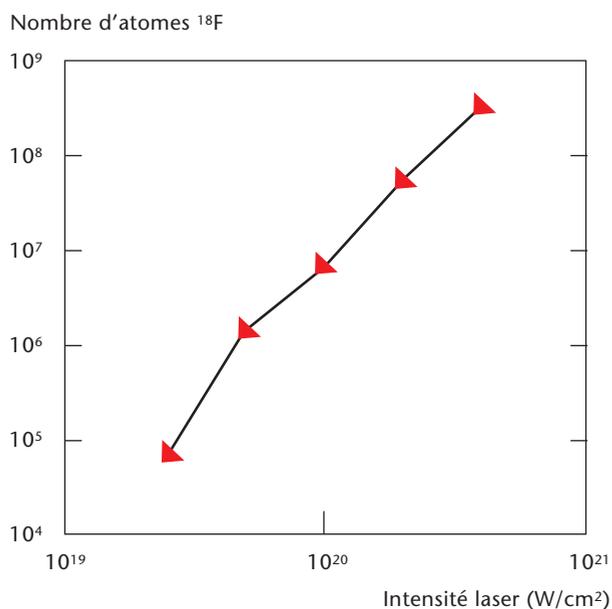


Figure 2

Calcul du nombre d'atomes de fluor 18 créés lors du ralentissement, dans une cible d'oxygène 18, d'un faisceau de protons accélérés par laser, à partir d'une cible de 2 μm d'épaisseur. Le nombre d'atomes d'isotope produits augmente proportionnellement à la puissance 2,7 de l'intensité laser sur cible, en accord qualitatif avec les mesures expérimentales.

A l'inverse de cet exemple, d'autres applications peuvent tirer un excellent parti des propriétés remarquables (*bonne émittance, très forte densité de courant, faible durée à la source, etc.*) des faisceaux de protons accélérés par laser. Tout en cherchant à améliorer les propriétés de ces faisceaux, nos études portent donc aussi sur leurs applications : chauffage isochore de matière solide ou comprimée, source de neutrons pulsée, mesure de champ magnétique dans un plasma de fusion, etc.

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. FUCHS, P. ANTICI, E. D'HUMIÈRES, E. LEFEBVRE et Al., "Laser-driven proton scaling laws and new paths towards energy increase", *Nature Physics*, **2**, p. 48-54 (2006).
- [3] E. D'HUMIÈRES, E. LEFEBVRE, L. GREMILLET, V. MALKA, "Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils", *Physics of Plasmas*, **12**, 062704, p.1-13 (2005).
- [4] P. ANTICI, J. FUCHS, E. D'HUMIÈRES, E. LEFEBVRE et Al., "Energetic protons generated by ultrahigh contrast laser pulses interacting with ultrathin targets", *Physics of Plasmas*, **14**, 030701, p. 1-4 (2007).
- [5] T. CECCOTTI et Al., "Proton acceleration with high-intensity ultrahigh-contrast laser pulses", *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 185002, p. 1-4 (2007).
- [6] E. LEFEBVRE, E. D'HUMIÈRES, S. FRITZLER, V. MALKA, "Numerical simulation of isotope production for positron emission tomography with laser-accelerated ions", *Journal of Applied Physics*, **100**, 103308, p. 1-10 (2006).