

■ **CONTEXTE** ■ Depuis la fin des années soixante-dix, les physiciens cherchent à mettre au point un nouveau type de machine utilisant des plasmas. Le but ? S'affranchir des contraintes de taille et

de coûts des accélérateurs de particules conventionnels. Dans leurs premières expériences, les particules étaient accélérées de façon aléatoire. Mais l'on arrive à présent à produire des faisceaux

d'électrons de bonne qualité, de forte intensité et à une énergie bien définie. Des applications en médecine, en physique des accélérateurs, en chimie et en physique des matériaux pourraient suivre.

# Électrons surfeurs pour mini-accélérateurs

Les lasers à impulsions très brèves et de forte puissance permettent de produire aujourd'hui des faisceaux de particules aux propriétés particulièrement intéressantes, performants et moins coûteux. Les nouvelles sources de particules ouvrent la voie à de multiples applications. L'ère des grands accélérateurs est-elle révolue ?

**Victor Malka et Jérôme Faure** sont chercheurs au Laboratoire d'optique appliquée, unité mixte du CNRS, de l'École nationale supérieure des techniques avancées et de l'École polytechnique  
victor.malka@ensta.fr  
jerome.faure@ensta.fr

**Érik Lefebvre** est chercheur au département de physique théorique et appliquée du Commissariat à l'énergie atomique.  
Erik.Lefebvre@cea.fr

**D**e la *Dream Team* du basket américain au *Dream Beam*. Le « faisceau de rêve », comme l'a surnommé la revue *Nature*, est une machine compacte, peu coûteuse, tenant sur quelques mètres carrés et capable d'accélérer des particules à l'aide d'un faisceau laser [1]. L'engin a évidemment de quoi séduire ! Car ses dimensions et son coût tranchent avec les grands accélérateurs, collisionneurs linéaires, cyclotrons, et autres synchrotrons, qu'utilisent habituellement les physiciens pour sonder la matière.

Depuis que les premiers accélérateurs ont fait leur apparition, l'énergie des particules produites en laboratoire n'a cessé de croître, passant de quelques milliers d'électronvolts\* à près d'un milliard de milliards aujourd'hui. Mais, dans les machines traditionnelles, l'intensité des champs électriques permettant d'accélérer les particules est limitée : des phénomènes dits de « claquages », sortes de décharges électriques, ont pour effet de détériorer les structures accélératrices.

Pour passer outre, il faut donc voir de plus en plus grand : les particules sont accélérées dans des structures successives, et les dispositifs sont devenus gigantesques. En ce moment, par exemple, se construit au CERN, près de Genève, le Large Hadron Collider (Grand Collisionneur

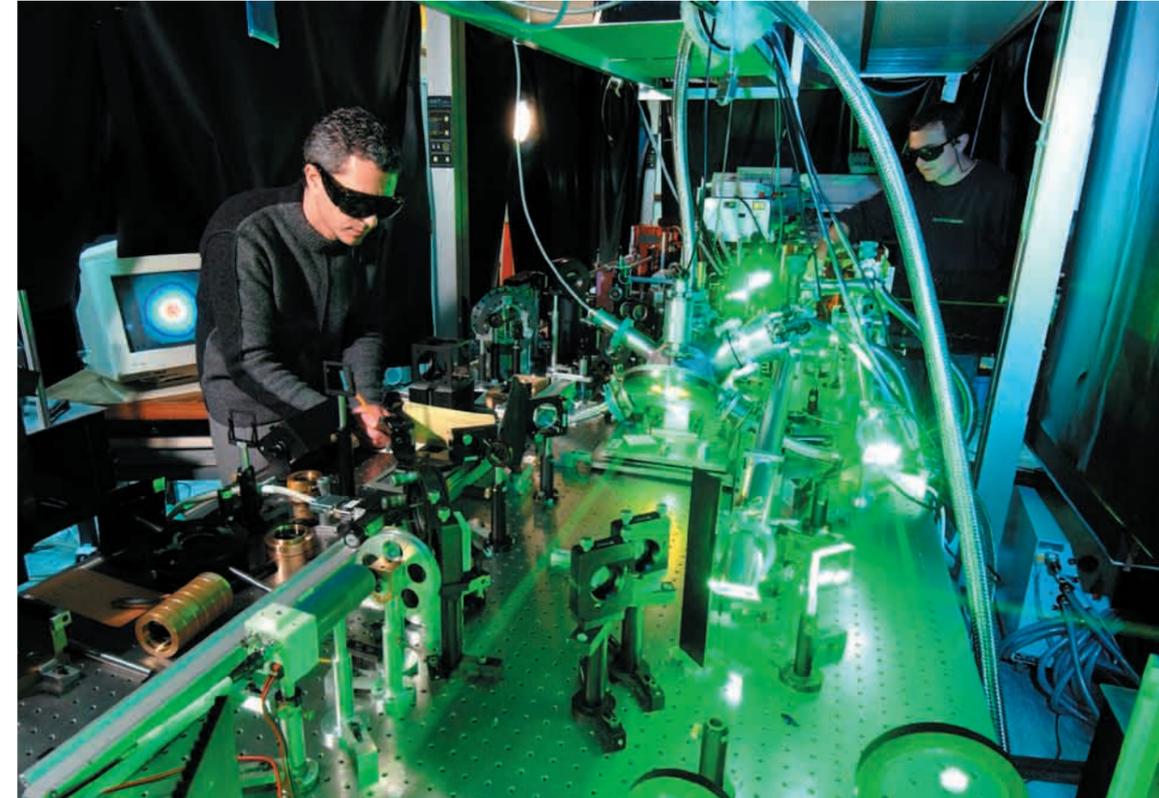
de Hadrons, ou « LHC ») : un accélérateur aussi grand que le boulevard périphérique de Paris, dont le coût est de plusieurs milliards d'euros !

Dans des versions plus modestes, les accélérateurs de particules font également partie de notre vie quotidienne, par exemple ceux nichés dans les tubes cathodiques des écrans de télévision et des ordinateurs. Ces faisceaux de particules de faible énergie servent aussi à produire les rayons X nécessaires à de nombreux examens médicaux. Pour tous ces usages, des progrès permettant de réduire la taille des accélérateurs seraient grandement bénéfiques.

## Plasmas à la rescousse

À la fin des années soixante-dix, Toshi Tajima et John Dawson, deux physiciens de l'université de Californie, à Los Angeles, lançaient une idée en ce sens. Sur la base de leurs travaux en simulation numérique, ils suggéraient que des électrons pourraient théoriquement être accélérés dans un plasma à une vitesse proche de celle de la lumière [2].

L'état de plasma est l'un des quatre états de la matière, avec l'état solide, liquide et gazeux. Par nature, ces plasmas, milieux ionisés constitués d'électrons libres et d'ions, peuvent supporter des champs électriques dix mille à cent mille fois supérieurs à ceux utilisés dans les accélérateurs



CETTE CHAÎNE D'AMPLIFICATION LASER DU LABORATOIRE D'OPTIQUE APPLIQUÉE, à Palaiseau, permet d'obtenir un rayonnement d'une puissance de cent mille milliards de watts. Ce laser sera utilisé pour accélérer des particules. © PATRICK ALLARD/REA

traditionnels. Dans un plasma, la distance sur laquelle une particule doit être accélérée pour parvenir à une énergie donnée est donc considérablement réduite par rapport aux machines actuelles.

L'idée de Tajima et de Dawson a stimulé la recherche. Au début des années quatre-vingt-dix, sa confirmation expérimentale est apportée par une équipe américaine qui parvient pour la première fois à accélérer des électrons injectés dans un plasma [3]. Peu après, en Grande-Bretagne, des faisceaux d'électrons de grande énergie sont directement produits grâce à un laser de forte puissance, sans qu'aucune source extérieure de particules soit nécessaire [4].

Dans cette quête vers des accélérateurs modèles réduits, un nouveau pas est franchi en 1999 avec un laser d'une énergie et d'une taille plus modestes encore, au Laboratoire d'optique appliquée (LOA), laboratoire de recherche mixte du CNRS, de l'École nationale supérieure des techniques avancées et de l'École polytechnique. Avec ce laser compact, on a pu produire des faisceaux d'électrons de 70 millions d'électronvolts. En 2002, des faisceaux d'électrons d'énergie trois fois plus élevée seront obtenus [5].

En 2004, enfin, trois équipes indépendantes, aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France, réalisent une

avancée notable. Elles obtiennent pour la première fois des faisceaux qui, par leurs qualités, s'approchent de ceux délivrés par les accélérateurs traditionnels, mais seulement sur une distance d'accélération de quelques millimètres ! La nouveauté : tous les électrons constituant ces faisceaux sont animés d'une énergie voisine et sont accélérés dans la même direction. Les fameux « faisceaux de rêve » dont parlait la revue *Nature*...

## Une puissance colossale

Pour créer ces faisceaux, on utilise des lasers qui délivrent des impulsions ultrabrèves, de l'ordre de quelques dizaines de femtosecondes\*. Parce que ces impulsions ont des durées incroyablement courtes, elles produisent au final des puissances énormes avec une énergie de départ relativement modeste. À titre d'exemple, pour obtenir une puissance d'un million de milliards de watts avec une impulsion laser d'un milliardième de seconde, l'énergie nécessaire serait d'un million de joules. En revanche, il n'est besoin que de 30 joules pour une impulsion de 30 femtosecondes.

Lorsqu'une telle impulsion est focalisée sur une cible de matière, le champ électrique énorme qui lui est associé arrache les électrons des atomes de la ⇒

\* L'électronvolt est une unité de mesure quantifiant l'énergie des particules. Elle correspond à la quantité d'énergie que gagne un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel d'un volt.

\* Une femtoseconde équivaut à un milliardième de milliardième de seconde.

[1] J. Faure et al., *Nature*, 431, 541, 2004 ; C. Geddes et al., *Nature*, 431, 538, 2004 ; S. Mangles et al., *Nature*, 431, 535, 2004.

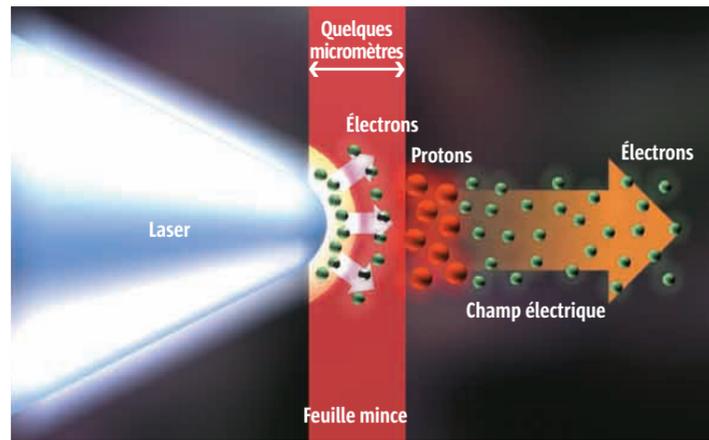
[2] T. Tajima et J. Dawson, *Phys. Rev. Lett.*, 43, 267, 1979.

[3] F. Amiranoff et al., « Accélérer des particules avec un plasma », *La Recherche*, décembre 1992, p. 1443.

[4] A. Modena et al., *Nature*, 377, 606, 1995.

[5] V. Malka et al., *Science*, 298, 1596, 2002.

**PRINCIPE** Accélération des ions par laser



**POUR ACCÉLÉRER DES IONS, ON FOCALISE UNE IMPULSION LASER ULTRA INTENSE SUR UNE CIBLE SOLIDE (EN ROUGE),** par exemple une feuille d'aluminium très mince. La face avant de la cible est instantanément ionisée et transformée en plasma. Une partie importante de l'impulsion lumineuse est alors absorbée par le plasma conduisant à la production de nombreux électrons de forte énergie (boules vertes). Ces électrons peuvent aisément traverser l'épaisseur de la cible (flèches blanches) et s'échapper dans le vide qui l'entoure. Mais au fur et à mesure que des électrons sont arrachés au plasma, son potentiel électrostatique augmente, piégeant autour de la cible une fraction de plus en plus grande des électrons. On forme ainsi rapidement un nuage diffus d'électrons énergétiques autour de la cible. Si le potentiel électrostatique a pour effet de confiner ces derniers, il produit un effet inverse sur les ions du plasma (boules rouges) qui ont une charge électrique positive, et qui subissent une force centrifuge. Résultat : la cible explose en quelques millièmes de milliardième de seconde, et les ions se trouvent accélérés sur une fraction de millimètre (flèche orange) jusqu'à des énergies de plusieurs millions d'électronvolts. © INFORAPHIE GRÉGOIRE CIRADE

⇒ matière, celle-ci passant immédiatement de son état initial, gazeux ou solide, à celui de plasma. La violence de l'interaction entre la lumière et la matière est si intense que les électrons du plasma, mais aussi des ions, peuvent être accélérés à des énergies de plusieurs millions d'électronvolts.

**Dans le sillage du laser**

Comment les particules sont-elles accélérées? Le mécanisme dépend en réalité de la nature du faisceau de particules que l'on veut obtenir. Pour des ions, on favorise la production de champs électriques statiques (lire l'encadré « Accélération des ions par laser »). Pour des électrons, on utilise des ondes progressives, c'est-à-dire des champs électriques qui se propagent à grande vitesse dans le plasma [fig. 1]. On procède comme suit. Un laser très intense est focalisé sur un jet de gaz, habituellement de l'hélium, qui se trouve instantanément ionisé. Dans le plasma ainsi formé, la pression de radiation du laser chasse alors les électrons hors du chemin de l'impulsion lumineuse. Plus lourds, les ions sont peu sensibles à la pression de

radiation et restent immobiles. La différence de répartition des charges crée un champ électrique qui tend à ramener les électrons vers leur position initiale. Résultat : les électrons se mettent à osciller avec une période directement liée à la densité initiale du milieu. Cette oscillation est appelée « onde plasma », et le champ électrique associé à ce mouvement constitue l'onde progressive nécessaire à l'accélération des électrons. Si la durée de l'impulsion laser est de l'ordre de la période d'oscillation du plasma, le transfert d'énergie du laser vers les ondes plasmas est optimal.

Il existe une analogie simple pour expliquer ce phénomène. Le laser qui se propage dans le plasma est très similaire à un bateau créant une vague dans son sillage. Si cette vague (l'onde plasma) est d'une amplitude suffisante, des surfeurs (les électrons) peuvent s'en servir pour gagner de la vitesse. Ainsi, dans notre expérience, nous avons généré une vague énorme derrière l'impulsion laser, et nous nous en sommes servis pour accélérer les électrons.

**Contrôler les ondes**

Dans la réalité, certes, les choses sont un peu plus complexes. Contrairement au bateau qui file sur la mer, l'impulsion laser se déforme dans le plasma : l'avant de l'impulsion ralentit, tandis que l'arrière accélère. Cela conduit à une compression de l'impulsion laser qui excite une onde plasma tellement intense qu'elle finit par déferler. Comme une énorme vague qui s'écroule sur la rive, elle accélère alors tout ce qui se trouve sur son passage. L'onde plasma déferlante piège et accélère les électrons du plasma conduisant, du coup, à la génération des faisceaux d'électrons.

Dans les expériences précédentes, le déferlement des ondes était très difficile à contrôler. Les électrons étaient accélérés de façon aléatoire, et les faisceaux obtenus étaient de mauvaise qualité. Animés de vitesses différentes, les électrons étaient aussi accélérés dans des directions différentes. Or, dans la pratique, de tels faisceaux sont difficiles à utiliser. On ne peut ni les propager ni les focaliser, ce qui réduit considérablement les applications possibles. Mais les résultats de l'année dernière, publiés dans *Nature*, ont montré qu'en utilisant des impulsions laser encore plus courtes et des longueurs d'interaction plus grandes il était possible de contrôler les mécanismes d'injection des électrons dans l'onde plasma. Le caractère aléatoire du déferlement peut ainsi être évité : les électrons étant tous piégés au même endroit, ils acquièrent tous la même énergie lors de l'accélération.

Un laser formant un sillage, une vague d'électrons qui déferle : derrière ces analogies et ces métaphores se cache une physique très complexe qui fait l'objet de nombreuses études. Pour explorer des mécanismes se déroulant à des échelles de temps et d'espace qui défient souvent la mesure, la simulation numérique est un outil aussi précieux qu'irremplaçable. Quel que soit le mécanisme d'accélération étudié ou le logiciel de modélisation utilisé, la puissance de calcul requise est colossale. Elle n'est à la portée que des ordinateurs très puissants composés de nombreux processeurs fonctionnant en parallèle.

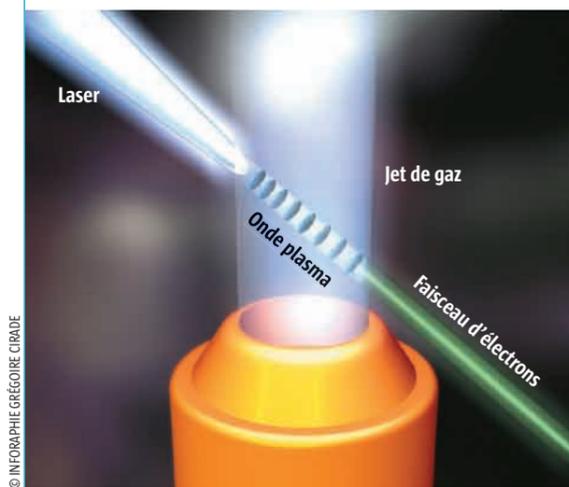
En contrepartie de cette boulimie de ressources informatiques, les modèles numériques fournissent une vue très détaillée de l'interaction laser-matière et permettent de réaliser des observations inaccessibles à la mesure expérimentale. Ils permettent aussi de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre, et fournissent des indications sur les expériences qui seront conduites ultérieurement avec des lasers encore plus performants.

**Augmenter les cadences**

L'accélération laser-plasma remplacera-t-elle un jour les gigantesques accélérateurs? Si ces sources de particules ouvrent des perspectives fascinantes, il faut reconnaître que, pour la physique des hautes énergies, le défi reste encore très difficile à relever. Dans les domaines d'énergie de l'ordre du million de milliards d'électronvolts, en effet, une propriété essentielle des faisceaux, appelée « luminosité », qui quantifie le nombre de collisions entre particules, est encore largement hors de portée pour la méthode laser-plasma. Pour obtenir une luminosité similaire à celle des grands accélérateurs, et en supposant qu'on arrive un jour à obtenir des faisceaux d'une énergie comparable, il faudrait augmenter considérablement la cadence des lasers. Or, actuellement, les lasers ne génèrent que dix impulsions par seconde, soit dix paquets d'électrons par seconde. Pour la physique des hautes énergies, il en faudrait au moins cent fois plus, ce qui demandera un effort de développement très important. Mais d'autres applications sont tout à fait envisageables à court et à moyen termes. Dans le cadre de la chimie ultrarapide,

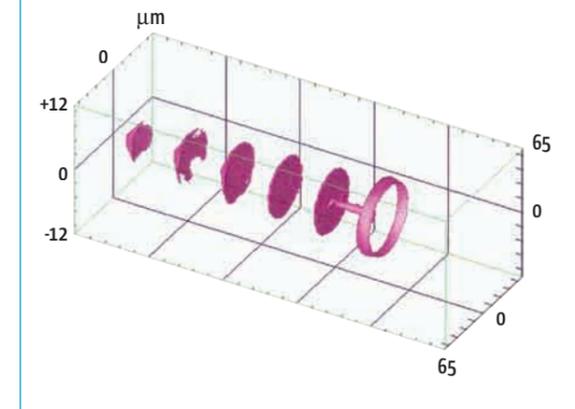
**Fig.1 Créer des faisceaux d'électrons**

**UN LASER À IMPULSION ULTRABRÈVE et de forte puissance est focalisé sur un jet d'hélium de quelques millimètres de diamètre. Le gaz se transforme alors en plasma dans lequel des ondes (coupelles bleues) de très grande amplitude sont générées dans le sillage du laser. Portés par ces ondes, les électrons sont ensuite accélérés à de très grandes vitesses et expulsés du plasma.**



© INFORAPHIE GRÉGOIRE CIRADE

**Fig.2 Formation des ondes plasma**



**CETTE SIMULATION NUMÉRIQUE À TROIS DIMENSIONS permet de comprendre la structure de l'onde plasma qui accélère les électrons sur une dizaine de micromètres. On représente ici la perturbation de la densité des électrons (en mauve) derrière le laser. Les disques roses représentent les régions où cette densité est maximale. Cette variation s'accompagne d'un champ électrique élevé, qui accélère certains électrons sous la forme d'un faisceau cylindrique très fin (à droite).**

l'année dernière, au LOA, la solvation\* des électrons d'un colorant a pu être mesurée sur des échelles de temps extrêmement brèves avec des faisceaux d'électrons. Autre exemple : des flashes de rayons X ultrabrefs ont été obtenus en focalisant un autre laser sur un faisceau d'électrons : une telle source de rayons X pourrait notamment être exploitée pour l'étude de structures transitoires en biologie. Mais les applications les plus prometteuses concernent le domaine médical.

**Protonthérapie**

Les faisceaux de particules sont couramment utilisés pour le traitement du cancer en bombardant la tumeur par des électrons, des rayons X ou encore des protons. De masse plus élevée que les électrons, les protons déposent leur énergie préférentiellement en fin de parcours et sur une zone de tissus relativement étroite, ce qui permet de minimiser l'irradiation des cellules saines situées autour de la tumeur. Mais cette thérapie, qui nécessite des protons de 60 à 250 millions d'électronvolts, est encore peu répandue, en raison du coût et du poids des accélérateurs utilisés. Ainsi, il n'existe aujourd'hui que deux centres de protonthérapie en France. Les résultats expérimentaux obtenus au LOA, où des protons d'énergie supérieure à 10 millions d'électronvolts ont été mesurés, indiquent qu'un laser d'une puissance d'un million de milliards de watts fonctionnant à une cadence de dix tirs pas seconde pourrait très bien produire des protons avec l'énergie requise. Le développement de l'accélération laser-plasma est encore étroitement lié à celui des lasers à impulsions ultracourtes ainsi qu'à notre compréhension de leur interaction avec la matière. Mais l'optimisation des paramètres des lasers, ainsi que des cibles, devrait permettre d'améliorer encore la qualité des faisceaux et d'atteindre des applications insoupçonnées. Un rapprochement entre la communauté des physiciens des accélérateurs, des lasers et des plasmas permettra enfin de faire émerger l'ensemble des avantages et des possibilités offertes par cette technologie. ■ V. M., E. L., J. F.

\* Le phénomène de solvation correspond à la manière dont les molécules de solvants s'organisent autour d'une espèce chimique et en modifient la réactivité.