

# Etat de l'Art des Accélérateurs à Plasma-Laser

V. Malka

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Optique Appliquée, École Nationale Supérieure des Techniques Avancées,  
École Polytechnique, CNRS, UMR 7639, 91761 Palaiseau, France.*

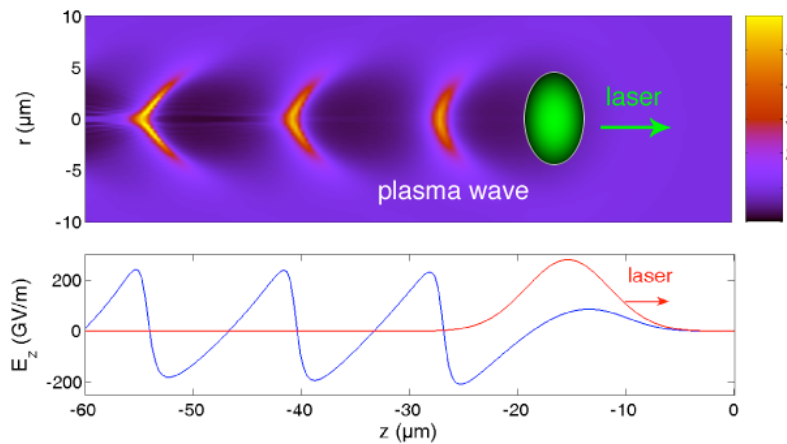
mél: [victor.malka@ensta.fr](mailto:victor.malka@ensta.fr)

La découverte de la supraconductivité à basse température (4 Kelvin) du mercure refroidi à l'hélium liquide, réalisée par K. Onnes en 1911, a ouvert un champ de recherche très actif. Après des décennies d'effort, les chercheurs ont été en mesure de produire de nouveaux matériaux supraconducteurs qui travaillent à de plus hautes températures. Même si il reste encore beaucoup de questions fondamentales, la maîtrise de la supraconductivité a permis la découverte d'importantes applications par exemple en imagerie par résonance magnétique (IRM) pour la médecine, dans les transports (trains à suspension magnétique), et dans les accélérateurs modernes (cavités supraconductrices). En parallèle, depuis la réalisation du premier faisceau d'ion mercure à 1.26 MeV faite par E. O. Lawrence, les accélérateurs ont gagné en efficacité et en performance. Avec un marché de plusieurs milliards d'euros par an, les accélérateurs sont utilisés aujourd'hui dans de nombreux domaines tels que le traitement du cancer, l'implantation ionique, la production de radio-isotopes, la sécurité, etc...

Les machines les plus énergiques, qui délivrent des faisceaux de particules à des énergies supérieures à 1 GeV, ne représentent que 1% du nombre total des accélérateurs. Elles ont été développées pour la recherche fondamentale, par exemple pour la production de faisceaux intenses de rayons X dans le schéma de laser à électrons libres. Ces sources X ont un intérêt pour l'étude des phénomènes rapides ultra, par exemple, en biologie, elles permettent de suivre l'évolution de molécules biologiques telle que l'ADN, ou dans la science des matériaux. Les accélérateurs de plus grandes énergies sont essentiels pour répondre aux questions fondamentales concernant l'origine de l'univers, l'énergie sombre, le nombre de dimension de l'espace, etc .. Le plus grand accélérateur disponible, le LHC (Large Hadron Collider), permettra, probablement dès cette année, de révéler les propriétés du boson de Higgs.

Les accélérateurs modernes utilisent des cavités supraconductrices aux seins desquelles des ondes radio-fréquence (RF) sont produites pour accélérer les particules chargées. Cette technologie, développée depuis plus d'un demi-siècle a fait ses preuves : elle permet de produire des faisceaux de particules de très bonne qualité et avec une grande stabilité. Pour éviter les phénomènes de claquage qui endommagent les cavités, le champ accélérateur ne peut dépasser les quelques dizaines de mégavolts par mètre. Les plasmas étant des milieux ionisés, les problèmes de claquage ne se posent plus et des champs électriques très intenses peuvent s'y propager. On est ainsi capable de produire des champs électriques de l'ordre de quelques centaines de gigavolts par mètre [1], soit plus de 10 000 fois plus élevés que les champs utilisés dans les accélérateurs conventionnels. C'est en focalisant une impulsions laser intense (énergie de l'ordre du Joule et durée de quelques dizaines de fs) dans une cible gazeuse ou déjà à l'état de plasma que l'on crée les champs électriques très intenses. Lorsqu'elle pénètre dans le plasma, l'impulsion lumineuse exerce une pression très forte sur les électrons par le biais de la force pondéromotrice. Cette force, proportionnelle au gradient de l'éclairement laser, va chasser les électrons de son passage, les écartant de leur position d'équilibre. Les ions plus lourds, qui n'ont pas encore eu le temps de bouger vont rappeler les électrons qui vont ainsi osciller à la fréquence plasma ( $\omega_p = e^2 n_{e0} / m \epsilon_0$  où e et m sont la charge

et la masse de l'électron et  $n_{e0}$  est la densité du plasma. Ces séparations de charges se traduisent par une perturbation de la densité d'électrons du plasma qui se propage avec une vitesse de phase  $v_p$  proche de la vitesse de la lumière. Le champ électrique longitudinal correspondant est alors très intense. Il a une amplitude maximale  $E_{z\max} = mc\omega_p\delta/e$ , proportionnel à l'amplitude de la perturbation de densité  $\delta$ . En unité pratique  $E [\text{V/m}] = 96 \delta n^{1/2}[\text{cm}^{-3}]$ . Soit par exemple,  $E_z = 300 \text{ GV/m}$  pour  $n_{e0} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et  $\delta = 1$ . La figure 1 illustre, dans le cas non linéaire ( $\delta > 1$ ), la perturbation de densité électronique et montre le champ électrique associé.

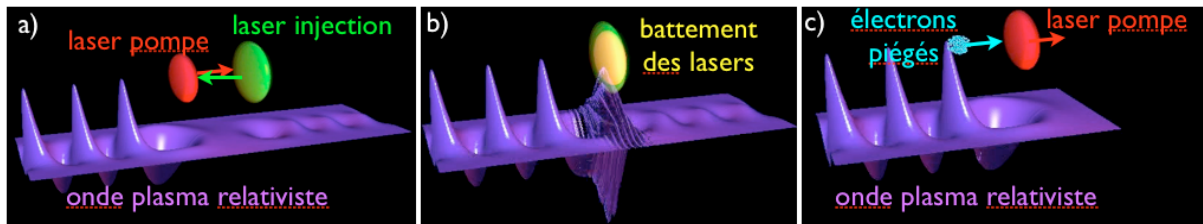


**Figure 1 :** Onde de sillage créée par laser, en haut : perturbation de densité électronique, en bas : champ électrique longitudinal sur l'axe laser.

Un électron peut alors gagner de l'énergie dans ces champs électriques longitudinaux s'il possède une vitesse initiale suffisante pour y être piégé. A cette condition l'électron acquiert une énergie maximale donnée par  $\Delta E \simeq eE_z L_{\text{deph}}$ , où  $L_{\text{deph}} = \lambda_p^3/2\lambda_0^2$  est la longueur de déphasage ( $\lambda_p$  et  $\lambda_0$  sont les longueurs d'onde plasma et laser). La longueur de déphasage représente la distance qu'un électron met pour passer d'une zone accélératrice à une zone décélératrice de l'onde plasma. Pour obtenir des faisceaux d'électron de bonnes qualités, il faut injecter le plus grand nombre d'électrons avec la bonne phase dans l'onde plasma. Le champ électrique n'étant pas constant, il convient de les injecter sur une petite fraction de la longueur d'onde plasma  $\lambda_p$ , de sorte que le champ accélérateur  $E_z$  soit identique pour tous les électrons à injecter. Concrètement, il est donc nécessaire d'injecter un faisceau d'électrons ultra bref de durée inférieure à la durée de l'impulsion laser, c'est à dire de quelques dizaines de femtoseconde. Cela constitue un réel défi puisqu'il n'existe actuellement pas de sources de particules aussi courtes disponibles en laboratoire. Pour pallier ce problème nous avons réalisé l'injection des électrons de façon tout optique [2]: deux faisceaux laser ultra-courts interagissant avec le plasma ont permis le contrôle de l'injection et l'accélération des électrons. Le schéma de principe de la méthode de collision d'impulsions laser est illustré sur la figure 2. Ce schéma permet l'obtention de faisceaux d'électrons plus stables, de plus faible dispersion en énergies, et mieux contrôler que le schéma de la bulle [3] (aussi appelé régime d'autoinjection).

Les expériences de collision d'impulsion réalisées au LOA ont permis la production de faisceaux d'électrons de 300 MeV avec des distributions quasi-monoénergétiques, de très faibles dispersion en énergie de l'ordre de 1%, et d'une remarquable stabilité tir à tir (fluctuation de quelques % des paramètres). De plus, cette méthode permet un degré de contrôle important sur l'injection des électrons : on peut par exemple régler la charge du faisceau d'électrons en modifiant l'éclairement de l'impulsion d'injection ou sa polarisation.

Il est également possible de régler facilement l'énergie du faisceau d'électrons en changeant la position de recouvrement des impulsions laser.



**Figure 2 :** principe du schéma de collision d'impulsion. a) l'impulsion pompe crée l'onde plasma accélératrice, b) les impulsions chauffent lors de leur battement certains électrons, c) les électrons piégés sont accélérés dans le sillage de l'impulsion laser pompe.

Le meilleur contrôle de l'injection a permis (i) de réaliser des études fondamentales sur les processus d'interaction laser-plasma-faisceau d'électron : inhibition des ondes plasmas, effet de beam loading (réponse électrique du plasma au faisceau d'électron), et des mécanismes de chauffage, (ii) de caractériser très finement le courant crête du faisceau d'électron. Ce courant de quelques kA (faisceau ultra bref de quelques fs et de quelques pC) [4] est comparable à celui utilisé au SLAC pour saturer le laser à électron libre LCLS en Californie.

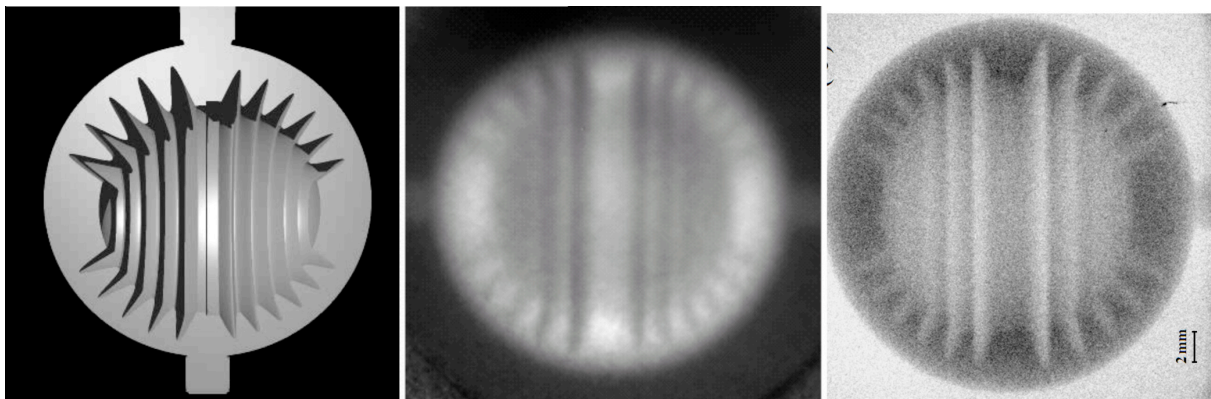
Comme nous l'avons vu, les progrès réalisés ces dernières années tant sur la compréhension des processus physique que sur la qualité des faisceaux d'électron sont considérables. Ces progrès ont permis de faire émerger un ensemble d'applications tout à fait pertinentes qui résultent des propriétés des faisceaux créés par laser : brièveté, taille, qualité et coût de la source. Nous proposons ici quelques exemples d'applications qui illustrent bien les perspectives originales de ces sources [5]. Un exemple d'applications concerne l'utilisation de faisceau d'électrons de forte énergie (dans la gamme 150-200 MeV) pour la radiothérapie [6]. À ces énergies, le profil de dose est beaucoup plus plat, du fait de la faible diffusion latérale, que les profils de dose obtenus par des faisceaux de rayons X ou par des électrons de plus faible énergie. Ainsi, ces faisceaux d'électrons sont mieux adaptés au traitement de certains cancers que ces autres sources. La figure 3 montre des simulations de dépôt de dose dans le cas d'un cancer de la prostate réalisées en utilisant 7 angles d'irradiation par faisceaux d'électrons ou par faisceaux de rayon X. La comparaison indique clairement l'amélioration du traitement « électrons » : d'une part la dose déposée dans le milieu sain est réduite et d'autre part le contour de la tumeur est mieux respecté (figure 3).



**Figure 3 :** Iso-doses dans le cas d'une tumeur cancéreuse de la prostate irradiée à 7 angles, à gauche (électron à 250 MeV, au centre rayons X, et à droite différence électrons/X)

Un autre exemple d'utilisation de ces accélérateurs laser plasma concerne l'inspection non destructive et à haute résolution spatiale de la matière dense [7]. Il est possible, à partir du faisceau d'électrons, de produire une source secondaire de rayons gamma d'énergie de la dizaine de MeV. Ces sources sont simplement produites lors du ralentissement des électrons

énergétiques dans une feuille de métal lourd. Les images présentées sur la figure 4 représentent la radiographie gamma d'un objet étalon : une sphère de tungstène de 20 mm de diamètre, comprenant des structures usinées. La figure de gauche représente une coupe de l'objet, et celle de droite l'image mesurée. L'analyse de ces images permet de déduire une dimension de source de 50 microns, plus petite que ce que l'on obtient par les techniques existantes. De telles sources présentent un intérêt pour l'imagerie de petits défauts à l'intérieur de matériaux sensibles (moteurs, train d'atterrissage, coeur de réacteur, etc.). Finalement, on peut également utiliser ces électrons pour les faire rayonner par effet synchrotron ou Compton. Il est alors possible d'obtenir une source X avec des énergies dans le domaine de la dizaine de keV par rayonnement bêta-tron [8] (oscillations des électrons causées par les champs électriques radiaux dans la bulle plasma) ou de plusieurs centaines de keV par collision avec un faisceau laser intense [9]. Ces sources X produites sont ultra brèves (durée de l'ordre de la dizaine de fs) et elles émanent d'un point source extrêmement petit (de l'ordre du micron). Ici encore, cette nouvelle source X est très prometteuse pour l'étude de la dynamique de la matière sur des échelles de temps ultracourt.



**Figure 4 :** Radiographie gamma. A gauche, l'image de l'objet, au centre image obtenue en 2005 avec 400 microns de taille de source, à droite image obtenue en 2010 avec une taille de source de 50 microns.

Les accélérateurs laser-plasma produisent des faisceaux d'électrons de bonne qualité de quelques centaines de MeV. Ces faisceaux ultra brefs sont stables et de paramètres ajustables. Ils peuvent être utilisés pour de nombreuses applications, allant de la radiographie haute résolution, à la chimie rapide, à la biologie, à la médecine, ou à la production de sources X innovantes. Ce domaine de recherche évolue très vite, le nombre de groupe travaillant dans ce nouveau domaine est en très nette progression et cela laisse présager d'une amélioration rapide des performances de ces accélérateurs qui devraient prochainement modifier le paysage scientifique.

## Références

- [1] V. Malka *et al.*, Science 22, **298** (2002)
- [2] S. P. D. Mangles *et al.*, G. G. R. Geddes *et al.*, J. Faure *et al.*, « Nature », **431** (2004)
- [3] J. Faure *et al.*, « Nature », **444** (2006)
- [4] O. Lundh *et al.*, Nature Physics **7** (2011)
- [5] V. Malka *et al.*, Nature Physics **4** (2008)
- [6] T. Fuch *et al.*, Phys. Med. Bio. **54** (2009)
- [7] A. Ben-Ismaïl *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98** (2011)
- [8] K. Ta Phuoc *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006)
- [9] A. Rousse *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93** (2004)