

*Discours d'intronisation de Victor Malka lors du plénum l'Académie des Sciences de Roumanie, réuni le 25 octobre 2012.*

## **Les Accélérateurs Laser Plasmas**

Victor Malka

Laboratoire d'Optique Appliquée, Unité Mixte CNRS,  
Ecole Nationale des Techniques Avancées et Ecole Polytechnique

Monsieur le Président,

Chers confrères, collègues et amis,

C'est pour moi un immense honneur d'être accueilli parmi vous dans votre prestigieuse Académie.

A l'interface de la physique des accélérateurs, de la physique des plasmas et des lasers, le sujet de recherche qui m'a conduit à être des vôtres aujourd'hui est, comme je vais tenter de le présenter sommairement ici, des plus attrayants.

Il y a bientôt un siècle, le premier accélérateur produisait des faisceaux d'ions à 1 MeV facilitant ainsi les recherches sur la radioactivité artificielle. Mis au point par Ernest Orlando Lawrence, cette petite machine faite de fils de cuivre et de ruban adhésif, d'un coût d'environ 25 dollars, a valu à son auteur le prix Nobel de physique en 1939.

Vingt ans plus tôt, la découverte de la supraconductivité par Heike Kamerlingh Onnes (prix Nobel de Physique en 1913) a suscité un vif intérêt et beaucoup d'interrogations.

Ces deux découvertes dans deux domaines différents de la physique ont révolutionné la science contemporaine. Aujourd'hui, de nombreuses questions restent néanmoins ouvertes quant à la compréhension de la supraconductivité à température ambiante. Les supraconducteurs sont pourtant couramment utilisés dans l'industrie et dans la recherche : en imagerie par résonance magnétique, dans les transports avec les trains à sustentation magnétique mais aussi dans les accélérateurs tant pour les cavités radiofréquences que pour les aimants de focalisation.

Les accélérateurs d'électrons sont utilisés dans de nombreux domaines, allant de la médecine à la physique des particules, en passant par la radiobiologie ou la physique de la matière condensée. Le marché annuel des accélérateurs industriels est évalué à quelques milliards d'euros. Les accélérateurs à usage fondamental pour la physique des hautes énergies et pour les sources de rayonnement X de 3<sup>ième</sup> et 4<sup>ième</sup> générations (Synchrotron et Laser à électrons

libres), représentent un coût du même ordre de grandeur.

Les accélérateurs modernes utilisent des ondes électromagnétiques radio-fréquence (RF) pour accélérer des particules chargées à des vitesses relativistes. Développée depuis plus d'un demi-siècle, cette technologie a fait ses preuves : elle permet de produire de façon stable et robuste des faisceaux de particules d'excellente qualité. Dans un accélérateur, l'énergie des particules est proportionnelle au produit du champ électrique et de la distance sur laquelle on l'applique. Or, le champ accélérateur dans ces cavités RF est limité à quelques dizaines de mégavolts par mètre: au-delà, les parois de la structure commencent à être endommagées par le champ électrique qui ionise les parois (phénomène de claquage). Cette limite du champ explique pourquoi les accélérateurs deviennent de plus en plus grands. Par exemple, Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN, près de Genève, qui a mené avec succès sa quête du boson de Higgs, est un accélérateur circulaire aussi long que le boulevard périphérique de Paris. Son possible successeur pourrait être l'International Linear Collider (ILC) qui utilisera 16000 cavités RF pour accélérer des électrons et des positrons à 250 Gigaélectronvolt (GeV) sur 31 km ou le Compact Linear Collider (CLIC) qui fera des collisions électrons positrons à 3 Teraélectronvolt (TeV). La longueur des accélérateurs ne pouvant croître indéfiniment, il est crucial de chercher des solutions alternatives compactes à l'accélération de particules.

Physicien des plasmas, j'ai rapidement pris conscience que cet état particulier de la matière, où les électrons circulent librement autour d'atomes partiellement ou totalement ionisés (les ions), pouvait être utilisé pour produire des champs électriques gigantesques. Le défi majeur qui s'adressait alors à la communauté était « comment maîtriser le mouvement des électrons de façon à les faire bouger de façon collective, de façon ordonnée ? En effet, seule la mise en mouvement cohérent des électrons, séparés des ions - lourds et immobiles - permet de produire des champs électriques intenses, présentant un intérêt pour l'accélération. Comment établir une telle structure accélératrice stable avec des impulsions lasers? Je me souviens, au début de cette aventure, du scepticisme de la communauté plasma et des accélérateurs. Je me souviens des « ça ne marchera jamais », « le plasma un milieu stable, quelle idée ?, etc. ». Je me souviens d'avoir douté. Je me souviens de n'avoir jamais renoncé.

L'histoire des accélérateurs laser plasma commence par la première étude théorique réalisée par le Prof. John Dawson et son post doctorant Toshi Tajima. Ils suggéraient déjà à la fin des années 1970 que, dans un plasma, des électrons pourraient être accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière. Au début des années 1990, sa confirmation expérimentale a été

apportée par une équipe américaine qui est parvenue pour la première fois à accélérer des électrons injectés dans un plasma. En 1995, en Grande-Bretagne, je produisais avec mes collègues du groupe de Chan Joshi (UCLA) et du groupe de Bucker Dangor (Imperial College) des faisceaux d'électrons de grande énergie, allant jusqu'à 44 Megaélectronvolts (MeV). Cette expérience a suscité le déclic : je décidais de concentrer mon activité sur ce nouveau domaine de recherche. Quelques années plus tard, des résultats analogues ont été obtenus avec des lasers tout aussi puissants, mais d'une énergie et d'une taille beaucoup plus modestes, comme celui du Laboratoire d'Optique Appliqué (LOA), laboratoire de recherche mixte du CNRS, de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, et de l'Ecole Polytechnique. Dès 1999, je montrais la production de faisceaux d'électrons de 70 MeV avec ce laser compact. Puis en 2002, après avoir changé de laboratoire et créé mon groupe constitué d'un étudiant Sven Fritzler, je démontrais comment des ondes plasmas fortement non linéaire excitées dans le régime que je nommais « de sillage forcé », pouvaient produire des faisceaux d'électrons d'énergie encore plus élevée (200 MeV). En 2004, avec mon ancien doctorant Jérôme Faure, tout juste entrant au CNRS et Yannick Glinec jeune doctorant, nous établissions une autre avancée notable, en même temps que deux autres équipes, l'une aux Etats-Unis et l'autre en Grande-Bretagne, nous obtenions pour la première fois des faisceaux qui, par leurs qualités, s'approchaient de ceux délivrés par les machines traditionnelles, mais après une distance d'accélération de quelques millimètres seulement ! Plus récemment, en 2006, nous avons encore amélioré notre dispositif en éclairant le plasma avec deux impulsions laser : ce nouveau schéma d'accélérateur produit alors un faisceau d'électrons stable et dont la charge et l'énergie peuvent être précisément contrôlées en jouant simplement sur les paramètres des impulsions laser. Une brièveté de l'ordre de la femtoseconde, un courant crête de quelques kA, une dispersion en énergie de l'ordre du %, et des énergies atteintes qui dépassent aujourd'hui le GeV représentent les paramètres actuels des accélérateurs à plasma laser.

J'ai, au cours de ces années, tenu à promouvoir ces sources innovantes, aussi ai-je exploré aux travers de nombreuses collaborations avec des experts de différents domaines l'intérêt sociétal de ces sources. Pour la chimie rapide afin de comprendre les processus primaires intervenant lors de réactions de radiolyse de l'eau. Pour la science des matériaux, avec la génération d'une source  $\gamma$  ponctuelle (permettant une résolution inférieure à 400 microns en 2005 et inférieure à 40 microns en 2010) pour l'inspection non destructive de la matière dense. Pour la médecine, les récents calculs que nous avons menés avec le DKFZ montrent que nos

faisceaux d'électrons permettraient d'améliorer le traitement de certains cancers (avec une réduction de dose dans les cellules saines de l'ordre de 20% pour le cas d'une tumeur de la prostate).

Fort de la confiance durement acquise des communautés scientifiques et industrielles, les subventions académiques obtenues aux niveaux européens (ERC AdG Paris, ERC PoC Versatile) et nationaux ANR, et aux niveaux industriels (OSEO) m'ont permis de poursuivre avec succès mon activité de recherche.

Le bref aperçu que je relate ici montre toute la vitalité de ce nouveau domaine de recherche. Le petit club, composé de trois groupes, il y a 15 ans environ, s'est agrandi. La cinquantaine de groupes travaillant sur ce sujet dans le monde et la démonstration des premières applications des accélérateurs laser plasma me conforte dans mon choix.

En avançant vers l'inconnu, de nouveaux horizons s'ouvrent, de nouvelles interrogations apparaissent, le savoir s'étend et avec lui l'inconnu qu'il révèle. En parallèle de ce monde de particules et de rayonnement, celui composé de jeunes étudiants, doctorants et chercheurs rendent cette aventure merveilleuse. De nouveaux acteurs apparaissent, d'horizons scientifiques et de cultures différentes. Ceux sont là autant d'atouts majeurs qui permettront l'éclosion de nouvelles idées, de nouvelles percées scientifiques et techniques. La mise en place du projet Franco-Roumain ILA permettra d'initier un dialogue indispensable aux expériences à venir. La qualité de l'Ecole roumaine de physique, le haut niveau des chercheurs roumains, l'expertise en physique nucléaire, en physique des accélérateurs et en physique de l'interaction de mes collègues Roumains avec le démarrage du projet ELI-NU nous réserve un bel avenir. Il faudra se battre pour maîtriser les difficultés techniques à venir et ne jamais désespérer. La ténacité est notre devoir, l'imagination notre compagne, la créativité notre talent et la curiosité notre moteur. L'aventure ne fait que commencer.

Bucarest, le 25 octobre 2012.