Le laser : 50 ans de dialogue entre science et applications

Un des objectifs de nos deux revues, *Reflète de la physique* et *Le Bup physique-chimie*, est de présenter à leurs lecteurs les avancées récentes de la recherche en sciences de la matière. En cette année 2010, anniversaire des 50 ans de la découverte du laser, l'UdPPC et la SFP ont pris la décision de réaliser en commun ce numéro spécial sur le laser.

Fabien Bretenaker, directeur de recherche au CNRS et professeur chargé de cours à l'École polytechnique, a accepté d'en prendre la direction scientifique. Il nous présente ici l'organisation de ce numéro commun, qui comprend quinze articles scientifiques, répartis en quatre parties. Après un rappel des notions de base sur le laser, on y traite de certaines des avancées les plus récentes, aussi bien en recherche fondamentale que dans les applications.

Nous le remercions pour avoir mené à bien ce projet. Un grand merci également à Jean-Pierre Hulin, à qui l'on doit une analyse approfondie des articles, et à Catherine François et Laetitia Morin, qui se sont chargées avec enthousiasme et compétence de son édition et de sa mise en forme.

Grard Dupuis

Rdacteur en chef du *Bup physique-chimie*

Charles de Novion

Rdacteur en chef de *Reflts de la physique*

Fabien Bretenaker

Rdacteur en chef invit du numro spcial « Laser »

Fabien Bretenaker est n Metz en 1966. Ses travaux de thse, effectus l'universit de Rennes 1 en collaboration avec la Sagem, concernaient la physique des lasers en anneau, avec des applications la gyromtrie optique. Aprs avoir soutenu sa thse, il a travaill au centre de recherche de la Sagem Argenteuil, avant de rentrer au CNRS en 1994. Chercheur au sein de l'UMR « PALMS » Rennes jusqu'en 2003, il a ensuite rejoint le laboratoire Aim-Cotton Orsay. Actuellement directeur de recherche au CNRS, Fabien Bretenaker est directeur adjoint du laboratoire Aim-Cotton. Il est galement professeur charg de cours l'cole Polytechnique, o il enseigne la mcanique quantique et la physique des lasers.

Les travaux de recherche de Fabien Bretenaker concernent la physique des lasers, l'optique non linaire, l'interaction matire-rayonnement et l'optique quantique. Il s'intresse aussi aux applications de ces domaines au dveloppement de nouveaux senseurs, au traitement optique des signaux radars et l'information quantique.

Il y a cinquante ans, Ted Maiman mettait au point le premier « MASER optique », qui sera ensuite rebaptis « LASER ». Aprs la dcouverte du maser dans le domaine micro-ondes par Townes en 1954, plusieurs quipes de physiciens s'taient lances dans la qute de ce Graal. Charles Townes lui-mme a accept de nous livrer ses souvenirs de cette pope. Cela constitue le premier article de ce numro spcial, commun aux *Reflts de la physique* et au *Bulletin de l'Union des Professeurs de physique et de chimie*.

Initialement simple objet de curiosit pour les physiciens, le laser est, cinquante ans plus tard, tellement prsent dans notre quotidien que nous ne le remarquons quasiment plus. Au mme titre que le transistor, il peut tre considr comme une des russites majeures de la physique du xx sicle, dont se sont empars tous les domaines de la recherche et de l'innovation.

Faire un tour d'horizon un tant soit peu exhaustif de ce domaine est devenu impossible. Aussi avons-nous choisi ici de nous limiter, en faisant appel la plume de plusieurs des meilleurs spcialistes, quelques exemples regroups en quatre parties. La premire partie dbute avec l'article de Charles Townes, suivi d'un rappel simple mais prcis des principes de base des lasers, propos par Catherine Schwob et Lucile Julien. Cette partie se conclut par un tour d'horizon illustr des principaux types de lasers ; au cours de cette visite, le lecteur est guid par Sbastien Forget, Isabelle Robert-Philip et Philippe Balcou.

La seconde partie, intitule « les lasers de l'extrme », regroupe quelques-uns des champs de recherche o les caractristiques des lasers sont pousses l'extrme, que ce soit en termes de taille du systme (proprits quantiques surprenantes des lasers de taille nanomtrique, dcrites par Izo Abram, Alexios Beveratos et Isabelle Robert-Philip), de longueur d'onde (lasers EUV et X dcrits par Thierry Ruchon, Pascal Salires, Philippe Zeitoun et Stphane Sebban), ou d'nergie par impulsion (article de Michel Decroisette sur la fusion par confinement inertiel).

Une autre faon d'utiliser les performances exceptionnelles des lasers concerne leurs applications en mtrologie et pour des mesures extrmement prcises, illustres dans la troisime partie de ce numro spcial. La rvolution rcente des peignes de frquence, dcrite par Anne Amy-Klein, est un superbe exemple d'utilisation des lasers femtosecondes la mesure des frquences et la spectroscopie. L'outil laser, trs stable, est tout aussi indispensable au dveloppement fascinant de la physique des atomes froids, que Michle Leduc et Pierre Lemonde voquent ici en mentionnant

les ponts récents jetés vers la physique de la matière condensée et la métrologie du Temps. La pureté spectrale, la qualité de faisceau et la puissance des lasers sont également mises à profit dans la manipulation des atomes pour réaliser les interféromètres atomiques décrits par Arnaud Landragin et Franck Pereira Dos Santos. Dans ces interféromètres à ondes de matière, envisagés par exemple comme senseurs inertiels, les atomes jouent le rôle des photons dans les interféromètres optiques habituels, mais leur longueur d'onde de de Broglie très courte permet d'envisager une amélioration considérable de la sensibilité de ces appareils.

La quatrième et dernière partie regroupe quelques exemples de la myriade d'applications pratiques des lasers. Ceux-ci ont apporté une véritable révolution en médecine. La première illustration en est donnée avec la mise à profit de leur cohérence optique pour l'imagerie du corps humain (Claude Boccara). Les utilisations thérapeutiques des lasers se développent et se répandent à un rythme impressionnant. L'exemple peut-être le plus ancien et le plus connu est l'utilisation du laser en ophtalmologie. L'article de Serge Mordon nous propose quelques exemples plus récents de ces utilisations thérapeutiques. Mehdi Alouini explique ensuite pourquoi une des applications les plus importantes du laser, les télécommunications optiques, n'a pu se développer que grâce à un composant essentiel : le laser à semi-conducteurs. Le domaine de l'environnement bénéficie également des lasers, comme nous le montrent Jean-Pierre Cariou et Laurent Sauvage avec les lidars atmosphériques. Rappelons aussi que, depuis plusieurs décennies, l'industrie et les « process » sont d'immenses champs d'application des lasers. Philippe Aubourg, François Fariaut, Patrick Mauchien et François Salin ont choisi de l'illustrer par deux exemples, issus de la fabrication des cellules photovoltaïques et de l'analyse de la composition chimique des matériaux. Enfin, objet de recherches et de développement, le laser peut aussi devenir un outil pédagogique pour l'enseignant et une source d'inspiration pour l'artiste, comme l'illustrent les fontaines laser décrites par Sébastien Forget, Christophe Daussy et Paul-Éric Pottie.

Des secteurs entiers d'application des lasers ne sont pas couverts par les articles qui suivent. Nous avons laissé de côté les applications militaires. Nous regrettons de n'avoir pas pu aborder le fascinant domaine du stockage optique de données, ainsi que celui de l'information et de la communication quantiques. Il en est de même pour les utilisations des lasers dans la vie quotidienne (CDs et DVDs, imprimantes lasers, jeux de lumière dans les boîtes de nuit

et les spectacles, etc.). Les lasers jouent également un rôle majeur dans les recherches en physique avec l'optique non linéaire, le chaos, la physique des plasmas ou l'accélération des particules. Il en va de même pour de nombreux domaines d'ingénierie, comme les capteurs de toutes sortes ou le dépôt et la caractérisation de couches minces. Notons que d'autres secteurs font aujourd'hui largement appel aux lasers : la chimie en est un bon exemple avec, entre autres, le suivi et le contrôle par laser des réactions chimiques et les techniques optiques d'analyse. Mais c'est également vrai pour la biologie, l'archéologie, ou l'analyse et la restauration des œuvres d'art.

Que nous réserve l'avenir du laser ? Il est difficile évidemment de le prévoir, mais une chose est sûre : il sera foisonnant. D'une part, il est en effet frappant que, cinquante ans après l'invention du laser, la recherche sur la physique de l'objet laser lui-même soit encore un domaine en pleine effervescence (nouveaux matériaux pour l'amplification, course aux rendements, impulsions de plus en plus brèves, extensions aux térahertz et au-delà, etc.). Chaque nouveau développement technologique, chaque nouvelle utilisation, obligent le physicien à approfondir sa compréhension du système (voir, par exemple, l'article sur les nanolasers). D'autre part, du côté des applications, chaque domaine qui s'empare de cet outil en fait un usage que les physiciens n'avaient pas imaginé. Enfin, et c'est là certainement un des aspects les plus inattendus de la recherche, les concepts liés au laser trouvent des analogies et stimulent de nouvelles idées dans d'autres domaines. Il suffit de mentionner les exemples décrits ici de l'interférométrie atomique et des lasers à atomes, pour lesquels les ondes de matière atomique remplacent les ondes électromagnétiques de l'optique « photonique ». Ou encore de voir se multiplier les ponts entre la physique des atomes froids (condensats de Bose-Einstein, gaz de fermions dégénérés, atomes en réseaux) et la physique de la matière condensée (localisation d'Anderson, superfluidité, transitions de phase...). Alors demain ? Au lecteur de s'approprier le laser et d'en tirer profit dans les domaines qui lui sont chers.

Fabien Bretenaker (Fabien.Bretenaker@u-psud.fr)

Laboratoire Aimé-Cotton, CNRS-Université Paris Sud 11, 91405 Orsay Cedex

Je tiens à remercier Michèle Leduc, Charles de Novion, Jean-Pierre Hulin et Gérard Dupuis pour m'avoir proposé de participer à ce numéro spécial et pour leur dévouement, plein d'énergie et de bonne humeur, pour le voir aboutir en temps et en heure malgré mes retards...