

PLASMA-QUÉBEC, REGROUPEMENT STRATÉGIQUE EN SCIENCE ET APPLICATIONS DES PLASMAS

PAR JOËLLE MARGOT, MY ALI EL KHAKANI, FRANÇOIS GITZHOFFER, ET JEAN-LUC MEUNIER



On a coutume de dire que le plasma constitue le quatrième état de la matière qui par ailleurs compose 99% de l'univers visible. Pour cette raison, la plupart des physiciens considèrent que le plasma est étroitement associé aux étoiles. Par ailleurs, en laboratoire, on pense immédiatement aux plasmas des Tokamaks, les machines à fusion thermonucléaire contrôlée qui combleront peut-être les besoins énergétiques du futur. Cependant, on sait moins que les plasmas ont de multiples applications bien plus proches des besoins immédiats de la société. Actuellement, un nombre impressionnant de technologies font en effet appel à un plasma dans les procédés de fabrication qu'elles impliquent. L'exemple le plus frappant est celui de la microélectronique où les plasmas grâce à leur caractère multifonctionnel font partie intégrante de la chaîne de fabrication (gravure, dépôt, nettoyage, etc.). Plus récemment, les plasmas ont commencé à envahir des secteurs traditionnels ou d'avant-garde comme ceux où interviennent des dispositifs de faibles dimensions (par exemple photonique, optoélectronique), des nouveaux matériaux avec des fonctionnalités spécifiques (par exemple le biomédical, l'aérospatiale) ou ceux nécessitant des sources de photons (par exemple l'éclairage). En bref, on ne compte plus le nombre d'applications familières ou de pointe faisant intervenir des plasmas de toutes natures, à basse ou haute pression, produit par des radiofréquences, des micro-ondes ou des lasers, dans des gaz ou des solides, voire des liquides, dans des volumes importants ou à des dimensions micrométriques.

Historiquement, le Québec a toujours été un leader canadien dans le domaine des plasmas. C'est grâce à cette expertise que le Québec a été depuis fin des années 80 et pendant plus d'une décennie le site d'accueil du Tokamak de Varennes, l'un des plus ambitieux projets scientifiques canadiens jamais développés. C'est dans le contexte de cette masse critique québécoise dans le domaine des plasmas que le regroupement stratégique en science et applications des plasmas, Plasma-Québec, a vu le jour en 2001. Le Fonds de recherche du Québec Nature et Technologie (FRQNT), un des organismes subventionnaires de recherche publique québécois, a annoncé son financement en 2002. Plasma-Québec a ainsi fêté en 2012 ses 10 ans d'existence officielle. Il fait partie des regroupements stratégiques identifiés et

subventionnés par le gouvernement du Québec afin de «faire émerger ou de renforcer des pôles d'excellence en recherche qui s'insèrent dans les grands réseaux scientifiques internationaux et qui contribuent au développement de domaines de recherche prioritaires ayant des retombées potentielles importantes pour le Québec, tant aux plans scientifique et technologique que social et économique».

Plasma-Québec s'est structuré autour de 4 partenaires fondateurs, à savoir l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), l'Université McGill, l'Université de Montréal et l'Université de Sherbrooke. Ces 4 institutions universitaires poursuivent de la recherche autour des plasmas depuis plusieurs décennies et les groupes de chercheurs qu'elles hébergent se sont distingués par leur apport à la physique, la chimie et le génie des plasmas. En plus de ces partenaires, Plasma-Québec est fier d'avoir aussi su attirer l'ensemble de la communauté québécoise œuvrant dans le domaine des plasmas et de leurs applications. Ainsi, le regroupement compte des collaborateurs dans 4 autres établissements universitaires québécois, à savoir l'École Polytechnique de Montréal, l'Université Laval, l'Université Concordia, l'Université du Québec à Chicoutimi, ainsi que dans des laboratoires gouvernementaux. Certains de ces membres sont impliqués comme collaborateurs des membres principaux dans des projets où ils apportent une expérience complémentaire spécifique. Plasma-Québec compte également des membres issus d'industries qui soutiennent les activités de Plasma-Québec notamment dans des partenariats université-industrie.

De par leur richesse, leur diversité et leur multifonctionnalité, les plasmas fournissent souvent des solutions innovatrices et économiquement viables à de nombreux problèmes sociétaux et technologiques présents et futurs. Dans ce cadre, Plasma-Québec s'est donné les objectifs suivants :

- (i) capitaliser sur la complémentarité des compétences scientifiques et technologiques de ses membres dans le domaine des plasmas et de leurs applications pour aborder de nouvelles thématiques d'avant-garde réunissant des compétences impossibles à rassembler autrement,

J. Margot
< joelle.margot@umontreal.ca >,
Département de
Physique, Université
de Montréal.

M.A.E. Khakani,
Centre EMT de
l'Institut National
de la Recherche
Scientifique.

F. Gitzhofer, Univer-
sité de Sherbrooke.

J.L. Meunier, Uni-
versité McGill.

- (ii) utiliser de manière optimale l'exceptionnelle infrastructure unique au Canada dont Plasma-Québec dispose, afin d'accélérer la recherche et le développement dans des créneaux où s'exerce une très forte concurrence internationale,
- (iii) former des étudiants et stagiaires postdoctoraux ayant accès à des compétences multidisciplinaires et à une infrastructure de tout premier plan dans un milieu de recherche structuré, ce qui résulte naturellement en une formation de qualité exceptionnelle,
- (iv) contribuer à l'essor économique du Québec par un soutien constant à la R&D des industries québécoises et par la création de sociétés d'essaimage et
- (v) accroître le leadership et le rayonnement du Québec au niveau international par l'entretien et l'établissement de liens avec des laboratoires et centres de recherche internationaux.

La science des plasmas se situe à la frontière de plusieurs disciplines telles que la physique et le génie physique, la chimie et le génie chimique, et de plus en plus le génie des matériaux. De la richesse et de la diversité des plasmas sont issues des avancées importantes et des applications multiples comme le recul des limites de longueur d'onde, de puissance et de rapidité des lasers, l'utilisation variée et sélective de l'énergie chimique des espèces d'un gaz hors d'équilibre thermodynamique et le couplage des décharges électriques aux milieux de l'aérodynamique. La science et le génie des plasmas ont ainsi largement contribué à améliorer la qualité de nos vies. Les observations des dernières années montrent que l'impact des plasmas dans d'autres domaines ne fait que croître.

Dans cet esprit, Plasma-Québec s'est doté d'un programme de recherche cohérent intégrant 3 axes complémentaires, à savoir (i) la science des plasmas, (ii) les procédés assistés par plasmas et (iii) l'intégration de procédés assistés par plasma dans des secteurs stratégiques, notamment en technologies de l'information et des communications, en génie biomédical, et en développement durable et environnement. Par leur thématique même, les activités de recherche menées au sein de Plasma-Québec sont en lien direct avec les besoins à court, moyen et long termes du Québec dans divers secteurs névralgiques jugés prioritaires dans la stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation. En effet, la programmation scientifique de Plasma-Québec montre son impact direct dans des domaines scientifiques et technologiques émergents à fort potentiel. Par exemple, ces dernières années, une partie importante des travaux s'est orientée vers les nanotechnologies, en particulier les nanomatériaux et les nanoparticules, et vers les applications biomédicales. Ces domaines sont parmi ceux dans lesquels les plasmas se sont révélés être des outils génériques indispensables.

Les résultats issus des recherches menées dans Plasma Québec ont donné lieu depuis janvier 2008 à environ 600 articles dans

des revues scientifiques aux facteurs d'impact élevés et au moins autant dans des comptes-rendus de conférence. Mentionnons à titre d'exemples de revues réputées, des articles dans les diverses revues *Nature*, dans *Science*, *Advanced Materials*, *Physical Review Letters*, *Applied Physics Letters*, *Journal of Physical Chemistry C*, *Optics Express* et *Small*. Ce qui caractérise Plasma-Québec est le nombre important de publications impliquant plusieurs membres principaux du regroupement. En effet, 22% des articles et 27% des actes de colloque impliquent au moins deux membres principaux, ce qui témoigne de l'interaction étroite qui existe entre les membres. Ce nombre est encore bien plus élevé si on considère les membres collaborateurs (industriels, universitaires et gouvernementaux). En d'autres termes, Plasma-Québec n'est pas un simple regroupement d'individus, mais une véritable structure rassemblant des chercheurs aux intérêts de recherche complémentaires.

Depuis 2008, Plasma-Québec a accueilli plus de 220 étudiants à la maîtrise et au doctorat ainsi que près de 100 stagiaires postdoctoraux. Le regroupement a contribué à la diplomation d'environ 70 étudiants au doctorat et à la maîtrise et à la finalisation d'une cinquantaine de stages postdoctoraux. Nos étudiants et stagiaires postdoctoraux reçoivent une formation de tout premier plan qui leur ouvre de nombreuses portes aussi bien au niveau industriel qu'universitaire et gouvernemental. Nous croyons que la qualité de cette formation repose en grande partie sur la qualité de nos infrastructures et leur diversité permettant de répondre à la quasi-totalité des besoins. En 2001, cette infrastructure représentait un investissement de l'ordre de 15 M\$. Compte tenu de l'importance des ressources matérielles nécessaires pour continuer à innover dans le domaine des plasmas et de leurs applications, les membres de Plasma-Québec se sont concertés pour renforcer l'infrastructure existante. Ils ont ainsi réussi à attirer au cours des 3 années suivantes (2002–2005) des investissements totalisant environ 61 M\$. Parmi ceux-ci, notons deux subventions de la Fondation Canadienne pour l'Innovation, à savoir en 2002 le LMN (Laboratoire de Micro- et Nanofabrication, 14.7 M\$) et en 2004 le LSAP (Laboratoire en Science et Applications des Plasmas, 10.9 M\$), une FCI-Innovation en 2002 (Chimie inorganique combinatoire par plasma appliquée à la découverte de nouveaux matériaux nanométriques, 4.9 M\$) et également en 2002 une FCI-projets internationaux, le Laboratoire des Sources Femtoseconde (aussi connu comme ALLS -Advanced Laser Light Sources- 20.9 M\$). A ces investissements majeurs se sont ajoutées d'autres subventions d'infrastructure totalisant environ 10 M\$. Par la suite, les nouveaux chercheurs intégrant le centre ont réussi à attirer des subventions de la FCI et du Gouvernement du Québec pour bonifier cette infrastructure. Plasma-Québec dispose ainsi actuellement d'une infrastructure unique au Canada dont le coût total dépasse les 80 M\$. Le fonctionnement de cette infrastructure nécessite bien évidemment des investissements importants en matière de personnel technique et professionnel.

Plasma-Québec attache beaucoup d'importance à ses relations privilégiées avec des industries et à ses activités de transfert. Le regroupement a déposé de nombreuses demandes de brevets depuis sa création. Parmi les réalisations récentes illustrant la valorisation de la recherche effectuée au sein du regroupement, mentionnons que suite à ses travaux de thèse, une des doctorantes de Plasma-Québec a fondé en 2008 une compagnie basée à Montréal pour développer et commercialiser le crayon à plasma – une technologie innovante consistant en une micro torche à décharge lumineuse fonctionnant à la pression atmosphérique pour le traitement des plaies et affections chroniques de la peau.

Enfin, un des grands succès de Plasma-Québec est d'avoir réussi à établir des liens avec le réseau français Plasmas Froids depuis 2009. Il fut alors décidé d'un commun accord de mener des actions communes entre les deux regroupements. Ces actions ont débuté par un déroulement simultané de nos colloques annuels, ce qui a permis de tenir deux demi-journées en vidéoconférence entre la France et le Québec en 2010. Cette

initiative saluée des deux côtés de l'Atlantique a été réitérée en 2011 par une autre demi-journée à laquelle ont également participé des chercheurs belges et luxembourgeois. Du côté français, on a attribué à des étudiants deux prix qui leur ont permis d'assister à la version 2012 du colloque de Plasma-Québec avec le soutien financier des deux regroupements. Des discussions sont également en cours pour démarrer de nouvelles initiatives.

Plasma-Québec est donc une organisation avec des réalisations dont elle peut s'enorgueillir et dont le Québec peut être fier. L'organisation a soufflé en 2012 ses dix bougies. Cependant, malgré la distance parcourue, des efforts sont encore à mener pour rencontrer la totalité des objectifs collectifs. Grâce au dynamisme de ses chercheurs, nombre d'actions continueront à être menées dans les prochaines années en vue de renforcer la qualité de la formation, de démarrer de nouveaux projets et d'améliorer la visibilité du regroupement notamment au niveau international.

Biographies des auteurs

Joëlle Margot est une physicienne des plasmas possédant une expertise à la fois sur les aspects théoriques et expérimentaux des plasmas de faible température dont, en particulier, ceux produits par des champs électromagnétiques de haute fréquence. Ses activités incluent, entre autres, la caractérisation de plasmas de basse pression, le développement de diagnostics appropriés, particulièrement les méthodes faisant appel aux lasers et à la spectroscopie, la modélisation des plasmas froids et l'application des plasmas à la gravure de couches minces et à la synthèse de nanomatériaux. Elle est l'auteur de plus de 110 articles dans des revues avec comité de lecture et de plus d'une centaine de comptes-rendus de conférences. Fellow de l'Institute of Physics, elle a siégé sur de nombreux comités de pairs nationaux et internationaux et depuis 2005, elle est la directrice du regroupement stratégique Plasma-Québec.

My Ali El Khakani est professeur titulaire au Centre-EMT de l'Institut National de la Recherche Scientifique où il dirige le groupe "NanoMat" depuis 1998. Le Prof. El Khakani est reconnu internationalement pour ses travaux de R&D dans le domaine de la synthèse des matériaux nanostructurés par les procédés plasma/laser pour diverses applications allant de la micro/nanoélectronique au photovoltaïque et aux nanocomposites. Il a publié plus de 150 articles scientifiques dans différentes revues prestigieuses, est codétenteur de 5 brevets et a présenté ses travaux de recherches dans 200 conférences nationales et internationales dont plusieurs à titre de conférencier invité. Le Prof. El Khakani agit régulièrement comme expert auprès de divers agences privées et publiques de financement de la R&D. Ses travaux actuels portent sur le développement de nouvelles structures nanohybrides pour l'optoélectronique et le photovoltaïque de 3^{ème} génération.

François Gitzhofer est professeur titulaire au département de Génie chimique et génie biotechnologique de la faculté de génie de l'université de Sherbrooke où il dirige le laboratoire de génie des Plasmas depuis 2003. Il est reconnu internationalement pour ses travaux dans le domaine de la synthèse des matériaux par plasma thermique en utilisant la technologie d'injection de suspensions dans des plasmas inductifs. Au cours de sa carrière, le professeur Gitzhofer a cosigné plus de 70 publications et déposé près de 10 brevets. Le professeur Gitzhofer est invité à donner des cours régulièrement dans des universités européennes. Il agit comme arbitre pour de nombreuses agences de recherche européennes. Ses travaux actuels concernent la synthèse combinatoire de nouvelles classes de matériaux appliqués au domaine aéronautique et aérospatial, de la catalyse et des piles à combustible et aux revêtements protecteurs.

Jean-Luc Meunier (D.Ing.(1981), EPF-Lausanne; MSc(1982), PhD(1986), INRS-EMT) est professeur associé au Département de génie chimique (Laboratoire des Procédés Plasmas, PPL) de l'Université McGill depuis 1986. Ses travaux de recherche portent sur l'émission électronique des surfaces dans le mode thermo-champ, sur les plasmas thermiques et le design de réacteurs à plasmas pour la nucléation, la synthèse et la fonctionnalisation de nanoparticules, sur les applications de ces structures aux piles à combustibles, à l'énergie solaire et à l'environnement et sur les revêtements 3-D nanostructurés. Actuellement, il s'intéresse à la nucléation homogène de nano-flocons de graphène fonctionnalisés pouvant remplacer le platine dans les piles à combustibles PEM. Différentes structures de nanotubes de carbone sont également étudiées pour la création de nanofluides stables, de nouvelles géométries de cellules photovoltaïques ou de structures 3D pour l'émission électronique.

Biographie des auteurs des autres articles de Plasma Québec:**Plasma Medicine**

Michael R. Wertheimer détient un baccalauréat en physique et une maîtrise en physique de l'Université de Toronto et un PhD de l'Université de Grenoble en supraconductivité. Professeur émérite depuis 2005, il a détenu une chaire industrielle du CRSNG pour le traitement par plasma des matériaux au département de génie physique de l'école Polytechnique de Montréal depuis 1996. Il a intégré l'École Polytechnique de Montréal en 1973 après avoir passé plus de 6 ans comme chercheur senior dans l'industrie. Le professeur Wertheimer est fellow de l'IEEE et de l'académie canadienne de génie; il a détenu une bourse de recherche Killam de 1990 à 1992. Il est coéditeur en chef du journal "*Plasma Processes and Polymers*". Il est l'auteur ou co-auteur de plus de 400 articles de recherche dans des journaux, livres et comptes-rendus de conférence, de 2 douzaines de brevets et a édité ou coédité 5 livres.

Sylvain Coulombe est actuellement professeur agrégé et directeur du département de génie chimique de l'Université McGill. Ingénieur physicien de formation, il poursuit des recherches dans le domaine des sources de plasmas et du développement de procédés depuis 1990. En tant que chercheur senior et directeur de projet pour General Electric Global Research de 1997 à 2001, il a contribué au développement de plusieurs lampes à décharges électriques. Il détient 6 brevets notamment sur la conception de lampes à décharge et sur une nouvelle source de plasma à la pression atmosphérique pour la production localisée d'espèces réactives. Il est l'auteur de plus de 150 articles arbitrés et présentations à des conférences. Il est le récipiendaire du prix Carrie M. Derick 2010 de l'Université McGill pour son excellence en enseignement et en supervision aux études supérieures. Il est également consultant pour plusieurs compagnies canadiennes.

Les plasmas générés par des impulsions laser ultra-brèves et intenses

François Vidal a fait ses études de cycles supérieurs en physique subatomique théorique (Ph.D. Université de Montréal) avant de rejoindre l'INRS-EMT en 1991 pour travailler en physique des plasmas, d'abord comme chercheur postdoctoral, puis en 1995 comme associé de recherche, après un séjour d'un an au CEA (France). Il est ensuite devenu professeur adjoint à l'INRS-EMT en 2003, et professeur associé en 2007. Il a apporté des contributions sur différents sujets de la physique des plasmas, dont la cinétique des ondes de choc, la filamentation de la lumière, les décharges électriques à grande échelle, les plasmas de décharge, et surtout les plasmas produits par laser appliqués à l'analyse spectroscopique des matériaux, à la dissection de tissus biologiques, au guidage des micro-ondes, et à la génération d'harmoniques élevés sur les cibles solides.

Jean-Claude Kieffer est professeur à l'INRS-EMT depuis 1990. Il détient une Chaire de Recherche du Canada sur la Photonique Ultrarapide Appliquée aux Matériaux et aux Systèmes. Il a été directeur de l'INRS-EMT de 2006 à 2011. Il est aussi à l'origine du laboratoire ALLS de l'INRS. Au cours de sa carrière il s'est intéressé à de nombreux sujets reliés à l'interaction entre les lasers intenses et la matière, dont l'étude résolue en temps de mécanismes transitoires ultra brefs par sources X produites par laser, et plus récemment la production de rayonnement X Bêta-tron.

François Légaré s'est joint à l'INRS-EMT en juin 2006 et est professeur agrégé depuis juin 2010. Il dirige une équipe de recherche qui élabore de nouvelles méthodes d'imagerie basées sur l'interaction laser-matière, soit pour l'imagerie moléculaire ultrarapide ou pour des applications biomédicales. Son équipe de recherche a développé une technologie permettant la génération d'impulsions lasers IR dont la durée approche le cycle optique et qui ont permis de montrer que le spectre d'harmoniques élevés permet de sonder des corrélations multi-électroniques par la mise en évidence de la résonance géante du xénon (Nat. Phys. 7, 464, 2011). De plus, toujours en 2011, il a montré comment la localisation de la charge dans les molécules triatomiques permet une augmentation significative du taux d'ionisation (PRL 107, 063201, 2011). En 2012, il a été nommé Fellow of the Institute of Physics et est vice-chair de DAMOP Canada (Association Canadienne des Physiciens).

Jean-Pierre Matte (Ph.D. École Polytechnique, Palaiseau, 1987) a d'abord été agent de recherche, et est maintenant professeur à l'Institut National de la Recherche Scientifique, centre Énergie, Matériaux et Télécommunications à Varennes, Qc. Ses recherches portent sur l'étude des processus cinétiques et la déformation des fonctions de distribution des vitesses électroniques et ioniques dans les plasmas, au moyen de codes à particules (PIC), Vlasov ou Vlasov-Fokker-Planck. Ces simulations ont porté principalement sur les plasmas créés par l'interaction laser-matière pour la fusion par confinement inertielle, l'émission de rayonnement X, diverses études fondamentales *etc.* Il y a aussi eu des travaux numériques sur les fonctions de distribution électroniques dans plasmas de déflecteurs dans les Tokamaks et sur les plasmas de décharges.

Tsuneyuki Ozaki a reçu sa maîtrise et son doctorat de l'Université de Tokyo. De 1990 à 2000, il a été associé de recherche à « Institute for Solid-State Physics » de l'Université de Tokyo. De 2000 à 2003, il a été spécialiste de recherche au « Nippon Telegraph and Telephone (NTT) Basic Research Laboratories » (Atsugi, Japon). En 2003, il a joint l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), comme professeur adjoint. Il est actuellement professeur titulaire et Directeur du Laboratoire des sources femtosecondes (plus couramment connu comme « Advanced Laser Light Source »). Depuis 2006, il est aussi chercheur invité au Centre de Recherche de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont, Université de Montréal. Ses principaux intérêts de recherches comprennent le rayonnement térahertz intense et ses applications, la génération des harmoniques d'ordre élevé intense et l'application des lasers au domaine de la santé.

La gravure par plasma: défis et perspectives

Joëlle Margot est une physicienne des plasmas possédant une expertise à la fois sur les aspects théoriques et expérimentaux des plasmas de faible température dont, en particulier, ceux produits par des champs électromagnétiques de haute fréquence. Ses activités incluent, entre autres, la caractérisation de plasmas de basse pression, le développement de diagnostics appropriés, particulièrement les méthodes faisant appel aux lasers et à la spectroscopie, la modélisation des plasmas froids et l'application des plasmas à la gravure de couches minces et à la synthèse de nanomatériaux. Elle est l'auteur de plus de 110 articles dans des revues avec comité de lecture et de plus d'une centaine de comptes-rendus de conférences. Fellow de l'Institute of Physics, elle a siégé sur de nombreux comités de pairs nationaux et internationaux et depuis 2005, elle est la directrice du regroupement stratégique Plasma-Québec.

Mohamed Chaker est un expérimentateur reconnu pour sa vaste expertise en applications des plasmas au traitement des matériaux. Il a publié environ 220 articles dans des revues scientifiques avec comité de lecture et plus de 130 comptes-rendus de conférences dans divers domaines incluant la lithographie X et EUV, la gravure de couches minces et le dépôt de couches minces par ablation laser de plusieurs matériaux dont DLC, SiC, GaN, AlN, STO et CBN. Il détient une Chaire de Recherche du Canada en « plasmas appliqués aux technologies de micro- et de nanofabrication ». Président du comité des affaires scientifiques de NanoQuébec, il a une compétence notoire dans le domaine des nanomatériaux, notamment en synthèse de nanoparticules. Il codirige avec Jean-Pierre Boeuf du LAPLACE de Toulouse le Laboratoire International en Technologie et Applications des Plasmas et est impliqué personnellement dans plusieurs projets de ce laboratoire.