

16^E CONGRÈS DE LA DIVISION PLASMAS

DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE



Société Française
de Physique



Livre des résumés

6-8 juillet 2022 - Marseille
Aix-Marseille Université, Jardin du Pharo

sfp-plasmas.sciencesconf.org



Liste des sponsors



CNRS



CEA



ISFIN



Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires



Laboratoire Lasers, Plasmas et Procédés Photoniques



**Société Française
de Physique**

Société Française de Physique



IDIL Fibres Optiques
TECHNOLOGIES FIBRES OPTIQUES ET LASERS

	Mardi 05-juil	Mercredi 06-juil	Jeudi 07-juil	Vendredi 08-juil
08:00				
08:15				
08:30		Accueil/Inscriptions		
08:45				
09:00		Introduction	Étude spectroscopique de l'influence d'un champ magnétique sur un plasma d'aluminium induit par laser - Paul Dubois	Transport anormal et pertes de particules rapides dans les plasmas de fusion - David Zarzoso
09:15		Incompressible and compressible energy cascade rates in the inner heliosphere - Lina Hadid	Recherche et outils pour la météorologie de l'espace – Sophie Masson	Electrons découplés dans les tokamaks – Cédric Reux
09:30		Instabilités Laser Plasma multifaisceaux dans les expériences de fusion par confinement inertiel – Sylvie Depierreux	Interaction plasma/surface pour le recyclage du CO2 – Olivier Guitella	Accélération des particules énergétiques dans les flares solaires et dans les chocs coronaux associés – Illya Plotnikov
09:45		Transport d'impuretés dans les plasmas de tokamak - P. Donnel	Ionic wind produced by corona discharges and dielectric barrier discharges in atmospheric air – Eric Moreau -	Accélération d'électrons relativistes par sillage laser plasma – Brigitte Cros
10:00		Pause	Pause	Pause
10:15		Utilisation de tubes à ondes progressives pour étudier l'interaction onde-particule non-linéaire - Khalil Aliane	Les plasmas froids comme vecteur d'innovation pour l'industrie du bois – Nicolas Naudé	Les pulsars et leur environnement – Jérôme Pétri
10:30		Présentation Flash posters	Les plaies chroniques et le monoxyde de carbone – Claire Douat	Processus d'accrétion autour des objets compacts et expériences d'astrophysique de laboratoire – Emeric Falize
10:45		Déjeuner	Déjeuner	Déjeuner
11:00				
11:15				
11:30				
11:45				
12:00				
12:15				
12:30				
12:45				
13:00				
13:15				
13:30				Les plasmas spatiaux comme source d'évolution chimique du système solaire : Effets, mesures, expériences de laboratoire - Alexis Bouquet
13:45				Extreme-light physics at the Apollon laser: new challenges & opportunities for laser-plasma interaction - Mickael Grech
14:00				Génération de nanoplasma à haut rapport de forme dans des diélectriques par faisceaux de Bessel femtosecondes - Pierre-Jean Charpin
14:15				Optimization of plasma density profile in laser electrons plasma accelerators - Céline Hue
14:30				Ignition, a dream that came true: a brief history of the ICF program at LLNL - Sébastien Le Pape
14:45				CLOTURE
15:00				Remise du prix poster
15:15				
15:30				
15:45		Session "Femmes et Sciences". Influence des stéréotypes de genre en Sciences sur les performances cognitives et les décisions de recrutement - Isabelle Régner	Visite ITER/WEST	
16:00		Pause		
16:15				
16:30		Décharges électriques dans les liquides – Cathy Rond		
16:45		Production d'ions négatifs par réactions de surface en plasma d'hydrogène – Gilles Cartry		
17:00		Etude de l'instabilité d'un plasma d'arc créé par séparation de contacts en régime continu – Chabha Djerroud		
17:15				
17:30				
17:45				
18:00				
18:15		Prix Pellat 2021. Interaction aérosols-plasma dans l'ionosphère de Titan : du laboratoire aux mesures in situ - Audrey Chatain		
18:30				
18:45				
19:00	Accueil/Inscriptions Apéritif de bienvenue			
19:15				
19:30		Conférence Grand Public L'héliosphère: un gigantesque laboratoire de physique des plasmas – Laurence Rezeau		
19:45				
20:00			Banquet au Rowing Club	
20:15				
20:30				
21:30				
22:30				

Turbulence, transport, instabilités

Incompressible and compressible energy cascade rates in the inner heliosphere

Lina. Z. Hadid^{1*}, N. Andrés^{2,3}, F. Sahraoui¹, S. Y. Huang⁴, N. Romanelli^{5,6}, S. Galtier¹,
G. DiBraccio⁵, and J. Halekas⁷

[*lina.hadid@lpp.polytechnique.fr](mailto:lina.hadid@lpp.polytechnique.fr)

¹*Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS-École polytechnique-Sorbonne Université-Observatoire de Paris-Université Paris-Saclay, Route de Saclay, 91128 Palaiseau, France*

²*Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Ciudad Universitaria, 1428, Buenos Aires, Argentina; nandres@iafe.uba.ar, nandres@df.uba.ar*

³*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Ciudad Universitaria, 1428, Buenos Aires, Argentina*

⁴*School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, China*

⁵*Solar System Exploration Division, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA*

⁶*CRESST II, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD, USA*

⁷*Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, IA, USA*

Compressible turbulence has been a subject of active research within the space physics community for the last three decades and is actually believed to be essential for understanding the physics of the solar wind (for instance the heating of the fast wind), of the interstellar medium (in cold molecular clouds) and other astrophysical and space phenomena. In this talk I will give an overview of the different studies that we have done regarding the compressible and incompressible cascade rates in the interplanetary space. Firstly, using the exact law of compressible isothermal magnetohydrodynamic (MHD) turbulence [Banerjee & Galtier, PRE, 2013], we give an estimation of the compressible energy cascade rate ($|\varepsilon_C|$) in the Earth's magnetosheath using THEMIS and CLUSTER spacecraft data and show that it is at least three orders of magnitude larger than its value in the solar wind. Moreover, we show the role of the density fluctuations in increasing the spatial anisotropy in the Earth's magnetosheath [Hadid et al., PRL, 2018]. Secondly, using the exact law of compressible Hall MHD turbulence [Andrés & Sahraoui, PRE, 2017] we give a complete estimation of $|\varepsilon_C|$ at the MHD and the sub-ion scales in the Earth's magnetosheath using MMS data [Andrés et al., PRL, 2019]. Finally we show the radial evolution of the turbulent cascade rate from the Sun (~ 0.2 A.U.) up to Mars (~ 1.5 A.U.), using Parker Solar Probe and Maven data [Andrés et al. 2022].

Instabilités laser-plasma multifaisceaux dans les expériences de fusion par confinement inertiel

S. Depierreux^{1*}, C. Neuville¹, V. Tassin¹, C. Baccou², R. Bahr³, N. Borisenko⁴, L. Borisenko⁴, M. Casanova¹, A. Colaitis⁵, A. Debayle¹, G. Duchateau⁵, P. Fremerye¹, A. Heron⁶, S. Huller⁶, J. Katz³, P. Loiseau¹, P.-E. Masson-Laborde¹, M.-C. Monteil¹, P. Nicolai⁵, A. Orekhov⁴, F. Philippe¹, C. Riconda⁷, P. Seytor¹, C. Stoeckl³, D. Teychenné¹, G. Tran¹, W. Seka³, V. Tikhonchuk⁵, D. Pesme⁶, C. Labaune²

¹CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

²Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

³Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, New York 14623-1299, USA

⁴P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Centre Lasers Intenses et Applications, Université Bordeaux I, CEA, CNRS, Talence, France

⁶Centre de Physique Théorique, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

⁷Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, (TIPS) Université Paris 6, CNRS, CEA, Ecole Polytechnique, 94200 Ivry-sur-Seine, France

* sylvie.depierreux@cea.fr; sylvie.depierreux@polytechnique.edu

Dans les plasmas denses ($n_e > 10^{20}$ e⁻/cm³) et chauds ($T_e > 500$ eV) produits par laser, la diffusion Thomson d'une onde électromagnétique laser incidente est source d'ondes électromagnétiques diffusées sur les modes propres du plasma aux fréquences (resp. vecteurs d'onde) $\omega_1 = \omega_0 \pm \omega_2$ (resp. $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_0 \pm \mathbf{k}_2$) où ω_0 (resp. \mathbf{k}_0) désigne la fréquence (resp. le vecteur d'onde) du laser et ω_2 (resp. \mathbf{k}_2) la fréquence (resp. le vecteur d'onde) d'une onde dans le plasma. Pour les ondes plasma et diffusée satisfaisant les conditions de résonance, à savoir $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ et $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$, l'amplitude du mode plasma est simultanément augmentée par le battement pondéromoteur des ondes électromagnétiques diffusée et incidente. Ces mécanismes de couplages non-linéaires donnent lieu à des instabilités laser-plasma aux niveaux d'éclaircements ($\sim 10^{14}$ - 10^{15} W/cm²) typiquement utilisés auprès des installations laser de puissance. Ces instabilités conduisent, entre autre, à l'amplification d'ondes électromagnétiques diffusées dans les gammes Raman (dans le cas du couplage avec des ondes plasma électroniques) et Brillouin (dans le cas du couplage avec des ondes acoustiques ioniques). Lors de l'interaction d'un seul faisceau dans un plasma homogène, cette amplification est principalement attendue dans la direction de rétrodiffusion du faisceau laser incident.

Sur les installations laser de classe mégajoule (LMJ, NIF), les faisceaux laser sont distribués en cônes (de quelques dizaines de faisceaux) et superposés à l'entrée d'une cavité pour en irradier les parois de façon relativement homogène. L'éclaircissement laser superposé et la répartition angulaire régulière des faisceaux amènent la possibilité de couplages résonants instables entre les modes propres du plasma et les faisceaux laser dans de nouvelles géométries au travers d'instabilités dites collectives où l'une des ondes est stimulée par plusieurs faisceaux répartis sur un cône. L'existence de ces instabilités dites collectives à plusieurs faisceaux a été démontrée dans deux expériences (S. Depierreux *et al.*, "Experimental investigation of the collective Raman scattering of multiple laser beams in inhomogeneous plasmas", *Phys. Rev. Lett.* **117**, 235002 (2016), C. Neuville *et al.*, "Experimental evidence of the collective Brillouin scattering of multiple laser beams sharing acoustic waves", *Phys. Rev. Lett.* **116**, 235002 (2016)) réalisées auprès de l'installation laser Omega du Laboratory for Laser Energetics aux Etats-Unis.

Dans cet exposé, nous décrivons d'abord ces instabilités laser-plasma dans les géométries d'irradiation multifaisceaux des expériences de FCI puis nous présenterons les expériences ayant permis de démontrer leur existence.

Transport d'impuretés dans les plasmas de tokamak

¹*P. Donnel, ²K. Lim, ¹X. Garbet, ¹Y. Sarazin, ³M. Lesur, ³E. Gravier, ¹G. Dif-Pradalier, ¹V. Grandgirard, ¹K. Obrejan

*conférencier principal

¹IRFM, CEA, France

²SPC, EPFL, Suisse

¹IJL, Université de Lorraine, France

* peter.donnel@cea.fr

Au sein d'un tokamak les isotopes de l'hydrogène, nécessaires aux réactions de fusion, sont majoritaires. Ils sont souvent accompagnés d'autres espèces ioniques appelées impuretés. La compréhension du transport d'impuretés dans les tokamaks est cruciale. Une des raisons de cette importance vient du choix d'utiliser du tungstène pour le divertor d'ITER. En effet, les noyaux lourds ne sont que partiellement ionisés dans le cœur du plasma, ils peuvent alors fortement rayonner et entraîner une diminution importante de la qualité du confinement du plasma.

Une accumulation des impuretés lourdes au cœur du plasma est régulièrement observée au sein des tokamaks. Cette accumulation est souvent attribuée à la physique dite néoclassique, qui correspond à la modification des trajectoires des particules par les collisions entre les différents éléments composant le plasma. La prédominance du transport néoclassique pour les impuretés lourdes est due au fait que leur fréquence de collision est bien plus élevée que les espèces légères à cause de leurs charges élevées. Malgré l'importance du transport néoclassique pour les impuretés lourdes, le transport turbulent pourrait bien dominer pour ces impuretés dans la zone de gradient d'ITER. De plus, dans le cas des impuretés légères et dans les machines actuelles, il est observé que les transports néoclassique et turbulent sont du même ordre de grandeur. Jusqu'à récemment, les calculs des flux néoclassique et turbulent étaient réalisés de façon distincte, supposant implicitement que les deux canaux de transport sont indépendants.

L'existence d'une synergie entre transport turbulent et néoclassique des impuretés sera démontrée au cours de cette présentation. Ce résultat s'appuiera sur un travail analytique d'identification d'un mécanisme de synergie et sera illustré par des résultats numériques obtenus avec le code gyrocinétique GYSELA, capable de simuler de manière cohérente les flux néoclassique et turbulent.

Bibliographie :

D. Estève *et al* 2018, *Nucl. Fusion* **58** 036013

P. Donnel *et al.* 2019, *Plasma Phys. Control. Fusion* **61** 044006

K. Lim *et al* 2021, *Nucl. Fusion* **61** 046037

Utilisation de tubes à ondes progressives pour étudier l'interaction onde-particule non-linéaire

Khalil Aliane^{1,2,3*}, Meirielen C. de Sousa^{1,4,5}, Yves Elskens¹,
Frédéric André³, Damien F.G. Minenna⁶, Alexandre Poyé¹ & Fabrice Doveil¹
*présentateur principal

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, UMR 7345 PIIM, Marseille, France

² Centre National d'Études Spatiales, Toulouse, France

³ Thales AVS/MIS, Vélizy, France

⁴ Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

⁵ Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

⁶ CEA, IRFU, Université Paris Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

L'interaction entre ondes électromagnétiques et particules chargées est fondamentale dans plusieurs domaines de la physique. Elle constitue le mécanisme clé derrière plusieurs technologies, parmi lesquelles les gyrotrons, les lasers à électrons libres, les accélérateurs de particules, ainsi que les tubes à ondes progressives (TOP). C'est sur ces derniers que porte principalement notre étude.

Les TOPs sont des tubes à vide utilisés principalement comme amplificateurs d'onde radiofréquence pour les télécommunications spatiales. L'amplification est assurée par l'échange de moment entre un faisceau d'électrons et une onde RF se propageant le long d'un guide d'onde de structure périodique, avec une vitesse de phase voisine de la vitesse des particules. L'amplification sature lorsque les électrons sont piégés par l'onde.

Afin de simuler les interactions non-linéaires ondes-faisceau dans les TOPs, plusieurs approches sont envisageables : modélisation en domaines temps ou fréquence, description fluide, cinétique ou N -corps du faisceau etc... Nous optons pour un modèle hamiltonien à N corps en domaine temps appelé DIMOHA. Ce genre de modèle est généralement écarté en électrodynamique du fait du nombre considérable de particules à simuler. Pour pallier ce problème, d'une part nous agglomérons des paquets de particules adjacentes en macro-électrons, d'autre part nous utilisons une discrétisation dite de Kuznetsov, tirant profit de la périodicité structurelle des TOPs pour décomposer les champs sur une base de fonctions à nombre de degrés de liberté réduit [1].

Des modèles similaires, dits pseudo-spectraux, réalisent cette réduction d'ordre en exprimant les champs et leurs gradients dans l'espace de Fourier. Toutefois, ce choix confine ces modèles aux seules structures périodiques, là où DIMOHA tolère une certaine flexibilité, grâce à la localité de ses fonctions de base [1,2]. Il est ainsi possible dans notre modèle de simuler des structures complexes telles que des hélices à profil de pas non uniforme, ou encore des défauts locaux.

Avec ce modèle, nous étudions plusieurs phénomènes impliquant l'interaction onde-faisceau, dont l'amplification d'impulsions courtes [2], l'effet des réflexions dans les TOPs, l'accélération d'ions via une impulsion laser, ainsi que l'instabilité faisceau-plasma avec des TOPs de grande taille [3].

[1] D. F. G. Minenna *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 092110 (2021).

[2] Kh. Aliane *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices **68**, 6476 (2021).

[3] M. C. de Sousa *et al.*, Phys. Plasmas **27**, 093108 (2020).

Session « Parité »

Influence des stéréotypes de genre en Sciences sur les performances cognitives et les décisions de recrutement

¹Régner, I.

¹ *Laboratoire de Psychologie Cognitive UMR CNRS 7290, Aix-Marseille Université, France*

* isabelle.regner@univ-amu.fr

Les plans d'action visant à promouvoir l'égalité entre les femmes et les hommes au sein de la fonction publique ont permis un certain nombre d'avancées. Toutefois, les inégalités demeurent au sein des personnels en termes de recrutement, de promotion, d'accès aux postes les plus prestigieux, et de représentation dans les disciplines scientifiques dites STIM (Sciences, Technologie, Informatique, et Mathématique). La recherche en Cognition Sociale a contribué à montrer que ces inégalités sont, au moins pour partie, liées aux stéréotypes de genre qui conduisent à davantage associer, encore aujourd'hui, les capacités de leadership, de management, et les compétences en Sciences aux hommes plutôt qu'aux femmes. Seront présentées ici quelques résultats permettant de comprendre comment ces stéréotypes sont de nature, d'une part, à influencer négativement les performances des femmes, et d'autre part à générer des biais et processus subtils de discrimination en impactant les décisions des évaluateurs et des évaluatrices au moment des recrutements et des promotions.

Interaction plasma-surface

Décharges électriques dans les liquides

¹*Rond, C., ¹Fagnon, N., Nguyen, S., Dufour, B., Vega, A. & Duten, X.

¹ *Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, France*

* rond@lspm.cnrs.fr

Les interactions entre les plasmas et les liquides sont d'une grande complexité notamment en raison de leur caractère multidisciplinaire et multi-échelle. En effet, les décharges dans ces milieux denses impliquent des processus variés de type électronique (injection d'électrons, ionisation), thermodynamique (chauffage, changement de phase) et hydrodynamique (formation de bulles, propagation d'ondes acoustiques) [1]. De par cette richesse, les décharges en milieu liquide présentent un potentiel attractif en termes d'applications telles qu'historiquement les disjoncteurs à haute tension [2] ou plus récemment les dispositifs à finalité médicale [3] ou environnementale [4].

L'efficacité de ces procédés est généralement corrélée à la production d'espèces réactives. Cette production est initiée par des mécanismes chimiques se déroulant en phase gazeuse en contact avec la phase liquide. L'interface gaz/liquide est donc une zone clé dans la description des nombreux phénomènes se déroulant dans ces décharges. Il est important de noter que la production et la perte des espèces issues de la phase gazeuse sont intimement liées, et à l'heure actuelle, on comprend encore mal comment ces espèces sont produites, perdues et transportées dans le liquide.

Cette présentation propose de discuter la complexité des décharges en milieu liquide et notamment les mécanismes à l'interface. Ces phénomènes seront notamment illustrés à travers les spécificités observées lors des décharges pulsées microsecondes réalisées dans l'eau. Une étude expérimentale couplant des mesures de strioscopie résolues en temps et des mesures électriques (courant, tension) permet d'identifier et de caractériser différents régimes de décharge. En parallèle, des études complémentaires ont été menées afin de déterminer la production d'espèces actives (peroxyde d'hydrogène) dans le cadre d'applications à la dépollution d'effluents liquides. En particulier l'effet des décharges sur la réduction du Cr(VI) sera discutée.

L'ensemble des résultats présentés a pour objectif de mettre en évidence les phénomènes physiques complexes inhérents aux décharges électriques en milieu aqueux.

Références

- [1] Bruggeman, P.J. *et al.*, Plasma Sources Science and Technology, 25(5)(2016)
- [2] Farazmand, B., British Journal of Applied Physics 12(5) (1961)
- [3] Fridman, A., *et al.*, Plasma Medecine. Begell house (2011)
- [4] Joshi, R.P. and S.M. Thagard, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 33(1) (2013)

Production d'ions négatifs par réactions de surface en plasma d'hydrogène

^{1*} Cartry G, ¹ Maurice B, Layet J.M, ² Sasao M

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR7345, F-13013 Marseille, France

² Organization for Res. Initiatives and Development, Doshisha Univ., Kyoto 602-8580, Japan

* gilles.cartry@univ-amu.fr

Dans les futurs dispositifs de fusion tels qu'ITER, le chauffage du plasma sera en grande partie obtenu par l'injection de faisceaux intenses d'atomes d'hydrogène (H ou D) de haute énergie. Ces faisceaux d'atomes proviennent de la neutralisation de faisceaux d'ions accélérés. Jusqu'à présent, la plupart des tokamaks dans le monde utilisent des faisceaux d'ions positifs. Toutefois, les exigences d'ITER en termes d'énergie du faisceau (1 MeV) rendent obligatoire d'utiliser des faisceaux d'ions négatifs en raison de la très faible neutralisation des ions positifs à haute énergie. Les sources d'ions négatifs développées doivent produire une densité de courant d'ions négatifs H⁻/D⁻ de l'ordre de 300 A/m², pour un courant total extrait proche de 60A sur des périodes de 3 600 secondes. Ceci ne peut être obtenu que dans des sources constituées par des réacteurs plasmas froids d'hydrogène ou de deutérium reliés à l'accélérateur 1 MeV par une large grille d'extraction au travers de laquelle les ions sont extraits avant d'être accélérés. Afin de limiter les collisions dans l'accélérateur, ces sources doivent être exploitées à basse pression (0,3 Pa) dans des conditions où la production de volume d'ions négatifs par attachement dissociatif des électrons sur les molécules n'est pas assez efficace. Par conséquent, les sources d'ions négatifs les plus efficaces développées jusqu'à présent reposent sur la production de surface, un processus dans lequel une particule d'hydrogène incidente sur la paroi du plasma capture un électron sur la surface et est rétrodiffusée sous forme d'ion négatif. Il est intéressant de noter que les contraintes en terme de pression de travail dans les sources d'ions pour la fusion se retrouvent dans les sources d'ions négatifs utilisés pour l'injection de protons dans les anneaux de stockage des accélérateurs ou encore dans les cyclotrons médicaux. Ces sources fonctionnent donc elles aussi sur le processus de production en surface avec une densité de courant d'ions négatifs produite très élevée mais des courants requis beaucoup plus faibles (au maximum dans la gamme du milliampère).

Le processus de production de surface des ions négatifs présente habituellement un très faible rendement. Pour le renforcer il est d'usage d'injecter du césium sous forme de vapeur à l'intérieur de la source d'ions négatifs. Le dépôt de césium sur les surfaces en contact avec le plasma abaisse le travail de sortie du matériau et augmente considérablement la production d'ions négatifs. Cependant, le césium présente de nombreux inconvénients et complique le fonctionnement de l'injecteur de faisceaux neutres. Ainsi, plusieurs groupes dans le monde dont le nôtre concentrent leurs études sur la réduction de l'injection de césium ou son élimination totale et son remplacement par des matériaux alternatifs.

Cet exposé présentera les méthodes développées pour l'étude de la production de surface d'ions négatifs, y compris la description des diagnostics de plasma et de surface. En particulier, la spectrométrie de masse avec analyse de l'énergie ionique est utilisée pour détecter les ions négatifs produits en surface, et la spectroscopie de rendement par photoémission est employée pour mesurer le travail de surface. Certains résultats obtenus

avec des matériaux alternatifs tels que le diamant ou de nouvelles électrodes seront décrits en mettant l'accent sur la corrélation entre le rendement en ions négatifs et l'état de surface.

Etude de l'instabilité d'un plasma d'arc créé par séparation de contacts en régime continu

C. Djerroud*, F. Brochard, R. Hugon, S. Chouchène, P. Schweitzer, G. Marcos, J. Moritz, C. Noël, S. Weber

Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, campus ARTEM, 54000 Nancy, France

* Chabha.Djerroud@univ-lorraine.fr

Les stratégies de décarbonation dans l'industrie et les transports reposent en grande partie sur l'électrification d'un nombre croissant de systèmes. Dans l'industrie aéronautique par exemple, les systèmes hydrauliques et pneumatiques sont progressivement remplacés par des systèmes électriques [1]. Cette mutation, qui s'accompagne d'une augmentation considérable de la puissance électrique embarquée, rend plus impérieuse la protection contre les défauts d'arcs électriques. L'effort de recherche à entreprendre est d'autant plus nécessaire que l'électrification repose sur l'utilisation d'alimentations électriques continues, pour lesquelles il n'existe pas encore de système de détection fiable, contrairement aux installations alimentées en alternatif.

Les principales approches poursuivies pour détecter le défaut d'arc reposent sur des méthodes d'analyse fréquentielles du courant de ligne. L'apparition d'un arc sur un réseau électrique se traduit en effet le plus souvent par l'apparition d'un bruit généralement qualifié de « rose » ou « brun », et dont la provenance n'est pas expliquée en termes physiques [2-4]. En parallèle de travaux visant à améliorer la détection précoce des défauts d'arcs, nous avons engagé des recherches visant à comprendre les phénomènes associés à ce bruit.

Nous avons ainsi conçu un dispositif expérimental permettant d'étudier dans d'excellentes conditions de reproductibilité les différents processus à l'œuvre lors de l'apparition d'un arc électrique produit par séparation de contacts en régime continu. Ce dispositif est aujourd'hui utilisé afin d'étudier la génération d'arcs de plusieurs ampères sous une tension DC pouvant atteindre 1000 V. En parallèle des mesures électriques, le plasma d'arc est caractérisé par imagerie rapide jusqu'à des cadences d'acquisition de 1 million d'images par seconde.

Après une brève présentation du dispositif et du protocole expérimental, nous montrerons dans cette présentation que l'analyse des données collectées permet de lier certaines variations du courant de ligne (amplitude, fréquence, transitoires) à des processus observés par imagerie : déplacements des pieds d'arc, fluctuations plasma, éjection de matière.

[1] Barzkar, A., Ghassemi, M. (2020). *IEEE Access*, 8, 169314-169332.

[2] Humbert, J.B., Schweitzer, P., Weber, S. (2021). *Electric Power Systems Research*, 196, 107084.

[3] Artale, G., Caravello, G., Cataliotti, A., Cosentino, V., Di Cara, D., Guaiana, S., Panzavecchia, N., Tinè, G. (2021). *Measurement*, 182, 109770.

[4] Li, T., Jiao, Z., Wang, L., Mu, Y. (2020). *Energies*, 13(16), 190.

Prix Pellat 2021

Interaction aérosols-plasma dans l'ionosphère de Titan : du laboratoire aux mesures *in situ*

^{1,2,3}*Chatain, A., ¹Carrasco, N., ²Guaitella, O., ¹Vettier, L. & ⁴Wahlund, J.-E.

*conférencier principal

¹ *LATMOS/IPSL, Université Paris-Saclay, UVSQ, CNRS, France*

² *LPP, Ecole polytechnique, Sorbonne Université, IP Paris, CNRS, France*

³ *Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, Espagne*
(affiliation actuelle de A.C.)

⁴ *Swedish Institute of Space Physics, Suède*

* audrey.chatain@latmos.ipsl.fr

Le système climatique de la lune de Saturne Titan est gouverné par la production intense d'aérosols organiques dans sa haute atmosphère. Ce phénomène s'est aussi certainement produit sur Terre au moment de l'apparition de la vie. Ces deux points motivent fortement les recherches sur les processus de formation et d'évolution des aérosols dans l'atmosphère de Titan. Les aérosols se forment et restent plusieurs semaines dans l'ionosphère, étendue d'environ 900 à 1200 km d'altitude. Cette région de l'atmosphère est ionisée par le rayonnement solaire UV et des particules énergétiques provenant de la magnétosphère de Saturne. Des espèces plasma très réactives sont ainsi présentes : des radicaux, des espèces excitées, des ions et des électrons. Dans un tel environnement, nous nous sommes intéressés à l'interaction entre les aérosols organiques et le plasma.

Ce phénomène est simulé en laboratoire avec une expérience développée à cet effet : des analogues des aérosols de Titan sont exposés à une décharge plasma en N_2-H_2 . Nous observons qu'à la fois les grains et la phase gaz évoluent. Les atomes H et N interagissent chimiquement avec les aérosols. Puis, du cyanure d'hydrogène (HCN) ainsi que d'autres molécules organiques sont éjectées en phase gaz par le bombardement ionique. Ces résultats mettent en évidence une contribution importante des processus hétérogènes dans l'ionosphère de Titan.

La ré-analyse des données de la sonde de Langmuir de la mission Cassini nous a d'autre part révélé la présence d'une population d'électrons inattendue dans l'ionosphère, sous 1200 km d'altitude et côté jour, zone dans laquelle des ions lourds ont également été détectés. Ces électrons pourraient être émis par les aérosols, après collision avec un photon et/ou après chauffage par la chimie ionique très active dans cette région.

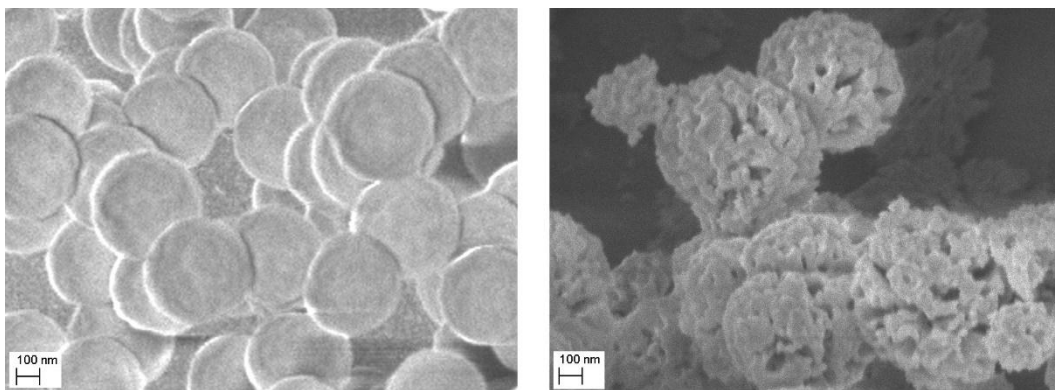
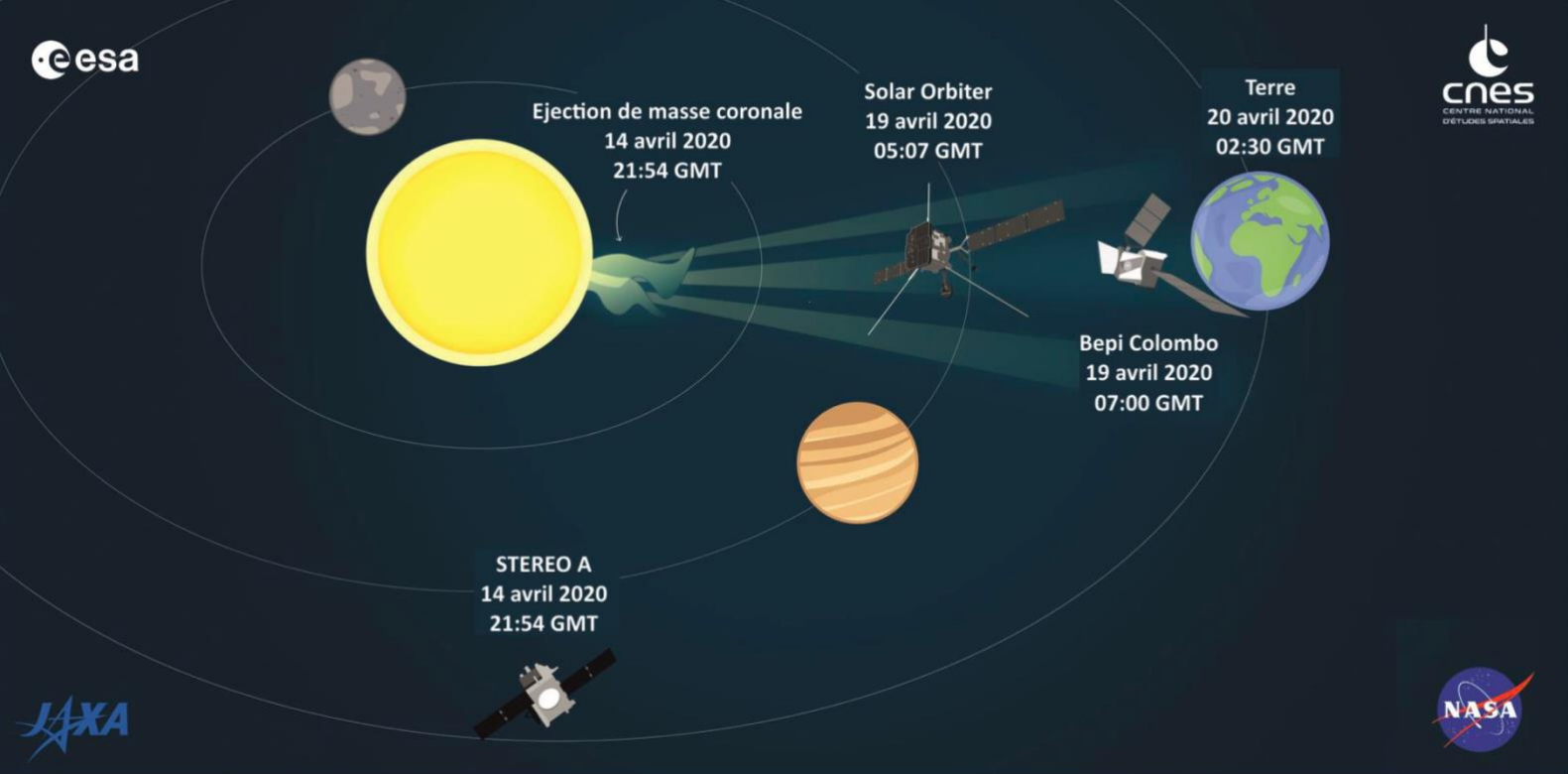


Figure : analogues d'aérosols de Titan (a) avant et (b) après exposition à un plasma de N_2-H_2 .

Conférence Grand Public



L'héliosphère : un gigantesque laboratoire de physique des plasmas

Laurence Rezeau, *Professeur à Sorbonne Université*

J'expliquerai ce qu'est un plasma et comment on atteint ce quatrième état de la matière. Le milieu interplanétaire, espace entre le Soleil et la Terre, est un plasma, de même que l'environnement de la Terre au-dessus de quelques centaines de kilomètres. On a découvert ces plasmas au début du XX^{ème} siècle et on les explore depuis les débuts de l'ère spatiale. Je donnerai un aperçu de cette exploration et je montrerai que le Soleil interagit avec la Terre en l'éclairant mais pas seulement ! Il éjecte aussi un vent de plasma qui nous bombarderait si nous n'avions pas un bouclier protecteur plutôt efficace, le champ magnétique terrestre. On sait maintenant faire le lien entre les éjections de plasma observées sur le Soleil et les perturbations électromagnétiques observées au sol, jetant ainsi les bases d'une « météorologie » de l'espace. Les nombreuses missions spatiales qui explorent l'héliosphère en ce moment permettent de suivre à la trace une éjection de matière coronale et de prévoir si elle va atteindre la Terre.

Plasmas froids

Étude spectroscopique de l'influence d'un champ magnétique sur un plasma d'aluminium induit par laser

*Dubois P., Favre A., Quevieux B., Gobin C., Morel V. & Bultel A.
CORIA, UMR CNRS 6614, Normandie Université, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France
* paul.dubois@coria.fr

La spectroscopie d'émission optique de plasma induit par laser (ou LIBS, pour *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) est une technique qui permet l'analyse quasi instantanée et à distance de la composition multi-élémentaire d'échantillons solides, liquides ou gazeux [1]. Ces avantages en font une méthode privilégiée pour réaliser *in situ* le suivi du contenu en isotopes de l'hydrogène au sein des parois du réacteur de fusion expérimental ITER [2]. Dans le but de préparer cette mesure en amont, il est important de caractériser en laboratoire la dynamique du plasma généré par l'impulsion laser dans les conditions qui seraient imposées par un tokamak en opération, c'est-à-dire à basse pression ($\sim 10^{-5}$ Pa) et en présence d'un champ magnétique intense (~ 5 T).

Cette communication présente l'étude de l'effet d'un champ magnétique $B = 0,98$ T sur un plasma induit par la focalisation d'une impulsion laser (1064 nm, 6 ns, 250 mJ) sur une cible d'aluminium. La Figure 1 représente un schéma simplifié du dispositif expérimental, ainsi que l'assemblage d'aimants permanents au néodyme qui génère le champ B statique, uniforme, transverse à la direction de propagation de l'impulsion laser et parallèle à la surface de l'échantillon.

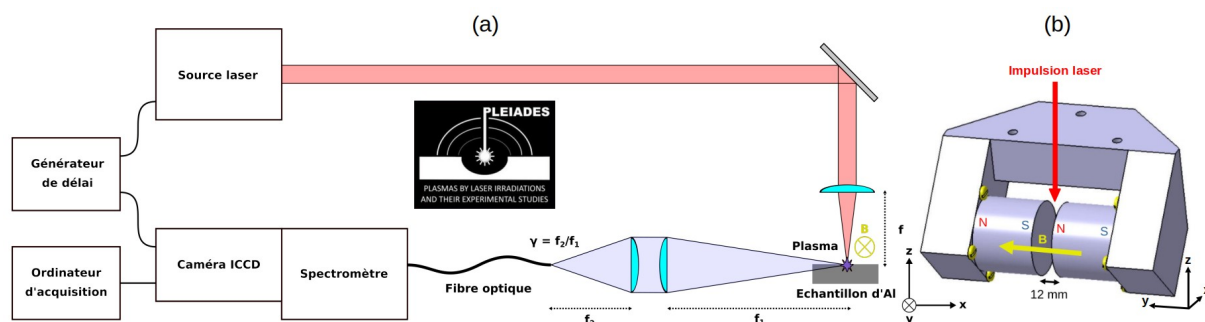


Figure 1: Schéma du montage expérimental (a) et du dipôle magnétique permanent (b).

L'évolution temporelle de la densité et de la température électroniques du plasma est déterminée à partir des spectres d'émission des raies d'aluminium atomique et ionique. Les différences entre les dynamiques observées avec et sans champ magnétique sont interprétées à l'aide d'un modèle de magnétohydrodynamique résistive [3]. Enfin, des perspectives sont proposées sur les prochaines expériences à réaliser, en particulier dans une chambre à vide, et sur des échantillons de tungstène et de béryllium implantés en deutérium.

Références

- [1] A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter, *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Fundamentals and Applications* (Cambridge University Press, 2006).
- [2] C. Grisolia, A. Semerok, J.-M. Weulersse, F. Le Guern, S. Fomichev, F. Brygo, P. Fichet, P.-Y. Thro, P. Coad, N. Bekris, M. Stamp, S. Rosanvallon, G. Piazza, *J. Nucl. Mater.* **363-365**, 1138-1147 (2007).
- [3] S. S. Harilal, M. S. Tillack, B. O'shay, C. V. Bindhu, F. Najmabadi, *Phys. Rev. E* **69**, 026413 (2004).

Plasmas et Société

Recherche et outils pour la météorologie de l'espace

^{1,2}Masson, S.

*conférencier principal

¹ *Laboratoire de Physique des Plasma, France*

² *Observatoire de Radioastronomie de Nançay, France*

* sophie.masson@lpp.polytechnique.fr

Les vents et activités éruptives de notre étoile le Soleil sont les acteurs principaux des perturbations de l'environnement spatial de la Terre. La météorologie de l'espace s'articule autour d'un volet recherche fondamentale et d'un volet opérationnel pour la société. La partie recherche fondamentale vise à déterminer la physique et l'origine des différents événements solaires afin de développer des modèles permettant de prévoir le déclenchement de ces phénomènes extrêmement énergétiques. A cet effet, la communauté française d'héliophysique dispose de jeux de données uniques multi-longueurs d'ondes et multi-messagers, de modèles numériques de pointe pour la simulation de la dynamique de l'atmosphère solaire et d'outils de détection automatiques et de suivi de structures. Bien que la partie opérationnelle ne soit pas du ressort de la communauté scientifique, nous générons et distribuons plusieurs produits dérivés utilisables par la société civile dans un but applicatif. Je présenterai dans un premier temps les principaux événements solaires et leur impact direct ou indirect sur l'environnement spatial terrestre. Je résumerai ensuite les différents efforts en cours au sein de la communauté française pour développer des outils exploitables par la société civile.

Interaction plasma surface pour le recyclage du CO₂

*¹Guaitella, O., Baratte, E., Garcia-Soto, Sadi, D., C., Silva, T., Guerra, V.

*conférencier principal

¹ *Laboratoire de Physique des Plasma, France*

²Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
1049-001, Portugal

* olivier.guaitella@lpp.polytechnique.fr

La valorisation du CO₂ est un enjeu environnemental et sociétal majeur. La stabilité intrinsèque de la molécule de CO₂ rend son utilisation comme matière première difficile en raison du coût énergétique nécessaire à sa dissociation. Néanmoins, parmi les technologies explorées pour y parvenir, l'utilisation des plasmas froids est particulièrement prometteuse. En effet, l'énergie moyenne des électrons dans les sources de plasmas froids permet de favoriser l'excitation vibrationnelle du CO₂ afin de rendre la molécule réactive vis-à-vis d'autres molécules telles que H₂, CH₄ ou même H₂O. Les recherches que nous menons visent donc en premier lieu à comprendre et maximiser le transfert d'énergie aux vibrations du CO₂, et plus spécifiquement au mode asymétrique. Pour y parvenir des mesures de spectroscopie infrarouge in situ et résolue en temps sont utilisées. Un autre point essentiel est de maîtriser le devenir des produits de dissociation du CO₂, et en particulier d'éviter les processus de « réaction inverse » qui reforment CO₂ à partir du CO et de O ou O₂. Les surfaces au contact direct du plasma jouent alors un rôle essentiel. L'impact de simples fibres de verre au contact du plasma, ou bien de matériaux catalytiques plus complexes est étudié expérimentalement en analysant à la fois la réactivité de surface *in situ*, et l'impact de ces surfaces sur les températures vibrationnelles et sur l'ensemble de la cinétique du plasma. Grâce à l'ensemble de ces données expérimentales combinant champ électrique, températures rotationnelles et vibrationnelles, densités radicalaires et de molécules stables, des modèles cinétiques peuvent être validés étape par étape pour affiner les taux de réaction et contraindre les sections efficaces de processus aussi fondamentaux que la dissociation par impact électronique du CO₂.

Ionic wind produced by corona discharges and dielectric barrier discharges in atmospheric air

*Moreau, E., Benard, N.

*conférencier principal

¹ Institut PPRIME, Université de Poitiers, UPR 3346 CNRS, ENSMA

* eric.moreau@univ-poitiers.fr

A corona discharge can be generated in air at atmospheric pressure when a sufficient high voltage is applied at a thin active electrode. The ions produced around the thin electrode are subjected to the Coulomb force, and therefore move towards the grounded electrode; on their path, they exchange momentum with the surrounding air neutral molecules by collisions, thus producing the movement of the whole fluid, such as a jet, from the high voltage electrode towards the collecting electrode. This flow is called “ionic wind” and can reach about 10 m/s. This phenomenon can be used as an electromechanical actuator without moving parts, which directly converts electrical energy into a flow *i.e.* mechanical energy. In this case, we speak of plasma actuators. For instance, Figure 1a presents an instantaneous velocity field of the ionic wind produced by a *volume* corona discharge between a needle and a plate. Furthermore, since the early 2000s, lots of research teams have been investigating the ability of *surface* corona-type discharges to modify boundary layer near-wall flow for the control of subsonic airflows. In aeronautical applications, the aim can be for instance to reduce skin-friction drag. The most common plasma actuator is based on a surface dielectric barrier discharge (DBD) that is established between an air-exposed high voltage electrode and a grounded electrode encapsulated inside a dielectric material (Figure 1b). The main advantage of plasma actuators is that one can imagine any electrode geometry (Figure 1c), the control strategies being then infinite, and this for a large number of industrial applications for which fluid mechanics are involved. During the oral presentation, we will discuss of the dynamic properties of the produced ionic wind and how it can be used in different applications.

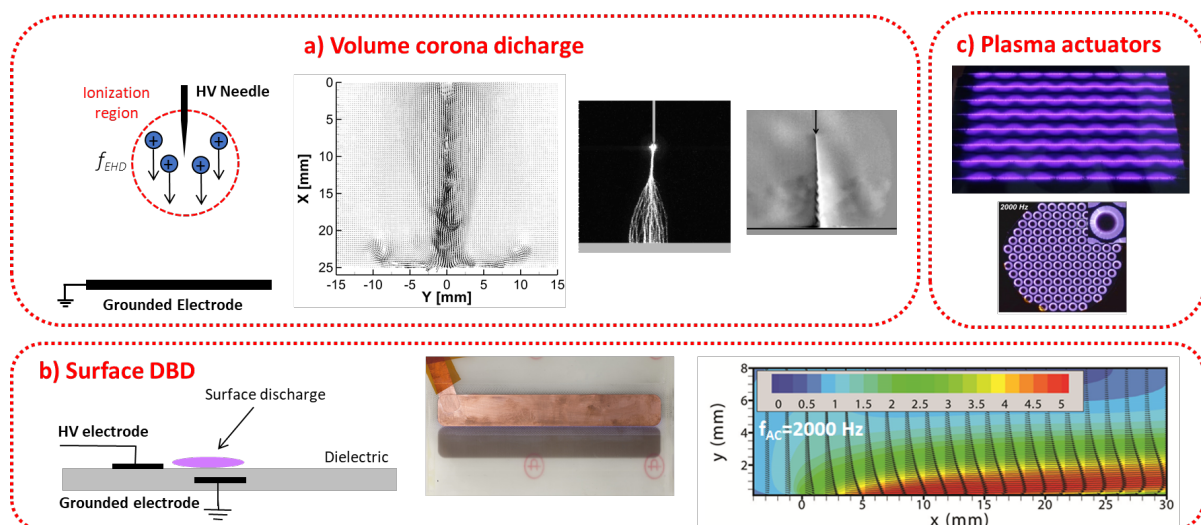


Figure 1. Plasma actuators: a) schema of a volume corona discharge, with a needle-to-plate geometry, instantaneous flow field of the ionic wind produced between a needle and a plate obtained by PIV (the needle tip is located at $(x = 0, y = 0)$), iCCD visualization of the discharge streamers and visualization of the ionic wind by strioscopy. b) side-view of a surface dielectric barrier discharge (DBD), photo of the electrodes of a surface DBD and flow vector field of the ionic wind wall-jet produced by a surface DBD. c) original designs of surface plasma actuators.

Les plasmas froids comme vecteur d'innovation pour l'industrie du bois

Naudé, N.

LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

nicolas.naude@laplace.univ-tlse.fr

Lorsque l'on évoque les plasmas froids dans l'industrie, on pense naturellement à l'industrie de la micro-électronique et la nano-fabrication avec les procédés de gravure et de dépôts de couches minces. Néanmoins, les plasmas froids sont utilisés (ou pourraient être utilisés dans un avenir proche) dans de nombreux autres domaines. En effet, l'utilisation de plasmas froids pour les traitements de surfaces permet de répondre aux besoins croissants de nouvelles fonctionnalités et/ou multifonctionnalités pour les surfaces et au développement de procédés plus respectueux de l'environnement.

Avec un chiffre d'affaires annuel de 60 milliards d'euros et presque 400 000 emplois, la filière bois présente un rôle économique majeur en France [1]. Un des enjeux actuels de la filière est de mieux valoriser les ressources forestières locales, d'une part en mobilisant mieux la ressource, et d'autre part en apportant davantage de valeur ajoutée aux produits bois commercialisés. C'est sur ce deuxième point que les plasmas froids peuvent apporter des solutions innovantes. En effet, l'utilisation des produits de la forêt dans les applications architecturales ou décoratives extérieures (huisseries, bardage, etc.) est souvent limitée par la faible durée de vie de leur apparence qui conduit à des traitements de finition, qui assurent à la fois un rôle esthétique et une protection physique de surface mais qui devront être renouvelés régulièrement [2]. Ainsi, des traitements de surfaces basés sur des procédés plasmas froids peuvent permettre d'apporter des réponses à ces problématiques.

L'objectif de cet exposé sera d'illustrer comment les procédés basés sur des plasmas froids peuvent répondre à ces problématiques. Il s'agira également de montrer que la génération de plasmas froids en contact avec un milieu complexe tel que le bois permet d'étudier la physique de ces plasmas.

[1] <https://franceboisforet.fr/2021/05/26/la-filiere-foret-bois-un-role-economique-majeur-en-france/>

[2] Traitements du bois : Tenir compte de leur impact sur la santé et l'environnement – février 2007 - guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments - recommandation pratique CSS10

Les plaies chroniques et le monoxyde de carbone

Claire Douat

GREMI UMR7344 CNRS, Université d'Orléans, Orléans, France

E-mail: claire.douat@univ-orleans.fr

Une plaie chronique demande au minimum plusieurs mois pour se refermer, laissant alors une brèche aux bactéries de s'y infiltrer. Cette contamination entrave la cicatrisation, ce qui la rend plus longue. Dans beaucoup de cas, l'utilisation d'antibiotiques est nécessaire, mais ces derniers, à cause de leurs utilisations intensives, sont de moins en moins efficaces.

Depuis une quinzaine d'années de nouveaux types de plasma, générés par décharge électrique, sont étudiés, et permettent la génération de plasmas à température proche de la température ambiante, permettant leurs utilisations sur le vivant sans risque de le brûler.

Dans un premier temps, nous verrons que ces plasmas présentent une alternative très intéressante aux antibiotiques pour le traitement des plaies chroniques, et que ces derniers ne sont pas seulement efficaces contre les bactéries, mais permettent également d'accélérer la cicatrisation.

Puis dans un second temps, nous discuterons d'une possibilité d'amélioration de ce traitement plasma en y ajoutant du monoxyde de carbone. Cette molécule, malheureusement connue pour sa toxicité, s'avère être un allié de taille pour lutter contre l'inflammation lorsqu'elle est utilisée à la bonne dose [1]. L'inflammation est également un problème de taille pour les plaies chroniques, car elle induit un déséquilibre entre les différents facteurs biologiques et par conséquent une altération de la cicatrisation [2].

Le CO peut être facilement produit par plasma en dissociant du dioxyde de carbone (CO₂), et nous verrons qu'il est tout à fait possible de produire un plasma adapté au traitement des plaies tout en étant capable de produire du CO en de faibles quantités [3].

[1] Carbone and Douat, *Plasma Med.*, vol. 8, no. 1, pp. 93–120, 2018.

[2] Rosique, Rosique, and Farina Junior, *Int. J. Inflam.*, vol. 2015, no. iv, pp. 1–9, 2015.

[3] Douat, Escot Bocanegra, Dozias, Robert, and Motterlini, *Plasma Process. Polym.*, vol. 18, no. 9, p. 2100069, Sep. 2021.

Turbulence, transport, instabilités

Anomalous transport and losses of energetic particles in burning fusion plasmas

^{1,2,*}D. Zarzoso, ³D. del-Castillo-Negrete, ⁴R. Lacroix, ⁵P.-E. Bernard, ⁴S. Touzet

¹Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR 7345 Marseille, France

²Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR 7340, Marseille, France

³Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-8071, United States of America

⁴Institut du développement et des ressources en informatique scientifique (IDRIS), CNRS, Université

Paris-Saclay, F-91403 Orsay, France

⁵Hewlett Packard Enterprise (HPE), SENSE Building, 92800 Puteaux, France

*E-mail of the main speaker: david.zarzoso-fernandez@univ-amu.fr

Energetic particles (EP) are ubiquitous in fusion plasmas and need to be well-confined in order to transfer their energy to thermal particles and thus achieve self-sustained fusion reactions. However, a fusion plasma is a complex system where micro- and macro-instabilities develop. These instabilities can dramatically reduce the EP confinement and therefore limit the performance of future fusion devices such as ITER. This is the reason why understanding and controlling EP transport in the presence of different instabilities is of prime importance on the route towards steady-state scenarios.

In the first part of this presentation, we give an overview of the theory, modelling and experimental observation of transport and losses of EP in the presence of electromagnetic instabilities. In the second part, we provide a deep insight into the impact of single-helicity modes, such as Energetic Geodesic Acoustic Modes (EGAMs) [1-3] or tearing modes [4-7], characterized by one poloidal (m) and one toroidal (n) mode numbers. Although such modes are not believed to produce chaotic transport, significant losses of EP have been observed, both experimentally and numerically. The purpose of this second part is to shed light on these observations and provide an explanation for the losses of EP in the presence of single-helicity modes, leading to the characterization of the transport as anomalous.

Such transport has been analysed and quantified using the recently developed *Toroidal Accelerated Particle Simulator* (TAPAS) [8]. For this purpose, TAPAS has been parallelized and deployed on Graphical Processing Units (GPU), exhibiting an acceleration factor of 10 with respect to classical CPU partitions. The capabilities of TAPAS to integrate a large number of trajectories ($>10^9$) and produce an enormous amount of data are exploited to analyse the transport and losses of fusion-born alpha particles [8]. Finally, the efficiency of TAPAS allows us to build a large database of loss patterns of alpha particles and thereby unveil the fundamental physics of their transport and losses.

[1] D. Zarzoso *et al* 2012 *Phys. Plasmas* **19** 022102

[2] D. Zarzoso *et al* 2018 *Nucl. Fusion* **58** 106030

[3] D. Zarzoso and D. del-Castillo-Negrete *J. Plasma Phys.* (2020), vol. **86**, 795860201

[4] H.E. Mynick *Physics of Fluids B* **5**(7):2460-2467, 1993.

[5] E.M. Carolipio *et al Nucl. Fusion*, **42**(7):853, 2002.

[6] M. García-Muñoz *et al Nucl. Fusion*, **47**(7):L10, 2007.

[7] William W Heidbrink *et al Nucl. Fusion* **58**(8):082027, 2018.

[8] D. Zarzoso *et al* 2022 *Plasma Phys. Control. Fusion* **64** 044003

Accélération de particules rapides dans les plasmas

Electrons découplés dans les tokamaks

¹C. Reux*, JET contributors, WEST Team

*conférencier principal

¹CEA-IRFM, F-13108 Saint-Paul-les-Durance, France

* cedric.reux@cea.fr

Les électrons découplés «runaways» apparaissent dans les plasmas lorsque des champs électriques intenses accélèrent des électrons davantage que ceux-ci ne sont freinés par les collisions : ils se «découplent» de leur plasma. Théorisés à la fin des années 1950 et découverts dans les premiers stellarators et machines à striction axiale, ils ont depuis été observés dans les plasmas solaires ainsi que dans la foudre. Les principaux objets de recherche concernés par les électrons découplés sont néanmoins les tokamaks.

Les plasmas de tokamaks sont sujets à des instabilités magnétohydrodynamiques macroscopiques appelées disruptions qui provoquent l'arrêt prématuré de la décharge. Elles conduisent à un dépôt brutal du contenu énergétique du plasma dans les composants internes du réacteur, menant à leur endommagement prématuré. Les faisceaux d'électrons découplés sont une des formes que peut prendre ce dépôt d'énergie. Ceux-ci sont créés par le champ électrique induit par la perte du courant plasma à la suite de la disruption. Ils accélèrent jusqu'à des énergies de plusieurs dizaines de MeV, tout en portant une part significative du courant plasma initial. Les électrons découplés sont également présents à l'amorçage de la décharge plasma, du fait des champs électriques élevés nécessaires à la montée initiale du courant. Initialement une simple nuisance sur les premiers tokamaks, ils deviennent de plus en plus problématiques sur les machines de plus grande taille. Ils pourraient représenter jusqu'à 80% des 15 MA de courant plasma initial sur une disruption d'ITER.

Il apparaît donc nécessaire d'empêcher la formation des électrons découplés, et en cas d'échec de cette première ligne de défense, d'être capable d'arrêter un faisceau d'électrons découplés déjà accéléré. Dans les deux cas, la méthode principale actuellement testée est l'injection massive de matière. Une quantité équivalente à plusieurs fois le contenu en particules du plasma est injectée dans le but d'augmenter la densité et la fréquence des collisions pour freiner les électrons. Lorsque l'imminence d'une disruption est détectée, l'injection massive a pour effet de déclencher celle-ci de façon contrôlée et moins dangereuse.

La présente contribution va brosser un rapide tableau des recherches actuelles dans la prévention et la suppression des faisceaux d'électrons découplés dans les tokamaks. En particulier, nous reviendrons sur les résultats expérimentaux récents ainsi que les efforts de modélisation. Le champ de recherche est particulièrement actif depuis la fin des années 1990, et a conduit à des découvertes intéressantes en physique des plasmas. Parmi elles, on peut citer le phénomène d'avalanche multipliant les électrons découplés par collisions, l'importance des processus radiatifs (synchrotron, bremsstrahlung) dans leur dynamique d'accélération, celle des instabilités MHD dans leur dissipation, et la mise en évidence d'un plasma froid qui accompagne le faisceau et influe sur son évolution. Nous reviendrons également sur une méthode d'amortissement du faisceau récemment découverte, qui combine instabilités MHD et suppression de l'avalanche et qui a permis de dissiper sans danger 1.4 MA d'électrons découplés sur JET. Enfin nous illustrerons quelques conséquences inattendues d'un faisceau d'électrons non amorti sur les machines récentes.

Accélération des particules énergétiques dans les flares solaires et dans les chocs coronaux associés

¹Plotnikov, I.*

*conférencier principal

¹*IRAP, Toulouse*

* illya.plotnikov@irap.omp.eu

Dans cette présentation on discutera les différents mécanismes de production d'électrons et protons les plus énergétiques lors des éruptions solaires. Plusieurs mécanismes sont connus comme reconnexion dans la couche de courant à l'origine de l'éruption, accélération stochastique dans les boucles éruptives et accélération de Fermi au niveau du choc coronal. Les propriétés d'accélération de Fermi seront discutés plus en détail en relation avec particules solaires énergétiques (SEPs) mesurés in-situ à 1 AU. Sans mesures in-situ disponibles dans la couronne solaire, les diagnostics disponibles sont le rayonnement radio, X et gamma, dont on discutera les signatures dans les différents mécanismes d'accélération.

Accélération d'électrons relativistes par sillage laser plasma

¹Cros, B.

¹ *LPGP CNRS Université Paris Saclay, France*
brigitte.cros@universite.paris-saclay.fr

L'excitation d'une onde de plasma de grande amplitude dans le sillage d'un laser intense est associée à des champs électriques longitudinaux qui voyagent à la vitesse de la lumière dans le plasma. Ce mécanisme permet d'obtenir des champs accélérateurs dans la gamme de 1 à 100 GV/m, et constitue une voie très prometteuse pour réaliser des accélérateurs compacts (<https://gdr-appel.fr/>).

Suivant l'intensité du laser, les ondes de plasma sont créées dans différents régimes : le régime quasi-linéaire, combiné au guidage externe du faisceau laser, permet d'accélérer des électrons relativistes injectés de l'extérieur du plasma ; en régime non linéaire, le déferlement de l'onde de plasma conduit au piégeage et à l'accélération d'une partie des électrons du plasma, et permet de créer des sources d'électrons intenses accompagnées de rayonnement énergétique.

Cette physique très riche est explorée par de nombreux groupes au niveau théorique et expérimental, afin d'identifier les concepts les plus performants pour contrôler les propriétés du faisceau d'électrons et construire, à terme, des accélérateurs basés sur des technologies plasma. Une présentation des concepts de base sera suivie par l'illustration de résultats récents de la thématique et les défis à relever pour les futurs accélérateurs plasma.

Plasmas naturels

Les pulsars et leur environnement

Jérôme Pétri

Observatoire Astronomique de Strasbourg, 11 rue de l'Université, 67000 Strasbourg, France
jerome.petri@astro.unistra.fr

Bien que découverts il y a plus de 50 ans, les pulsars restent des objets astrophysiques au fonctionnement énigmatique. Notre connaissance théorique actuelle se limite à les décrire comme des étoiles à neutrons fortement magnétisées et en rotation sur elles-mêmes. En effet, à ce jour, aucun modèle auto-cohérent n'est capable d'expliquer leur spectre ainsi que les processus d'accélération des particules sous-jacentes. Néanmoins, un effort important de modélisation de la magnétosphère et du vent des pulsars commence à fournir une image satisfaisante du fonctionnement d'un tel astre (Pétri, 2016). Cette présentation a pour but de synthétiser, tant du point de vue observationnel que théorique, nos connaissances actuelles de cette classe particulière d'étoiles à neutrons.

Dans une première partie, je rappellerai succinctement que les pulsars ont permis entre autre de cartographier les électrons dans la Voie Lactée ainsi que le champ magnétique galactique. Le chronométrage précis des variations de la période a permis de détecter la première planète autour d'un pulsar et démontré indirectement l'existence des ondes gravitationnelles.

Dans une deuxième partie, je rappellerai certaines données observationnelles de base pour fixer les ordres de grandeur (rayon de l'étoile, vitesse de rotation, champ magnétique, énergie rayonnée) ainsi que les propriétés de leurs spectres d'émission, des ondes radio jusqu'aux rayons X et gamma.

Dans une troisième partie, je passerai en revue les modèles de magnétosphère de pulsars prédisant la formation d'un vent relativiste de paires électrons/positrons et dont cette magnétosphère serait la source. J'en dégagerai une vue d'ensemble du système, de la surface stellaire à la nébuleuse environnante. Je montrerai que la localisation des régions d'émission radio et gamma est bien contrainte (Benli et al., 2021) (Pétri and Mitra, 2021).

Benli, O., Pétri, J., Mitra, D., 2021. Constraining millisecond pulsar geometry using time-aligned radio and gamma-ray pulse profile. *A&A* 647, A101.

Pétri, J., 2016. Theory of pulsar magnetosphere and wind. *J. Plasma Phys.* 82, 635820502.

Pétri, J., Mitra, D., 2021. Young radio-loud gamma-ray pulsar light curve fitting. *Astronomy and Astrophysics* 654, A106.

Astrophysique de "laboratoire"

Processus d'accrétion autour des objets compacts et expériences d'astrophysique de laboratoire

É. Falize^{1,*}, L. Van Box Som^{1,2}, C. Busschaert¹, N. Charpentier¹,
V. Tranchant¹, L. Dollershell¹, B. Albertazzi³, M. Koenig³

¹CEA-DAM-DIF, F-91297, Arpajon, France

²Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, 91680
Bruyères-le-Châtel, France

³LULI-CNRS École Polytechnique, CEA, Université Paris-Saclay, UPMC Univ. Paris 06,
Sorbonne Universités, F-91128 Palaiseau cedex, France.

*emerich.falize@cea.fr

Les plasmas d'accrétion sont des environnements privilégiés pour étudier la matière dans des conditions physiques extrêmes. Une modélisation précise de la dynamique et de l'émissivité radiative de ces écoulements peut être un moyen efficace de déduire les propriétés intrinsèques des étoiles accrétantes [1,2,3,4] (masse, rayon, champ magnétique ...).

Pour apporter un éclairage complémentaire aux observations multi-longueur d'onde souvent limitées, des expériences utilisant des lasers de puissance nanoseconde ont permis de reproduire en laboratoire une grande variété de structures d'accrétion (disque, colonne ou encore choc d'accrétion) que l'on trouve autour des naines blanches et des étoiles à neutrons. De nombreux travaux théoriques [5,6], dont on rappellera les principaux résultats dans cet exposé, ont permis de renforcer le lien entre ces plasmas de laboratoire et les processus d'accrétion à l'échelle astrophysique.

Dans cet exposé nous présenterons trois projets que nous avons développé ces dernières années. Tout d'abord, nous montrerons comment l'utilisation du Laser Mégajoule permettra de contraindre, grâce à l'expérience POLAR, la physique des colonnes d'accrétion rencontrées autour des naines blanches accrétantes composant les variables cataclysmiques magnétiques [7]. Puis nous détaillerons comment l'expérience *CIRENE* (Chocs Internes Radiatifs dans les *Ejecta* de *NovaE*) permettra de confirmer la structure produisant l'intense rayonnement produit lors du phénomène de novæ [8]. Enfin nous détaillerons comment le programme *MaTaLE* (*Mapping Theory and Laboratory Experiments*) ouvre la voie à une nouvelle catégorie d'expérience d'astrophysique de laboratoire [9]. En particulier nous montrerons comment il est possible de reproduire la propagation du rayonnement X produit lors de l'explosion nucléaire à la surface des étoiles à neutrons [10].

[1] Busschaert C. et al., *Astronom. & Astrophys.*, 579, 25 (2015)

[2] Mouchet M. et al., *Astronom. & Astrophys.*, 600, 53 (2017)

[3] Van Box Som L. et al., *Monthly Not. R. Astronom. Soc.*, 473, 3158 (2018)

[4] Bonnet-Bidaud J.-M. et al., *Astronom. & Astrophys.*, 633, 145 (2020)

[5] Ryutov D. D. et al., *Astrophys. J.*, 518, 821 (1999)

[6] Falize E. et al., *Astrophys. J.*, 730, 96 (2011)

[7] Van Box Som L. et al., *Astrophys. J.*, in prép. (2022)

[8] Chomiuk L. et al., *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, 59, 391 (2021)

[9] Tranchant V. et al., *Astrophys. J.*, submitted (2022)

[10] Fragile P. C. et al., *Nature Astronom.*, 4, 541 (2020)

Les plasmas spatiaux comme source d'évolution chimique du système solaire : Effets, mesures, expériences de laboratoire

Bouquet, Alexis¹ *

¹ *Aix-Marseille Univ, CNRS, PIIM, France*

* Alexis.bouquet@univ-amu.fr

La grande majorité de la matière visible de l'univers est sous forme de plasma. Bien que le plasma dense des étoiles en représente la plus grande partie, les plasmas peu denses jouent un rôle crucial dans les interactions entre corps célestes. Vent stellaires, magnétosphères planétaires... ont façonné et influencent toujours notre système solaire.

Dans cette présentation, nous passerons en revue les plasmas connus dans notre système solaire qui affectent les corps planétaires, et donnerons les exemples les plus marquants de cette interaction, sur les atmosphères et surfaces de planètes et satellites.

Nous discuterons ensuite les moyens d'analyse déployés sur des missions spatiales, et le type d'informations qu'ils permettent d'obtenir sur les plasmas spatiaux, et les implications pour notre compréhension des corps du système solaire.

Enfin, nous parlerons des expériences de laboratoire réalisées par la communauté planétologie pour explorer les effets physico-chimiques et chimiques des plasmas sur la surface des grains interstellaires, des petits corps du système solaire, et des surfaces et atmosphères de planètes et lunes. Nous présenterons les possibilités et limites de ce type d'expérimentation, les moyens pour les réaliser et analyser leurs résultats, et leurs apports pour la préparation et l'exploitation de missions spatiales.

Plasmas Chauds

Extreme-light physics at the Apollon laser: new challenges & opportunities for laser-plasma interaction

Mickael Grech^{1,*}

¹ *Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, Sorbonne Université, CEA, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France*

* mickael.grech@polytechnique.edu

The Apollon laser [1,2] is now operational at the 1PW level (22J in 22fs, after compression). An ongoing upgrade will allow to reach the multi-PW level in the months to come, and the first experiments are about to start. Apollon and similar (multi-PW class) laser systems in Europe and Asia will soon allow to reach unprecedented on-target intensities, well beyond 10^{21} W/cm² and potentially up to 10^{24} W/cm². Under such extreme light conditions, the laser-plasma interaction is not only relativistic, it is also strongly impacted by quantum electrodynamic (QED) effects [3]. Among these effects are high-energy (γ) photon emission and its back-reaction on the emitting electron dynamics, as well as electron-positron pair production in either the strong laser-field or the Coulomb field of highly-charged ions. These new processes will not only strongly modify the dynamics of the laser-plasma interaction, they will provide new opportunities in terms of radiation and particle sources, as well as pose new challenges in terms of their experimental detection.

To support this formidable experimental undertaking, new theoretical and numerical tools need to be developed, that allow to model new processes at the edge of relativistic plasma physics and QED. In this talk, I present recent code developments [4] and advances we have made - on both the simulation & theory sides - in treating QED processes of utmost importance for the forthcoming experiments on the Apollon laser. A particular emphasis is put on γ -photon [5,6] and electron-positron pair production [7,8] in strong electromagnetic fields.

- [1] Papadopoulos et al., *High-contrast 10-fs OPCPA-based Front-End for the Apollon-10PW laser*, Advanced Solid State Lasers 2015, Oct 2015, Berlin, Germany
- [2] Cros et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **740**, 27 (2014)
- [3] Di Piazza et al., Rev. Mod. Phys. **84**, 1177 (2012)
- [4] Derouillat et al., Comp. Phys. Comm. **222**, 351 (2018) ; <https://smileipic.github.io/Smilei>
- [5] Niel et al., Phys. Rev. E **97**, 043209 (2018)
- [6] Niel et al., Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 094002 (2018)
- [7] Lobet et al., Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 043401 (2017)
- [8] Mercuri-Baron et al., New J. Phys. **23**, 085006 (2021)

Interaction plasma-surface

High aspect ratio nanoplasma generation in dielectrics by femtosecond Bessel beams

***Pierre-Jean Charpin, Kazem Ardaneh, Benoit Morel, Remo Giust & François Courvoisier.**

*FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS,
15B avenue des Montboucons, 25030, Besançon Cedex, France*

*pj.charpin@femto-st.fr

Controlling the energy deposition mechanism in matter is very important for applications in the high-speed/high-precision cutting of dielectrics. In the laser-matter interaction, the key component in energy deposition is the generated plasma. Bessel beams have a great advantage in the generation of high-density plasmas inside matter due to their conical structure, which allows the uniform distribution of energy in a rod with $\sim 400\text{nm}$ in diameter that extends over a large distance ($10^3\text{'s } \mu\text{m}$ to centimeter scale). One of the first phenomena responsible for the destruction of the matter is the ionization by the field, closely followed by collisional ionization. These two ionization processes create a plasma with a rapidly increasing density. Here, we investigate with Particle-In-Cell simulations the microphysics of ionization and laser-plasma interaction. Previous simulation codes simulating pulse propagation could not retrieve the main characteristics of the experimental data, specifically the very high absorption¹.

In our experiments, a single 100 fs Bessel pulse at central wavelength 800 nm was focused inside transparent dielectrics at intensities of 10^{14} W.cm^{-2} . To reproduce the experiments, we have performed simulations using the massively parallel EPOCH particle-in-cell (PIC) code². This approach allowed us retrieving successfully several experimental diagnostic: near and far field of the pump pulse after interaction, second harmonic generation pattern. Figure 1 (a) and (b) show the Ex component of the electric field and the free electron density after the generation of an over-critical hot plasma using a Bessel beam. There is strong field enhancement at the surface of the plasma and defocusing of the laser beam. The pulse energy linearly decreases along the plasma length with a total absorption of 60%. The main absorption process is resonance absorption. Importantly, we have demonstrated the energy storage mechanism into the plasma is collisionless (Landau damping), which could not be captured in previous simulations. The deposited energy density in the plasma volume is about 10^6 J.cm^{-3} which corresponds to the energy density allowing the generation of warm dense matter³.

Using Bessel beams, it is possible to reach cm-scale over-critical hot plasmas inside solids which is a promising use for laser ablation and for studying warm dense matter. Moreover, simulations will help us to get a better understanding of the mechanisms involved in the formation of those plasmas such as resonance absorption that we can see on Fig. 1 a).

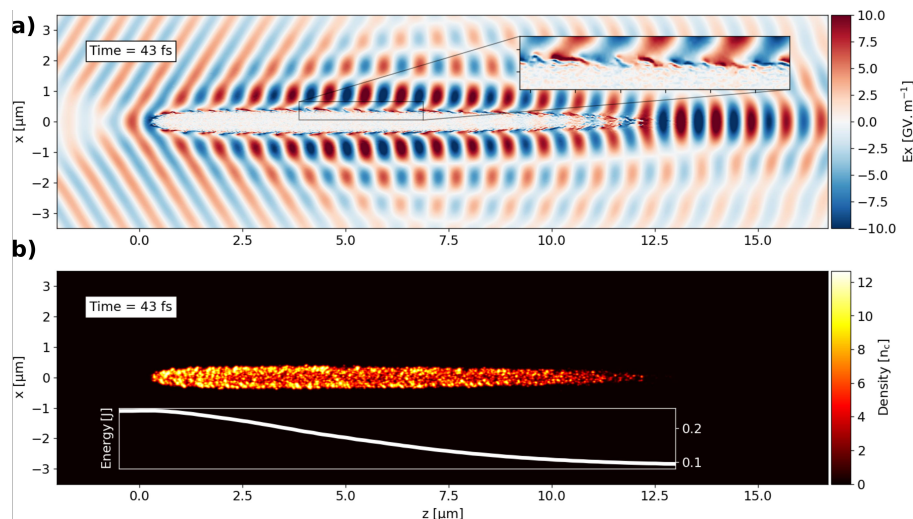


Figure 1. Simulation of a) the electric field and b) the free electron density generated by a femtosecond Bessel beam inside matter.

¹ K. Ardaneh, R. Meyer, M. Hassan, R. Giust, C. Xie, B. Morel, I. Ouadghiri-Idrissi, L. Furfaro, L. Froehly, A. Couairon, G. Bonnaud & F. Courvoisier " High energy density plasma mediated by collisionless resonance absorption inside dielectrics ", <https://doi.org/10.48550/arxiv.2109.00803> (2021)

² D. Arber, K. Bennett, C. S. Brady, et al, Plasma Phys. Control Fusion. 57, 113001 (2015)

³ K. Ardaneh, R. Meyer, M. Hassan, R. Giust, B. Morel, A. Couairon, G. Bonnaud & F. Courvoisier " Femtosecond laser-induced sub-wavelength plasma inside dielectrics: I. Field enhancement", <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.01709> (2022)

Accélération de particules rapides dans les plasmas

Optimization of plasma density profile in laser electrons plasma accelerators

¹Céline HUE, ¹Yang WAN, ¹Eithan LEVINE, ¹Omri Seeman, ¹Daria RASPOPOVA, ¹Sheroy TATA, ¹Victor MALKA

*conférencier principal, Céline HUE

¹ *Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israël*

* celine.hue@weizmann.ac.il

Shock-injection in laser driven plasma-based accelerators (LWFAs) are proofed to be an elegant and efficient approach for generating high quality electron beams. Yet, the charge of the produced beams is still limited to tens of pc, reducing then its use for a wider range of applications. The possibility to generate high charge beams by keeping a good quality, stays to be explored. Moreover, despite former studies focused on separate physical processes such as for example beam loadings, repulsive defocusing force, and laser evolution, a more general investigation of the plasma density parameters on the final beam parameters is required. In this research, we investigate the possibilities to improve shock-injection parameters for producing high quality and high charge electron beams in the hundreds of MeVs range of energy. With this research, we have understood that the longitudinal distribution of the beam current $I(\xi)$ plays an important role in the injected beam charge as well as energy performance. Ways to tailoring $I(\xi)$ are also been studied.

Plasmas chauds

Ignition, a dream that came true: a brief history of the ICF program at LLNL

Sébastien Le Pape

LULI-CNRS École Polytechnique, CEA, Université Paris-Saclay, UPMC Univ. Paris 06, Sorbonne Universités, F-91128 Palaiseau cedex, France.

Fusion energy has been the driven force in the High Energy Density (HED) community for more than fifty years but especially since the start of the National Ignition Campaign in 2009 on the National Ignition facility (LLNL, USA). The National Ignition Campaign, though a marvel in term of laser technology and data quality in this challenging regime, has failed to achieve ignition. This failure has shed lights on gaps of our understanding of fundamental plasma properties such as thermal transport or emissivity. Following these initial difficulties, evolution of the design (higher adiabat, new ablator, new hohlraum conditions) has led to significant improvement in implosion performance over the years and finally to performance close to ignition ($Q=0.7$) in the summer of 2021. I will go over these evolutions and why they led to the recent successes obtained on the NIF.

Session « Posters »

TOPIC	TITLE	AUTEURS	Numéro
Accélération de particules rapides dans les plasmas	Accélération de positrons dans un canal plasma avec des lasers multi-Petawatt	Martinez Bertrand, Barbosa Bernardo, Vranic Marija	P1
Accélération de particules rapides dans les plasmas	Acceleration of positrons in plasmas with high energy efficiency	Hue C.s., Cao G.j. , Andriyash I.a., Knetsch A., Hogan M.j., Adli E., Gessner S., Corde Sébastien	P2
Accélération de particules rapides dans les plasmas	Optimization of γ -photon sources using near-critical density targets towards electron-positron pairs generation through the linear and nonlinear Breit-Wheeler processes	Vladisavlevici Iuliana-Mariana, Ribeyre Xavier, Vizman Daniel, D'humieres Emmanuel	P3
Accélération de particules rapides dans les plasmas	Terahertz radiation from laser-induced plasmas inside dielectrics	Ardaneh Kazem, Giust Remo, Morel Benoit, Charpin Pierre-Jean, Courvoisier Francois	P4
Astrophysique de "laboratoire"	Instabilités plasma induites par des faisceaux d'électrons ultra- relativistes ou des flux ultra-intenses de photons gamma	J. Faure, L. Gremillet, M. Lemoine & the E-305 collaboration	P5
Astrophysique de "laboratoire"	Instabilités faisceau-plasma en régime ultra-relativiste à FACET-II	San Miguel Claveria Pablo	P6
Interaction plasma-surface	Gravure par plasma du titane pour la fabrication de microcomposants biomédicaux	Ettouri Rim, Tillocher Thomas , Lefaucheux Philippe, Boutaud Bertrand, Dussart Rémi	P7
Plasmas chauds	1ere campagne expérimentale « Shock Ignition » en FCI sur l'installation laser LMJ-PETAL	Baton Sophie , Colaitis Anaud, Rousseaux Christophe, Boutoux Guillaume, Brygoo Stéphanie, Jacquet Laurent, Reverdin Charles, Koenig Michel, Batani Dimitri, Casner Alexis	P8
Plasmas chauds	DIP, a dispersion interferometer to measure linear electron density at ITER	Hamdani Slim	P9
Plasmas chauds	Full self-consistent stationary solutions of Vlasov-Maxwell equations	Cordonnier Aurélien , Leoncini Xavier, Dif-Pradalier Guilhem	P10
Plasmas chauds	Introduction du Machine-Learning en spectroscopie des plasmas	Kerebel Malo, Koubiti Mohammed	P11
Plasmas chauds	La description de la physique de base des plasmas par la mécanique à N corps: ça marche!	Escande Dominique	P12
Plasmas chauds	Macroscopic and microscopic study of laser shocked glassy GeO2	Benuzzi Mounaix Alessandra , Torchio Raffaella, Balugani Sofia, Cordone Andrea, Dorchies Fabien, Guillam Erwann, Hernandez Jean-Alexis, Pépin Charles , Ravasio Alessandra, Sevelin Radiguet Nicolas , Vinci Tommaso	P13
Plasmas chauds	Study of K α X-ray source size based on high-intensity femtosecond laser-solid interaction	Ferré Amélie	P14
Plasmas et Société	Caractérisation de jets plasma He/CO2 et Ar/CO2 pour le traitement des plaies	Mestre Eloïse , Gibert Titaina , Dozias Sebastien , Rabat Hervé , Douat Claire	P15
Plasmas et Société	Dégradation des microplastiques par décharges électriques dans un liquide	Zamo Aurélie, Hamdan Ahmad, Merbahi Nofel, Rond Cathy	P16
Plasmas froids	Caractérisation multiple de la densité électronique d'un plasma	Herbelot Julien, Chérigier-Kovacic Laurence	P17
Plasmas froids	Cinétique chimique-plasma de la décomposition du n-hexane dans une décharge N2/O2 (20%) comparée à une décharge N2	Trad Perla , Blin-Simiand Nicole, Pasquiers Stéphane, Gérardin Fabien, Jeanney Pascal , Fleury Michel, Heninger Michel	P18
Plasmas froids	Design d'une antenne 'birdcage' pour la génération d'ondes Helicon dans la machine toroïdale TORPEX	Vincent Simon, Guittienne Philippe , Jacquier Rémy , Baquero-Ruiz Marcelo , Sepulchre Cyrille , Furno Ivo	P19
Plasmas froids	Mesure par LIF de la température de l'Argon neutre dans une colonne de plasma magnétisé	Dubuit Nicolas , Escarguel Alexandre	P20
Plasmas froids	Modélisation de l'absorption d'une impulsion laser nanoseconde par un plasma d'aluminium généré par une première impulsion	Bultel Arnaud, Favre Aurélien , Morel Vincent	P21
Plasmas froids	Réacteurs microplasmas intégrés sur dispositifs en silicium	Dussart Rémi , Kouadou Elane , Stolz Anaud , Iséni Sylvain , Aubry Olivier , Lefaucheux Philippe	P22
Plasmas naturels	Hélicité magnétique et éruptivité des régions actives solaires	Pariat Etienne	P23
Turbulence, transport, instabilités	Shearless transport barriers in magnetised plasma model	Osorio Leonardo , Roberto Marisa , Caldas Ibere , Viana Ricardo, Elskens Yves	P24
Turbulence, transport, instabilités	Spectroscopie Stark en présence d'ondes de Langmuir dans un plasma hors d'équilibre	Stamm Roland	P25
Turbulence, transport, instabilités	Transport chaotique anormal d'électrons dans les champs induits par l'instabilité de dérive en champs croisés	Mandal Debraj, Elskens Yves, Le Moine Nicolas, Doveil Fabrice, Leoncini Xavier	P26

Accélération de particules rapides dans les plasmas

Accélération de positrons dans un canal plasma avec des lasers multi-Petawatt

^{1*}B. Martinez, ¹B. Barbosa, ¹M. Vranic

¹GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal

Les accélérateurs plasmas représentent une alternative ambitieuse afin d'accélérer des électrons et des positrons sur des distances courtes et à un coût raisonnable. Bien que l'accélération par sillage laser soit une piste prometteuse pour accélérer des électrons, cette méthode ne se généralise pas aux positrons. De plus, les diverses approches proposées pour les positrons se basent sur un faisceau créé et injecté par un accélérateur conventionnel [1-3].

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser les futurs lasers multi-PW afin de directement créer et accélérer des positrons. L'interaction d'un tel laser se propageant perpendiculairement à un faisceau relativiste d'électrons est capable d'induire la création de paires électrons-positrons [4]. Une fraction des positrons est alors injectée et accélérée dans le champ laser intense avant qu'il ne se défocalise. Nous proposons de prolonger cette accélération de positrons dans le champ laser en utilisant un canal plasma. Nous démontrons notamment que l'interaction du laser ultra-intense dans le canal plasma permet d'accélérer un faisceau dense d'électrons. Ce dernier induit un champ focalisant les positrons, permettant ainsi leur accélération dans le champ laser sur une distance de l'ordre de 400 μm .

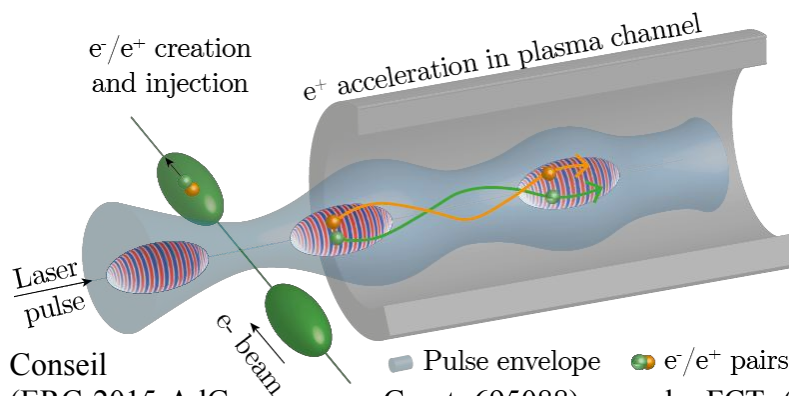


Figure: Création et accélération de positrons par un laser multi-PW se propageant dans un canal plasma

Conseil
(ERC-2015-AdG Grant 695088), par la FCT (grant CEECIND/01906/2018 et PTDC/FIS-PLA/3800/2021). Nous remercions PRACE pour l'accès au ordinateur du BSC, basé en Espagne (MareNostrum).

Travail financé par le
Européen de la Recherche

- [1] S. Corde et al, Nature 524, 442-445 (2015)
- [2] J. Vieira et al, Physical Review Letters 112, 215001 (2014)
- [3] C. Lindstrom et al, Physical Review Letters 120, 124802 (2018)
- [4] M. Vranic et al, Scientific Reports 8, 4702 (2018)

Acceleration of positrons in plasmas with high energy efficiency

¹Hue, C.S., ^{1,2}Cao, G.J., ¹Andriyash, I.A., ¹Knetsch, A., ³Hogan, M.J., ²Adli, E.,
³Gessner, S. & ^{1*}Corde, S.

*conférencier principal, sebastien.corde@polytechnique.edu

¹ LOA, ENSTA Paris, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91762
Palaiseau, France

² Department of Physics, University of Oslo, NO-0316 Oslo, Norway

³ SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California 94025, USA

Accelerating particles to high energies with high efficiency and beam quality is crucial in developing accelerator technologies. By leveraging plasmas, we can reach unprecedented high acceleration gradients, and with this prospect plasma-based accelerators are now considered as a promising future technology [see the European Strategy for Particle Physics -- Accelerator R&D Roadmap, arXiv:2201.07895]. While important progress has been made in plasma-based electron acceleration in recent years, identifying a reliable acceleration technique for the positron counterpart in plasma would pave the way to a linear collider for high-energy physics applications.

In this work, we show that a tradeoff between energy efficiency and beam quality needs to be established in the presence of a positron load in the plasma [Hue *et al.*, Phys. Rev. Research 3, 043063 (2021)]. This tradeoff is intrinsically related to the quick response of plasma electrons within the positron bunch, a response which becomes stronger at higher positron charge and energy efficiency. In electron-driven linear plasma wakefields, it is found that the bunch quickly evolves towards an equilibrium with limited emittance growth, and the main limitation for the beam quality lies in the uncorrelated energy spread that the positron bunch acquired during its acceleration in the plasma. Different plasma acceleration schemes are discussed, and the results demonstrate that when the plasma response is driven in a moderately nonlinear regime, one can achieve simultaneously energy transfer efficiencies exceeding 30% and uncorrelated energy spread below 1%. On the other hand, a strongly nonlinear wake produced by a donut-shaped driver is more suitable for high-charge, high-gradient acceleration, at the cost of a degraded efficiency and beam quality.

The presentation will be concluded with perspectives and future directions for reaching collider-type parameters for the positron beam using plasma accelerators, and with a new vision of the possible physical limitations when trying to reach such parameters.

Optimization of γ -photon sources using near-critical density targets towards electron-positron pairs generation through the linear and nonlinear Breit-Wheeler processes

^{1,2,*}Vladisavlevici, I.M., ²Ribeyre, X., ¹Vizman, D., ²d'Humieres, E.

¹*Faculty of Physics, West University of Timisoara, 300023 Timisoara, Romania*

²*University of Bordeaux – CNRS – CEA, CELIA, UMR 5107, 33405 Talence, France*

* iuliana.vladisavlevici@e-uvvt.ro

At the interaction between an ultra-high intensity laser pulse ($I > 10^{22}$ W/cm²) with matter, the electrons will be accelerated up to ultra-relativistic velocities and will emit a copious amount of synchrotron gamma photons. For even higher intensities ($I > 10^{24}$ W/cm²), the emitted gamma photons can interact with the laser field and create electron-positron pairs by the nonlinear Breit-Wheeler process [1]. Due to the promising PW laser facilities such as APOLLON (Paris, France) and ELI-NP (Bucharest, Romania), various theoretical and numerical studies on these phenomena were performed in the last years. Studies on various absorption mechanisms using different target configurations, showed a conversion efficiency of the laser energy to gamma photons from 15% [2] up to 35% [3].

Our main goal is to investigate the high energy radiation emitted by electrons in the laser-plasma interaction, eventually leading to production of electron-positron pairs via the linear and nonlinear Breit-Wheeler processes. Through 2D Particle-in-Cell (PIC) simulations using SMILEI [4], we studied the case of an ultra-high intensity laser pulse interacting with a near critical density target. We studied the optimal parameters for the maximum conversion efficiency of the laser energy to gamma photons. In the optimal configuration, we analysed the total number of electron-positron pairs produced and the energy cut-off of the electrons, respectively positrons. We compared our results with the ones obtained by M. Lobet et al. [5][6] and we discuss their suitability for experimental campaigns.

[1] C. S. Brady and T. D. Arber, *Plasma Phys. Controlled Fusion* 53, 015001 (2011)

[2] Brady et al., *Physical Review Letters*, 109, 245006 (2012)

[3] Ridgers et al., *Physical Review Letters* 108, 165006 (2012)

[4] J. Derouillat et al., *Comput. Phys. Commun.* 222, 351-373 (2018)

[5] M. Lobet et al., *Phys. Rev. Lett.* 115, 215003 (2015)

[6] M. Lobet et al., *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 043401 (2017)

Terahertz radiation from laser-induced plasmas inside dielectrics

^{1*}Kazem Ardaneh, ¹Remo Giust, ¹Benoit Morel, ¹Pierre-Jean Charpin & ¹Francois Courvoisier

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS, 15B avenue des Montboucons, 25030, Besancon, France

* kazem.ardaneh@gmail.com

Electromagnetic radiation in the terahertz ($10^{11} - 10^{13}$) frequency domain is particularly attractive for applications in remote sensing using optically pumped laser sources and time-domain spectroscopy. The plasma is a promising medium to generate THz radiation. An ultrashort laser pulse can generate over-critical plasma inside dielectrics.¹ Here we show that the ponderomotive forces due to the intense resonantly driven fields at the critical surface are sufficient to create a large density difference between the ions and electrons which can lead to powerful THz radiation. The nonlinear current, in this case, can also lead to second-harmonic generation. In our experiments, a single 100 fs Bessel pulse at central wavelength 800 nm was focused inside transparent dielectrics at intensities of 10^{14} Wcm^{-2} , in conditions where over-critical plasma can be generated (diam. 200-500 nm). To reproduce the experiments, we performed simulations using the massively parallel EPOCH particle-in-cell (PIC) code.²

Figure 1(a) shows the time evolution of the E_x component, parallel to the plasma density gradient, and the trajectory of a representative electron. There are intense ambipolar fields due to the induced pressure difference between the electrons and ions (dashed lines). An ejected electron from the resonance region follows an arc trajectory in the ambipolar fields with a period of around 100 fs. During this motion, it radiates in the THz frequencies. Panels 1(b-e) show the electric fields and intensity radiated by the electron during the arc between 186-219 fs. The THz radiation is mainly polarized in x direction, similar to the measured second-harmonic in the far-field. The emission pattern agrees with the electron radiation having acceleration mainly in the x direction perpendicular to its velocity in the z direction.

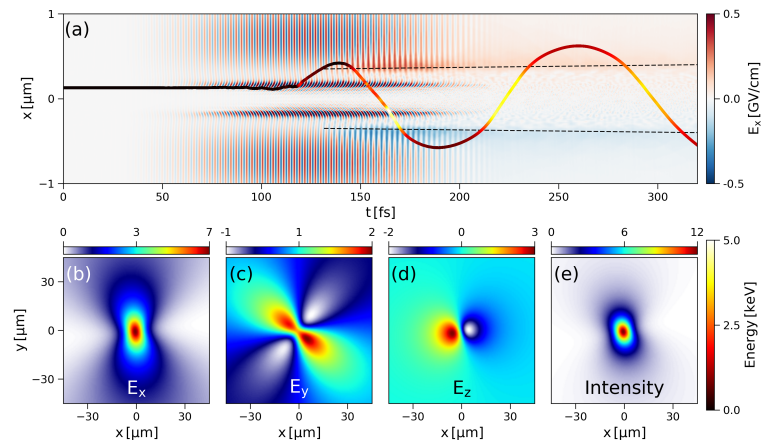


FIG. 1. Terahertz radiation from electron trapped in an bipolar electric fields: (a) E_x with over-plotted electron trajectory, (b-e) electric fields and intensity radiated by the electron, respectively.

¹ . Ardaneh, R. Meyer, M. Hassan, et al , arXiv:2109.00803 [physics.plasm-ph], (2021)

² D. Arber, K. Bennett, C. S. Brady, et al, Plasma Phys. Control Fusion. 57, 113001 (2015)

Astrophysique de "laboratoire"

Instabilités plasma induites par des faisceaux d'électrons ultra-relativistes ou des flux ultra-intenses de photons gamma

^{1,2}J. C. Faure*, ^{1,2}L. Gremillet, ³M. Lemoine & the E-305 collaboration

¹ CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

² Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

³ Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS–Sorbonne Université, 98 bis boulevard Arago, F-75014 Paris, France

*jeremy.faure@cea.fr

Les instabilités électromagnétiques résultant de l'interpénétration entre un faisceau de particules énergétiques et un plasma gouvernent la dynamique de nombre de systèmes astrophysiques ou de laboratoire. Le projet expérimental E-305 sur l'accélérateur FACET-II du SLAC [1] vise à étudier ces phénomènes au moyen d'un intense faisceau (de charge $\sim nQ$ et dimensions $\sim \mu\text{m}$) d'électrons ultra-relativistes (10 GeV) injecté dans un milieu solide ou gazeux [2,3]. Les instabilités alors excitées se répartissent en deux classes principales : électrostatique, ou quasi électrostatique, pour les modes se propageant parallèlement ou obliquement au faisceau (dénotés OTSI pour *oblique two-stream instability*) et quasi magnétique pour les modes de filamentation transverse (dénotés CFI pour *current filamentation instability*).

Dans le cadre de ce projet, nous avons simulé, à l'aide du code *particle-in-cell* (PIC) CALDER, le développement de ces instabilités et leur impact sur le faisceau dans le cas d'une cible solide d'aluminium. Nous montrons que la collisionnalité de la cible, fonction de sa température, affecte la hiérarchie des instabilités par rapport à celle observée en l'absence de collisions. En particulier, les collisions coulombiennes entre les électrons et les ions du plasma freinent la croissance des modes obliques, généralement dominants dans les régimes considérés [2,3], au profit des modes de filamentation, ceux-ci prévalant quand la densité maximale du faisceau dépasse 10^{20}cm^{-3} . Il s'agit d'un effet dynamique compte tenu du chauffage rapide des électrons du plasma au sein du faisceau, chauffage conduisant généralement à augmenter la collisionnalité du plasma. Le renversement de la hiérarchie entre OTSI et CFI survient pour un chauffage de quelques eV ou plus.

Ces résultats ont été interprétés en examinant la stabilité linéaire d'un système faisceau-plasma collisionnel. Nous avons ainsi obtenu, et résolu numériquement, la relation de dispersion associée à un faisceau ultra-relativiste et à un plasma électronique gouverné par l'équation de Vlasov-Fokker-Planck [4,5]. Nos calculs confirment l'atténuation des modes obliques et le renforcement de la filamentation en présence de collisions. Dans les conditions de l'expérience E-305, ils concluent à la prédominance de la CFI dans un plasma initialisé à une dizaine d'eV, en accord avec les simulations PIC.

[1] V. Yakimenko *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 101301 (2019).

[2] M. Lemoine, and G. Pelletier, *MNRAS* **402**, 321 (2010).

[3] A. Bret, L. Gremillet, and M. Dieckmann, *Phys. Plasmas*. **17**, 120501 (2008).

[4] V. Yu. Bychenkov, V. T. Tikhonchuk and W. Rozmus, *Phys. Plasmas* **4**, 4205 (1997).

[5] V. Yu. Bychenkov, *Plasma Phys. Rep.* **24**, 801 (1998).

Instabilités faisceau-plasma en régime ultra-relativiste à FACET-II

¹*San Miguel Claveria, P., on behalf of ¹⁻⁹E-305 collaboration
*conférencier principal

¹ LOA, ENSTA Paris, CNRS, Ecole Polytechnique, IP Paris, France, ² CEA, DAM, DIF, France, ³ Université Paris-Saclay, France, ⁴ SLAC National Accelerator Laboratory, USA, ⁵ Stanford University, USA, ⁶ University of Colorado Boulder, USA, ⁷ University of California Los Angeles, USA, ⁸ Max-Planck-Institut für Kernphysik, Germany, ⁹ Stony Brook University, USA

* pablo.san-miguel-claveria@polytechnique.edu

Les instabilités faisceau-plasma relativistes jouent un rôle crucial dans les sources astrophysiques de haute énergie, comme les sursauts gamma ou les blazars, notamment pour créer la turbulence électromagnétique responsable de l'émission synchrotron des particules accélérées dans ces sources. Ces instabilités sont aussi importantes dans certains concepts expérimentaux d'accélérateurs de particules ou de sources photoniques ultra-intenses basés sur l'interaction faisceau-plasma ou laser-plasma [1].

Afin de caractériser, pour la première fois en laboratoire, leur dynamique en régime ultra-relativiste et leur potentiel en tant que sources de rayonnement gamma, une série d'expériences (baptisé E-305) est prévue sur le nouvel accélérateur FACET-II du SLAC National Accelerator Laboratory. Les travaux rapportés ici ont été réalisés dans le cadre de ce projet.

Dans un premier temps, nous examinerons théoriquement l'évolution des instabilités en présence d'un faisceau de taille finie tel que produit par un accélérateur [2]. Un modèle décrivant la dynamique spatiotemporelle des modes obliques électrostatiques sera développé. Pour un faisceau ultra-relativiste, ce modèle révèle, en bon accord avec des simulations *particle-in-cell*, le caractère intrinsèquement spatiotemporel de l'instabilité (avec une croissance de l'avant vers l'arrière du faisceau, et un taux de croissance plus élevé à l'arrière, voir Fig. 1), infirmant ainsi les théories usuelles qui supposent une croissance purement temporelle. Une extension de notre modèle, capturant à la fois les modes électrostatique et électromagnétiques, et donc leur hiérarchie en fonction de la position et du temps, sera également présentée. Enfin, nous déterminerons les conditions propices à une croissance plus rapide des instabilités que l'auto-focalisation du faisceau due aux ondes de sillage plasma.

Dans un deuxième temps, nous présenterons les tout premiers résultats expérimentaux obtenus sur FACET-II. L'instabilité sera alors excitée dans un plasma de densité gazeuse et caractérisée par différents diagnostics. Parmi eux, un dispositif d'ombroscopie permettra de suivre l'évolution de l'instabilité le long du plasma.

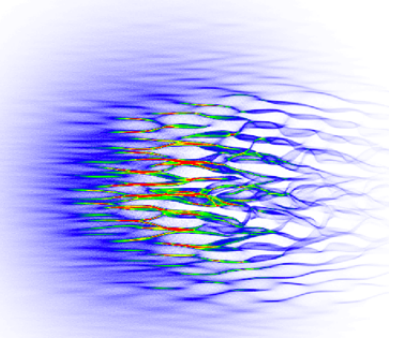


Figure 1: Filamented beam after propagation in plasma (extracted from PIC simulation)

[1] A. Benedetti, M. Tamburini, and C. H. Keitel, Nat. Photon. 12, 319 (2018).

[2] P. San Miguel Claveria *et al.*, accepted in Phys. Rev. Research, arXiv:2106.11625

Interaction plasma-surface

Gravure par plasma du titane pour la fabrication de microcomposants biomédicaux

^{1,2}*Rim Ettouri, ¹Thomas Tillocher, ¹Philippe Lefauchaux,
²Bertrand Boutaud et ¹Rémi Dussart

*conférencier principal

¹ Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés (GREMI - UMR 7344),
CNRS-Université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, 45067 Orléans, France

² MISTIC SAS, Issy-les-Moulineaux, 92130, France

* rim.ettouri@univ-orleans.fr

Le titane (Ti) est un matériau biocompatible qui est largement utilisé dans le domaine biomédical pour la cardiologie, la chirurgie, l'orthopédie, etc. Ces dernières années, les micro-systèmes électromécaniques (MEMS) ont émergé avec des applications dans les domaines biologiques et biomédicaux, comme les biocapteurs, les micro-pompes pour l'administration de médicaments. Ils sont appelés bioMEMS. Comme ces applications visent une utilisation *in-vivo* et *in-vitro*, le Ti présente un fort potentiel d'application pour ces dispositifs. Il existe différentes voies pour graver le titane : la gravure humide (en solution chimique) et la gravure par plasma. Nous nous intéressons ici au second cas, le plus approprié pour obtenir des parois verticales.

Introduction à la gravure profonde du titane

Ce projet de recherche se concentre sur l'étude de la gravure par plasma de substrats de titane massif dans le but de créer des systèmes innovants de rupture pour des applications biomédicales. On souhaite graver le titane sur des profondeurs de plusieurs centaines de micromètres (l'épaisseur du substrat étant de 300 μm). On parle dans un tel cas de figure de « gravure profonde » car la profondeur visée est bien au-delà des épaisseurs habituellement atteintes en microélectronique (de l'ordre de la centaine de nanomètres voire de quelques micromètres). L'objectif final, scientifiquement et technologiquement inédit, vise le contrôle optimal d'une part, de la gravure à fort rapport d'aspect (jusqu'à 1:10) et d'autre part, des procédés de microfabrication répétables et reproductibles.

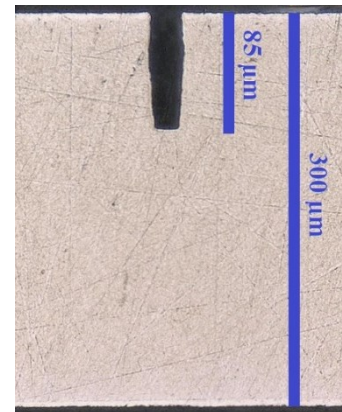


Figure : substrat de titane gravé par plasma dans un mélange de $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{Ar}$.

Dispositifs expérimentaux et techniques de caractérisation

Les gravures ont été réalisées à l'aide d'un réacteur par plasma à couplage inductif, dans des plasmas à base de fluor et d'oxygène. La compréhension de la physico-chimie du procédé passe par le diagnostic par sonde de Langmuir et par spectroscopie d'émission optique afin d'étudier les mécanismes scientifiques mis en jeu lors de la gravure. De plus, la caractérisation post-procédé par microscopies optique et électronique (MEB), couplées à la microanalyse chimique par EDX, a permis de mettre en évidence le rôle joué par l'oxygène à la fois dans la gravure et la passivation. Cela conduit finalement à la mise au point d'un nouveau procédé en chimie de $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{Ar}$ qui permet l'obtention de structures en titane avec des parois verticales et des vitesses de gravure allant jusqu'à 2 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Remerciements

Ce projet est financé par la région Centre-Val de Loire dans le cadre du projet PSPC-Régions n°1 Tech2AIM et du CERTeM 5.0 à travers le projet ProTiMe.

Plasmas chauds

1ere campagne expérimentale « Shock Ignition » en FCI sur l'installation laser LMJ-PETAL

S.D. Baton^{1*}, A. Colaitis², C. Rousseaux³, G. Boutoux³, S. Brygoo³, L. Jacquet³,
C. Reverdin³, M. Koenig¹, D. Batani², A. Casner², E. Le Bel^{2,4}, D. Raffestin²,
V. Tikhonchuk², J. Trela², L. Le-Deroff⁴, W. Theobald⁵, G. Cristoforetti⁶, L.A.
Gizzi⁶, P. Koester⁶, L. Labate⁶, K. Shigemori⁷

¹ LULI, CNRS-CEA-Ecole Polytechnique-Sorbonne Université, Palaiseau, France

² CELIA-Université de Bordeaux-CNRS-CEA, Talence, France

³ CEA, DAM, DIF, Arpajon, France

⁴ CEA, DAM, CESTA, Le Barp, France

⁵ Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, USA

⁶ INO, CNR, Pisa, Italy

⁷ Institute of Laser Engineering, University of Osaka, Japan

* sophie.baton@polytechnique.edu

L'ignition par choc est un schéma alternatif pour la fusion par confinement inertiel, dans lequel un choc sphérique violent généré par un laser à forte intensité déclenche l'ignition à la fin de la compression réalisée par des faisceaux laser à moyenne intensité. Les électrons chauds produits par les instabilités paramétriques lors de l'interaction des faisceaux laser à haute intensité avec le plasma de couronne, peuvent avoir un effet bénéfique ou préjudiciable suivant leurs énergies et le moment où ils apparaissent. Pour étudier leur impact, une campagne expérimentale a été réalisée sur l'installation LMJ-PETAL pour produire un choc fort dans des conditions plasma que l'on retrouve dans le schéma d'allumage par choc. Pour évaluer les effets des électrons chauds sur le choc, le système de lissage temporel laser SSD (Smoothing by Spectral Dispersion), qui a un effet modérateur sur les instabilités paramétriques telle que l'instabilité de diffusion Raman stimulée, principale source des électrons chauds, a été actionné ou non.

Cette campagne expérimentale s'est déroulée en deux étapes : la première en avril 2019 dédiée à la caractérisation des électrons chauds et à l'estimation du niveau des instabilités paramétriques [1], et la deuxième en mars 2020, plus centrée sur l'influence des électrons chauds sur la propagation du choc fort.

Ce travail a été supporté par l'Institut Laser & Plasma et conduit dans le cadre du consortium EUROfusion via les Enabling Research Projects ENR-IFE15.CEA-02 and ENR-IFE19.CEA-01.

[1] S.D. Baton, A. Colaitis, C. Rousseaux *et al.*, High Energy Density Physics **36** (2020) 100796.

DIP, a dispersion interferometer to measure n_e at ITER

¹*Hamdani, S., ¹Carrat, V., ²Sirinelli, A.

¹ *Bertin Technologies, France*

² *ITER Organization, France*

* slim.hamdani@bertin.fr

Dispersion interferometers are installed on several fusion reactors to measure electron density. Phase modulating the laser source allows vibrations and intensity fluctuation rejections, a crucial point for these interferometers operated in harsh environments. The Density Interferometer Polarimeter, DIP, is such a phase-modulated dispersion interferometer, specifically developed for ITER basic control. It reached its final design and is starting its mock-up and testing phase, before integration in 2024-2025.

DIP is pursuing four major developments for ITER: i) second harmonic generation for a 9.6 μm laser ii) an active beam tracking system working in radioactive environment, required for such a long propagation path, iii) reflectors facing the plasma tolerant of the harsh environment; iv) measurement drift correction during long pulses.

In tests, Bertin demonstrated that an OpGaAs crystal can perform efficient second harmonic generation of a 32W, 9.6 μm CO₂ laser for several hours. The required phase modulation is then performed with a ZnSe Photo Elastic Modulator. On the detection side, the interference signal is quadrature demodulated in real time with an FPGA, to get an output at 1kHz while correcting for environmental fluctuations.

Test are now ongoing to qualify the interferometer performance before building a full-size mock-up of the system, including beam tracking. These will be included in the paper.

The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the ITER Organization.

Full self-consistent stationary solutions of Vlasov-Maxwell equations

^{1*}Aurélien Cordonnier, ¹Xavier Leoncini, & ²Guilhem Dif-Pradalier
*conférencier principal

¹ *Aix Marseille Univ., Université de Toulon, CNRS, CPT, Marseille, France*

² *CEA, IRFM, F-13108 St. Paul-lez-Durance cedex, France*

* aurelien.cordonnier@cpt.univ-mrs.fr

In order to study plasmas at thermodynamic equilibrium in a cylindrical magnetic field limit, we start from the Hamiltonian of a test particle which can be completely integrable because of the symmetries of the problem. In this idealized framework of large aspect-ratios of the torus, the problem can be formulated as a function of a single radial variable.

Considering this as a constrained problem taking into account the invariants of motion, a particle distribution function is obtained from the maximization of the resulting entropy. This distribution can then be used to compute the source terms coming from the plasma and leading to a self-consistent problem. The exact form of this stationary Vlasov-Maxwell equations solutions end up to be solutions of a system of self-consistent non-linear differential equations arising from the differentiation of the magnetic potential in this geometry.

From there, a steep density profile can be constructed, as well as an effective potential which can reveal a separatrix that is a potential source of chaos in the system.

Our method has been derived in the simplified framework of a static magnetic geometry. In the current work, the dynamic stability of the solution is studied and in particular what happens to the individual trajectories near the separatrix. First results on these topics will be presented.

Introduction du Machine-Learning en spectroscopie des plasmas

M. Kerebel*, M. Koubiti

PIIM, UMR 7345 Aix-Marseille Université-CNRS, Marseille, France

* malo.kerebel@etu.univ-amu.fr

Les algorithmes de l'apprentissage supervisé et de l'apprentissage profond et d'une manière générale les techniques de l'Intelligence Artificielle IA sont de plus en plus introduits en physique, y compris en physique des plasmas. Cependant, en spectroscopie des plasmas, l'idée d'utiliser l'IA n'est pas très répandue, mais il existe quelques publications. À titre d'exemple, le package Sickit-learn [1], qui regroupe plusieurs algorithmes de Machine-Learning supervisé (apprentissage automatique supervisé), a été récemment utilisé pour des prédictions de paramètres plasmas des simulateurs linéaires de divertor à savoir PISCES-B et NAGDIS [2-3]. Dans cet exemple, ce sont les intensités des raies d'émission de l'hélium neutre qui ont été analysées avec un algorithme de régression linéaire de la librairie d'algorithmes Sickit-learn, le but étant de faire des prédictions de densité et température électroniques. Dans ce papier, nous discuterons l'idée d'introduire les algorithmes de l'IA pour l'étude de données correspondant à des plasmas de fusion magnétique contenant des mélanges H-D et D-T. Nous illustrerons cette idée en considérant la raie Balmer- α émise par un mélange d'isotopes de l'hydrogène dans le but de prédire les rapports isotopiques, grandeur très importante à connaître pour ITER pour des raisons évidentes de sûreté à cause des problèmes de rétention du tritium.

[1] F. Pedregosa *et al*, the Journal of machine learning research **12**, 2825 (2011)

[3] S. Kajita *et al*, AIP Advances **10**, 025225 (2020)

[3] D. Nishijima *et al*, Rev. Sci. Instrum. **92**, 023505 (2021)

La description de la physique de base des plasmas par la mécanique à N corps : ça marche !

Escande D.F.

Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR 7345, Marseille, France

dominique.escande@univ-amu.fr

Alors que ce fut considéré comme infaisable pendant presque un siècle, la description de la physique microscopique de base des plasmas par la mécanique classique à N corps est possible, et même avec des calculs très simples [1]. En particulier, un calcul élémentaire, mais rigoureux, de l'amortissement Landau est désormais accessible à des étudiants qui connaissent la relation fondamentale de la dynamique, la transformée de Fourier discrète, mais ni l'équation de Vlasov, ni les fonctions analytiques, ni la transformée de Laplace [1].

La description de la physique microscopique des plasmas par la mécanique classique apporte en particulier l'information intuitive suivante [1]:

- L'écrantage de Debye résulte des collisions.
- L'amortissement Landau est dû à un mélange de phase, correspond à la synchronisation moyenne avec l'onde des particules quasi-résonnantes, et est une relaxation vers le niveau thermique des ondes de Langmuir,
- La description vlasovienne est une limite singulière et renormalisée de celle par la mécanique classique à N corps.

Une approche N-corps a permis le premier calcul de la diffusion coulombienne décrivant correctement tous les paramètres d'impact [2,1]. Elle incorpore naturellement le calcul avec l'approximation à deux corps de cette diffusion, calcul dominant dans les manuels, alors que la diffusion se fait surtout sous l'effet simultané de toutes les particules dans la sphère de Debye. Le nouveau calcul global apporte aussi une vision intuitive de la contribution des différents paramètres d'impact.

[1] D. F. Escande, D. Bénisti, Y. Elskens, D. Zarzoso, and F. Doveil, Basic microscopic plasma physics from N-body mechanics: A tribute to Pierre-Simon de Laplace, *Rev. Mod. Plasma Phys.* 2, 9 (2018) et <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01802414v1>

[2] D.F. Escande, Y. Elskens, F. Doveil, Uniform derivation of Coulomb collisional transport thanks to Debye shielding. *J. Plasma Phys.* 81, 305810101 (2015)

Macroscopic and microscopic study of laser shocked glassy GeO₂

R. Torchio¹, S. Balugani¹, A. Cordone², F. Dorchies³, E. Guillaum⁴, J.A. Hernandez¹, C. Pepin⁵, A. Ravasio⁴, N. Sevelin-Radiguet¹, T. Vinci⁴, A. Benuzzi-Mounaix*⁴

¹ *European Synchrotron Radiation Facility, 6 Rue Jules Horowitz, Grenoble, France*

² *Politecnico di Milano, Italy*

³ *CELIA, Université de Bordeaux, CNRS, CEA, F-33400, France*

⁴ *Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, Ecole Polytechnique, CNRS, Commissariat à l'Energie Atomique, Sorbonne Université, 91128 Palaiseau, France*

⁵ *CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon Cedex, France*

* alessandra.benuzzi-mounaix@polytechnique.edu

Germanium dioxide existing in glass, rutile and quartz phases, is an important material for technology and material science as well as for geophysics and planetary science, due to its analogy with SiO₂. Thanks to their mechanical and optical properties, GeO₂ polymorphs can be applied in a number of devices from solar cells to encapsulating materials for Ge semiconductors. Its phase diagram is poorly studied, especially above Mbar range.

Here, we present an extensive study of glassy GeO₂ under laser induced dynamic compression, including equation of state and optical properties measurements up to 800 GPa. To go beyond this macroscopic characterization obtained using usual visible diagnostics, we performed also an X-ray diffraction investigation putting in evidence the recrystallization with the emergence of the stishovite structure. The experiments were conducted on LULI2000 laser facility at the Ecole Polytechnique. As perspective, we will present also an experimental campaign devoted to measure local ionic and electronic structure with XANES diagnostic. This experiment will be done at ESRF with the new laser facility HPLF.

Study of K_{α} X-ray source size based on high-intensity femtosecond laser-solid interaction

M. Gambari¹, R. Clady¹, L. Videau^{2,3}, O. Peyrusse¹, O. Uteza¹, M. Sentis¹
and A. Ferré^{1,*}

1. Aix-Marseille Université, CNRS, LP3 UMR 7341, 13288, Marseille, France

2. CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

3. Laboratoire Matière Conditions Extrêmes, CEA, Université Paris-Saclay, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

*corresponding author: amelie.ferre@univ-amu.fr

Table-top plasma X-ray sources driven by high-peak power (fs) laser sources are of high applicative interest for imaging and material science [1,2] because of their capability to provide hard energetic jitter-free point-source pulsed X-ray sources suitable for phase-contrast imaging or (time-resolved) X-ray diffraction. We thus study the characteristics (mainly here focusing on its size evolution) of a hard K_{α} Mo X-ray source ($E_{K_{\alpha}} = 17.48$ keV) produced by a high intensity femtosecond laser interacting with a solid molybdenum target for a wide range of laser intensity ($I \sim 10^{17} - 2.8 \times 10^{19}$ W/cm²) and for four values of the temporal contrast ratio ($6.7 \times 10^7 < CR < 3.3 \times 10^{10}$). The temporal contrast ratio was varied by inserting or removing saturable absorbers between the different preamplifier stages of the laser chain [3]. Results demonstrate that increasing the laser intensity leads to enlargement of the X-ray source size and this phenomenon is emphasized when the temporal contrast of the laser driving pulse is deteriorated (see Figure 1) [4]. To explain these observations, we developed dedicated experiments and hydrodynamic simulations to estimate the impact of laser absorption mechanisms and hot electron scattering inside the solid on the evolution of both the X-ray source size and the K_{α} photon number. However, while bringing light on K_{α} photon number changes, they do not explain the increase of the X-ray source size. We finally deduce that the most probable mechanism leading to the broadening of the source size is linked to the creation of surface electromagnetic fields which confine the hot electrons at the solid surface [5]. This assumption is supported by experiments made with the highest contrast ratio and in which the evolution of the size enlargement of the X-ray source is studied as a function of the laser focal spot size (Fig. 1c).

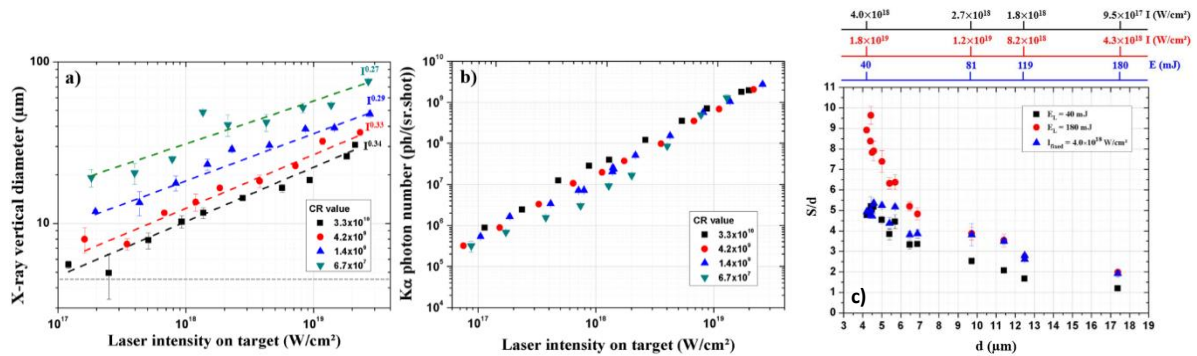


Figure 1. a) FWHM X-ray vertical diameter versus laser intensity on target. Fitting power functions in form of I^ϵ with ϵ varying with the contrast ratio value are shown by dashed lines. The grey horizontal dashed line is the FWHM vertical laser focal diameter (~ 4.6 μm). b) K_{α} photon number versus laser intensity on target. c) Ratio between the X-ray source size (S) and the laser focal spot size (d) versus laser focal spot size for two laser energies (40 mJ and 180 mJ) and for a fixed maximum laser intensity on target (4.0×10^{18} W/cm²).

References

- [1] R. Schoenlein et al., Phil. Trans. R. Soc. A **377**: 20180384 (2019).
- [2] M. Gambari et al., Sci. Rep. **10**, 6766 (2020).
- [3] Y. Azamoum et al., Sci. Rep. **8**, 4119 (2018).
- [4] M. Gambari et al., Sci. Rep. **11**, 23318 (2021).
- [5] Y.T. Li et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 165003 (2006).

Plasmas et Société

Caractérisation de jets plasma He/CO₂ et Ar/CO₂ pour le traitement des plaies

*Eloïse Mestre, Titaina Gibert, Sébastien Dozias, Hervé Rabat et Claire Douat

GREMI UMR7344 CNRS, Université d'Orléans, Orléans, France

*eloise.mestre@univ-orleans.fr

Depuis plus de dix ans, les plasmas froids à pression atmosphérique sont étudiés à des fins médicales. Il s'agit en effet d'un milieu proche de la température ambiante produisant des radiations (UV, visible, IR), un champ électrique et une grande population d'espèces réactives qui, ensemble, ont des effets intéressants pour la médecine, comme anticancéreux, stérilisant et cicatrisant.

En grandes quantités, le monoxyde de carbone (CO) est un poison mortel. Lorsqu'il est présent dans le sang, le CO remplace de dioxygène (O₂) sur l'hémoglobine et forme du carboxyhémoglobine (COHb), participant ainsi à l'asphyxie des tissus.

Cependant, des études médicales ont montré qu'à faible dose, c'est-à-dire moins de 10 % de COHb dans le sang, le CO est non nocif et possède des propriétés anti-inflammatoires, vasodilatatrices, anti-apoptotiques et antiprolifératives et pourrait donc être utilisé pour la cicatrisation des plaies.[1]

Le plasma est capable de produire du CO à partir de la dissociation du CO₂ [2]. Un traitement utilisant un jet plasma pour produire une petite quantité de CO près de la plaie permettrait de combiner les effets bénéfiques du plasma et du CO.

Cet oral portera sur la caractérisation de jets plasma d'hélium et d'argon en tant que sources de CO pour un usage biomédical. L'influence de la quantité de CO₂, de la fréquence et du débit de gaz sur les propriétés de la décharge et sur la production de CO seront étudiées.

[1] Carbone and Douat, Plasma Med, vol.8, no 1, p.93-120, 2018.

[2] Douat et al, Plasma Processes Polym, 2021, e2100069.

Dégradation de microplastiques par décharges électriques dans un liquide

^{1*}ZAMO, A., ²HAMDAN, A., ³MERBAHI, N., & ¹ROND, C.

¹ LSPM CNRS 3407, Université Sorbonne Paris Nord, France

² Université de Montréal (UdeM), Canada

³ LAPLACE, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France

* aurelie.zamo@univ-tlse3.fr

Aujourd'hui les enjeux environnementaux sont un problème sociétal majeur, avec comme exemple la pollution marine et près de 150 millions de déchets plastiques dans les océans. Depuis une dizaine d'années, les microplastiques (MPs) sont une source majeure de pollution dans les océans. Ces déchets plastiques issus de l'action de l'Homme, que l'on retrouve dans les cosmétiques, fibres textiles, peintures industrielles, granulés de plastiques ou les déchets non recyclés, sont rejetés dans les fleuves, rivières et océans. Certains de ces contaminants sont persistants et s'accumulent également dans l'eau potable, ce qui représente des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques ainsi que sur la santé humaine [1].

L'accumulation de ces MPs dans les eaux montrent donc une inefficacité des techniques de filtration et de dégradation dans les centrales de traitement des eaux usées. En effet, ces techniques de filtration ne sont pas fiables pour traiter les MPs dont la taille est inférieure à 1 mm. Actuellement les principales méthodes identifiées dans la littérature pour traiter ces petits plastiques reposent sur les procédés d'oxydation avancés, la coagulation ou les procédés biologiques [2], [3]. Mais ces techniques font état d'un certain nombre d'inconvénients tels que des temps de dégradation longs, la génération de composés organiques volatiles, des pollutions secondaires...

Les plasmas froids sont aujourd'hui largement envisagés comme solution pour la dépollution des gaz et des eaux [4]. En effet les procédés plasmas sont connus pour être une source efficace d'espèces réactives (RONS), ce qui permet la dégradation de nombreux composés organiques dans l'eau (cycles aromatiques, aliphatiques ou les colorants organiques)[5]. De plus, il a été montré que les plasmas froids possèdent des propriétés permettant la modification de surfaces des plastiques [6], [7]. Ainsi le procédé plasma-liquide semble particulièrement bien adapté pour permettre la dégradation des MPs en phase aqueuse.

Dans le cadre de ce travail nous présentons une première étude de décharges électriques en milieu liquide appliquées à la dégradation de polystyrène (< 1 mm). Tout d'abord nous avons mené une étude paramétrique sur la configuration du réacteur afin d'optimiser les interactions plasma-liquide-MPs. Nous avons réalisé une caractérisation électrique des décharges avec les MPs ainsi que des mesures chimiques liées à leur dégradation.

Références :

- [1] H. A. Leslie, *et al.*, *Environ. Int.*, vol. 163, p. 107199, mai 2022,
- [2] Q. Xu, *et al.*, *Chem. Eng. J.*, vol. 416, p. 129123, juill. 2021,
- [3] H. Du, *et al.*, *J. Hazard. Mater.*, vol. 418, p. 126377, sept. 2021,
- [4] B. Locke, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, vol. 6, p. 194-203, janv. 2012.
- [5] R. Joshi et S. Thagard, *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 33, févr. 2013,
- [6] A. Bartnik, *et al.*, *Appl. Phys. B*, vol. 96, p. 727-730, sept. 2009,
- [7] M. Gilliam, *et al.*, *Plasma Process. Polym.*, vol. 11, n° 11, p. 1037-1043, 2014,

Plasmas froids

Caractérisation multiple de la densité électronique d'un plasma

Herbelot, J., Chérigier-Kovacic, L.

Aix Marseille Univ, CNRS, PIIM, Marseille, France

laurence.kovacic@univ-amu.fr

Un plasma d'argon est créé par une décharge thermoïonique dans une enceinte à la masse. La densité électronique dépend du courant de décharge, dont la valeur est fixée par le courant de chauffage du filament ou la tension de décharge. Trois méthodes de mesure de la densité électronique sont comparées : analyse d'une caractéristique courant-tension d'une sonde de Langmuir [1], mesure de la fréquence plasma excitée par une instabilité de faisceau due aux électrons primaires de la décharge [2] et méthode de la cavité résonante par le diagnostic EFILE.

Le diagnostic EFILE (Electric Field Induced Lyman- α Emission) est basé sur l'émission de la raie Lyman- α par un faisceau sonde d'hydrogène métastable (2s) induite par un champ électrique. On mesure l'intensité émise, reliée de façon directe au carré de l'amplitude du champ électrique statique ou oscillant, dans le vide ou dans un plasma [3, 4]. La mesure d'un champ radiofréquence en fonction de la fréquence, sans plasma, montre la présence de pics centrés sur les fréquences de résonance de l'enceinte. En présence d'un plasma, la fréquence centrale de ces pics se décale. On calcule alors la densité à partir de la formule [5] :

$$n_e = \left(\frac{4\pi^2 m_e \epsilon_0}{e^2} \right)^2 \frac{2f^2 \Delta f}{f_0}$$

$\Delta f = f - f_0$ où Δf est le décalage induit par la présence du plasma de la fréquence de résonance f_0 sans plasma.

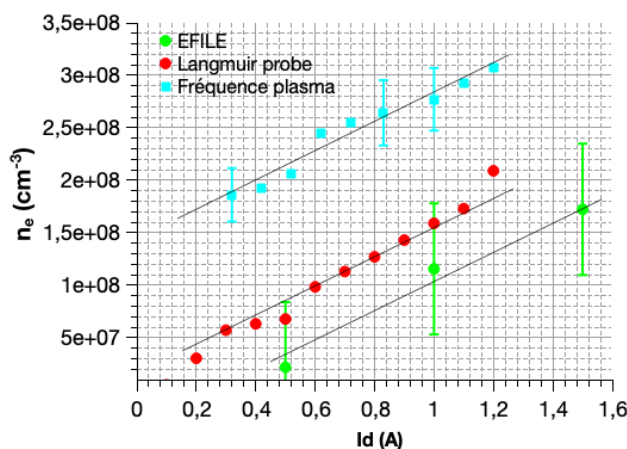


Figure 1 : densité électronique mesurée par chacune des méthodes, pour une pression $P_0 = 3.3 \cdot 10^{-4}$ mbar. On observe que les valeurs sont du même ordre de grandeur et présentent la même évolution en fonction du courant de décharge.

[1] CHEN, Francis F. Langmuir probe diagnostics. In : Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEEICOPS meeting, Jeju, Korea. 2003. p. 20-111.

[2] SHIRAKAWA, Teruyuki et SUGAI, Hideo. Plasma oscillation method for measurements of absolute electron density in plasma. Japanese journal of applied physics, 1993, vol. 32, no 11R, p. 5129.

[3] L. Chérigier-Kovacic, P. Ström, A. Lejeune and F. Doveil, Review of Scientific Instruments 86, 063504 (2015); doi: 10.1063/1.4922856

[4] L. Chérigier-Kovacic, Static and RF electric field direct measurement based on Lyman- α emission from a hydrogen probe beam ; Invited talk @ XXXIV ICPIG conference, July 14-19 2019, Sapporo, Japan.

[5] SLATER, John Clarke. Microwave electronics. Reviews of Modern Physics, 1946, vol. 18, no 4, p. 441.

Cinétique chimique-plasma de la décomposition du n-hexane dans une décharge N₂/O₂ (20%) comparée à une décharge N₂

^{1,3}Perla Trad, ¹Nicole Blin-Simiand, ¹Michel Fleury, ³Fabien Gerardin, ²Michel Heninger, ¹Pascal Jeanney, ¹Stéphane Pasquiers

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas - Orsay (France)

² Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de Chimie Physique - Orsay (France)

³ PROCEP, INRS, Vandœuvre-lès-Nancy (France)

*perla.trad@universite-paris-saclay.fr

Les plasmas non-thermiques sont connus pour leur capacité à produire des espèces réactives à température ambiante et pression atmosphérique. Cette réactivité est très utile dans le contexte de dépollution de l'air intérieur. Les espèces réactives créées dans des plasmas de gaz atmosphériques sont largement dépendantes de la composition du gaz, ex : pourcentage de O₂ et teneur en H₂O. Le but de cette étude est de comprendre les mécanismes de destruction du n-hexane (C₆H₁₄) dans un plasma filamentaire créé dans l'air ou l'azote. Le n-hexane a été choisi comme COV modèle, il est un polluant très commun qui est largement utilisé dans l'industrie en tant que solvant.

Une décharge à barrière diélectrique (DBD) est créée dans un réacteur de géométrie fil-cylindre. Ce réacteur est constitué d'un tube en alumine ($d_{\text{intérieur}} = 10$ mm, épaisseur = 2.5 mm), avec une électrode centrale qui est une tige en tungstène (diamètre = 1 mm). Celle-ci est reliée à une alimentation électrique haute-tension impulsionnelle et l'électrode de masse est un 'scotch' en cuivre enroulé autour du tube. Le volume de la décharge est égal à 3.9 cm³. Le plasma est créé en premier lieu dans un mélange N₂/O₂ (20%) et en second lieu dans l'azote. L'analyse du gaz traité est faite en sortie du réacteur à l'aide d'un spectromètre de masse (BTrap, Alyxan) à très haute résolution qui permet la détection en temps réel des molécules présentes dans l'effluent à l'état de traces.

Les espèces réactives qui initient les réactions dans un plasma dans l'air sont : l'oxygène atomique O, le radical hydroxyle OH, et les états métastables de l'azote N₂*. Le radical hydroxyle provient soit de la recombinaison de l'oxygène atomique avec un atome d'hydrogène qu'il arrache au C₆H₁₄, soit de la dissociation du H₂O présent dans le mélange. Les réactions d'initiations par attaque de OH sur le C₆H₁₄ sont les plus rapides. Les états métastables de l'azote proviennent de l'excitation du N₂ par impact électronique.

Dans l'air les sous-produits majeurs issus de la dégradation du C₆H₁₄ par réactions d'oxydation sont le : CO₂, CO, CH₂O, CH₃CHO, CH₃CH₂CHO [1]. La détection de H₂ et HCN montre qu'il existe aussi une réactivité avec les états métastables de l'azote. Il y a donc dissociation du n-hexane par collision avec N₂*. L'analyse des sous-produits devrait nous permettre de déterminer les produits issus de cette dissociation.

[1] Kuiwen Zhang et al., *An experimental and kinetic modeling study of n-hexane oxidation*, *Combustion and Flame*, Volume 162, Issue 11, 2015, Pages 4194-4207,

Design d'une antenne 'birdcage' pour la génération d'ondes Helicon dans la machine toroïdale TORPEX

*Vincent, S., Guittienne, Ph., Jacquier, R., Sepulchre, C., Baquero-Ruiz, M.
& Furno I.

EPFL, Swiss Plasma Center (SPC), CH-1015 Lausanne, Suisse

* simon.vincent@epfl.ch

Les sources helicon sont connues pour être l'un des moyens les plus efficaces de génération de plasma, et sont aujourd'hui largement utilisées, tant en laboratoire que dans l'industrie [1]. Les antennes de type 'birdcage' [2] sont une configuration particulière de source helicon, consistant en un réseau électrique résonnant permettant la génération de champs magnétiques uniformes sur de large volumes et oscillant à des fréquences de l'ordre du MHz. Initialement bien connue dans le domaine de la résonance magnétique nucléaire, cette configuration est encore peu utilisée en physique des plasmas pour la génération d'ondes helicon, malgré des résultats prometteurs [3, 4]. Dans cette présentation, nous montrons les premiers développements d'une antenne birdcage sur TORPEX.

TORPEX est une machine toroïdale de grand rayon 1 m et de petit rayon 20 cm, permettant l'étude de plasmas magnétisés en turbulence sous différentes configurations magnétiques. Un plasma d'Hydrogène à une pression de quelques 0.01-0.1 mTorr et d'une densité $\sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$ est généré par chauffage cyclotronique électronique à 2.45 GHz et confiné par un champ magnétique allant jusqu'à $\sim 80 \text{ mT}$. Les derniers développements expérimentaux sur TORPEX ont permis l'étude du transport d'ions rapides dans un plasma turbulent. Validé sur des machines toroïdales de moindres dimensions [5, 6], le montage d'une source helicon sur TORPEX répond donc à plusieurs objectifs :

- Faisabilité d'utilisation d'une source helicon en géométrie toroïdale de grande taille ($\sim \text{m}^3$).
- Génération d'un plasma toroïdal de densité élevée.
- Étude de la stabilité et possibilité du contrôle de modes helicon.
- Étude de l'impact d'ondes E&M sur le transport d'ions rapides.

Le design de l'antenne est présenté, ainsi qu'une série de simulations numériques motivant les choix de ses composants électroniques.

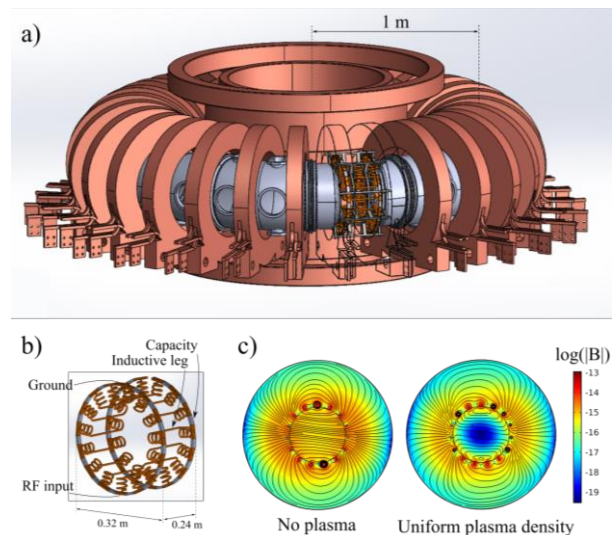


Figure 1 : a) Dessin CAD de TORPEX, avec le montage de l'antenne birdcage. b) Dessin de l'antenne. c) Simulation COMSOL du champ magnétique à la résonance, sans plasma (gauche) avec un plasma de densité uniforme $5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ (droite).

- [1] F. F. Chen, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 014001 (2015)
 [2] Ph. Guittienne *et al.*, *Journal of Applied Physics* **98**, 083304 (2005)
 [3] I. Furno *et al.*, *EPJ Web of Conferences* **157**, 03014 (2017)
 [4] F. Romano *et al.*, *Acta Astronautica* **176**, 476-483 (2020)
 [5] Y. Sakawa *et al.*, *Phys. Plasmas* **11**, 311 (2004)
 [6] M. Kr. Paul *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 062511 (2005)

Mesure par LIF de la température de l'Argon neutre dans une colonne de plasma magnétisé

^{1*}N. Dubuit, ¹A. Escarguel

¹Aix-Marseille Univ., CNRS, PIIM UMR 7345, Marseille, France

* nicolas.dubuit@univ-amu.fr

L'expérience Mistral est une décharge cylindrique de plasma magnétisé, à basse température, qui a l'avantage de pouvoir opérer en régime permanent. Elle est dédiée à l'étude des instabilités plasma et au développement de nouveaux diagnostics. Dans la dernière décennie, plusieurs études de physique des plasmas en rotation ont été effectuées sur cette machine au moyen de fluorescence induite par laser (LIF) sur l'argon ionisé. La LIF permet de mesurer directement la fonction de distribution d'une espèce partiellement ionisée ou neutre.

Le travail présent concerne l'analyse de données de LIF sur l'argon neutre dans la décharge Mistral¹. Une campagne expérimentale a été dédiée à la mesure des profils radiaux de température T_n . En effet, une variation de T_n en fonction de la pression a été observée, ce qui est un résultat inattendu à basse pression. Des flux de particules sortants ont également été mesurés.

Des simulations cinétiques et une approche théorique permettent d'interpréter correctement ces résultats. La LIF mesure uniquement la fonction de distribution des atomes excités dans un état métastable². Or, à basse pression, ces atomes métastables ont un comportement non local, car ils peuvent parcourir une distance significative entre leur excitation et leur détection par LIF. Un modèle analytique 1D cinétique permet de quantifier cet effet, et reproduit correctement la dépendance en pression et les flux de particules observés.

Bibliographie

1. Th. Pierre, A. Escarguel, D. Guyomarc'h, R. Barni, C. Riccardi, « *Radial convection of plasma structures in a turbulent rotating magnetized plasma column* », Phys. Rev. Lett., 92, 065004 (2004).
2. N. Claire, A. Escarguel, C. Rebont, F. Doveil, « *Ion velocity analysis of rotating structures in a magnetic linear plasma device* », Phys. Plasma 25, 061203 (2018)

Modélisation de l'absorption d'une impulsion laser nanoseconde par un plasma d'aluminium généré par une première impulsion

*Bultel, A., Favre, A. & Morel, V.

CORIA UMR6614, Université de Rouen – Normandie, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France

* arnaud.bultel@coria.fr

Les plasmas induits par laser sont faciles à produire, que ce soit dans des gaz ou sur des surfaces solides. Leur analyse spectroscopique est exploitée pour déduire la composition multi-élémentaire de la matière irradiée dans le cadre de la spectroscopie de plasmas induits par laser (LIBS). Cette technique fonctionne bien sur des échantillons métalliques si la fraction molaire des éléments est supérieure à 10^{-4} . Certains échantillons se caractérisent par la présence d'éléments légers (isotopes de l'hydrogène, C, N, O...) dont la détection est difficile lorsque la fraction molaire associée est inférieure à 10^{-2} . C'est le cas des tuiles métalliques (Be et W) utilisées comme système de protection thermique dans un tokamak. Pour surmonter cette difficulté, le plasma induit par laser doit être plus chaud. L'utilisation d'une deuxième impulsion laser pour augmenter la température après son absorption par le plasma est particulièrement pertinente pour obtenir des niveaux de température plus élevés [1]. La présente communication est consacrée à la modélisation de l'absorption de la deuxième impulsion laser dans une situation de référence.

Au lieu de travailler avec Be ou W, nous avons choisi un métal test pour permettre une validation expérimentale aisée du modèle. Les plasmas induits par laser sur Al étant souvent étudiés, nous avons considéré ce métal pour son élaboration. Le plasma est produit par une première impulsion laser au temps $-\Delta t_{1-2}$. Ce plasma se détend dans l'air ambiant à pression atmosphérique. Cette expansion dure environ $\tau_e = 100$ ns. A l'instant 0, la deuxième impulsion (longueur d'onde $\lambda = 532$ nm, durée $\tau_L = 5.1$ ns, facteur de qualité $M^2 = 2$) atteint le plasma. La propagation de cette impulsion se fait selon l'axe optique ($z'z$) parallèle à l'échantillon pour éviter toute ablation supplémentaire de la cible (cf. figure 1).

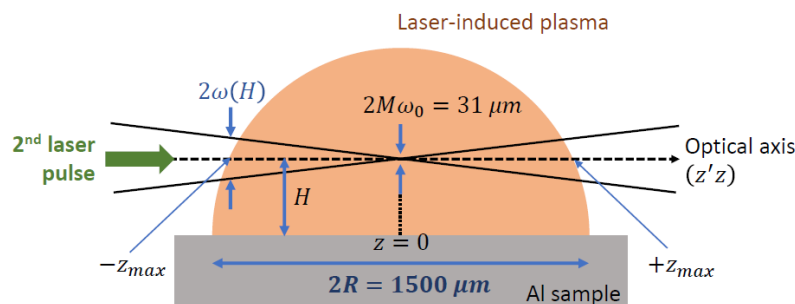


Figure 1 : absorption d'une seconde impulsion laser par un plasma d'aluminium induit par une première impulsion.

Le modèle prend en compte les conditions de focalisation, les gradients de densité électronique n_e internes au plasma [2], les phénomènes radiatifs (ionisation multiphotonique [3], Bremsstrahlung inverse) et collisionnels élémentaires faisant intervenir Al, Al⁺ et Al²⁺. La résolution des équations du modèle mène à la

détermination de l'évolution spatio-temporelle du champ de densité des espèces (électrons, ions et neutres) et de la température électronique T_e du plasma. La comparaison avec nos propres résultats expérimentaux met en évidence l'influence déterminante du profil initial de n_e .

Références

- [1] A. Bultel, V. Morel, A. Favre, G. Godard *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **146** (2019) 1971-1974
- [2] T. Sakka, T. Nakajima and H. Ogata, *J. Appl. Phys.*, **92** (2002) 2296-2303
- [3] C. O. Park, H. W. Lee, T. D. Lee and J. K. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 368-370
- [4] A. Favre, V. Morel, A. Bultel, G. Godard *et al.*, ESCAMPIG 25 Paris, 2022

Réacteurs microplasmas intégrés sur dispositifs en silicium

¹*Dussart, R., ¹Kouadou, E., ¹Stolz, A., ¹Iseni, S., ¹Aubry, O., ¹Lefaucheux, P.

*conférencier principal

¹ GREMI, Orléans, France pays

² Laboratoire, pays

* remi.dussart@univ-orleans.fr

Des réacteurs plasma à l'échelle micrométrique sont élaborés sur plaquettes de silicium [1,2]. Une fois le dispositif réalisé, un microplasma est créé en appliquant une haute tension à ses bornes. La microdécharge fonctionne à une pression entre 100 et 750 Torr dans différents gaz tels que l'hélium, l'argon ou l'azote en régime de courant continu. Au laboratoire GREMI, ces dispositifs sont fabriqués par des technologies de salle blanche habituellement utilisées pour la conception des composants de microélectronique. Ils sont ensuite caractérisés par des diagnostics électrique et optique (spectroscopie, caméra rapide).

Le schéma de principe d'un microréacteur à plasma est représenté en figure 1. Une résistance de ballast est insérée pour limiter le courant de décharge. La figure 2 montre un microplasma fonctionnant dans l'argon à une pression de l'ordre de 350 Torr. Bien que fonctionnant à une pression assez élevée, le plasma reste en régime hors équilibre et le plasma reste « froid ». C'est le rapport surface/volume très élevé par rapport aux plasmas à l'échelle macroscopique qui permet d'éviter de basculer en régime d'équilibre thermodynamique local.

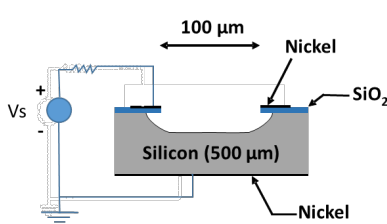


Fig. 1 : Schéma du microdispositif

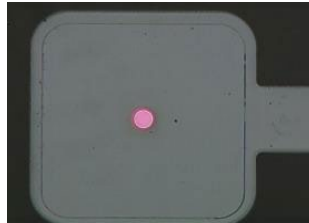


Fig. 2 : Microp en fonctionnement dans l'argon

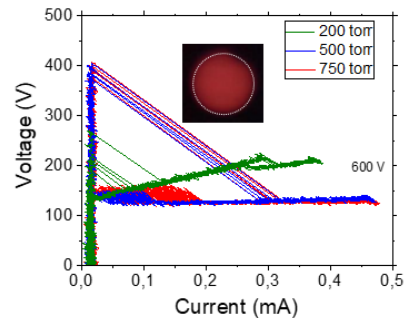


Fig. 3 : Exemple de caractéristiques V(I) d'un microplasma dans l'hélium à 3 pressions

La figure 3 montre plusieurs caractéristiques tension – courant obtenues dans de l'hélium à 3 pressions différentes avec un zoom du microplasma à 750 Torr. A 200 Torr, la tension de claquage est d'environ 270 V. On observe ensuite une augmentation de la tension de décharge en fonction du courant (régime anormal). A 500 et 750 Torr, la tension de claquage est de l'ordre de 400V. La tension reste constante en fonction du courant. A faible courant, un régime d'instabilités apparait (régime auto-impulsionnel). Les dispositifs peuvent se présenter sous forme de matrices ou en monotrou comme sur la figure 2. Des dispositifs débouchant ont également été mis au point et testés. Leurs caractéristiques seront comparées aux dispositifs non-débouchant.

[1] V. Felix *et al* Origin of microplasma instabilities during DC operation of silicon based microhollow cathode devices *Plasma Sources Sci. Technol.* 25 025021 (2016)

[2] Michaud, R. *et al.* Direct current microhollow cathode discharges on silicon devices operating in argon and helium. *Plasma Sources Sci. Technol.* 27, 025005 (2018)

Plasmas naturels

Hélicité magnétique et éruptivité des régions actives solaires

¹*PARIAT, E.

¹ *Sorbonne Université, Ecole polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Université Paris Saclay, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), Paris, France*

* etienne.pariat@lpp.polytechnique.fr

L'hélicité magnétique occupe une place paradoxale en physique des plasmas : bien qu'étant un des très rares invariants de la magnétohydrodynamique idéale, sa mesure correcte, que ce soit dans des expériences de laboratoires, à partir d'observations, voir même dans des domaines numériques reste complexe. L'hélicité magnétique est une quantité étroitement associée avec le niveau d'enlacement des lignes de champ magnétique dans un plasma. Les récents développements en théorie de sa mesure permettent aujourd'hui d'ouvrir de nouveaux axes d'études des propriétés de l'hélicité magnétique. Ils révèlent que l'hélicité magnétique pourrait être un élément clef de la compréhension d'un problème central de physique solaire : le déclenchement des éruptions solaires.

Dans diverses simulations numériques, une quantité dérivée de l'hélicité, l'indice d'éruptivité hélicitaire, apparaît être étroitement lié avec l'éruptivité des systèmes magnétiques dans différents modèles numériques d'événements actifs solaires. D'un point de vue observationnel, des résultats préliminaires montrent un lien étroit entre l'indice d'éruptivité hélicitaire et l'activité présente au sein de différentes régions actives.

Turbulence, transport, instabilités

Modélisation des instabilités plasma par PIC-MCC haute résolution : piégeage et libération d'électrons et d'ions négatifs par effet de marée électrostatique

¹*Schiesko L., ¹Revel A., ¹Alharbi A. S., Minea T. & ²Carbone E.

*conférencier principal

¹ *LPGP, UMR 8578 CNRS, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France*

² *Institut National de la Recherche Scientifique, centre Énergie Matériaux Télécommunications, 1650 blvd Lionel Boulet, J3X 1P7 Varennes, QC, Canada*

* loic.schiesko@universite-pris-saclay.fr

La modélisation particulière couplée aux collisions Monte-Carlo (PIC-MCC) est communément utilisée pour simuler le transport complexe du plasma en particulier lorsque des instabilités de type \mathbf{ExB} , faisceau-faisceau, acoustique ionique... sont présentes. Une prescription pour minimiser le temps d'exécution qui peut être très long surtout en 2D et 3D classique consiste à maximiser la taille de maille Δx et du pas de temps Δt en respectant les 'critères PIC' à savoir $\Delta t < \min(0.2 w_p^{-1}, \Delta x/v_{\max})$ et $\Delta x \leq \lambda_d$ avec w_p la fréquence plasma, v_{\max} et λ_d la vitesse de la macro-particule la plus rapide et longueur de Debye respectivement. Le respect de ces critères est suffisant pour modéliser des décharges quiescentes.

Prenant à titre d'exemple l'instabilité acoustique ionique dans le cadre d'un plasma constitué de H^+ , H^- et e , nous montrerons qu'un maillage la grille de simulation au moyen projections d'ordre supérieur (B-spline d'ordre 5 et $\Delta x = \lambda_d/20$) permet de modéliser des aspects critiques au niveau du transport des ions et plus particulièrement des électrons. Tandis que la figure 1b) illustre la nature convective bien connue de cette instabilité pour les ions positifs, la figure 1a) montre que l'instabilité donne lieu à des modulations de potentiel qui piègent et transportent les électrons de basse énergie ainsi que les ions négatifs, lorsqu'ils sont présents, depuis la source jusqu'à voisinage de la paroi située en 0. En lisière de gaine, les électrons et ions négatifs piégés sont libérés sous forme de faisceau monochromatique par effet de marée électrostatique comme montré sur les figures 1c) et d). Les simulations sont réalisées en tenant compte des collisions de Coulomb, collisions élastiques et inélastiques des électrons et ions avec les neutres et échange de charge pour tous les ions. La méthode numérique et les résultats sur le transport seront présentés.

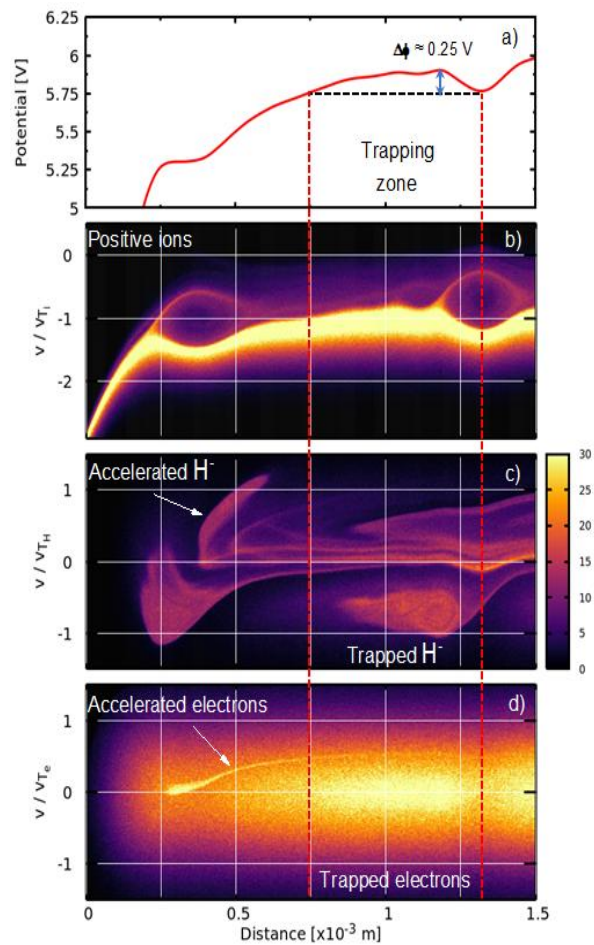


Figure 1: a) variation du potentiel, b), c) et d) espaces des phases normalisés à la vitesse thermique en fonction de la distance.

Shearless transport barriers in magnetised plasma model

Osorio^{1,2*}, L.A., Roberto³, M., Caldas¹, I.L., Viana⁴, R.L., & Elskens², Y.
* conférencier principal

¹ Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP 05315-970, Brazil

² Aix-Marseille Université, CNRS, UMR 7345 PIIM, France

³ Departamento de Física, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos,
SP 1228-900, Brazil

⁴ Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR 81531-990, Brazil
* laosorio1@gmail.com

Barriers have been identified in magnetically confined plasmas reducing the particle transport and improving the confinement. One of them, the primary shearless barriers are associated to extrema of non-monotonic plasma profiles. We identify shearless barriers in a model described by a map that allows the integration of charged particles in drift waves for a long time scale. Thus, we show that the existence of these robust barriers depends on the fluctuation amplitude and on the electric shear.

Besides the mentioned primary barriers, we also observed secondary shearless barriers created and destroyed by a sequence of bifurcations as the main control parameters, the fluctuation amplitude and electric shear, are varied. Furthermore, in these bifurcations, double and triple secondary shearless are also identified. Finally, we find control parameter intervals for which the barriers onset and breakup are recurrent.

[1] F.A. Marcus *et al.*, **Phys. Plasmas** **26** (2019) 022302 (7 pp.).

[2] L.A. Osorio *et al.*, **Phys. Plasmas** **28** (2021) 082305 (10 pp.).

Spectroscopie Stark en présence d'ondes de Langmuir dans un plasma hors d'équilibre

^{1,2}Hannachi, I., ^{1,3}Meireni M., ^{1*}Stamm, R., ¹Rosato, J. & ¹Marandet Y.

¹ Aix Marseille Université, CNRS, PIIM, 13397 Marseille, France

² Université Batna 1, PRIMALAB, Batna, Algérie

³ Republic of Indonesia Defense University, Kawasan Indonesia Peace and Security Center, Sentul, Bogor 16810, West Java, Indonesia

* roland.stamm@univ-amu.fr

Le comportement collectif d'un plasma est favorisé par la longue portée des champs électriques et magnétiques, et est bien connu pour être capable d'exciter des ondes avec un champ électrique oscillant. Par exemple, les ondes de Langmuir sont omniprésentes dans de nombreux types de plasmas de laboratoire, de fusion et d'astrophysique. En utilisant un théorème d'équipartition classique pour un plasma en équilibre, on attribue la moitié de l'énergie de l'onde au champ oscillant, et l'autre moitié en énergie cinétique, et on peut estimer alors que le module du champ électrique de l'onde est un ordre de grandeur plus petit que le microchamp moyen du plasma, par exemple pour un plasma avec une température $T = 1$ eV, et une densité $N = 10^{21} \text{ m}^{-3}$. Dans un plasma non thermique, les ondes peuvent être amplifiées par une instabilité, ce qui permet au module du champ électrique oscillant d'atteindre des valeurs plus grandes que le microchamp moyen du plasma.

Nous étudions ici la signature spectroscopique d'un champ oscillant $\vec{E}_L = \vec{E}_w \cos(\omega_p t + \varphi)$, où $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / m \epsilon_0}$ est la fréquence plasma électronique, avec e et m la charge et la masse de l'électron, et ϵ_0 la permittivité du vide. Nous calculons les premières raies de Lyman et de Balmer de l'hydrogène pour des densités comprises entre 10^{19} m^{-3} et 10^{23} m^{-3} , et une température de 10^4 K, conditions pour lesquelles la dynamique ionique affecte la partie centrale des raies spectrales. En traitant la contribution des électrons avec un opérateur de collision constant, nous calculons l'effet simultané de la dynamique ionique et d'un champ électrique oscillant en utilisant une simulation numérique du mouvement des ions, couplée à une intégration numérique de l'équation de Schrödinger.

Pour des valeurs croissantes de E_w , nos calculs montrent avec précision comment les deux champs dynamiques transfèrent l'intensité de la partie centrale de l'ion vers un nombre croissant de satellites à des multiples de la fréquence de plasma.

Transport chaotique anormal d'électrons dans les champs induits par l'instabilité de dérive en champs croisés

Mandal^{1,2}, D., Elskens^{2*}, Y., Lemoine³, N., Doveil², F., & Leoncini⁴, X.

*conférencier principal

¹ CEFIPRA, Inde

² Aix-Marseille Université, CNRS, UMR 7345 PIIM, France

² Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS – Université de Lorraine, France

² Aix-Marseille Université, Université de Toulon, CNRS, UMR 7332 CPT, France

* yves.elskens@univ-amu.fr

De nombreux dispositifs à plasma impliquent des champs électrique et magnétique stationnaires perpendiculaires. Dans les propulseurs à effet Hall, les électrons sont magnétisés tandis que les ions ne le sont pratiquement pas, et l'instabilité de dérive électronique ExB excite des ondes électrostatiques de basse fréquence.

Dans le cadre d'un modèle à petit nombre de degrés de liberté, nous montrons que la dynamique des électrons est chaotique et engendre des toiles stochastiques dans lesquelles le transport est sous-diffusif. Les ondes électrostatiques chauffent les électrons dans la direction perpendiculaire au champ magnétique ($T_{\perp} \sim 4 T_{\parallel}$) et renforcent le transport des électrons dans l'axe du propulseur. Nous montrons que l'interaction ondes-particules apporte aux électrons une vitesse axiale moyenne de l'ordre des valeurs observées expérimentalement.

[1] D. Mandal *et al.*, **Phys. Plasmas** **27** (2020) 032301 (8 pp.)

[2] D. Mandal *et al.*, **Chaos, Solitons and Fractals** **145** (2021) 110810 (13 pp.).