

SFP Plasmas 2024

17^e congrès
de la Division Plasmas
de la SFP

RECUEIL des RÉSUMÉS



14-16 mai 2024
Rouen
France





17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Recueil des Résumés

Le congrès de la division Plasmas de la SFP (Société Française de Physique) est un congrès national ayant lieu tous les deux ans. La 17^{ème} édition se tiendra du

14 au 16 mai 2024 à Rouen

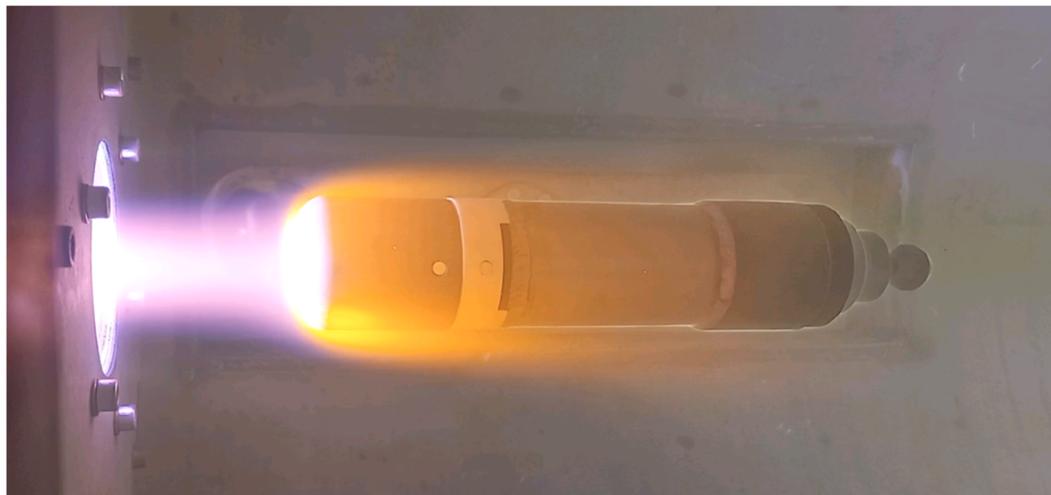
Lors des dernières éditions, ce congrès a regroupé environ une centaine de participants, étudiants, académiques et industriels.

L'objectif principal de cette rencontre est de rassembler chercheur.euse.s, enseignant.e.s-chercheur.euse.s, post-doctorant.e.s, étudiant.e.s, ingénieur.e.s et technicien.ne.s, dont les activités concernent la recherche dans le domaine de la physique des plasmas.

Les thèmes abordés, fortement pluridisciplinaires, s'inscriront dans les trois grandes familles de plasmas qui recouvrent l'ensemble de la communauté :

- les plasmas froids,
- les plasmas industriels et
- les plasmas chauds

ainsi que dans les thèmes transverses, comme : l'interaction plasma-surface ; l'astrophysique de laboratoire ; la turbulence, les instabilités et le transport ; la physico-chimie ; l'interaction laser-plasma ; l'accélération de particules par plasmas ; plasmas et société...





17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Des conférences invitées et orales, ainsi que des présentations par affiche viseront le double objectif :

- de faire découvrir les avancées récentes de la thématique et
- de proposer un état de l'art pour ces différents domaines.

Pour cette dix-septième édition, nous envisageons de continuer à mettre l'accent sur l'invitation de jeunes chercheur.euse.s pour les conférences orales, et de permettre aux doctorant.e.s de largement contribuer à cette manifestation. La remise des prix René Pellat de ces dernières années sera, également, un moment fort de ce congrès. Ce prix décerné chaque année par la SFP récompense un travail de thèse exceptionnel en physique des plasmas, sur le plan fondamental ou applicatif, et constitue un soutien actif à l'excellence scientifique.

En point d'orgue de ce congrès, une visite du GANIL à Caen sera proposée.



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Comité scientifique

- Alessandra Benuzzi-Mounaix, LULI, Ecole Polytechnique, Palaiseau
- Annette Calisti, PIIM, Marseille
- Danièle Del Sarto, IJL, Nancy
- Laurent Garrigues, LAPLACE, Toulouse
- Titaina Gibert, GREMI, Orléans
- Laurent Gremillet, CEA/DAM, Bruyères-le-Châtel
- Christian Grisolia, CEA/IRFM, Marseille
- Emmanuel d’Humières, CELIA, Univ. Bordeaux
- Nicolas Jidenko, LPGP, Orsay
- Dimitra Koutroumpa, LATMOS, IPSL
- Yannick Marandet, PIIM, Marseille
- Grégory Marcos, IJL, Nancy
- Etienne Pariat, LESIA, Meudon
- Joao Santos Sousa, LPGP, Orsay
- Sedina Tsikata, ICARE, Orléans
- Laure Vermare, LPP, Palaiseau

Comité d'organisation

- Abdenacer BENYAGOURB (abdenacer.benyagoub@ganil.fr)
- Pascal BOUBERT (pascal.boubert@coria.fr)
- Adrien BRAULT (adrien.brault@coria.fr)
- Arnaud BULTEL (arnaud.bultel@coria.fr)
- Aurélien FAVRE (aurelien.favre@coria.fr)
- Léo GOSSE (leo.gosse@coria.fr)
- Morgan LESAGE (morgan.lesage@coria.fr)
- Vincent MOREL (vincent.morel@coria.fr)
- Ioan SCHNEIDER (ioan.schneider@univ-lehavre.fr)

Organisateur : Christophe LETAILLEUR (christophe.letailleur@coria.fr)



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Ce congrès n'aurait pu se réaliser sans le soutien de :

- L'Université de Rouen Normandie
- La Métropole Rouen Normandie
- La Région Normandie
- Le LabEx EMC3
- Le GDR EMILI
- Le CNRS
- L'IEPE
- L'INSA Rouen Normandie
- L'UFR Sciences et Techniques de l'Université de Rouen Normandie
- L'UFR Droit, Sciences Economiques et Gestion de l'Université de Rouen Normandie

Organisé par :

- Le CORIA – UMR 6614
- La SFP



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

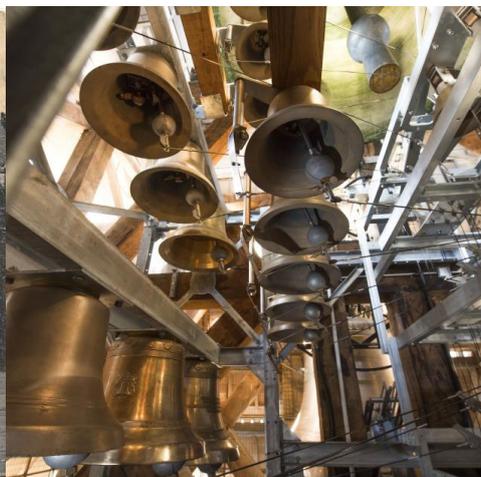
14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

PROGRAMME

Lundi 13 mai 2024

- 17:00 - 22:00 Accueil - Enregistrement - Cave Erisay 33 rue aux Ours, Rouen
- 18:00 - 19:30 Visite guidée - Visite pédestre guidée de Rouen Historique
- 19:30 - 20:00 Concert de carillon
- Annie Chevrier vous fera entendre le carillon de la cathédrale de Rouen
- 19:30 - 21:30 Cocktail dinatoire - Afin d'étancher votre soif et de remplir vos estomacs... Cave Erisay, 33 rue aux Ours.





17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Mardi 14 mai 2024

08:00 - 08:45	Accueil - Enregistrement
08:45 - 09:00	Introduction - Mot de bienvenue
09:00 - 09:30	La fusion thermonucléaire et ses controverses - Christian GRISOLIA - IRFM CEA & SYNGENIA SA (Non fourni)
09:30 - 10:00	Nucléation et dynamique de particule dans les plasmas - Armelle MICHAU - LSPM
10:00 - 10:30	Reconnexion magnétique - Camille GRANIER - Observatoire de la Côte d'Azur (Non fourni)
10:30 - 11:00	Pause café
11:00 - 11:30	Observations d'ondes de Whistler par les missions Solar Orbiter et Parker Solar Probe - Matthieu KRETZSCHMAR - LPC2E
11:30 - 12:00	Spectroscopie et imagerie de l'atmosphère solaire par Solar Orbiter - Susanna PARENTI - IAS
12:00 - 12:15	Présentations Flash Posters
12:15 - 13:30	Déjeuner
13:30 - 14:00	Cinétique des magnétosphères de trous noirs - Benjamin CRINQUAND - IRAP
14:00 - 14:30	Photons de haute énergie pour les études de QED par laser ultra-intense - Livia LANCIÀ - LULI (Non fourni)
14:30 - 15:00	Interactions faisceau de particules-plasma - Pablo SAN MIGUEL CLAVERIA - prix Pellat 2022 - LOA (Non fourni)
15:00 - 15:30	Caractérisation par XANES des plasmas denses hors équilibre - Ludovic LECHERBOURG - CEA/DAM (Non fourni)
15:30 - 16:15	Début Session Posters
16:15 - 16:45	Pause café
16:45 - 18:00	Fin Session Posters
18:00 - 19:00	Conférence sur les accélérateurs et le GANIL - Jean-Charles THOMAS - GANIL

Nucléation et dynamique de particule dans les plasmas

Armelle Michau*¹ and Khaled Hassouni²

¹Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux – Institut Galilée, Université Sorbonne Paris Cité, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Sorbonne Paris nord – France

²Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux – Institut Galilée, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR3407, Université Sorbonne Paris nord – Institut Galilée, Université Paris 13, 99 avenue Jean-baptiste Clément, F-93430 Villetaneuse, France

Résumé

Dans cette présentation, nous discuterons des voies de formation de particules dans différentes conditions de plasmas et illustrerons par différents exemples les effets de couplage entre dynamique de la décharge, croissance moléculaire et dynamique d'aérosol des poussières en croissance.

*Intervenant

Observations d'ondes de Whistler par les missions Solar Orbiter et Parker Solar Probe

Matthieu Kretzschmar^{*1}, Lucas Colombari², Volodya Krasnoselskikh³, Thomas Chust⁴,
and Milan Maksimovic⁵

¹Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace – Institut national des sciences de l'Univers, Université d'Orléans, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7328, Institut national des sciences de l'Univers, Institut national des sciences de l'Univers – France

²SSL, University of Berkeley – États-Unis

³LPC2E – Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS – France

⁴LPP – Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS – France

⁵Observatoire de Paris – Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS – France

Résumé

Les missions spatiales Solar Orbiter et Parker Solar Probe ont exploré le vent solaire au plus proche du Soleil. Grâce à leurs instrumentations pour la mesure des ondes et des particules, elles ont notamment permis des avancées importantes sur la microphysique du vent solaire. Ici, nous présentons les résultats de la détection et de l'analyse des ondes électromagnétiques entre 3 Hz et 20 kHz. La plupart des ondes rencontrées sont des ondes Whistler, quasi alignées avec le champ magnétique ambiant, et se propageant du Soleil vers l'observateur. L'activité d'onde augmente entre 1 AU et 0,5 AU, puis diminue ensuite. Plus proche du Soleil, il y a plus d'ondes se propageant vers l'étoile. Ces mesures ont été utilisées pour calculer les coefficients de diffusion en angle d'attaque des électrons suprathermiques du vent solaire. L'effet intégré des ondes Whistler sur ces électrons permet d'expliquer les évolutions relatives de deux populations électroniques suprathermiques, le faisceau, qui est aligné avec le champ magnétique, et le halo qui est isotrope.

*Intervenant

Spectroscopie et imagerie de l'atmosphère solaire par Solar Orbiter

Susanna Parenti*¹

¹Institut d' Astrophysique Spatiale – CNRS, Université Paris Sud, Université Paris Saclay – France

Résumé

Solar Orbiter lancé en 2020, est la dernière mission solaire de l'ESA. Une de ses particularités est de s'approcher du Soleil jusqu'à 0.29 UA, ce qui permet d'observer l'étoile avec une résolution spatiale j'aimais atteinte. La charge utile inclut, entre autres, des imageurs EUV, un spectromètre UV et un coronographe pour l'observation des couches extérieures du Soleil.

Depuis le début des opérations scientifiques en 2022, ces instruments ont produit des résultats scientifiques remarquables. Ils offrent la possibilité de diagnostiquer le plasma hautement dynamique à des échelles très petites jamais observées auparavant, d'observer et d'étudier les éruptions solaires par des méthodes de stéréoscopie, grâce à des observations multi-plateformes, ou encore d'étudier l'extension et la propagation vent solaire dans la haute atmosphère.

Je fournirai des exemples de ces résultats, accompagnés d'une introduction aux possibilités des diagnostics des plasmas par de tels instruments.

*Intervenant

Cinétique des magnétosphères de trous noirs

Benjamin Crinquand*¹

¹Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) – Université Paul Sabatier-Toulouse
III - UPS – France

Résumé

Des jets de plasma relativistes aux sursauts gamma, de nombreux phénomènes parmi les plus énergétiques de l'univers sont expliqués par la présence d'un trou noir. Leur environnement proche peut maintenant être résolu par les télescopes radio et infra-rouge, levant le voile sur certains aspects de leur activité. Afin d'expliquer ces phénomènes, qui indiquent une dissipation d'énergie rapide et efficace dans le plasma accréant, il est nécessaire de modéliser la physique cinétique de ces plasmas sans collisions et magnétisés. Je présenterai des résultats récemment obtenus dans la modélisation des magnétosphères de trous noirs au moyen de simulations cinétiques incluant physique non-idéale des plasmas cinétiques, radiation, et relativité générale. Je montrerai également comment faire le lien entre ces simulations et des quantités observables, montrant l'impact de la physique des plasmas sur l'interprétation des observations astrophysiques.

*Intervenant



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

SESSION POSTERS

Contrôle Électrique de l'instabilité de Rayleigh-Rayleigh

Hadi Abou Daher^{*1}, Marie-Charlotte Renoult^{†1}, and Mostafa Safdari Shadloo²

¹Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (CORIA) – INSA Rouen Normandie, Univ Rouen Normandie, CNRS, Normandie Univ, CORIA UMR 6614, F-76000 Rouen – Site Universitaire du Madrillet, BP 12, 76801 St Etienne du Rouvray Cedex, France

²Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (CORIA) – INSA Rouen Normandie, Univ Rouen Normandie, CNRS, Normandie Univ, CORIA UMR 6614, F-76000 Rouen, Institut Universitaire de France, Rue Descartes, F-75231 Paris, France – Site Universitaire du Madrillet, BP 12, 76801 St Etienne du Rouvray Cedex, France

Résumé

L'instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT) se produit lorsqu'un fluide dense se situe au-dessus d'un fluide moins dense dans un champ de pesanteur. Elle se manifeste à l'interface séparant les fluides et se caractérise par la formation de digitations de formes remarquables, la forme en champignon étant celle la plus répandue. On peut l'observer dans divers domaines, notamment en physique nucléaire, où les fluides se trouvent fréquemment sous forme de plasma. En particulier, elle impacte la fusion nucléaire **(1)**, une technologie clé pour la production future d'énergie propre. Plus précisément, dans le contexte de la fusion par confinement inertiel **(2)**, l'interface entre deux plasmas est sujette à l'IRT. Contrôler les instabilités de type Rayleigh-Taylor revêt donc une importance cruciale dans ces domaines. Pour explorer de nouvelles méthodes de contrôle, une approche électrique utilisant des champs électriques et des liquides diélectriques est explorée **(3)**. Notre étude concerne l'IRT en 2D. Considérons deux fluides pesants, immiscibles et visqueux, dont la profondeur est infinie, modélisés comme des diélectriques parfaits, soumis à un champ de pesanteur et à un champ électrique uniforme. Alors que plusieurs études ont exploré l'influence d'un champ électrique parallèle **(4)** et perpendiculaire **(3)** à l'interface, notre démarche se distingue en considérant un champ électrique de direction générale. Notre objectif est d'étudier comment ce champ affecte la stabilité de l'interface, en utilisant l'analyse linéaire de stabilité, une méthode permettant d'évaluer la réaction d'un système à des perturbations infinitésimales et de comprendre leur évolution temporelle. Une relation de dispersion, reliant le taux de croissance s au nombre d'onde k est obtenue analytiquement et résolue numériquement pour différents jeux de paramètres. Cette relation permet de déterminer un nombre d'onde de coupure i.e. le nombre d'onde (non nul) pour lequel s est nul. Une diminution de k indique un effet stabilisant sur l'IRT. La figure ci-dessous montre l'effet stabilisant d'un champ électrique formant un angle aigu avec l'interface sur la relation de dispersion de l'IRT. Les résultats obtenus à l'aide de cette théorie plus générale permettent d'envisager de nouvelles possibilités de contrôler l'IRT, que celle d'utiliser un champ électrique horizontal **(4)**.

Mots-Clés: Instabilité de Rayleigh Taylor, Electrohydrodynamique, Analyse linéaire de stabilité

^{*}Intervenant

[†]Auteur correspondant: renoultm@coria.fr

Les plasmas pour les applications de Défense

Pascal Bradu*¹

¹BRADU – aid – France

Résumé

L'Agence de l'Innovation de Défense (AID), en lien avec la DGA, fédère toutes les actions qui concourent à la recherche et l'innovation de défense. Elle soutient notamment des projets de recherche et d'innovation relatifs aux plasmas froids ou chauds, couvrant plusieurs domaines scientifiques et à différents niveaux de maturité. Les dispositifs de soutien ainsi que des exemples de sujets et de porteurs de projets qui ont été financés sont ici présentés.

*Intervenant

Influence d'un filament de Plasma généré par un Laser haute cadence sur le déplacement d'un véhicule supersonique

Nicolas Cantonnet-Paloque*¹, Aurélien Houard², Nicolas Severac³, Magali Lozano², Ivan Doudet⁴, Benoit Mathieu⁵, Benjamin Khier³, André Mysyrowicz⁶, Benoit Wattellier⁴, Sylvain Morilhat³, Jean-Marc Luysen³, Jean-Pierre Tobeli³, Reynald Bur³, Yves-Bernard André¹, Laurent Bizet³, and Paul-Quentin Elias³

¹LOA – ENSTA Paris, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris – France

²LOA – ENSTA Paris, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris – France

³ONERA – Université Paris Saclay – France

⁴PHASICS – Université Paris Saclay – France

⁵CEA – Université Paris Saclay – France

⁶LOA – ENSTA Paris, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris – France

Résumé

En Aéronautique, la quantité d'énergie nécessaire à un engin supersonique pour voyager dans l'atmosphère est conséquente en raison de la formation d'une onde de choc sur le nez de l'engin qui augmente la force longitudinale qu'il subit (aussi appelée trainée). Il a été démontré expérimentalement, qu'en formant des filaments de plasmas induits par laser femtoseconde en amont du choc, il était possible de réduire cette trainée d'un facteur 2, de façon transitoire (1). Cet effet a été attribué à la déformation du choc produite par le dépôt linéique d'énergie laser. Il est également très sensible à la position du filament par rapport au nez de l'engin. On peut donc imaginer qu'un filament plasma s'écrasant sur un bord du nez produira des efforts latéraux sur l'engin, pouvant permettre un contrôle de sa trajectoire. Dans cette expérience réalisée dans les souffleries de l'ONERA, nous avons cherché à quantifier la baisse de trainée moyenne produite par un laser terawatt fonctionnant au kHz (2) et les efforts latéraux induits par les filaments. Différentes énergies (50 à 200 mJ) et cadences de laser (1 et 5 kHz) ont été utilisées, avec différentes pressions génératrices dans la veine (2,5 à 10 bar). En parallèle, des simulations hydrodynamiques de l'effet du dépôt linéique d'énergie sur l'écoulement ont été réalisées par l'ONERA.

Nous avons observé un effet significatif du dépôt d'énergie plasma sur la trainée de l'engin supersonique, mais la réduction de trainée moyenne est difficilement mesurable à la cadence de 1 kHz. Nous avons aussi mis en évidence des efforts latéraux générés par le laser.

(1) P.-Q. Elias et al., "Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation", Science Advanced, vol. 4, p. eaau5239, (2018)

(2) A. Houard et al., "Laser-guided lightning", Nature Photonics, p. 1-5, (2023)

*Intervenant

Point de vue d'un expérimentateur: les gaines sont-elles bien comprises ?

Nicolas Claire*¹

¹Physique des interactions ioniques et moléculaires – Aix Marseille Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7345 / UMR6633 / URA773, Aix Marseille Université : UMR7345 / UMR6633 / URA773 – France

Résumé

Les gaines plasma restent un sujet de recherche d'actualité¹. Aucune théorie ne peut, par exemple, reproduire quantitativement les mesures des fonctions de distribution ionique dans la gaine d'une surface métallique au potentiel flottant dans un plasma d'Argon basse température². La forme de ces distributions, en 3 parties dans la pré-gaine, et leur thermalisation dans la gaine non collisionnelle, qui a été mesurée² peut être expliquée qualitativement par 2 théories qui s'opposent: basée sur de la microturbulence³ ou grâce à un effet balistique⁴. L'émission secondaire d'électrons par la surface, qui peut être conductrice ou isolante, affecte la taille et le potentiel⁵ de la gaine, même pour une surface métallique avec un faible taux d'émission⁶. Une gaine inverse a été prédite théoriquement⁷ mais n'a pas encore été mesurée. Des erreurs dans le calcul du critère Bohm ont été identifiées³. Toutes les théories de gaine dérivent de l'équation de Vlasov avec des opérateurs de collision plus ou moins complexes. Les distributions et les champs présents dans cette équation sont moyennés sur un nombre de particules suffisant. Les densités chutant brutalement dans cette région, l'équation de Vlasov n'est à priori plus valide et les opérateurs de collisions devraient être de type à "N corps".

Les mesures de fonctions de distribution ionique mesurées avec le diagnostic de fluorescence induite par laser seront présentées pour plusieurs types de matériaux -isolants et conducteurs- et la théorie sera questionnée.

Références

1S.D. Baalrud et al, Plasma Sources. Sci. Technol. 29, 053001, 2020

2N. Claire et al, Phys. Plasmas 13, 062103, 2006

3S.D. Baalrud et al, Plasma Sources. Sci. Technol., 20, 025013, 2011

4D. Coulette et al, Phys. Plasmas 22, 043505, 2015

5V. Pigeon et al, Phys. Plasmas 27, 043505, 2020

6N. Ranson et al, Phys. Plasmas 30, 043502, 2023

7M.D. Campanell, Phys. Rev. E, 88, 033103, 2013

*Intervenant

Modélisation des émissions térahertz dues aux électrons et ions accélérés par laser femtoseconde dans des cibles solides

Laurent Gremillet^{*1}, Emilien Denoual¹, Luc Bergé^{1,2}, and Xavier Davoine¹

¹CEA, DAM, DIF and LMCE, Université Paris-Saclay – CEA,DAM,DIF, CEA – 91680 Bruyeres-Le-Chatel, France

²Centre des Lasers Intenses et Applications (CELIA) – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

Résumé

L'interaction entre des impulsions laser ultraintenses ($> 10^{18}$ W/cm²) et des cibles gazeuses ou solides est une source efficace de particules (électrons, ions) énergétiques ainsi que de rayonnements dans une vaste gamme de fréquences, allant du domaine térahertz (THz) aux photons gamma. Dans cette étude, nous nous concentrons, d'un point de vue théorique et numérique, sur les émissions THz engendrées en focalisant de telles impulsions sur de minces ($\sim \mu\text{m}$) feuilles solides. Notre attention se porte principalement sur le rayonnement causé par les courants électroniques à proximité de la face arrière (non irradiée) de la cible.

Dans un premier temps, nous présentons un modèle cinétique qui décrit à la fois le rayonnement de transition dû aux électrons rapides traversant l'interface plasma-vide, et le rayonnement synchrotron résultant de leur déviation et décélération dans le champ électrostatique qu'ils ont eux-mêmes induit (1). Ces deux rayonnements, émis de manière cohérente, interfèrent destructivement, ce qui nécessite une modélisation simultanée. Si la majorité des électrons rapides sont renvoyés dans la cible par le champ électrostatique, quelques-uns (les plus énergétiques) parviennent à s'en échapper, générant ainsi un rayonnement de transition non compensé. Nous démontrons que, dans des conditions expérimentales désormais communes, une faible fraction (de l'ordre du pourcent) de tels électrons peut suffire à dominer le rayonnement net.

Nous modélisons ensuite l'émission THz associée à l'expansion ultérieure des ions provenant de la surface arrière de la cible, neutralisés partiellement par un nuage d'électrons rapides. Notre modèle de détente prend en compte l'épaisseur finie de la cible et les effets multidimensionnels qui finissent par arrêter l'accélération ionique. Pour des paramètres d'interaction typiques, nous prévoyons que ce rayonnement est très inférieur à celui dû aux seuls électrons rapides avant l'expansion des ions (1).

Enfin, pour confirmer nos prédictions théoriques, nous avons intégré un module de rayonnement en champ lointain dans le code " *particle-in-cell* " CALDER. Ce module permet d'acquérir et de filtrer en temps réel (pour prévenir tout effet d' " *aliasing* ") le signal reçu par un détecteur virtuel dans une gamme de fréquences allant des THz aux XUV. L'objectif

^{*}Intervenant

final est d'identifier les particules (résolues en espèce ou énergie) principalement responsables des émissions observées et de quantifier leurs contributions respectives.

(1) E. Denoual, L. Bergé, X. Davoine, and L. Gremillet, " *Modeling terahertz emissions from energetic electrons and ions in foil targets irradiated by ultraintense femtosecond laser pulses* ", Phys. Rev. E **108**, 065211 (2023).

Etude de la dynamique d'un plasma d'arc électrique DC par caméra rapide

Arthur Hellé^{*1}, Robert Hugon¹, Frédéric Brochard¹, Sarah Chouchene¹, and Marcos Grégory¹

¹Institut Jean Lamour (IJL) – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – Institut Jean Lamour - CNRS - Université de Lorraine. Campus Artem 2 allée André Guinier BP 50840 54011 Nancy Cedex, France

Résumé

Dans une volonté de décarboner l'industrie des transports, l'électrification des dispositifs apparaît comme inévitable mais s'accompagne également de sérieux obstacles. L'utilisation de systèmes électriques à courant continu (DC) peut en effet entraîner l'apparition de défauts d'arc électrique dans le réseau par exemple en cas de section d'un conducteur. La signature électrique de ces arcs DC étant particulièrement difficile à distinguer de l'allumage d'une charge en parallèle dans le circuit, de nouvelles approches de détection doivent être développées.

Pour répondre à cette problématique, notre approche consiste à apporter une meilleure compréhension de la dynamique du plasma d'arc et de sa signature électrique en reliant des phénomènes propres de l'arc à des perturbations des signaux électriques. Pour ce faire, un réacteur de l'Institut Jean Lamour permet d'amorcer des arcs électriques par séparation de contact et ce de manière reproductible. Un double diagnostic caméra rapide et mesures électriques permet ensuite d'étudier les plasmas d'arc ainsi créés. Les films étant réalisés avec une grande vitesse d'acquisition (jusqu'à 2 000 000 d'images par seconde), il est dès lors possible de relier des phénomènes visibles à des fluctuations des signaux électriques.

Dans cette contribution, nous nous focaliserons sur la dynamique du plasma d'arc ainsi que sur l'étude de phénomènes particuliers issus de l'interaction plasma surface. Ces derniers aboutissant par exemple à l'apparition de bulles à la surface des électrodes qui expulsent de grandes quantités de matière dans le plasma.

*Intervenant

Propriétés de plasmas N₂/H₂ produits par une source à écran actif fonctionnant en mode DC pulsé unipolaire. Conséquences sur la nitruration des aciers inoxydables

Arthur Hellé^{*1}, Robert Hugon¹, Thierry Czerwiec¹, and Grégory Marcos¹

¹Institut Jean Lamour (IJL) – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – Institut Jean Lamour - CNRS - Université de Lorraine. Campus Artem 2 allée André Guinier BP 50840 54011 Nancy Cedex, France

Résumé

L'écran actif est une innovation technologique apparue au début des années 2000 pour tenter de pallier aux défauts constatés dans les procédés de traitements thermo-chimiques fonctionnant sur le principe de la décharge diode classique (DCPN : direct current plasma nitriding). Dans cette configuration, une chambre à vide contient une grille métallique cylindrique placée à la cathode et entourant les échantillons à traiter. Les parois du réacteur servent d'anode. Ainsi, le plasma formé sur la grille rayonne et diffuse vers les échantillons, apportant chaleur et espèces actives.

Pour la nitruration des aciers inoxydables, les performances de ce mode appelé ASPN (active screen plasma nitriding) restent inférieures à celles obtenues en DCPN. Les études menées à l'Institut Jean Lamour ont montré la formation d'une couche d'oxyde superficielle faisant partiellement barrage à l'insertion et à la diffusion des atomes d'azote. Par ailleurs, l'analyse de la grille par Spectroscopie à Décharge Luminescente (SDL) a révélé que celle-ci est nitrurée et oxydée. Dès lors, l'état de contamination des surfaces (parois internes et grille) lors de l'ouverture du réacteur et son impact sur le plasma puis le traitement revêt une importance capitale dans l'objectif d'optimiser le procédé.

En plasma d'azote pur, des études résolues en temps dans la gamme spectrale 242-262 nm ont permis le suivi des intensités des bandes de NO juste après une remise à l'air du réacteur. Une résolution de l'ordre de la minute et une durée totale de plusieurs heures (2 ou 4h) ont été choisies afin d'étudier des phénomènes lents comme le nettoyage de surface. En décroissance exponentielle, les bandes de NO diminuent progressivement au bénéfice du quatrième positif de l'azote moléculaire ($D3\Sigma_u^-$ - $B3\Pi_g$) et des raies du fer qui deviennent alors observables (2). Ces observations permettent de conclure que le nettoyage de la surface peut être réalisé en plasma d'azote pur et, que dans ce cas, la détection du quatrième système positif dans le spectre d'émission est un indicateur de ce nettoyage.

L'ajout d'un débit d'hydrogène fait disparaître l'émission de NO, même juste après ouverture du réacteur. Ainsi, le spectre d'émission des plasmas N₂/H₂ produits est dominé par le premier négatif ($B2\Sigma_u^-$ - $X2 \Sigma_g^+$) de N₂⁺ et le second positif ($C3\Pi_u$ - $B3\Pi_g$) de N₂.

*Intervenant

Nos études ont montré que la contamination n'est pas pour autant supprimée, puisque le NO réapparaît dès suppression de l'hydrogène. Dans ce cas, la disparition de NO ne peut servir de témoin de la pollution. Il s'avère donc nécessaire de mieux connaître les cinétiques afin de trouver une méthode de contrôle de la pollution.

Dès lors, quel est le rôle de l'hydrogène sur la décontamination ? Quelles sont les espèces formées dans le plasma et sur les surfaces ? Quelles sont les conséquences sur le traitement ? Nous tenterons d'apporter des réponses à la lumière des résultats obtenus. En perspectives, nous présenterons un montage original basé sur un procédé ASPN en mode bipolaire, objet des études que nous avons débuté récemment.

Electric field measurements in the presence of magnetic field with the EFILE diagnostic

Julien Herbelot^{*1}, Laurence Chérigier-Kovacic¹, Sandrine Ferri¹, Alexandre Escarguel¹,
and Veronica Gonzalez Fernandez²

¹Physique des interactions ioniques et moléculaires (PIIM) – Aix Marseille Université, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus de Saint-Jérôme Aile 3, Service 322 Avenue Escadrille Normandie-Niemen 13397 Marseille cedex 20, France

²Dpto. De Optica, Universidad Complutense de Madrid – Av. Arcos del Jalon 118, E-28037 Madrid, Espagne

Résumé

EFILE (Electric Field Induced Lyman- α Emission) diagnostic is developed to measure static or oscillating electric fields in vacuum or in a plasma. The measurement is based on the emission of the Lyman- α line by a hydrogen probe-beam in the $2S_{1/2}$ state. When the beam passes through a region where an electric field is present, Lamb-shift spaced $2S_{1/2}$ and $2P_{1/2}$ atomic hydrogen levels are coupled by Stark mixing. The $2S_{1/2}$ lifetime is shortened and this level decays via $2P_{1/2}$ to the ground state. By measuring the intensity of the subsequent Lyman- α radiation, it is possible to determine the magnitude of the field in a defined region. This is much less perturbative than probe techniques. Static and RF electric fields between two polarized plates in vacuum and a static electric field in a non-magnetized plasma have been measured (1,2). In this paper, we focus on electric field measurements in the presence of a magnetic field since this diagnostic will be used in a low-temperature magnetized plasma column in a device named MISTRAL. Indeed, low frequency rotating instabilities are commonly observed in the magnetized plasma column in MISTRAL (3). First we present electric field measurements in vacuum, in the air gap of an electromagnet, for magnetic field values comparable to those of MISTRAL. Results are compared to a model of the experiment. The expected Lyman- α signal is calculated, taking into account the influence of E and B fields along the beam path. The magnetic field is measured by a Hall probe and the electric field is numerically calculated with a finite elements program (4). Field values are injected in a Python-based calculation of populations and emission coefficients of a four-state system — $n = 2, l = 0, j = \frac{1}{2}, m = \pm \frac{1}{2}$, $-2, 1, \frac{1}{2}, \pm \frac{1}{2}$ based on (5) calculations. Stark effect and Motional Stark Effect are accounted for, as well as Zeeman effect. The model results are in good agreement with experimental results. We also show measurements of an oscillating electric field in the range 61 MHz - 1123 MHz in the same conditions. Finally, we present the configuration of EFILE diagnostic on MISTRAL.

(1) Poggi, Carlo, et al. "Estimation of the Lyman- α signal of the EFILE diagnostic under static or radiofrequency electric field in vacuum." *Plasma Science and Technology* 20.7 (2018): 074001.

(2) Doveil, Fabrice, et al. "Lamb-shift and electric field measurements in plasmas." *Plasma*

*Intervenant

Physics and Controlled Fusion 59.1 (2016): 014020.

(3) Aggarwal, Surabhi, et al. "Centrifugal instability in a weakly magnetized rotating plasma column." *Journal of Plasma Physics* 89.3 (2023): 905890310

(4) COMSOL Multiphysics® v. 6.2. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

(5) Bethe, Hans A, et al. "Quantum mechanics of one-and two-electron atoms." Springer Science & Business Media, (2013).

Mots-Clés: EFILE, Champ électrique, plasma, diagnostic, stark, zeeman, Faisceau d'atomes, MIS-TRAL, plasma magnétisés

Génération d'hydrogène bas Carbone en utilisant un réacteur plasma micro-structuré

Maxime Jacquart^{*1,2}, Carolina Garcia Soto², Federico Boni^{†2}, Elena Galvez¹, and Paul-Quentin Elias²

¹Institut Jean Le Rond d'Alembert (DALEMBERT) – Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – Boite 162 4 place Jussieu 75005 Paris, France

²DPHY, ONERA, Université Paris Saclay [Palaiseau] – ONERA, Université Paris-Saclay – F-91123 Palaiseau, France

Résumé

Une des voies pour la génération de dihydrogène décarboné est la décomposition de vecteurs énergétiques tels que le méthane et d'ammoniac. Les méthodes de décomposition par décharge à plasma froid présentent l'avantage de ne pas avoir de contrainte de pression et de température (1). Cependant, l'inhomogénéité de la décharge peut mener à un volume de gaz non traité significatif ($> 70\%$ (2)). Pour pallier à cela, notre étude considère un réacteur micro-structuré. L'intérêt de cette géométrie est double : (i) la décharge plasma s'étend sur un volume qui est comparable à celui du capillaire, maximisant ainsi le volume de gaz traité, et (ii) des échanges de chaleur élevés permettent un refroidissement rapide des réactifs qui réduit la recombinaison des produits. Le but de cette étude est d'évaluer les performances énergétiques de ce dispositif.

Le réacteur micro-structuré est constitué de deux plenums encadrant trois capillaires en verre. Dans chaque capillaire (ID 0.58 mm, L= 150 mm), une décharge de surface propagative est générée par application d'une impulsion haute tension (V_i entre 15 et 30 kV) entre l'électrode interne au capillaire et une électrode de masse externe au capillaire (4). La décharge filamentaire dans le plasma, de très petit rayon ($\sim 200\ \mu\text{m}$) se propage dans le capillaire sur 60 à 80 mm.

L'imagerie au télémicroscope montre que la majorité du capillaire est occupée par la décharge filamentaire ($\sim 23\%$ par streamer avec plusieurs centaines d'entre eux dans la décharge à $V_i=28\ \text{kV}$). On observe également des dépôts carbonés dans les capillaires après des décharges ayant lieu dans le méthane. L'énergie déposée dans la décharge est calculée à partir des mesures électriques. Ainsi, pour $V_i=28\ \text{kV}$, on dépose 71 mJ dans les 3 capillaires, soit 24 mJ(BF1) par capillaire.

Une analyse chimique sera prochainement réalisée afin de mesurer le taux de décomposition du méthane et d'ammoniac, ainsi que l'efficacité énergétique et la sélectivité de ce procédé. Les limites du réacteur en termes d'énergie déposée, en fonction des conditions du mélange, seront également déterminées. En parallèle, les propriétés de la décharge seront caractérisées par spectroscopie d'émission optique.

*Intervenant

†Auteur correspondant: federico.boni@onera.fr

- (1) Hydrogen Production from Methane Through Pulsed DC Plasma –Morgan et al 2017
- (2) The panorama of plasma-assisted non-oxidative methane reforming – Scapinello et al 2017
- (3) Experimental study and kinetic modeling of methane decomposition in a rotating arc plasma reactor with different cross-sectional areas – Kheirollahivash et al 2019
- (4) P. Q. Elias et P. Castera, " Measurement of the impulse produced by a pulsed surface discharge actuator in air ", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 46, no 36, p. 365204, sept. 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/36/365204.

Mots-Clés: diélectrique, plasma froid, méthane, décomposition, chimie

Hélicité magnétique et éruptivité des régions actives solaires

Etienne Pariat*¹

¹Laboratoire de Physique des Plasmas – Observatoire de Paris, Université Paris sciences et lettres, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7648 – France

Résumé

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.

*Intervenant

Caractérisation de l'hydrogène dans les zéolithes par LIBS et par spectroscopie infrarouge

Talla Sorelle Tembonso*¹, Alexandre Vimont², Arnaud Bultel¹, Vincent Morel¹,
Françoise Maugé³, and Philippe Bazin⁴

¹Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie – Université de Rouen Normandie,
Institut national des sciences appliquées Rouen Normandie, Centre National de la Recherche
Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6614 – France

²Laboratory of catalysis and Spectroscopy (LCS) – Laboratory of catalysis and Spectroscopy – France

³Laboratoire catalyse et spectrochimie (LCS) – Université de Caen Normandie, Ecole Nationale
Supérieure d'Ingénieurs de Caen, Institut de Chimie - CNRS Chimie, Centre National de la Recherche
Scientifique – 6, boulevard du maréchal Juin 14050 CAEN CEDEX 4, France

⁴Laboratoire catalyse et spectrochimie – Université de Caen Normandie, Ecole Nationale Supérieure
d'Ingénieurs de Caen, Institut de Chimie - CNRS Chimie, Centre National de la Recherche Scientifique
– France

Résumé

Les zéolithes sont des solides très poreux appartenant à la famille des aluminosilicates. Ces solides sont généralement utilisés comme des catalyseurs, des échangeurs d'ions ou des adsorbants (1-3). Elles sont capables d'adsorber des molécules et même certaines dérivées de l'hydrogène (4-5). Leur structure cristalline vient de l'agencement des tétraèdres d'oxygène ayant au centre un atome de silicium (Si) ou d'aluminium (Al). A cause du nombre d'oxydation de Al (+3) inférieur à celui de Si, les tétraèdres d'oxygène ayant des Al au centre génèrent des défauts de charge. Pour respecter l'électro-neutralité des zéolithes, les cations sont ajoutés dans les solutions de synthèse pour combler ces défauts de charge. Ces cation sont généralement des cations alcalins ou alcalino-terreux qui peuvent être échangés ensuite par des protons. La règle d'électro-neutralité sur la charpente zéolitique impose que le nombre de cation de compensation soit égal au nombre d'atomes de Al et donc proportionnel au rapport Si/Al de la charpente. Le rapport Si/Al est le paramètre qui permet généralement de différencier deux types de zéolithes.

Pour caractériser les cations de compensations (le proton dans notre cas) et les sites d'adsorption des zéolithes, la spectroscopie infrarouge est généralement utilisée. Cette technique donne des informations de certaines vibrations moléculaires dans la zéolithe. Pour accéder à la fois aux informations atomiques (les informations des éléments dans la zéolithe) et moléculaires (les informations des groupes fonctionnels et des sites d'adsorption), nous avons couplé la Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) et à la spectroscopie infrarouge (IR). En couplant ces deux techniques, nous avons identifié les raies de Si, Al, O, Na, Ca et H dans la zéolithe LZY-64 activée avec la LIBS et les bandes de OH des petites et grandes cages avec la spectroscopie IR. Pour rajouter de l'hydrogène dans la zéolithe LZY-64 activée, elle a été saturée d'ammoniac. Après saturation d'ammoniac, nous avons observé en spectroscopie IR

*Intervenant

la bande de NH_4^+ dans la zéolithe. En LIBS, nous avons fait le diagnostic du plasma de zéolithe LZY-64 activée et du plasma de zéolithe LZY-64 activée et saturée en ammoniac pour pouvoir estimer le rapport Si/Al et H/Al. Lors du congrès de la division Plasmas de la SFP (Société Française de Physique), les premiers résultats seront présentés.

Références

Daligaux, V., Richard, R., & Manero, M. H. (2021). *Catalysts*, 11(7), 770. Iwamoto, M., Furukawa, H., Mine, Y., Uemura, F., Mikuriya, S. I., & Kagawa, S. (1986). *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (16), 1272-1273. Mauberger, P. (2021). In *Chimie et changement climatique* (pp. 239-256).EDP Sciences. Diaz, C. D. C., Locatelli, S., & Gonzo, E. E. (1992). *Zeolites*, 12(7), 851-857. Hunger, B., Heuchel, M., Matysik, S., Beck, K., & Einicke, W. D. (1995). *Thermochimica acta*, 269, 599-611.

Mots-Clés: zéolithe, LIBS, hydrogène, spectroscopie infrarouge



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

Mercredi 15 mai 2024

08:30 - 09:00	Les dernières avancées en fusion magnétique - Timothée NICOLAS - CPHT
09:00 - 09:30	Les dernières avancées en fusion inertielle - Laurent MASSE - CEA/DAM (Non fourni)
09:30 - 10:00	Spectroscopie des naines blanches magnétisées - Joël ROSATO - PIIM (Non fourni)
10:00 - 10:30	Pause café
10:30 - 11:00	Simulations ab initio des intérieurs planétaires - Mandy BETHKENHAGEN - LULI (Non fourni)
11:00 - 11:30	Guidage de la foudre - Aurélien HOUARD - LOA
11:30 - 12:00	Spectroscopie d'émission atomique de plasmas induits par laser et applications - Jörg HERMANN - LP3
12:00 - 13:30	Déjeuner
13:30 - 18:30	Visite du GANIL - Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds vous ouvre ses portes. Départ 13:30 du site Pasteur et retour 18:30 site Pasteur.
19:00 - 22:30	Dîner de la conférence

Les dernières avancées en fusion magnétique

Timothée Nicolas*¹

¹Centre de Physique Théorique [Palaiseau] (CPHT) – CNRS, Institut Polytechnique de Paris – Ecole Polytechnique 91128 Palaiseau cedex, France

Résumé

Dans cet exposé, nous ferons un bref tour d'horizon des avancées dans le domaine de la fusion par confinement magnétique. Nous discuterons, d'une part, les perspectives nouvelles offertes par les supraconducteurs à haute température pour les tokamaks et les stellarators, ainsi que les activités autour de la triangularité négative. Les progrès dans le design des stellarators offrant un meilleur confinement des particules rapides seront soulignés. Dans un deuxième temps, les travaux de quelques startups choisies, portant sur des configurations alternatives, seront décortiqués.

*Intervenant

Guidage de la foudre par filamentation laser

Aurélien Houard*¹

¹Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) – CNRS, Ecole polytechnique, France, ENSTA Paris – France

Résumé

Plus d'un milliard de coups de foudre sont enregistrés chaque année sur terre, et les dommages causés par celle-ci sont considérables. Il est donc crucial de comprendre la foudre et de développer des moyens de protection adaptés.

Avec l'évolution rapide des technologies laser, l'idée de développer une protection contre la foudre basée sur la filamentation laser femtoseconde a émergé dans les années 1990 (1). Près de 30 ans plus tard, grâce au développement d'un système laser alliant une puissance crête TW à une haute puissance moyenne (1 kW), le projet Laser Lightning Rod (LLR) a permis de mettre en évidence pour la première fois le guidage par laser de décharges de foudre ascendantes sur plus de 50 m (2). La station expérimentale du mont Säntis, dans le nord-est de la Suisse, a été choisie pour cette expérience. Situé à une altitude de 2 500 mètres, ce site unique est entièrement instrumenté pour l'étude des phénomènes de foudre.

Dans cette communication, je présenterai un bref historique du contrôle de décharges électriques par laser avant de détailler les différentes étapes et les principaux résultats obtenus dans le cadre du projet Laser Lightning Rod.

(1) X.M. Zhao, et al. "Femtosecond ultraviolet laser pulse induced lightning discharges in gases," *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 599 (1995).

(2) A. Houard, *et al.* "Laser-guided lightning", *Nat. Photon.* **17**, 231 (2023).

Mots-Clés: filamentation laser, foudre, plasma, laser ultrabrefs

*Intervenant

Spectroscopie d'émission atomique de plasmas induits par laser et applications

Jörg Hermann^{*1}, Christoph Gerhard², Miloš Burger³, Valentin Craciun⁴, and Frédéric Pelascini⁵

¹Laboratoire Lasers, Plasmas et Procédés photoniques (LP3) – Aix-Marseille Université - AMU, CNRS – Case 917 163 Avenue de Luminy 13288 MARSEILLE CEDEX 09, France

²University of Applied Sciences and Arts, Faculty of Engineering and Health (HAWK) – Von-Ossietzky-Straße 99 37085 Göttingen, Allemagne

³University of Michigan, Gérard Mourou Center for Ultrafast Optical Science – 500 Church Street Ann Arbor, MI 48109-1090, États-Unis

⁴National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (INFLPR) – National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics Str. Atomistilor, Nr. 409 PO Box MG-36, 077125 Magurele, Bucharest, Roumanie

⁵Centre Technique des Industries Mécaniques, site de Strasbourg (CETIM) – Centre Technique des Industries Mécaniques - Cetim (FRANCE) – 24 rue D'Alsace 67400 Illkirch-Graffenstaden, France

Résumé

Les plasmas induits par laser sont apparus plus tard que leurs équivalents générés par décharges électriques. Au début, la génération des plasmas par laser en régime d'intensité modérée a été motivée principalement par l'étude des phénomènes d'interaction laser-matière et par l'application à des mesures analytiques. L'intérêt du plasma laser comme source de rayonnement pour la spectroscopie a été freiné par la faible reproductibilité des expériences due à la mauvaise stabilité des sources laser disponibles. De plus, la petite taille et la dynamique d'expansion rapide rendaient les observations spectroscopiques difficiles. Les progrès technologiques ont dramatiquement amélioré la situation. Des lasers déclenchés ont permis de générer des plasmas hautement reproductibles et des détecteurs rapides ont rendu les mesures spectroscopiques résolues en temps possibles. La faible taille du plasma devient alors un avantage, car elle limite l'effet d'auto-absorption. Plus récemment, il a été montré que le plasma produit par ablation laser peut présenter une source de radiation singulière qui combine deux propriétés que ne l'on trouve habituellement pas ensemble : le plasma est en équilibre thermodynamique local et spatialement uniforme (1). La combinaison des deux propriétés définit une source de rayonnement idéale car elle permet une modélisation simple et précise du spectre d'émission. Cela ouvre des perspectives dans les domaines de la spectroscopie de plasma et des mesures analytiques, car le diagnostic précis du plasma est possible sans la nécessité d'observations spectroscopiques résolues spatialement. L'objectif de cette présentation est d'illustrer les propriétés de ce plasma, et de discuter le diagnostic précis via la modélisation du spectre d'émission. En outre, les perspectives en termes d'applications seront établies pour la mesure de données spectroscopiques et pour l'analyse des matériaux (2).

*Intervenant

Références :

- (1) J. Hermann, D. Grojo, E. Axente, C. Gerhard, M. Burger, V. Craciun, *Ideal radiation source for plasma spectroscopy generated by laser ablation*, Phys. Rev. E **96**, 053210 (2017)
- (2) J. Hermann, C. Gerhard, M. Burger, V. Craciun, F. Pelascini, *Progress in calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy*, Spectrochim. Acta Part B: Atom. Spectrosc. **200**, 106595 (2023)

Mots-Clés: plasma induit par laser, diagnostic de plasma, simulation du spectre d'émission, LIBS



17^e Congrès de la division Plasmas de la SFP

SFP – PLASMAS 2024

14-16 mai 2024

CORIA – Rouen - France

jeudi 16 mai 2024

08:30 - 09:00	Entrées atmosphériques planétaires - Pascal BOUBERT - CORIA
09:00 - 09:30	Physique des sprites - Sébastien CELESTIN - LPC2E (Non fourni)
09:30 - 10:00	Jets de plasma en microgravité - Augusto STANCAMPIANO - GREMI
10:00 - 10:30	Pause café
10:30 - 11:00	Un modèle de Grad régularisé pour des décharges plasma à basse température - Alejandro ALVAREZ LAGUNA - LPP
11:00 - 11:30	Modélisation du vent solaire - Nicolas POIRIER, prix Pellat 2023 - IRAP
11:30 - 12:00	Collisions électroniques dans les plasmas froids et dans les nuages moléculaires interstellaires - Ioan SCHNEIDER - LOMC
12:00 - 12:15	Remise du prix poster
12:15 - 13:30	Déjeuner

Entrées atmosphériques planétaires : un problème multiphysique

Pascal Boubert
CORIA, Université de Rouen

L'interaction entre un objet animé d'une vitesse de plusieurs kilomètres par seconde avec un gaz donne naissance à une multitude de phénomènes physiques dont le moindre n'est pas conversion de l'énergie cinétique en énergie thermique. Que l'objet soit une sonde spatiale, un météore ou un débris, que le gaz soit celui de l'atmosphère de la Terre, de Mars ou de Titan, le milieu ainsi créé mérite d'être étudié. Pour la richesse de la physico-chimie qui s'y déroule. Par l'importance des applications qui en découlent. C'est un plasma, par les hautes températures qui s'y rencontrent et les phénomènes d'ionisation puis de recombinaison qui s'y produisent. C'est surtout un milieu où les échanges entre les modes de stockages énergétiques, notamment la vibration lorsque des molécules sont présentes, sont complexes et variables en fonction de l'endroit considéré, depuis le front de choc généré par l'interaction hypersonique jusqu'à la couche limite d'interaction entre le gaz et l'objet. L'écoulement et la convection en résultant, la désexcitation des espèces ainsi que le transfert radiatif, mais aussi la chimie, homogène et hétérogène, sont autant de problématiques à prendre en considération pour obtenir une vision globale du problème entre fort déséquilibre et équilibre thermodynamique local. C'est un panorama rapide de cette «soupe multiphysique» qui est proposé à travers cet exposé, avec quelques étapes marquées sur l'étude du rayonnement et l'interaction plasma-surface, thèmes particulièrement étudiés au laboratoire CORIA.

Remerciements à J. Annaloro, A. Brault, N. Brémare, A. Bultel, M. Jacquot, M. Lesage, C. Rond.

Jet plasma en microgravité : Première démonstration de fonctionnement et action antibactérienne

Augusto Stancampiano*^{†1}, Amaury Rouillard², Fabienne Brulé-Morabito³, Sébastien Dozias⁴, Julien Lemaire², Jean-Michel Pouvesle⁴, Eric Robert¹, and Pablo Escot Bocanegra⁴

¹Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés – Université d'Orléans, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7344, Université d'Orléans : UMR7344 – France

²GREMI – Université Paris Saclay, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec – France

³Centre de biophysique moléculaire (CBM) – Université d'Orléans : UPR4301, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale : UPR4301, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR4301 – Rue Charles Sadron 45071 ORLEANS CEDEX 2, France

⁴Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés (GREMI) – CNRS : UMR7344, Université d'Orléans – 14 Rue d'Issoudun - BP 6744 45067 ORLEANS CEDEX 2, France

Résumé

Les futures missions spatiales habitées de longue durée posent des défis technologiques uniques. Les véhicules spatiaux utilisés sont soumis à l'apesanteur, confinés et quasiment isolés du monde extérieur. Ces lieux ont aussi un volume de stockage et des ressources limités. Un dispositif médical polyvalent, compact, à faible consommation d'énergie et à faible production de déchets serait extrêmement précieux pour agir contre les bactéries, virus et agents pathogènes potentiellement résistants aux antibiotiques. L'effet antimicrobien des plasmas froids à pression atmosphérique et leurs multiples applications en médecine sont aujourd'hui établis sur Terre, mais qu'en est-il en apesanteur ? Un dispositif expérimental unique a été développé pour étudier un jet plasma dans des conditions d'apesanteur lors des campagnes de vols paraboliques du CNES. Le jet plasma utilisé est un " Plasma-Gun " (PG) développé au laboratoire GREMI et bien caractérisé. Il s'agit d'un réacteur plasma à DBD pulsées d'une durée de l'ordre de la microseconde (7 kV et 20 kHz) fonctionnant avec un mélange de gaz composé d'He et d'O₂ (1 SLM). Les expériences menées lors de ces différentes campagnes de vols paraboliques visaient à démontrer en premier lieu l'opérabilité du PG dans des conditions d'apesanteur et dans un second temps d'étudier le potentiel d'inactivation de bactérie du PG en apesanteur dans différentes conditions (paramètres électriques, concentration en O₂, temps de traitement, écart réacteur-cible). Les bactéries utilisées sont des *E. Coli* non pathogènes. Les résultats montrent que la plage opérationnelle du PG pour diverses concentrations d'O₂ est élargie dans des conditions d'apesanteur et que son potentiel d'inactivation est amélioré par rapport aux conditions terrestres. Les objectifs finaux de ce projet sont d'optimiser l'inactivation du PG et de corrélérer l'impact de l'apesanteur sur la structure du jet de plasma et la génération d'espèces réactives.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: augusto.stancampiano@univ-orleans.fr

Mots-Clés: jet, plasma froid, apesanteur, antibactérien

A regularized Grad's model for low-temperature plasma discharges

Alejandro Alvarez Laguna*^{1,2}

¹Laboratoire de Physique des Plasmas – Université Paris sciences et lettres, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7648
– France

²Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – CNRS – France

Résumé

Partially-ionized plasmas play a fundamental role in a number of scenarios, from gas discharges for plasma processing, the solar chromosphere and other space plasmas to the scrape-off layer of tokamaks. In general, these plasmas are difficult to model due to the non-equilibrium conditions that result from the interaction between the different species, the inelastic collisional processes, the presence of strong gradients, and the interplay of the charged species with the electromagnetic field. For this reason, fluid models of partially-ionized plasmas usually fail to fully represent the transport phenomena in weakly collisional regimes. In this presentation, we derive a velocity-moment plasma model from the kinetic equation through the Grad method which takes into account a mixture with several components in chemical and thermal non-equilibrium under the effect of an electrostatic field. In addition to conservation of mass, momentum and energy, the model considers the evolution of higher-order moments as the heat flux vector and the equilibrium of the contracted fourth moment. We will discuss regularization of equations with a generalized Chapman Enskog expansion. The model is able to reproduce the depopulation of the energy distribution function of high energy electrons, typical of low-temperature plasmas. We will explain the derivation of collision terms for elastic and inelastic collisions using the Boltzmann operator as opposed to a simplified BGK operator. The implementation of the set of equations and the numerical difficulties of coupling with the field electromagnetic are also discussed.

*Intervenant

Modélisation du vent solaire

Nicolas Poirier

Rosseland Centre for Solar Physics, Oslo

nicolas.poirier@irap.omp.eu

Depuis 50 ans déjà, de nombreuses observations solaires et théories montrent l'existence d'un écoulement continu de plasma en provenance du Soleil.

Bien qu'on ait atteint une bonne compréhension globale du vent solaire, son origine et ses processus de formation restent toujours aussi énigmatiques.

Depuis 2019 la sonde spatiale de la NASA Parker Solar Probe (PSP) s'est approchée très près du Soleil, et a ainsi mis en lumière de nouveaux aspects sur le vent solaire jusqu'alors méconnus.

Je vais en particulier discuter des récentes observations en lumière visible (Thomson scattering) prises par le télescope WISPR à bord de PSP, et les confronter à des simulations avancées de la couronne et du vent solaire.

Enfin j'aborderais les mystères concernant la composition du vent solaire en ions lourds, ainsi que les grands enjeux et défis que cela représente en termes de modélisation plasma.

Collisions électroniques dans les plasmas froids et dans les nuages moléculaires interstellaires

^{1,2}J Zs Mezei, ¹J Boffelli, ¹R Hassaïne, ³N Pop, ⁴F Iacob,
⁵K Chakrabarti, ⁶V Laporta, ⁷M Ayouz, ^{8,9}J Forer, ⁸V Kokoouline,
¹⁰J Tennyson, ^{1,11}*I F Schneider

¹LOMC, Université Le Havre Normandie, France, ²Institute for Nuclear Research, Debrecen, Hongrie, ³Politehnica University, Timisoara, Roumanie, ⁴West University, Timisoara, Roumanie, ⁵University of Calcutta, Inde, ⁶Istituto per la Scienza e Tecnologia dei Plasmi, Bari, Italie, ⁷LGPM, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, France, ⁸University of Central Florida, Orlando, Etats Unis, ⁹Columbia University, New York, Etats Unis, ¹⁰University College London, Royaume Uni, ¹¹LAC, Université Paris-Saclay, France
* ioan.schneider@univ-lehavre.fr

La cinétique des électrons et des cations moléculaires dans les milieux ionisés froids est contrôlée principalement par la recombinaison dissociative, en compétition avec l'excitation/déexcitation ro-vibrationnelle. L'ordre de grandeur et la forme des sections efficaces / vitesses de réaction dépendent fortement de l'énergie/température des électrons, ainsi que du degré d'excitation des ions cible.

Aux énergies de l'ordre de quelques quantas vibrationnelles - typiquement en dessous de 1 eV - la plupart des voies d'ionisation sont fermées, ce qui implique de nombreuses résonances dues à des captures temporaires de l'électron incident dans des états de Rydberg du neutre à cœur ionique fondamental. Cette dynamique complexe est très bien modélisée par nos méthodes basées sur la Multichannel Quantum Defect Theory [1] et sur le paquet de codes UK-R-matrix-Quantemol-N [2], que nous avons appliquée à H₂⁺ [1], BeH⁺ [3] (et leurs isotopologues contenant D et T), BF⁺, CO⁺, ArH⁺ [4], NS⁺ [5], CF⁺ et autres cations. Aux énergies plus importantes - 2-3 eV - l'électron incident peut être capturé aussi dans des états de Rydberg à cœur excités, générant des résonances plus larges - cas du N₂⁺ [6] et du SH⁺ [7].

Au-dessus du seuil de dissociation de la cible - typiquement 3 eV ou plus - les résonances de Rydberg disparaissent, et un processus supplémentaire, l'excitation dissociative, rentre en compétition avec la recombinaison dissociative et l'excitation ro-vibrationnelle. Nous avons étudié cette dynamique dans le cas de ArH⁺ [4] et du BeH⁺.

Enfin, nous allons présenter aussi des résultats sur quelques polyatomiques, comme BF₂⁺, N₂H⁺ [8], C₂H⁺, CH₂⁺ et autres.

Bibliographie

- [1] Epée M D et al, 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 512, 424.
- [2] Carr J et al, 2012, European Physical Journal D 66, 58.
- [3] Pop N et al, 2021, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 139, 101414.
- [4] Djuissi E et al, 2022, Plasma Sources Science and Technology 31, 114012.
- [5] Iacob F et al, 2022, J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics 55, 235202.
- [6] Abdoulanziz A et al, 2021, Journal of Applied Physics 129, 052202.
- [7] Boffelli J et al, 2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 552, 2259.
- [8] Mezei J Zs et al, 2023, European Physical Journal Special Topics 232, 1967.