

Journées 2021 du GDR EMILI

25 au 28 octobre 2021
École Polytechnique, Grand Hall

Site web des journées :
<https://emili2021.sciencesconf.org>



Site web du GDR :
<https://gdr-emili.cnrs.fr/>

Recueil des résumés



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS

Crédit image : Cédric Noel _ IJL



Sponsors



PLASMA Science



Edito

Le GDR EMILI (Etude des MILieux Ionisés : Plasmas froids créés par décharge et laser) a été créé au 1^{er} janvier 2021, résultat d'une réflexion de la communauté initiée fin novembre 2019 lors des [1^{ères} Rencontres Scientifiques Plasmas Froids et Lasers](#) organisées à Toulouse. Sous l'impulsion des représentants de la communauté au sein de la section 10 du CNRS (en 2019 : K. Hassouni, C. Leborgne et F. Massines), il s'agissait de trouver un moyen de restructurer la communauté plasmas/laser française qui avait perdu de sa cohésion, notamment du fait de l'évolution des modes de financement avec des appels à projet plus ciblés vers les applications favorisant l'usage du plasma en tant qu'outil au détriment de son étude.

Ce constat a orienté la communauté vers la création d'une structure qui pourrait aider l'ensemble des acteurs concernés (chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants) à se retrouver régulièrement pour échanger sur les aspects fondamentaux de ces milieux complexes. La création d'un GDR est apparue comme une solution permettant de redynamiser la communauté autour de leur objet d'étude principal. Près de 300 personnels permanents, représentant plus d'une quarantaine de laboratoires, ont exprimé leur souhait de rejoindre ce GDR soutenu par l'INSIS.

Ces Journées constituent la première action majeure du GDR et nous sommes particulièrement heureux que vous ayez été aussi nombreux à vous inscrire, bien au-delà de ce que nous espérions. Avec près de 160 participants, 30 oraux et 40 posters, la communauté a répondu présent à cet évènement. Le soutien financier de nos tutelles et de nombreux sponsors ainsi que l'énorme travail d'organisation du comité local des laboratoires LPP et LPICM, ont permis d'organiser des Journées que, nous espérons, vous apprécierez. Nous remercions également l'Ecole Polytechnique pour la mise à disposition de ses locaux et le soutien logistique.

Le programme a été structuré autour de différents types d'interventions permettant de dresser un état de l'art, d'identifier les défis qu'il reste à relever, de présenter des sujets d'actualités ou émergents et permettant aux jeunes chercheurs, futur de la communauté, de présenter leurs recherches. Les présentations orales et posters n'ont pas pour seule vocation d'exposer des résultats scientifiques comme dans les conférences traditionnelles, les participants ont été encouragés à présenter des résultats inexplicables, surprenants, contradictoires, des problèmes rencontrés dans l'utilisation de diagnostics ou de modèles numériques. L'objectif est de susciter des interrogations, de trouver des solutions auprès des autres participants ou de présenter des problèmes susceptibles d'être partagés par d'autres.

Enfin, ces journées sont aussi un lieu d'échanges et pour cela des sessions plus interactives ont été prévues pour favoriser les interactions et les discussions. Cela prendra la forme de stands posters et d'ateliers sur des sujets scientifiques précis ou sur certains aspects du monde de la recherche. Les échanges se feront aussi avec grand plaisir pendant les moments de pause et de convivialités prévus dans le programme en espérant que cela favorisera l'émergence de collaborations fructueuses.

Ce recueil de résumés permet de dresser un panorama des recherches actuellement menées dans les laboratoires de la communauté. Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

Le comité de pilotage du GDR EMILI

Comité de pilotage du GDR / Comité de programme

| | | |
|--------------------------|---------|---------------|
| David AMANS | ILM | Villeurbanne |
| Stéphane BECHU | LPSC | Grenoble |
| Bruno BOUSQUET | CELIA | Talence |
| Arnaud BULTEL | CORIA | St Etienne du |
| Gilles CARTRY | PIIM | Marseille |
| Gwénaél FUBIANI | LAPLACE | Toulouse |
| Laurent GARRIGUES | LAPLACE | Toulouse |
| Jörg HERMANN | LP3 | Marseille |
| Grégory MARCOS | IJL | Nancy |
| Armelle MICHAU | LSPM | Villetaneuse |
| Maxime MIKIKIAN | GREMI | Orléans |
| Vincent RAT | IRCER | Limoges |
| Cathy ROND | LSPM | Villetaneuse |
| Pierre TARDIVEAU | LPGP | Orsay |
| Sédina TSIKATA | ICARE | Orléans |

Comité local d'organisation

| | | |
|---|-------------------------------------|-----------|
| Olivier GUAITELLA | LPP | Palaiseau |
| Karim OUARAS | LPICM | Palaiseau |
| David PAI | LPP | Palaiseau |
| Garett CURLEY | LPP | Palaiseau |
| Alex ALVAREZ LAGUNA | LPP | Palaiseau |
| Yvan BONNASSIEUX | LPICM | Palaiseau |
| Pere ROCA i CABARROCAS | LPICM | Palaiseau |
| Erik JOHNSON | LPICM | Palaiseau |
| Tatiana JURESIC | EUR PLASMA Science | Palaiseau |
| Edouard BOUCHET, Catherine JEGU Maryline BAZIN, Cherifa IGHOUD | Administration LPP | Palaiseau |
| Tarek BEN SLIMANE, Benjamin ESTEVES Federico PETRONIO, Mhedine ALICHERIF Georgy POKROVSKIY, Nicolas LEQUETTE Victor LAFAURIE, Alix d'ARCHIMBAUD Zhan SHU | Doctorants LPP | Palaiseau |
| Khaoula JEMLI, Monalisa GHOSH Junkang WANG, Lakshman SRINIVASAN Ghewa AKIKI | Post-doctorants/doctorants LPICM | Palaiseau |

Sponsors



PLASMAScience



ROHDE & SCHWARZ
Make ideas real



neyco
VACUUM & MATERIALS



HIDEN
ANALYTICAL

FULLVAC



TELEDYNE
PRINCETON INSTRUMENTS
Everywhere you look™



BANQUE
POPULAIRE
VAL DE FRANCE **+X**



| Lundi 25 octobre | Mardi 26 octobre | Mercredi 27 octobre | Jeudi 28 octobre |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|

* Tous les oraux ont lieu dans l'amphi ARAGO, les posters, pauses et stands se tiendront dans le Grand Hall

| | | | | | |
|-------------|--|-------------|--|-------|---|
| 08:45 | Revue Laurent Berthe PIMM, Paris | 08:45 | Revue Thierry Belmonte IJL, Nancy | 08:45 | Revue Françoise Massines PROMES, Perpignan |
| 09:30 | Oraux Entrants Augusto Stancampiano GREMI, Orléans Thomas Orrière PPRIME, Poitiers Azadeh Valinataj Omran LSPM, Villetaneuse Laurène Youssef IRCER, Limoges | 09:30 | Oraux Jeunes Morgan Lesage CORIA, St-Étienne du Rouvray Alice Remigy LSPM, Villetaneuse Sylvain Grosse PPRIME, Poitiers Benjamin Esteves LPP, Palaiseau | 09:30 | Oraux Jeunes Lucas Fuster LAPLACE, Toulouse Thibault Dubois ICARE, Orléans Victorien Blanchard EM2C, Gif-sur-Yvette Thibault Darny LPGP, Orsay |
| 10:30 | Pause café | 10:30 | Pause café | 10:30 | Pause café |
| 11:00 | Ateliers Dynamique moléculaire en plasmas et plasmas/laser (PC41) Plasmas produits par laser : diagnostics et modélisation (PC42) Ions négatifs (PC44) | 11:00 | Ateliers Appels à projets (PC41) Recrutements sur des postes académiques (PC42) Formations universitaires plasmas/lasers en France (PC44) | 11:00 | Retour sur les ateliers |
| 12:30 | Accueil | 12:30 | Déjeuner | 12:30 | Déjeuner |
| 14:00 | Ouverture | 14:00 | Revue Khaled Hassouni LSPM, Villetaneuse | 14:00 | Sujets d'actu Laurent Navoret IRMA, Strasbourg |
| 14:20 | Revue Nader Sadeghi LTM, Grenoble | 14:45 | Sujets d'actu Pascal Brault GREMI, Orléans Michael Tatoulian IRCP, Paris Stéphane Pellerin GREMI, Bourges | 14:40 | Revue Stéphane Heuraux IJL, Nancy |
| 15:05 | Sujets d'actu Christophe Laux EM2C, Gif-sur-Yvette David Grojo LP3, Marseille Paul-Quentin Elias ONERA, Saclay Valentin Mazières LAPLACE, Toulouse | 15:45 | Agnès Granier INSIS | 15:25 | Oraux Entrants Alejandro Alvarez-Laguna LPP, Palaiseau Alexandros Mouskeftaras LP3, Marseille |
| 16:25 | Pause café | 16:25 | Pause café | 15:55 | Oraux Jeunes Corentin Grimaldi EM2C, Gif-sur-Yvette Glenn Otakandza Kandjani GREMI, Orléans |
| 16:55 | Stands thématiques - Plasmas magnétisés - Diagnostics optiques - Données de base | 16:55 | Session Posters | 16:25 | Pause Café |
| 18:30 | | 18:30 | Session Posters | 16:55 | Session Posters |
| 18:30-20:00 | Cocktail de bienvenue | | | 17:00 | Visites laboratoires |
| | | 19:30-23:00 | Banquet | | |

Lundi 25 octobre

** Tous les oraux ont lieu dans l'amphi ARAGO, les posters, pauses et stands se tiendront dans le Grand Hall*

| | | |
|-------|--|--|
| 12:30 | Accueil - Grand Hall | |
| 14:00 | Ouverture | |
| 14:20 | Revue | |
| 14:20 | Mesure de la densité et température électronique dans les plasmas à pression atmosphérique par méthodes optiques | Nader Sadeghi LTM, LIPhy, Grenoble |
| 15:05 | Sujets d'actu | |
| 15:05 | Combustion-assistée par plasma pour la transition écologique | Christophe Laux EM2C, Gif-sur-Yvette |
| 15:25 | Ultrafast laser-induced microplasmas inside band-gap solids: precision and controllability over the spectrum | David Grojo LP3, Marseille |
| 15:45 | Modélisation des propulseurs à résonance électronique cyclotronique : enjeux & problématiques | Paul-Quantin Elias ONERA, Saclay |
| 16:05 | Les plasmas à Retournement Temporel : Vers un contrôle spatio-temporel des plasmas en cavité surmodée à basse pression | Valentin Mazières LAPLACE, Toulouse |
| 16:25 | Pause café | |
| 16:55 | Stands thématiques | |
| | Plasmas magnétisés | Stéphane Béchu (LPSC), Anne Bourdon (LPP), Frédéric Brochard (IJL), Amaël Caillard (GREMI), Alexandre Escarguel (PIIM), Gwénaél Fubiani (LAPLACE), Laurent Garrigues (LAPLACE), Tiberiu Minea (LPGP), Nicolas Plihon (LabPhys), Sédina Tsikata (ICARE) |
| | Diagnostics optiques | Jörg Hermann (LP3), Sylvain Iséni (GREMI), Stéphane Pellerin (GREMI), Sédina Tsikata (ICARE) |
| | Données de base | Mehdi Ayouz (LGPM), Jeoffrey Boffeli (LOMC), Arnaud Bultel (CORIA), Emile Carbone (INRS), Emerance Djuissi (LOMC), Khaled Hassouni (LSPM), Zsolt Mezei (LOMC, Atomki), Armelle Michau (LSPM), Tibériu Minea (LPGP), Jacques Robert (LPGP), Ioan Schneider (LOMC), Laurent Wiesenfeld (LAC) |
| 18:30 | Fin de la journée | |
| 18:30 | Cocktail de bienvenue | |

Mardi 26 octobre

| | | |
|-------|---|---|
| 08:45 | Revue | |
| 08:45 | Chocs produits par laser : Une question de plasma avant tout ? | Laurent Berthe PIMM, Paris |
| 09:30 | Oraux Entrants | |
| 09:30 | Plasma froid en interaction avec gouttelettes liquides: principes fondamentaux et applications | Augusto Stancampiano GREMI, Orléans |
| 09:45 | Topologie d'une surface liquide en interaction avec un jet micro-plasma | Thomas Orrière PPRIME, Poitiers |
| 10:00 | Films de diamant synthétisés par plasmas : du procédé de croissance aux applications | Azadeh Valinattaj Omran LSPM, Villetaneuse |
| 10:15 | Plasmas : de la physique fondamentale aux procédés matériaux | Laurène Youssef IRCER, Limoges |
| 10:30 | Pause café | |
| 11:00 | Ateliers en // - Salles PC41 (DM), PC42 (Laser) et PC 44 (Ions) | |
| | Dynamique moléculaire en plasmas et plasmas/laser | Pascal Brault (GREMI), Emilie Despiau-Pujo (LTM, en visio), Tatiana Itina (LabHC), Maxime Mikikian (GREMI) |
| | Plasmas produits par laser : diagnostics et modélisation | Arnaud Bultel (CORIA), Jörg Hermann (LP3) |
| | Ions négatifs | Stéphane Béchu (LPSC), Gilles Cartry (PIIM), Pascal Chabert (LPP), Gilles Cunge (LTM), Cyril Drag (LPP), Benjamin Esteves (LPP), Gwénaél Fubiani (LAPLACE), Jean-Marc Layet (PIIM), Maxime Mikikian (GREMI) |
| 12:30 | Déjeuner | |
| 14:00 | Revue | |
| 14:00 | Some aspects of reactive thermochemically non-equilibrium plasmas | Khaled Hassouni LSPM, Villetaneuse |
| 14:45 | Sujets d'actu | |
| 14:45 | Dynamique moléculaire et réactivité des plasmas. Application à la dégradation des polluants organiques dans l'eau | Pascal Brault GREMI, Orléans |
| 15:05 | Microfluidique et procédés plasmas pour la synthèse chimique | Michaël Tatoulian IRCP, Paris |
| 15:25 | Claquage laser vs spark : Quelques applications | Stéphane Pellerin GREMI, Bourges |
| 15:45 | Présentation - Echanges | |
| 15:45 | Plasmas/lasers à l'INSIS | Agnès Granier IMN, Nantes Chargée de mission INSIS |
| 16:25 | Pause café | |
| 16:55 | Session Posters | |
| | Caractérisation d'un jet plasma d'argon/CO2 pour traiter des plaies - Eloïse Mestre (GREMI) Controlling perpendicular electric fields with biased electrodes - Baptiste Trotabas (LAPLACE) Décharge plasma sur céramique multicouche - Tom Fridlender (Pprime) Décharges à barrière diélectrique pulsées entre deux plaques et entre une plaque et une surface liquide - Valentin Berry (PPRIME) Detection and elimination of Chromium(VI) Application to the removal of industrial liquid effluents - Truong Son Nguyen (LSPM) Elaboration de films minces de ZnMn2O4 nanocristallin par un plasma RF basse pression - Lounis Hakim Bekkar (LSPM) Étude expérimentale d'une torche à plasma d'arc segmentée - Céline Ruelle (IRCER) Étude préliminaire de l'oxydation d'alliages Fe-Ni, présents dans les débris spatiaux, lors de rentrées atmosphériques terrestres - Morgan Lesage (CORIA) Evolution d'un Plasma d'Air Induit par Impulsion Laser Picoseconde en Présence d'un Champ Magnétique - Paul Dubois (CORIA) Focusing an intense relativistic electron beam for flash radiography - Adrien Dudes (CEA CESTA) Functionalization of MIL-53(Al) by means of ECR plasma treatment: a feasibility study. - Ronny Jean-Marie-Désirée (IJL) Generation of guided streamers in a magnetic-coil plasma gun device (MCPG): influence of electromagnetic induction on propagation and counter-propagation kinetics, Henri Decauchy (LPP) Instabilités dans les décharges E×B des propulseurs à effet Hall - Federico Petronio (LPP) Instant dissipated power monitoring process of a RF atmospheric pressure micro-plasma jet device : application to biological materials - Sylvain Iséni (GREMI) Modeling of air plasma emission in the VUV/UV spectral region - Sean McGuire (EM2C) Parametric study of methane dissociation and deposition rates in a Ar /CH4 RF plasma - Erik Von Wahl (GREMI) Self-organization of weakly magnetized plasmas under external forcing - Alexandre Escarguel (PIIM) Study of abnormal transport in a magnetized plasma column - Surabhi Aggarwal (PIIM) The influence of storage conditions on the anti-cancer efficacy of plasma-treated solutions - Kyriakos Sklias (LPGP) Two-photon absorption laser induced fluorescence (TALIF) : l'hypothèse de fluorescence proportionnelle à la section efficace à deux photons est-elle utilisée à tort et à travers ? - Christophe Blondel (LPP) | |
| 18:30 | Fin de la journée | |

Mercredi 27 octobre

| | | |
|-------|--|---|
| 08:45 | Revue | |
| 08:45 | Décharges dans les liquides : Quels réels apports à la synthèse de nanomatériaux ? | Thierry Belmonte IJL, Nancy |
| 09:30 | Oraux Jeunes | |
| 09:30 | Modélisation de la fluorescence induite par laser à deux photons et des propriétés radiatives des plasmas | Morgan Lesage CORIA, Saint-Étienne du Rouvray |
| 09:45 | Atomic nitrogen absolute density measurements by means of Two photon Absorption Laser Induced Fluorescence in a Micro-Hollow Cathode Discharge | Alice Remigy LSPM, Villeteuse |
| 10:00 | Propulsion d'aéronefs par vent ionique | Sylvain Grosse PPRIME, Poitiers |
| 10:15 | Diagnostics expérimentaux des espèces négatives dans le propulseur PEGASES fonctionnant à l'iode | Benjamin Esteves LPP, Palaiseau |
| 10:30 | Pause café | |
| 11:00 | Ateliers en // - Salles PC41 (AAP), PC42 (Recrutements) et PC 44 (Formations) | |
| | Appels à projets | David Amans (ILM), Agnès Granier (IMN, INSIS), Vincent Rat (IRCER), Weronika Urbanska (DR04) |
| | Recrutements sur des postes académiques | Stéphane Cuynet (IJL), Bernard Dussoubs (IJL), Khaled Hassouni (LSPM), Thomas Maho (DPHE), Kremena Makasheva (LAPLACE), Grégory Marcos (IJL), Françoise Massines (PROMES), Alexandros Mouskeftaras (LP3), Armelle Michau (LSPM), Karim Ouaras (LPICM) |
| | Formations universitaires plasmas/lasers en France | Anne Bourdon (LPP, EUR), Tatiana Juresic (EUR), Nicolas Naudé (LAPLACE), Cathy Rond (LSPM), Gabi-Daniel Stancu (EM2C), Pierre Tardiveau (LPGP) |
| 12:30 | Déjeuner | |
| 14:00 | Sujets d'actu | |
| 14:00 | Réseaux de neurones et modèles réduits pour les plasmas | Laurent Navoret IRMA, Strasbourg |
| 14:40 | Revue | |
| 14:40 | Des processus de base de l'interaction plasma-paroi aux améliorations des performances des plasmas de fusion | Stéphane Heuroux IJL, Nancy |
| 15:25 | Oraux Entrants | |
| 15:25 | Méthode des moments appliquée aux plasmas à basse pression pour la propulsion spatiale | Alejandro Alvarez Laguna LPP, Palaiseau |
| 15:40 | Etude expérimentale du dépôt de l'énergie laser dans l'air: De la génération plasma jusqu'à émission d'une onde de choc | Alexandros Mouskeftaras LP3, Marseille |
| 15:55 | Oraux Jeunes | |
| 15:55 | Mesure OES d'un plasma de CO2 en recombinaison | Corentin Grimaldi EM2C, Gif-sur-Yvette |
| 16:10 | Etude par dynamique moléculaire de la réactivité des espèces neutres principales d'un plasma Ar/CH4 | Glenn Otakandza Kandjani GREMI, Orléans |
| 16:25 | Pause café | |
| 16:55 | Session Posters | |
| | Bipolar hipims for filling silicon trenches and porous substrate - Soumya Atmane (GREMI) Couplage plasma-catalyse hétérogène pour la minéralisation de polluant organique dans l'eau - Olivier Aubry (GREMI) Current injection impacting low frequency waves in a magnetically confined plasma column - Simon Vincent (LabPhys) Dissociation du CO2 et échauffement du gaz dans une décharge nanoseconde pulsée capillaire - Georgy Pokrovskiy (LPP) E-FISH for Electric Field Measurements in Non-Equilibrium Plasmas: Prospects for Future Use - Tat Loon Chng (LPP) Electrical Discharges in Liquid Water: a Global Model for the Breakdown and the Post breakdown - Benjamin Dufour (LSPM) ERIS : Nouveau moyen d'essai pour la propulsion électrique - Victor Désangles (DPHY, ONERA) Etude d'un procédé d'oxydation avancée plasma non thermique / carbone activé fonctionnalisé pour l'élimination de l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4 D) dans l'eau - Mohamed Ali Antoissi (GREMI) Etude de la stabilité d'une torche micro-plasma micro-onde destinée à l'élaboration de matériaux à base de carbone - Abdoulaye Siby (LSPM) Etude du plasma de la Torche à Injection Axiale (TIA) par spectroscopie optique d'émission - Laura Renoux (IRCER) Influence de l'émission stimulée sur le signal de fluorescence induite par absorption de deux photons laser des atomes de krypton déterminée par un système d'excitation et de détection de résolution picoseconde - Laurent Invernizzi (LSPM) Mass spectrometry and surface adsorption measurements in a nanoparticle forming Ar/ethanol RF plasma - Erik Von Wahl (GREMI) Nucléation dans les plasmas RF Ar/C2H2 - Gautier Tétard (LSPM) Oxydation du n-hexane dans l'air par une DBD : efficacité de la décharge et analyse des sous-produits. - Perla Trad (LPGP) Plasma enhanced physical vapor deposition of epitaxial III-V materials (GaN) - Lakshman Srinivasan (LPICM, IPVF) SPEKTRE, futur équipement de recherche d'envergure pour les plasmas magnétisés - Frédéric Brochard (IJL) Sputtering process of Aluminum in Ar/He mixtures - Sara Ibrahim (GREMI) Transferts thermiques à l'interface plasma/solide - Tom Fridlender (PPRIME) Trapped electrons studies of an ECR ion source with new magnetic topology - Arpan Khandelwal (GANIL) | |
| 18:30 | Fin de la journée | |
| 19:30 | Banquet | |

Jeudi 28 octobre

| | | |
|-------|---|--|
| 08:45 | Revue | |
| 08:45 | Décharges contrôlées par barrière diélectrique : Toujours de la nouvelle physique ! | Françoise Massines PROMES, Perpignan |
| 09:30 | Oraux Jeunes | |
| 09:30 | Dispositif de protection microonde par décharge plasma : un modèle numérique auto-consistant confronté aux mesures expérimentales | Lucas Fuster LAPLACE, CEA, ISAE, Toulouse |
| 09:45 | Diffusion Thomson incohérente pour la mesure des propriétés électroniques d'une source ExB | Thibault Dubois ICARE, Orléans |
| 10:00 | Stabilization of a lean premixed flame by nanosecond discharges | Victorien Blanchard EM2C, Gif-sur-Yvette |
| 10:15 | Backward-Facing Step forced flow in a nanosecond pulsed cold atmospheric pressure argon plasma jet | Thibault Darny LPGP, Orsay |
| 10:30 | Pause café | |
| 11:00 | Retour Ateliers - Discussions | |
| 11:45 | Table ronde | |
| 12:20 | Clôture | |
| 12:30 | Déjeuner | |
| 14:00 | Visites laboratoires | |
| 17:00 | Fin de la journée | |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Exposés de revue | 15 |
| Mesure de la densité et température électronique dans les plasmas à pression atmosphérique par méthodes optiques, Sadeghi Nader | 17 |
| Chocs produits par laser : Une question de plasma avant tout ?, Berthe Laurent [et al.] | 18 |
| Some aspects of reactive thermochemically non-equilibrium plasmas, Hassouni Khaled [et al.] | 19 |
| Décharges dans les liquides : quels réels apports à la synthèse de nanomatériaux ?, Belmonte Thierry [et al.] | 20 |
| Des processus de base de l'interaction plasma-paroi aux améliorations des performances des plasmas de fusion, Heuraux Stéphane | 21 |
| Décharges contrôlées par barrière diélectrique : Toujours de la nouvelle physique !, Massines Françoise | 22 |
| Sujets d'actualité | 23 |
| Combustion-assistée par plasma pour la transition écologique, Laux Christophe | 25 |
| Ultrafast laser-induced microplasmas inside band-gap solids: precision and controllability over the spectrum, Grojo David | 26 |
| Modélisation des propulseurs à résonance électronique cyclotronique : enjeux & problématiques, Elias Paul-Quentin | 27 |
| Les plasmas à Retournement Temporel : Vers un contrôle spatio-temporel des plasmas en cavité surmodée à basse pression, Mazières Valentin [et al.] | 28 |
| Dynamique moléculaire et réactivité des plasmas. Application à la dégradation des polluants organiques dans l'eau., Brault Pascal | 29 |
| Microfluidique et procédés plasmas pour la synthèse chimique, Tatoulian Michaël [et al.] | 30 |
| Titre à venir, Pellerin Stéphane | 31 |
| Réseaux de neurones et modèles réduits pour les plasmas, Navoret Laurent [et al.] | 32 |
| Oraux - Entrants | 33 |
| Plasma froid en interaction avec gouttelettes liquides: principes fondamentaux et applications, Stancampiano Augusto [et al.] | 35 |
| Topologie d'une surface liquide en interaction avec un jet micro-plasma, Orriere Thomas [et al.] | 36 |

| | |
|---|-----------|
| Films de diamant synthétisés par plasmas : du procédé de croissance aux applications, Valinattaj Omran Azadeh [et al.] | 37 |
| Plasmas : de la physique fondamentale aux procédés matériaux, Youssef Laurène . | 38 |
| Méthode des moments appliquée aux plasmas à basse pression pour la propulsion spatiale, Alejandro Alvarez Laguna [et al.] | 39 |
| Etude expérimentale du dépôt de l'énergie laser dans l'air: De la génération plasma jusqu'à émission d'une onde de choc, Mouskeftaras Alexandros | 40 |
| Oraux - Jeunes | 41 |
| Modélisation de la fluorescence induite par laser à deux photons et des propriétés radiatives des plasmas., Lesage Morgan [et al.] | 43 |
| Atomic nitrogen absolute density measurements by means of Two photon Absorption Laser Induced Fluorescence in a Micro-Hollow Cathode Discharge, Remigy Alice [et al.] | 44 |
| Propulsion d'aéronefs par vent ionique, Grosse Sylvain [et al.] | 45 |
| Diagnostics expérimentaux des espèces négatives dans le propulseur PEGASES fonctionnant à l'iode, Esteves Benjamin [et al.] | 46 |
| Mesure OES d'un plasma de CO2 en recombinaison, Grimaldi Corentin [et al.] . . | 47 |
| Etude par dynamique moléculaire de la réactivité des espèces neutres principales d'un plasma Ar/CH4, Otakandza Kandjani Glenn Christopher [et al.] | 48 |
| Dispositif de protection micro-onde par décharge plasma : un modèle numérique auto-consistant confronté aux mesures expérimentales, Fuster Lucas [et al.] | 49 |
| Diffusion Thomson incohérente pour la mesure des propriétés électroniques d'une source ExB, Dubois Thibault [et al.] | 50 |
| Stabilization of a lean premixed flame by nanosecond discharges, Blanchard Victorien [et al.] | 51 |
| Backward-Facing Step forced flow in a nanosecond pulsed cold atmospheric pressure argon plasma jet, Darny Thibault [et al.] | 52 |
| Session Posters - Mardi | 53 |
| Caractérisation d'un jet plasma d'argon/CO2 pour traiter des plaies, Mestre Eloïse [et al.] | 55 |
| Controlling perpendicular electric fields with biased electrodes, Trotabas Baptiste [et al.] | 56 |
| Décharge plasma sur céramique multicouche, Fridlender Tom [et al.] | 57 |
| Décharges à barrière diélectrique pulsées entre deux plaques et entre une plaque et une surface liquide, Berry Valentin [et al.] | 58 |
| Detection and elimination of Chromium(VI) Application to the removal of industrial liquid effluents, Nguyen Truong Son [et al.] | 59 |
| Elaboration de films minces de ZnMn2O4 nanocristallin par un plasma RF basse pression, Bekkar Lounis Hakim [et al.] | 60 |
| Étude expérimentale d'une torche à plasma d'arc segmentée, Ruelle Céline [et al.] | 61 |
| Étude préliminaire de l'oxydation d'alliages Fe-Ni, présents dans les débris spatiaux, lors de rentrées atmosphériques terrestres, Lesage Morgan [et al.] | 62 |

| | |
|--|-----------|
| Evolution d'un Plasma d'Air Induit par Impulsion Laser Picoseconde en Présence d'un Champ Magnétique, Dubois Paul [et al.] | 63 |
| Focusing an intense relativistic electron beam for flash radiography, Dudes Adrien [et al.] | 64 |
| Functionalization of MIL-53(Al) by means of ECR plasma treatment: a feasibility study., Jean-Marie-Desiree Ronny [et al.] | 65 |
| Generation of guided streamers in a magnetic-coil plasma gun device (MCPG): influence of electromagnetic induction on propagation and counter-propagation kinetics, Decauchy Henri [et al.] | 66 |
| Instabilités dans les décharges $E \times B$ des propulseurs à effet Hall, Petronio Federico [et al.] | 67 |
| Instant dissipated power monitoring process of a RF atmospheric pressure micro-plasma jet device : application to biological materials, Iséni Sylvain [et al.] | 68 |
| Modeling of air plasma emission in the VUV/UV spectral region, Mcguire Sean [et al.] | 69 |
| Parametric study of methane dissociation and deposition rates in a Ar/CH4 RF plasma, Von Wahl Erik [et al.] | 70 |
| Self-organization of weakly magnetized plasmas under external forcing, Agullo Olivier [et al.] | 71 |
| Study of abnormal transport in a magnetized plasma column, Aggarwal Surabhi . | 72 |
| The influence of storage conditions on the anti-cancer efficacy of plasma-treated solutions, Sklias Kyriakos | 73 |
| Two-photon absorption laser induced fluorescence (TALIF) : l'hypothèse de fluorescence proportionnelle à la section efficace à deux photons est-elle utilisée à tort et à travers ?, Blondel Christophe [et al.] | 74 |
| Session Posters - Mercredi | 75 |
| Bipolar hipims for filling silicon trenches and porous substrate, Caillard Amael [et al.] | 77 |
| Couplage plasma-catalyse hétérogène pour la minéralisation de polluant organique dans l'eau, Aubry Olivier | 78 |
| Current injection impacting low frequency waves in a magnetically confined plasma column, Vincent Simon [et al.] | 79 |
| Dissociation du CO2 et échauffement du gas dans une décharge nanoseconde pulsée capillaire, Pokrovskiy Georgy [et al.] | 80 |
| E-FISH for Electric Field Measurements in Non-Equilibrium Plasmas: Prospects for Future Use, Chng Tat Loon [et al.] | 81 |
| Electrical Discharges in Liquid Water: a Global Model for the Breakdown and the Post breakdown, Dufour Benjamin [et al.] | 82 |
| ERIS : Nouveau moyen d'essai pour la propulsion électrique, Désangles Victor . . | 83 |
| Etude d'un procédé d'oxydation avancée plasma non thermique / carbone activé fonctionnalisé pour l'élimination de l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4 D) dans l'eau, Antoissi Mohamed Ali | 84 |
| Etude de la stabilité d'une torche micro-plasma micro-onde destinée à l'élaboration de matériaux à base de carbone, Siby Abdoulaye [et al.] | 85 |

| | |
|---|-----------|
| Etude du plasma de la Torche à Injection Axiale (TIA) par spectroscopie optique d'émission, Renoux Laura | 86 |
| Influence de l'émission stimulée sur le signal de fluorescence induite par absorption de deux photons laser des atomes de krypton déterminée par un système d'excitation et de détection de résolution picoseconde, Invernizzi Laurent [et al.] | 87 |
| Mass spectrometry and surface adsorption measurements in a nanoparticle forming Ar/ethanol RF plasma, Von Wahl Erik [et al.] | 88 |
| Nucléation dans les plasmas RF Ar/C ₂ H ₂ , Tetard Gautier [et al.] | 89 |
| Oxydation du n-hexane dans l'air par une DBD : efficacité de la décharge et analyse des sous-produits., Trad Perla [et al.] | 90 |
| Plasma enhanced physical vapor deposition of epitaxial III-V materials (GaN), Srinivasan Lakshman [et al.] | 91 |
| SPEKTRE, futur équipement de recherche d'envergure pour les plasmas magnétisés, Brochard Frédéric [et al.] | 92 |
| Sputtering process of Aluminum in Ar/He mixtures, Ibrahim Sara [et al.] | 93 |
| Transferts thermiques à l'interface plasma/solide, Fridlender Tom [et al.] | 94 |
| Trapped electrons studies of an ECR ion source with new magnetic topology, Khandelwal Arpan [et al.] | 95 |
| Liste des auteurs | 96 |

Exposés de revue

Mesure de la densité et température électronique dans les plasmas à pression atmosphérique par méthodes optiques

N. Sadeghi

Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM) et Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy), Université Grenoble-Alpes et CNRS, Grenoble
mél: nader.sadeghi@univ-grenoble-alpes.fr

Dans des plasmas à pression atmosphérique, les techniques usuelles pour caractériser les électrons du plasma, comme sonde de Langmuir (SdL), interférométrie micro-onde (μo) et shift en fréquence de résonance de la cavité résonnant contenant le plasma ou de la sonde "hairpin" plongée dans le plasma, ne peuvent plus être utilisées. Les collisions e-neutre rendent difficiles l'interprétation des caractéristiques V-I de la SdL et élargissent fortement la courbe de résonance dans les cas de μo et "hairpin". Dans cet exposé, trois techniques basées sur les informations transportées par les photons seront présentées et leurs points forts et inconvénients seront discutés.

1- Elargissement Stark de raies spectrales.

La raie émise, ou absorbée par un atome plongé dans le plasma est élargie par les collisions avec les électrons et les ions de son environnement. La théorie de ce phénomène est bien connue et le coefficient d'élargissement Stark d'un grand nombre de raies de plusieurs atomes a été rapporté dans [1]. Il faut mentionner que la raie H_β de l'hydrogène (486.3 nm) présente la plus grande sensibilité (~ 40 pm (FWHM) pour $n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$) [2]. Toutefois, la raie est également élargie par collision avec les neutres, dont la contribution doit être retranchée. Ceci nécessite une bonne connaissance de la pression et la température du gaz et la possession d'un spectromètre de bonne résolution spectrale.

2- Spectre d'émission de continuum

Lors d'une collision élastique e-neutre, le ralentissement de l'électron est accompagné de l'émission de rayonnement couvrant le domaine visible (bremsstrahlung) dont l'intensité absolue est proportionnelle à n_e et la distribution spectrale dépend de la fonction de distribution de l'énergie des électrons (*edf*), donc de T_e . [3] et ses références informent sur les relations reliant l'intensité du spectre enregistré à n_e et T_e . Les points faibles de cette technique sont la faible section efficace de l'émission de continuum et le besoin d'une calibration en absolue de l'intensité spectrale émise [3].

3- Diffusion Thomson

La diffusion d'un faisceau laser à la longueur d'onde λ_0 par un électron s'accompagne d'un déplacement Doppler du photon, ($\Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$), v et c étant les vitesses de l'électron selon la ligne d'observation et celle de la lumière. Ainsi, l'intensité de la lumière diffusée informe sur la valeur de n_e et sa distribution spectrale renseigne sur *edf*, donc de T_e . La difficulté majeure de cette technique réside en élimination de la lumière parasite et celle de la diffusion Rayleigh, à la longueur d'onde λ_0 . Pour longtemps, cette élimination se faisait à l'aide des spectromètres à 3 réseaux de diffraction (TGS) [4]. Mais depuis peu, un filtre "notch" à réseau de diffraction Bragg a été développé, permettant une élimination très efficace de la lumière parasite à λ_0 [4, 5].

Références

- [1] N. Konjevic, A. Lesage, J.R. Fuhr and W.L. Wiese, J. Phys. Chem. Ref. Data **31**, 819 (2002)
- [2] S.G. Belostotskiy, T. Ouk, V.M. Donnelly, D.J. Economou and N. Sadeghi, J. Appl. Phys. **107**, 053305 (2010) _
- [3] G. Nayak, M.S. Simeni, J. Rosato, N. Sadeghi et P.J. Bruggeman, J. Appl. Phys. **128**, 243302 (2020)
- [4] B. Vincent, S. Tsikata, S. Mazouffre, T. Minea and J. Fils, Plasma Sources Sci. Technol. **27** 055002 (2018)
- [5] Y. Yue, V.S.S Kondeti, N. Sadeghi et P.J. Bruggeman, PSST **30** (2021)

Statut :

Chocs produits par laser : Une question de plasma avant tout ?

Laurent Berthe¹, Laurent Videau²

¹ Laboratoire PIMM, UMR 8006 ENSAM CNRS

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

mél: laurent.berthe@cnrs.fr

Le choc laser consiste en l'utilisation de plasmas hautes pressions (GPa) produits par laser à moyen flux (1-100 GW/cm²) dans la gamme de durée du ns (1-40 ns). En réaction à la détente de ce plasma, une onde de choc se propage dans le matériau. Elle peut améliorer les performances des surfaces métalliques en générant un champ de contrainte résiduelles de compression (Laser Shock Peening). Elle peut aussi produire des phénomènes locaux de traction pour solliciter les interfaces (Test d'adhérence) et endommager les matériaux. La maîtrise du chargement est l'enjeu majeur de ces applications. En effet, la sensibilité des procédés est liée à une maîtrise du chargement de pression et donc de l'interaction laser matière. En laboratoire, les plasmas sont produits sous vide alors que pour les applications industrielles le régime confiné est privilégié. La surface cible est recouverte par un matériau transparent au laser limitant la détente du plasma. Celui est dense (densité proche du solide) et froid (quelques eV). Les récentes recherches [1][2] ont permis des avancées significatives en s'appuyant sur de nouveaux moyens expérimentaux et modèles numériques. L'objectif de cette présentation est un de faire un état de l'art sur ces derniers travaux dont les résultats ont fourni pour la première fois par exemple des données microscopiques sur les plasmas produits. Ils seront aussi mis dans le contexte des applications en relation avec les propriétés mécaniques des matériaux et les enjeux sociétaux associés.

Références

- [1] Scius-Bertrand, M., Videau, L., Rondepierre, A., Lescoute, E., Rouchausse, Y., Kaufman, J., Rostohar, D., Brajer, J., & Berthe, L. (2020). Journal of Physics D: Applied Physics, 54(5), 55204. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abc040>
- [2] Le Bras, C., Rondepierre, A., Seddik, R., Scius-Bertrand, M., Rouchausse, Y., Videau, L., Fayolle, B., Gervais, M., Morin, L., Valadon, S., Ecault, R., Furfari, D., & Berthe, L. (2019). Metals, 9(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/met9070793>
- [3] Rondepierre A, Ünaldi, S, Rouchausse, Y., Videau, L., Fabbro, R., Casagrande, O., Simon-Boisson, C., Besaucéle H., Castelnaud, O., Berthe, L. (2021) Optics & Laser Technology 135, 106689, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106689>
- [4] Ünaldi, S., Papadopoulos, K., Rondepierre, A., Rouchausse, Y., Karanika, A., Deliane, F., Tserpes, K., Floros, G., Richaud, E., & Berthe, L. (2021). 141, 107095. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107095>
- Sagnard, M., Ecault, R., Touchard, F., Boustie, M., & Berthe, L. (2019). Optics and Laser Technology, 111(October 2018), 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.052>

Some aspects of reactive thermochemically non-equilibrium plasmas

G. Tetard, G. Lombardi, F. Mohasseb, A. Michau, S. Prasanna, X. Duten, F. Benedic, K. Hassouni, M. Redolfi, J. Mougenot, A. Allouch, K. Ouaras, C. Arnas*, C. Rond, S. Longo**

Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, LSPM, CNRS, UPR 3407, F-93430, Villetaneuse, France

** LPIIM, Aix-Marseille université, CNRS, Campus Saint Jérôme, 13397 Marseille, France*

*** Department of Chemistry, University of Bari, via E. Orabona 4, 70126 Bari, Italy*

In this presentation we discuss some of the peculiarities of thermo-chemically non-equilibrium effects characterizing reactive electrical discharges and plasma flows. Although, the presentation will mainly use illustrative examples from numerical modeling studies, a brief discussion related to the different measurements that are needed to support model developments, validate modeling results and gain insight in the chemical physics of reactive plasmas will be hopefully also carried out at the end of the presentation.

We start by discussing electron kinetics in non-equilibrium plasmas and analyzing the different assumptions made and model used to determine the electron energy distribution functions in different non equilibrium situations. We will also discuss the impact of these assumptions on the description of energy dissipation and chemical kinetics. We will first discuss some collisional radiative models that are specific to plasmas generated in 'simple' molecular gases such as hydrogen or nitrogen. We will especially shows how the vibrational kinetics can play a role in the production of N-atom in nitrogen plasmas on one hand, and how the electronically excited states kinetics can contribute to the ionization kinetics in hydrogen plasmas on the other hand. Then we will consider hydrocarbon containing plasmas that show a much more complex and stiff chemistry and emphasize the non-equilibrium transport-chemistry effects induced by the electron component in these plasmas. We will also show how the chemistry may affect the discharge dynamics and the electromagnetic power deposition in RF and microwave discharges. We further discuss some examples of molecular growth and dust particle nucleation in carbon containing discharges. We will mainly focus on analyzing the interplay between discharge dynamics and chemistry and on identifying the key precursor species and governing process for particle nucleation in electrical discharges. We end up by showing some examples where reactive plasmas may transitions to dusty plasmas and discussing the coupling between discharge dynamics, aerosol dynamics and plasma chemistry.

Décharges dans les liquides : quels réels apports à la synthèse de nanomatériaux ?

A. V. Nominé¹, Th. Gries¹, C. Noel¹, A. Nominé^{1,2}, V. Milichko^{1,2}, T. Belmonte^{1*}

¹ Université de Lorraine, CNRS, IJL, F-54000 Nancy, France

² ITMO University, St. Petersburg 197101, Russia

* Email: thierry.belmonte@univ-lorraine.fr

Les applications des décharges dans les liquides connaissent aujourd'hui de nouvelles perspectives, en particulier dans le domaine de la synthèse de nanomatériaux. Il est possible en effet de fabriquer des nanoparticules de nouveaux matériaux (structures métal-organiques (MOF), nouvelles formes allotropiques d'oxydes métalliques, pérovskites), de nouveaux alliages (alliages de hautes entropies, alliages métalliques complexes), voire même d'alliages d'éléments non-miscibles (cuivre-argent, or-fer, or-silicium, etc.). Il est aussi désormais possible d'assembler des particules en chapelet par des nouveaux mécanismes, différents de la diélectrophorèse, de former massivement des objets bidimensionnels de quelques mono-feuillets seulement et même de synthétiser des mousses métalliques.

Ces résultats marquants résultent d'une meilleure compréhension des mécanismes d'érosion des électrodes qui sont à l'origine des nano-objets formés dans les liquides. Le recours à des matériaux en couches minces lors de procédés dynamiques (déplacements des électrodes par exemple), l'utilisation de pré-traitements des électrodes, ont récemment permis également de modifier drastiquement les nano-objets formés.

Les raisons de ces évolutions tiennent principalement au besoin de nouveaux matériaux pour répondre aux grands enjeux d'aujourd'hui : catalyseurs performants pour la synthèse de nouveaux carburants, dispositifs optiques et/ou magnétiques efficaces pour le stockage de l'information ou encore éléments actifs (vectorisation) ou passifs (théranostique) pour la santé. Les propriétés originales de ces nouveaux nano-objets ouvrent ainsi la voie à des applications plus performantes ou même à de nouvelles applications.

Quelques verrous restent néanmoins à lever. La sélectivité des procédés, le contrôle des tailles caractéristiques, la maîtrise des compositions s'obtiennent souvent, par exemple, au prix de post-traitements complexes et peu compatibles avec les exigences environnementales et énergétiques modernes. L'accès aux paramètres de base des décharges demeure une question récurrente, mais si, là encore, des avancées importantes ont récemment permis d'améliorer notre compréhension des mécanismes physiques qui contrôlent la formation et la propagation de ces milieux souvent relativement proches de l'équilibre.

Des processus de base de l'interaction plasma-paroi aux améliorations des performances des plasmas de fusion

S. Heuraux¹, J. Moritz¹, E. Faudot¹, F. Brochard¹, N. Lemoine¹, L. de Poucques¹, A. Cherukulappurath Mana¹, P. Hiret², R. Steiner², L. Marot², I. Furno³, S. Alberti³

¹ Institut Jean Lamour, Université de Lorraine-CNRS, ARTEM, Nancy, France

² Département de Physique, Université de Bâle, Bâle, Suisse

³ École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Swiss Plasma Center, Lausanne, Suisse

courriel: stephane.heuraux@univ-lorraine.fr

La compréhension des phénomènes présents lorsqu'un plasma est au contact d'une enceinte ou d'une paroi avec ou sans neutre en présence ou non d'un champ magnétique, ou/et de champs électromagnétiques [1,2] passe par la mise en place de modèles où interviennent des hypothèses simplificatrices dont les limites ont des contours souvent difficiles à appréhender. Le lien entre quasi-neutralité et potentiel plasma sera discuté dans différents cas ainsi que les effets résultants sur la surface matérielle exposée au plasma en termes de flux de particules et d'énergie et leurs conséquences. Le choix du tungstène pour les composants face au plasma de fusion sera ainsi expliqué. Un regard particulier sera porté sur le cas des "divertors" utilisés dans les expériences actuellement menées dans les plasmas confinés magnétiquement pour évacuer la puissance et les particules sortantes de la configuration magnétique fermée [3].

Pour appréhender le fonctionnement et déterminer la configuration optimale de ces divertors, il est d'ailleurs nécessaire de décrire le comportement des gaines en présence de champ magnétique pour différents angles d'incidence des lignes de champ magnétique sur la paroi [4]. Le rôle des champs radiofréquences sur les gaines sera aussi abordé vu les effets néfastes observés dans les tokamaks (points chauds sur la paroi, forte injection d'impuretés) ainsi que la parade mise en place pour les réduire de façon considérable. Cette parade résulte de la pleine compréhension des phénomènes mis en jeu tels que le couplage antenne-plasma incluant les courants RF induits sur la structure d'antenne et les processus de génération et de redressement des potentiels radiofréquence (RF).

La configuration divertor peut encore être améliorée en introduisant le phénomène de détachement [5] qui permet de convertir une partie de l'énergie thermique du plasma allant à la paroi en rayonnement pour réduire les phénomènes d'érosion et d'augmenter la durée de vie des divertors, point important concernant la viabilité des réacteurs à fusion. Toutefois ce régime de détachement présente différents types de bifurcation et leur stabilisation reste un sujet d'étude [6] afin qu'il devienne un régime maîtrisé applicable aux réacteurs à fusion. Une information sur la réalisation d'un plasma haute performance en régime divertor détaché [7] ainsi que la mise en place d'une nouvelle expérience SPEKTRE dévolue en partie aux phénomènes présentés termineront la présentation.

Références

[1] P. C. Stangeby "The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices" Ins. of Physics Publishing, 2000.

[2] P. Chabert, N. Braithwaite "Physics of Radio-Frequency Plasmas" Cambridge Univ. Press, 2011.

[3] W. Fundamenski "Power exhaust in fusion plasmas" Cambridge University Press, 2010.

[4] J. Moritz *et al* "Sheath size and Child–Langmuir law in one dimensional bounded plasma system in the presence of an oblique magnetic field: PIC results" 2021 Phys. Plasmas **28**, 083501.

[5] P.C. Stangeby "Basic physical processes and reduced models for plasma detachment" 2018 Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 044022.

[6] S. Krasheninnikov, A. S. Kukushkin "Physics of ultimate detachment of a tokamak divertor plasma" 2017 J. Plasma Phys. **83**, 155830501.

[7] L. Wang *et al* "Integration of full divertor detachment with improved core confinement for tokamak fusion plasmas" 2021 Nature communications **12**:1365.

Décharges contrôlées par barrière diélectrique : Toujours de la nouvelle physique !

F. Massines¹

¹PROMES, CNRS, UPR 8521, Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan
mél: francoise.massines@promes.cnrs.fr

Une solution robuste pour générer un plasma froid à la pression atmosphérique consiste à mettre un diélectrique solide entre les électrodes. Ainsi, dès le début du claquage du gaz, les surfaces du diélectrique se chargent ce qui diminue la tension appliquée sur le gaz et bloque son développement. Ces décharges sont des décharges contrôlées par barrière diélectrique, DBD qui ont beaucoup d'applications industrielles : ozoneur, source de lumière, traitement de surface... Pour certaines de ces applications, il ne suffit pas de générer un plasma froid il faut aussi uniformiser l'injection de l'énergie dans le gaz. En effet lorsque la distance interélectrode est de l'ordre du millimètre ou plus, à pression atmosphérique, le claquage du gaz se fait via la formation d'un streamer, lié à la formation d'une charge d'espace qui localise le champ électrique et conduit au développement d'un canal de décharge dont le rayon est de l'ordre de 100µm. Des solutions pour éviter la formation des streamers ont été trouvées, elles conduisent à des décharges de Townsend ou des décharges lumineuses suivant le niveau d'ionisation qui peut être obtenu sans former de streamer.

Des travaux récents montrent que la forme de la tension change de plusieurs ordres de grandeur la densité des espèces énergétiques : électrons, ions, états métastables du gaz vecteur. L'exposé montrera les résultats d'expériences et de modélisation obtenus pour différentes tensions et s'attachera à expliquer la physique des décharges observées. Tout d'abord, des résultats pour des fréquences sinusoïdales variant de la basse fréquence (kHz) à la radiofréquence (13,56 MHz) [1-2] ainsi que pour des tensions nanoimpulsionnelles répétitives seront présentés. Ensuite, les conséquences de l'application d'une tension différente sur chaque électrode seront décrites. Le cas de la décharge RF/BF sera plus détaillé, montrant que dans tous les cas, la décharge est une décharge RF et qu'elle peut s'éteindre lorsque l'amplitude de la tension BF est à son maximum ou au contraire atteindre pendant environ une microseconde le régime gamma associé à l'auto-entretien de la décharge dans la gaine, comme illustré sur la Figure 1 [3-5].

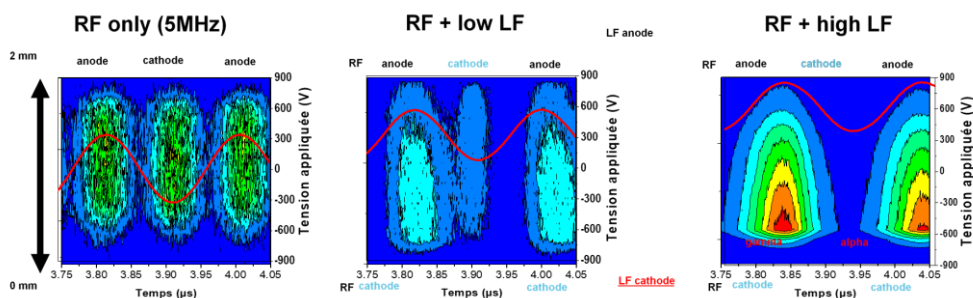


Figure 1: DBD RF/BF, variation à l'échelle RF de la distribution spatiotemporelle de l'émission de l'Argon à 750nm sans polarisation, avec une faible tension BF (mode alpha « étouffé » qui peut aller jusqu'à l'extinction de la décharge quand les cathodes RF et BF ne sont pas les mêmes électrodes et avec une polarisation d'amplitude suffisante pour obtenir le régime gamma quand la même électrode est la cathode RF et la cathode BF.

- [1] R. Bazinette, R. Subileau, J. Paillol, F. Massines, PSST, 23 035008, (2014)
- [2] J-S Boisvert, L. Stafford, N. Naudé, J Margot, F Massines, PSST, 27 035005 (2018)
- [3] R. Magnan, G. J M Hagelaar, M. Chaker and F. Massines, PSST, 29(3) 29 035009 (2020),
- [4] R. Bazinette, N. Sadeghi, F. Massines, PSST, 29(9), 29 095010, (2020)
- [5] R. Magnan, G. J M Hagelaar, M. Chaker, F. Massines, PSST, 30(1), 30 015010, (2021)

Statut : Permanent

Session - Sujets d'actualité

Combustion-assistée par plasma pour la transition écologique

C.O. Laux¹

¹Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, 8-10 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette

mél: christophe.laux@centralesupelec.fr

Pour lutter contre les changements climatiques, il est urgent de réduire les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles, qui représentent aujourd'hui plus de 80% de la production d'énergie primaire. Des solutions électrifiées propres se profilent à l'horizon, mais il est peu probable qu'elles atteignent un développement commercial avant 2040. De nouvelles technologies de combustion neutres en CO₂ (biocarburants) ou sans CO₂ (H₂) sont largement envisagées, mais ces technologies sont confrontées à des réglementations de plus en plus strictes en matière d'émissions de polluants, notamment des oxydes d'azote et de monoxyde de carbone. Pour réduire les polluants, la stratégie consiste à utiliser des flammes à basse température obtenues grâce à des mélanges pauvres en carburant. Cependant, ces flammes sont sujettes à des instabilités et à l'extinction, ce qui pose des problèmes de sécurité. La combustion assistée par plasma (PAC) est une méthode très prometteuse pour stabiliser les flammes à basse température grâce à l'extraordinaire capacité des décharges plasma à produire efficacement des radicaux améliorant la combustion. Aujourd'hui, cependant, ses effets sur les polluants sont mal compris et son adaptabilité aux chambres de combustion industrielles reste à prouver.

Pour résoudre ces limitations, il est important d'élucider les mécanismes thermochimiques de stabilisation du plasma dans les flammes CH₄- et H₂-air et leur impact sur les émissions de polluants. Cette présentation détaillera l'état de l'art des connaissances sur la combustion assistée par plasma, avec une attention particulière aux effets chimiques, thermiques et hydrodynamiques induits par les décharges nanosecondes. Les questions en suspens et les pistes d'amélioration envisagées seront ensuite évoquées.



Figure 1 : Stabilisation de flamme pauvre propane-air par décharge plasma nanoseconde

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme ERC GreenBlue et du programme ANR Pastec.

Statut : permanent

Ultrafast laser-induced microplasmas inside band-gap solids: precision and controllability over the spectrum

D. Grojo¹

¹*Aix Marseille University, CNRS, LP3, UMR7341, 13288 Marseille, France*

Email : david.grojo@univ-amu.fr

High-peak power compact femtosecond lasers allow strong-field interactions that are the basis for high-precision laser processing. However, a relatively narrow region of the spectrum remains exploited today in this field. We study femtosecond laser interactions in various band-gap materials at non-conventional driving wavelengths up to the mid-infrared part of the spectrum.

The range of nonlinear responses accessible by radiation tuning allows revisiting questions as important as the achievable precision in surface machining technologies. In particular, we establish that the concept of nonlinear resolution is not applicable for femtosecond laser ablation. Independently of the nonlinearity of interaction, we find a systematic one-to-one mapping between femtosecond laser ablation features in dielectrics and beam contours at a strict threshold-intensity [1]. This is because any observable based on a threshold-based response (as ablation) simply ruins all potential benefits that could be expected on resolution from the nonlinear confinement of absorption. Another important consequence is that the achievable precision and repeatability can be directly derived from the level of determinism of the interaction. By comparing the results of a simple 'noise' model accounting for laser fluctuations and statistical analyses of ablation experiments, we quantify the degradation of the machining repeatability with increased pulse duration [2]. In this way, we assess the precision limits in laser machining. Overall, these works indicate that stable UV sources must provide a direct route to reach the nanoscale resolutions routinely achieved in lithography.

At the opposite side of the spectrum, ultrashort infrared laser pulses open a way for internal structuring of semiconductor materials that are extremely challenging to process in the three dimensions (3D writing) [3]. Our first proposed solution used hyper-focused beams to achieve microplasmas up to permanent modifications in the bulk of silicon with sub-100-fs pulses [4]. For more practical alternatives, we rely today on optimizations in the time domain. We investigate the picosecond regime limiting the nonlinearities and improving the process reliability by provoking progressive thermal band gap closure to assist pulse energy deposition [5,6]. Another approach is to rely on transient accumulation strategies. To this aim, we generate and apply ultrafast trains of pulses at up to Terahertz repetition-rates [7]. An important aspect also addressed by our experiments is the unusually high sensitivity of 3D writing in semiconductors to the temporal contrast of the pulses [8]. This causes laser-technology dependent results and represents an important finding for a comprehensive reading of the literature on this topic. Taken these approaches together, we introduce unique multi-timescale control parameters exploited for improved energy coupling and reliable 3D laser writing deep inside silicon chips that would not be possible otherwise.

References

- [1] M. Garcia Lechuga, et al. Evidencing the nonlinearity independence of resolution in femtosecond laser ablation, *Optics Letters* 45, 952-955 (2020).
- [2] M. Garcia Lechuga, et al. Assessing the limits of determinism and precision in ultrafast laser ablation, *Applied Physics Letters* 117, 171604. (2020).
- [3] A. Wang, et al. Three-dimensional luminescence microscopy for quantitative plasma characterization in bulk semiconductors *Applied Physics Letters* 119, 041108 (2021)
- [4] M. Chanal, et al. Crossing the threshold of ultrafast laser writing in bulk silicon. *Nature Communications* 8, 773 (2017).
- [5] M. Chambonneau, et al. Competing nonlinear delocalization of light for laser inscription inside silicon with a 2- μm picosecond laser. *Physical Review Applied* 12, 024009 (2019) ; A. Das, et al. Pulse duration dependence of laser-induced modifications inside silicon *Optics Express* 28, 26623 (2020).
- [7] A. Wang, et al. Ultrafast Laser Writing Deep Inside Silicon with THz-repetition-rate Trains of Pulses, *Research* 8149764 (2020).
- [8] A. Wang, et al. Temporal Contrast Imperfections as Drivers for Ultrafast Laser Modifications in Bulk Silicon, *Physical Review Research* 2, 033023 (2020)

Modélisation des propulseurs à résonance électronique cyclotronique : enjeux & problématiques

P.-Q Elias¹, J. Porto Hernandez¹

¹DPHY, ONERA, Université Paris Saclay F-91123 Palaiseau - France

mél: elias@onera.fr

L'utilisation de la résonance cyclotronique électronique pour la création et le chauffage du plasma d'un propulseur plasmique est une idée qui a été considérée dès les premiers travaux sur la propulsion spatiale [1], [2]. L'utilisation de sources ECR pour la génération d'ions dans des propulseurs à grille a été démontrée en vol [3], l'utilisation de sources plasma ouvertes a fait l'objet de peu de travaux, ceci étant peut-être lié à la taille de structures de couplages par guide d'onde. Pourtant, en permettant l'accélération et l'éjection d'un plasma quasi-neutre, cette approche évite l'utilisation de grilles accélératrices et de neutraliseur, ce qui en fait une solution attractive pour réduire les coûts et augmenter la fiabilité des systèmes de propulsion. Récemment un concept de propulseur utilisant un couplage coaxial a été proposé à l'ONERA [4]. Cette approche permet la réalisation de sources compactes ; les travaux expérimentaux ont montré l'intérêt de cette configuration qui permet d'atteindre des efficacités intéressantes même à faible puissance[5], [6].

Toutefois, comme souvent en propulsion plasmique, les développements expérimentaux et empiriques devancent la compréhension théorique des processus physiques à l'œuvre dans le plasma. En effet, les mécanismes de transfert de puissance entre l'onde électromagnétique et le plasma restent pour l'instant partiellement compris. La source ECR peut être classée comme une source à champ E et B croisés : dès lors, les mécanismes de diffusion aux parois peuvent présenter des similitudes importantes à ce qui est considéré pour d'autres sources de ce type (ex. propulseur à courant de Hall). Enfin le confinement des électrons et la polarisation du propulseur restent dans une enceinte à vide ou dans un milieu ouvert restent également mal compris.

En s'appuyant sur des observations expérimentales, cet exposé proposera d'examiner ces différentes questions scientifiques posées par ce type de propulseur ECR. L'état actuel des efforts pour y répondre sera ensuite résumé.

Références

- [1] D. MILLER, E. GIBBONS, et P. GLOERSEN, « CYCLOTRON RESONANCE PROPULSION SYSTEM », in *Electric Propulsion Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.1963-2.
- [2] M. Nagatomo, « Plasma acceleration by high frequency electromagnetic wave in static magnetic field gradient », in *6th Electric Propulsion and Plasmadynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1967. doi: 10.2514/6.1967-660.
- [3] H. Kuninaka, K. Nishiyama, I. Funaki, T. Yamada, Y. Shimizu, et J. Kawaguchi, « Powered Flight of Electron Cyclotron Resonance Ion Engines on Hayabusa Explorer », *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, n° 3, p. 544-551, 2007, doi: 10.2514/1.25434.
- [4] F. Cannat, T. Lafleur, J. Jarrige, P. Chabert, P.-Q. Elias, et D. Packan, « Optimization of a coaxial electron cyclotron resonance plasma thruster with an analytical model », *Phys. Plasmas*, vol. 22, n° 5, p. 053503, mai 2015, doi: 10.1063/1.4920966.
- [5] T. Vialis, J. Jarrige, A. Aanesland, et D. Packan, « Direct Thrust Measurement of an Electron Cyclotron Resonance Plasma Thruster », *Journal of Propulsion and Power*, vol. 34, n° 5, p. 1323-1333, sept. 2018, doi: 10.2514/1.B37036.
- [6] S. Peterschmitt et D. Packan, « Impact of the Microwave Coupling Structure on an Electron-Cyclotron Resonance Thruster », *Journal of Propulsion and Power*, p. 1-10, sept. 2021, doi: 10.2514/1.B38156.

Statut :

Les plasmas à Retournement Temporel : Vers un contrôle spatio-temporel des plasmas en cavité surmodée à basse pression

V.Mazières¹, R.Pascaud², L.Liard¹, S.Dap¹, R.Clergereaux¹ et O.Pascal¹

¹Laboratoire LAPLACE, université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31077 Toulouse

²ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, France

mél: valentin.mazieres@laplace.univ-tlse.fr

L'objectif de cette communication est de présenter le concept de la source plasma innovante que nous avons introduite récemment, à savoir la "Space-Time Plasma Steering Source" (STPSS). Elle a été introduite pour relever le défi du contrôle des plasmas dans les grandes cavités, qui a été identifié dans la littérature [1]. La difficulté vient du caractère « surmodé » des grandes cavités, qui empêche le contrôle spatial de la distribution du champ par les techniques « modales » usuelles (*i.e.* consistant à exciter un ou plusieurs modes de résonance à une certaine fréquence d'excitation) [2].

Contrairement aux technologies conventionnelles de plasmas micro-ondes, l'idée n'est pas d'allumer un plasma occupant tout le volume d'un réacteur plasma, mais plutôt d'allumer un plasma localisé dont l'emplacement dans le réacteur peut être contrôlé dynamiquement. Ce contrôle dynamique est rendu possible en modifiant la forme d'onde temporelle du signal $s(t)$ transmis à une cavité surmodée. C'est alors le comportement des ondes à l'intérieur de la cavité qui contrôle la localisation du plasma, d'où le nom de "Space-Time Plasma Steering Source" (voir Figure 1).

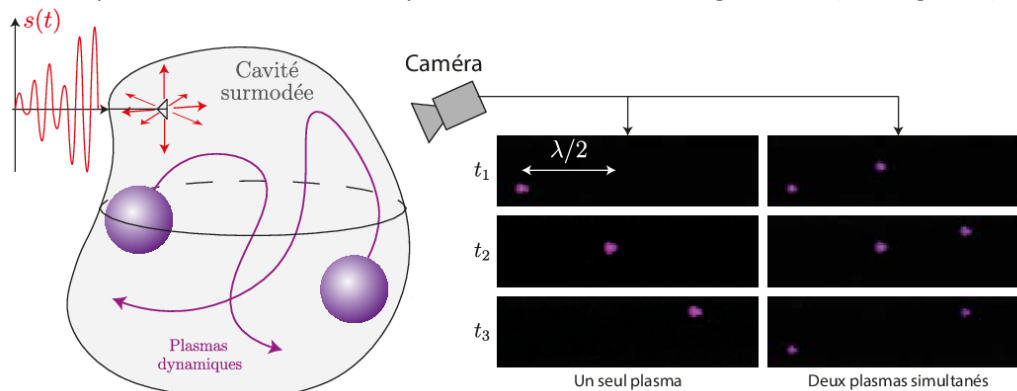


Figure 1 : (Gauche) Principe de la STPSS (Droite) Photos des plasmas amorcés expérimentalement par RT

Suivant ce principe, nous avons réussi à contrôler en régime pulsé la position du plasma sur des initiateurs dans une cavité surmodée en utilisant le Retournement Temporel (RT) [3] (et plus tard avec une technique plus élaborée [4]), comme les photos de la Figure 1 le montrent. Nous discuterons des caractéristiques inhabituelles de cette source plasma micro-onde : dimension et localisation du plasma non corrélées au design de la cavité, faible temps de montée (de l'ordre de la ns) et très faible rapport cyclique (de l'ordre de 0,05%) [5]. Nous finirons par discuter des prochaines étapes à suivre pour le développement de cette source, et en particulier du décrochage des plasmas des initiateurs, dans le but d'atteindre un contrôle spatio-temporel complet des plasmas dans les cavités surmodées.

Références

- [1] S. Samukawa et al, "The 2012 Roadmap", J. Phys. D: Appl. Phys. 45.25, juin 2012, p. 2530012.
- [2] G. S.J. Sturm, et al, "Microwaves and microreactors: Design challenges and remedies", Chemical Engineering Journal, Volume 243, 2014, p. 147-158.
- [3] V. Mazières, et al, "Plasma generation using time reversal of microwaves", Appl. Phys. Lett., 115.15 (oct. 2019), p. 154101.
- [4] V. Mazières et al., "Transient Electric Field Shaping With the Linear Combination of Configuration Field Method for Enhanced Spatial Control of Microwave Plasmas", IEEE Access, 8 (2020), p. 177084-177091.
- [5] V. Mazières et al, "Spatio-temporal dynamics of a nanosecond pulsed microwave plasma ignited by time reversal", Plasma Sources Sci. Technol., 29 125017, 2020.

Statut : post-doc

Dynamique moléculaire et réactivité des plasmas. Application à la dégradation des polluants organiques dans l'eau.

Pascal Brault¹

¹ GREMI, CNRS - Université d'Orléans, BP6744, 45067 ORLEANS Cedex 2

mél: pascal.brault@univ-orleans.fr

La Dynamique Moléculaire est une méthode de simulation bien adaptée pour décrire les réactions chimiques aux échelles moléculaires. Elle consiste en la résolution des équations du mouvement de Newton, et donc du calcul des trajectoires d'un ensemble de particules.

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_i(t) = -\vec{\nabla}_{\vec{r}_i} V(\vec{r}_1(t), \dots, \vec{r}_N(t)) = \vec{F}_i(t), \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

avec $\vec{r}_i(t)$ la position des espèces i au temps t , V est la fonction potentiel d'interaction total et $\vec{F}_i(t)$ est le champ de force agissant sur les espèces i au temps t . Cette technique nécessite donc de connaître les positions et vitesses initiales, que l'on peut déduire relativement facilement des expériences que l'on souhaite décrire. L'ingrédient majeur pour résoudre ces équations est donc la connaissance des potentiels d'interaction (ou des champs de force) entre ces particules.

A ce jour, d'énormes progrès ont été obtenus pour produire des champs de force semi-empiriques adaptés aux réactions chimiques : il s'agit, en plus de décrire la formation/brisure de liaisons, de tenir compte du maximum de liaisons possible pour un atome donné et des charges partielles. Un tel champ de force est appelé réactif à charge variable : les plus utilisés actuellement sont ReaxFF et COMB3 [1]. Quand ces potentiels ne sont pas connus, on peut les calculer à chaque pas de temps ou bien tous les quelques pas de temps par des méthodes quantiques comme la DFT. Cependant cela conduit à un accroissement considérable du temps de calcul.

La Dynamique Moléculaire n'est pas capable actuellement de traiter complètement la dynamique réactive dans un plasma puisque les électrons ne sont pas explicitement pris en compte. Des champs de forces peuvent les inclure comme eFF et eReaxFF, mais la masse de l'électron est égale à 1 pour permettre des temps de calculs raisonnables. Néanmoins, les interactions neutres-neutres et ions-neutres peuvent être abordées de façon très précise et donc moyennant une connaissance « correcte » d'une composition initiale, il devient possible de mener des calculs de réactivité qui peuvent se comparer aux expériences plasma (il est également possible d'inclure un champ électrique). Il est également possible de faire des études paramétriques afin de mieux comprendre le rôle d'espèces particulières dans la réactivité.

Afin d'illustrer cette méthodologie et les capacités de la Dynamique Moléculaire, l'exposé donnera des résultats portant la réactivité de molécules organiques polluantes telles que le paracétamol (anti-douleur) [2] et la sulfaméthoxazole (antibiotique) vis-à-vis du radical hydroxyl (par exemple issu de l'interaction avec un plasma en interaction avec l'eau), dans l'eau. Dans le premier cas, les calculs sont menés avec un potentiel ReaxFF et dans le second avec un couplage chimie quantique (DFTB), pour calculer le potentiel, et Dynamique Moléculaire.

Références

- [1] T. Liang, Y. K. Shin, D. E. Yilmaz, K. G. Vishnu, O. Veners, C. Zou, S. R. Phillpot, S. B. Sinnott, A. C. T. van Duin, Reactive potentials for advanced atomistic potentials, *Ann. Review of Materials Research* 43, 109 (2013)
- [2] P. Brault, M. Abraham, A. Bensebaa, O. Aubry, D. Hong, H. Rabat, M. Magureanu, Insight into plasma degradation of paracetamol in water using a reactive molecular dynamics approach, *J. Appl. Phys* 129 (2021) 183304

Statut : Permanent

Microfluidique et procédés plasmas pour la synthèse chimique

S. Ognier¹, M. Zhang¹, S. Cavadias¹, X. Duten², C. Ollivier³, L. Fensterbank³, M. Tatoulian¹

¹ IRCP-UMR8247, Equipe 2PM, Chimie ParisTech-PSL, IPGG, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris

² LSPM – CNRS UPR 3407 – Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 99 Avenue J.B. Clément, 93430 Villetaneuse, France

³ Sorbonne Université, CNRS, Institut Parisien de Chimie Moléculaire, MACO group, UMR 8232, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

mél: michael.tatoulian@chimieparistech.psl.eu

L'équipe 2PM (« Procédés, Plasmas, Microsystèmes ») développe à l'Institut Pierre Gilles de Gennes des microréacteurs plasmas diphasiques Gaz/liquide avec pour objectif de fonctionnaliser des molécules organiques en conditions douces (pression et température proches de l'ambiante) et en l'absence de catalyseur. Cet outil innovant, breveté récemment [1,2], permet de générer et de manipuler des espèces radicalaires de haute énergie de façon contrôlée grâce à l'association unique du plasma et de la micro-fluidique [3]. Le principe est le suivant : des espèces radicalaires sont générées en phase gazeuse grâce à une décharge plasma puis réagissent ensuite avec la molécule cible à fonctionnaliser. Les avantages du réacteur développé sont (i) la possibilité de contrôler la nature et la quantité des radicaux formés en modifiant la nature du gaz et les paramètres électriques du plasma et (ii) des transferts de matière et de chaleur extrêmement rapides grâce à l'utilisation de l'échelle micro-fluidique.

Le micro-réacteur plasma gaz/liquide « biflow », dans lequel les phases gazeuse et liquide circulent à co-courant (figure 1) dans un canal d'environ 300 μm de largeur et 1 m de longueur, a déjà montré son efficacité pour plusieurs types de fonctionnalisation. Au cours de cette présentation, nous montrerons notamment qu'il est possible de contrôler des réactions d'oxydation ou d'amination de façon sélective et quantitative du cyclohexane à température et pression ambiante et en l'absence de catalyseur [4,5].

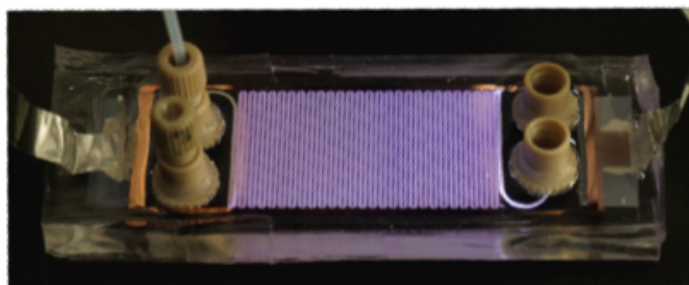


Figure 1 : microréacteur plasma/liquide biflow [2]

Références :

[1] M. Tatoulian, S. Ognier, M. Zhang, Diphasic gas/liquid plasma reactor, WO2017097996A1, dec. 2015

[2] European Patent pending (EP 18305214.1) J. Wengler, S. Ognier, S. Al Ayoubi, M. Tatoulian

[3] J. Wengler, S. Ognier, M. Zhang, E. Levernier, C. Guyon, C. Ollivier, L. Fensterbank, et M. Tatoulian, Reaction Chemistry & Engineering, oct. 2018.

[4] M. Zhang, S. Ognier, N. Touati, I. Hauner, C. Guyon, L. Binet, M. Tatoulian, Plasma Process Polym. doi:10.1002/ppap.201700188.

[5] Lepoetre, A., Ognier, S., Zhang, M. et al., Plasma Chem Plasma Process 41, 351–368 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11090-020-10140-9>

Statut : Permanent

Claquage laser vs spark : Quelques applications

Stéphane Pellerin

GREMI, UMR7344 CNRS/Univ. Orléans, 18020 Bourges cedex

Réseaux de neurones et modèles réduits pour les plasmas

L. Bois^{1,2}, N. Crouseilles^{3,4}, E. Franck^{1,2}, L. Navoret^{1,2}, G. Steimer¹, V. Vigon¹

¹IRMA, UMR 7501, Université de Strasbourg et CNRS, 7 rue René Descartes, 67000, France

²INRIA Nancy-Grand Est (TONUS), 7 rue René Descartes, 67000, France

³Université de Rennes, INRIA Bretagne Atlantique (MINGus), IRMAR, France

⁴ENS Rennes, France

mél: laurent.navoret@math.unistra.fr

Les algorithmes d'apprentissage par réseau de neurones sont devenus très performants pour diverses tâches de traitement de données (interpolation, classification), notamment en imagerie. Récemment, ils sont également employés pour construire de nouveaux modèles physiques. Nous présentons dans cet exposé deux types d'utilisation des réseaux de neurones pour construire des modèles réduits de plasma à partir de données issues de simulations numériques.

La première méthode consiste à construire des fermetures de modèles fluides valables dans des régimes faiblement collisionnels. À partir de données issues de simulations de modèles cinétiques, les réseaux de neurones permettent en effet d'apprendre les flux des chaleurs et les tenseurs de pression valables dans une gamme de nombres de Knudsen étendue. Les modèles obtenus sont moins coûteux à résoudre que les modèles cinétiques et plus précis que des modèles fluides de type Navier-Stokes. Pour accomplir cet objectif, différentes structures de réseaux de neurones ont été proposées [2,3] et des processus de prétraitement de données doivent être effectués. Nous exposerons nos résultats [1] sur la fermeture du modèle Euler-Poisson et nous discuterons des questions de stabilité et de convergence des méthodes obtenues.

Une autre méthode pour construire des modèles réduits consiste à utiliser les capacités des méthodes d'apprentissage à déterminer les principales variables sous-jacentes permettant de décrire la dynamique complète. Nous présenterons nos premiers résultats sur le sujet, basés sur des simulations particulières et un réseau de neurones de type auto-encoder.

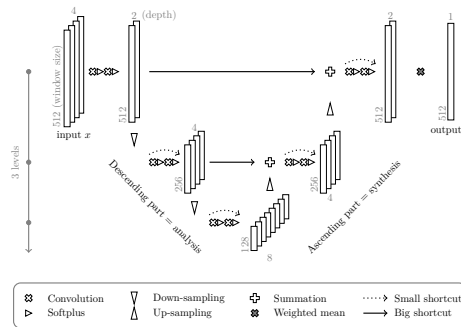


Figure 1 : Réseaux de neurones utilisé dans [1]

Références

- [1] L. Bois, E. Franck, L. Navoret, V. Vigon, A neural network closure for the Euler-Poisson system based on kinetic simulations. Accepted in Kin. Rerlat. Models (2021)
- [2] J. Han, C. Ma, Z. Ma, and W. E. Uniformly accurate machine learning5 based hydrodynamic models for kinetic equations, PNAS, **16**, 44 (2019)
- [3] C. Ma, B. Zhu, X.Q. Xu, and W. Wang. Machine Learning Surrogate Models for Landau Fluid Closure. Physics of Plasmas, **27**, 4 (2020).

Statut : permanent

Oraux - Entrants

Plasma froid en interaction avec gouttelettes liquides: principes fondamentaux et applications

A. Stancampiano¹, S. Dozias¹, P. Escot Bocanegra¹, J.-M. Pouvesle¹, E. Robert¹

¹ GREMI, UMR 7344, CNRS/Université d'Orléans, 45067 Orléans
mél: augusto.stancampiano@univ-orleans.fr

Depuis des décennies, les aérosols liquides (c'est-à-dire les gouttelettes de liquide en suspension dans le gaz) et le plasma ont joué un rôle clé dans de nombreux processus industriels, agricoles et biomédicaux allant de l'impression à l'administration de médicaments. Surtout pour le plasma froid à pression atmosphérique (CAP) la possibilité de générer in situ, à la demande et à température ambiante un environnement riche en agents actifs (ex. radicaux, rayonnements UV, électrons libres, champ électrique) qui peuvent être modulés pour obtenir des effets allant de la cicatrisation des plaies à la dégradation des polluants, offre un énorme potentiel qui a ouvert de nouveaux horizons dans de nombreux domaines. Les plasmas en contact avec l'eau peuvent générer des espèces réactives telles que $\cdot\text{OH}$, H_2O_2 , O_3 et $\cdot\text{O}$. Ainsi, les CAP constituent une technique d'oxydation avancée qui est exempte de solvants et de résidus à long terme et donc respectueuse de l'environnement et durable [1]. De nos jours, l'interaction CAP-liquide englobe un large champ d'applications telles que la dépollution environnementale, la synthèse de matériaux, la synthèse chimique, la bio-décontamination et les thérapies anticancéreuses. Quoi qu'il en soit, la surface d'échange limite fortement le rendement des configurations standards ainsi que l'utilisation des espèces actives à courte durée de vie.

La combinaison unique d'aérosols et de CAP a le potentiel de surmonter ces limites et de devenir une technologie révolutionnaire qui, en utilisant uniquement de l'eau, de l'air et de l'électricité, peut réaliser, par exemple, la décontamination des aliments. Le rapport surface/volume extrêmement élevé permet de récolter des espèces réactives à vie ultracourte qui ont un impact relativement faible dans les procédés sur gros volumes en raison de leur faible profondeur de pénétration. En fait, les micro-gouttelettes peuvent être considérées comme des micro-réacteurs qui, grâce à l'action de la PAC, peuvent être chimiquement et physiquement adaptés pour des effets spécifiques et être facilement délivrés sur la cible souhaitée. Néanmoins, de nos jours, le manque de connaissances sur les mécanismes physico-chimiques dans les systèmes plasma-aérosols entrave leur optimisation et limite le plein développement de leurs applications. Ce travail vise à présenter un aperçu des résultats les plus récents obtenus en adoptant des CAP-aérosols dans des domaines tels que la décontamination de l'eau, la synthèse de nanoparticules et le dépôt de revêtement ainsi que de mettre en évidence les avancées dans la compréhension de l'interaction plasma-aérosols et les défis et perspectives qui accompagnent ce domaine émergent.

Références

- [1] P. J. Bruggeman et al., "Plasma-liquid interactions: A review and roadmap," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 25, no. 5, (2016)
- [2] A. Stancampiano et al., "Plasma and Aerosols : Challenges, Opportunities and Perspectives," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 3861, (2019)

Statut : permanent

Topologie d'une surface liquide en interaction avec un jet micro-plasma

T. Orrière, J. Oliveira, G. Gomit

Institut P' (Cnrs, Université de Poitiers, Ensm), Téléport 2, Bv Marie et Pierre Curie, 86360 Chasseneuil-du-Poitou Cedex - France
mél: thomas.orriere@univ-poitiers.fr

Les décharges électriques en contact avec les liquides constituent une solution prometteuse dans de nombreux domaines tels que la synthèse de nanomatériau, la médecine et l'agriculture [1]. De nombreuses études se donnent comme objectif d'analyser les interactions plasma-liquide. Cependant, il y a moins d'études concernant les mouvements des fluides et en particulier la topologie de la surface liquide. Pourtant, la forme de la surface liquide a une influence significative sur plusieurs grandeurs d'intérêt telles que la distribution du champ électrique, la taille du plasma et la surface d'échange entre plasma et liquide. C'est pourquoi, nous proposons d'utiliser une méthode de topologie de surface libre par Schlieren [2]. Usuellement, un motif aléatoire est placé au fond du récipient du liquide et une caméra prend des images de celui-ci par le dessus. Par réfraction, le motif est déformé si la surface du liquide n'est plus plane. Un algorithme permet alors de calculer la topologie de la surface liquide en comparant une image sans déformation et une image avec déformation.

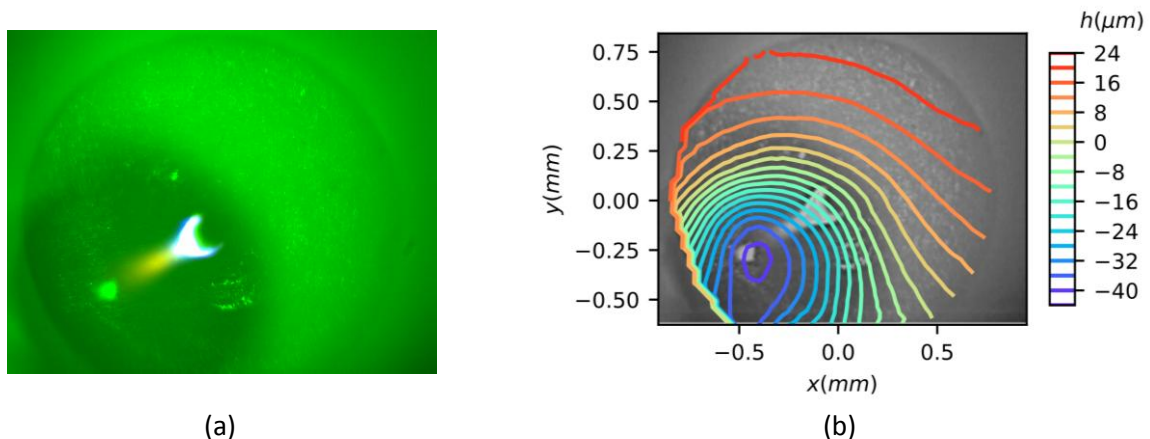


Figure 1(a) : image du jet plasma en vue de dessous avec un courant de 4,5 mA et un débit d'argon de 25 sccm (b) iso-contours de la hauteur du liquide obtenus à partir de la figure (a).

Le plasma sous étude était un jet micro-plasma d'argon ciblant une cuvette en verre contenant de l'eau déionisée. La tension appliquée était continue. Nous avons fixé un motif sur le jet puis regardé sa déformation par-dessous (figure 1a) pour en déduire la topologie de la surface liquide tridimensionnellement (figure 1b). Les résultats sont comparés à de l'imagerie ombroscopique prise sur le côté et montrent des déformés de surface similaires. Les résultats montrent que la position du point d'impact du jet est fortement influencée par les paramètres du plasma, comme l'amplitude du courant ou le débit d'argon.

Références

- [1] P J Bruggeman et al. Plasma-liquid interactions : a review and roadmap. Plasma Sources Sci. Technol. 25 053002 (2016).
- [2] F Moisy, M Rabaud & K Salsac. A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface. Exp Fluids 46, 1021 (2009).

Films de diamant synthétisés par plasmas : du procédé de croissance aux applications

A. Valinattaj Omran, C. Mahi, R. Issaoui, O. Brinza, J. Achard, F. Bénédic

Université Sorbonne Paris Nord, LSPM-CNRS, 99 Avenue Jean-Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France

mél: azadeh.valinattajomran@univ-paris13.fr

Le diamant synthétisé par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) possède un ensemble de propriétés permettant d'envisager des applications dans le domaine de l'électronique, de l'optique, du management thermique, de la tribologie ou encore du biomédical [1]. Les procédés plasmas micro-ondes "classiques" utilisés pour la croissance de diamant ne permettent de déposer que sur des surfaces planes, limitées à 5 cm de diamètre du fait de l'utilisation d'une cavité résonnante et à des températures supérieures à 600°C [2]. L'ensemble de ces contraintes freine ainsi l'industrialisation des couches de diamant. Le LSPM dispose d'un prototype unique au monde de réacteur de dépôt à plasma micro-onde distribué Distributed Antenna Array (DAA) conçu en collaboration avec LPSC (Grenoble) et le laboratoire LAPLACE (Toulouse). Ce système repose sur l'utilisation de 16 sources plasmas en configuration matricielle fonctionnant à basse pression (<100 Pa) et en plasma de mélange CH₄/CO₂/H₂ [3]. Il permet la croissance de Diamant NanoCristallin (DNC) sur des substrats d'un diamètre supérieur à 10 cm, à des températures de surface inférieures à 400°C [4], mais aussi, à des température plus élevées (> 600 °C), de Diamant PolyCristallin (DPC) et de Diamant MonoCristallin (DMC), qui sont les deux autres formes de diamant CVD. Il permet en outre la croissance tridimensionnelle de DNC et de DPC, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour le revêtement de pièces de géométrie complexe [5]. Les travaux du LSPM ont ainsi montré la faisabilité de la croissance de diamant sur des substrats usuels tels que le silicium, mais surtout non conventionnels comme les polymères, l'acier inoxydable, le titane, le verre ou encore les matériaux piézoélectriques, ce qui permet d'envisager des applications innovantes, en particulier dans les domaines de l'électronique, des technologies quantiques ou du biomédical [5,6].

En dépit des travaux déjà effectués au LSPM, il subsiste encore un manque de connaissances sur de nombreux aspects de cette synthèse de diamant par plasma et une approche multidisciplinaire est donc nécessaire pour élucider les mécanismes de croissance. L'essence de mon projet de recherche est d'identifier, comprendre et contrôler les liens forts entre la source plasma, la physique de la décharge et la croissance de diamant et d'optimiser les interactions entre plasma et matériaux pour la fabrication de couches de diamant.

On pourra alors trouver les conditions opératoires permettant d'obtenir des films de diamant de bonne qualité, transparents, adhérents et avec des vitesses de croissance compatibles avec une industrialisation du produit, notamment pour des applications dans le domaine biomédical.

Références

- [1] B. Dischler, C.Wild, Springer Series in Materials Processing, Springer, 1998.
- [2] F. Silva, K. Hassouni, X. Bonnin, A. Gicquel, J. Phys.: Condens. Matter **21**, 364202 (2009).
- [3] H.A. Mehedi, J. Achard, D. Rats, O. Brinza, A. Tallaire, V. Mille, F. Silva, C. Provent, A. Gicquel, Diamond Relat. Mater. **47**, **58** (2014).
- [4] B. Baudrillart, F. Bénédic, O. Brinza, T. Bieber, T. Chauveau, J. Achard, A. Gicquel, Physica Status Solidi (a) **212**, **2611** (2015).
- [5] D. Dekkar, F. Bénédic, C. Falentin-Daudré, O. Brinza, R. Issaoui, J. Achard, Diamond Relat. Mater. **94**, **28** (2019).
- [6] B. Baudrillart, F. Bénédic, Th. Chauveau, A. Bartholomot, J. Achard, Diamond Relat. Mater. **75**, 44 (2017).

Statut : Maître de Conférences (permanent)

Plasmas : de la physique fondamentale aux procédés matériaux

Laurène Youssef ^{1,2}

¹ Univ. Limoges, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France

² CNRS, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France

Mél : laurene.youssef@unilim.fr

Bien que le plasma soit globalement neutre, la coexistence de particules chargées donne naissance à des phénomènes différents que ceux dans les fluides classiques, ce qui rend cet état très sensible aux champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques. Le diagnostic est l'instrument principal dans la physique des plasmas. En effet, il est indispensable au manipulateur de connaître les paramètres qui régissent la décharge comme la densité, la fonction de distribution électronique des espèces, les températures ou la nature des espèces présentes. Ces paramètres impactent crucialement les propriétés des matériaux élaborés par une technique assistée par un plasma. Parmi ces outils de diagnostic, la Spectroscopie d'Émission Optique (OES) qui consiste à suivre la raie d'émission atomique ou moléculaire d'un élément particulier [1]. Cette technique pourrait être utilisée autant bien dans les études fondamentales que dans le diagnostic de plasmas d'élaboration ou de gravure de matériau [2, 3]. La **Figure 1** regroupe trois exemples, l'un d'un suivi d'une raie d'émission optique de l'espèce CO, un autre de la gravure d'un matériau par un plasma ICP et un dernier permettant de visionner un film synthétisé par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) [4].

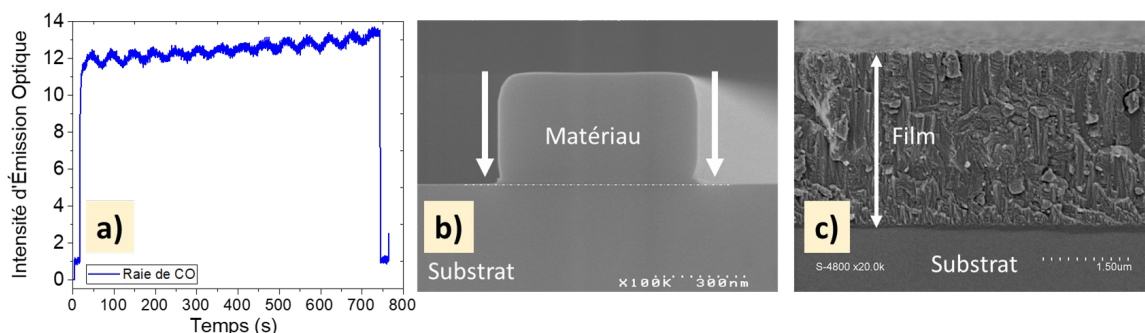


Figure 1 : Exemples a) d'une raie d'émission optique de CO, b) matériau gravé par plasma ICP et c) matériau déposé par PECVD

Comme il pourrait être constaté, il est possible de suivre la présence d'une espèce, ici par exemple le CO, dans la phase plasma (**Figure 1 (a)**). La chute de l'intensité d'émission optique est un indicateur de la disparition de cette espèce. Sur la **Figure 1 (b)**, le plasma est utilisé comme moyen de gravure de guide d'ondes pour des applications en photonique et en optique non linéaire. La composante physique du plasma permet d'améliorer l'anisotropie du procédé alors que la composante chimique permet d'ajuster la sélectivité de la gravure. Cependant, le plasma n'est pas uniquement un outil de gravure d'un matériau mais aussi une technique de dépôt d'une couche sur un substrat. La **Figure 1 (c)** montre un film de TiO_2 déposé sur du silicium pour des applications photocatalytiques et de génération d'hydrogène. En conclusion, le plasma fait l'objet d'études physiques fondamentales pour essayer de comprendre les divers phénomènes de cet état. Cependant, cette compréhension se met au service de l'interprétation des propriétés des matériaux élaborées par une technique plasma afin d'assurer la meilleure adaptation à l'application finale.

Références

- [1] I.P. Herman, Optical Diagnostics for Thin Film Processing (1996)
- [2] A. Rydosz, K. Kollbek, N-T H. Kim-Ngan, A. Czapl, A. Brudnik, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. **31**, 11624-11636 (2020)
- [3] L. Youssef, H. El Dirani, C. Petit-Etienne, S. Kerdiles, P. Grosse, C. Sciancalepore, E. Pargon, FiO + LS FTh3C (2019)
- [4] L. Youssef, Développement par procédé plasma de couches minces de TiO_2 et de TiO_2 dopé à l'azote pour la production d'hydrogène sous lumière solaire, thèse de l'Université de Montpellier (2018).

Statut : Maître de Conférences (permanent)

Méthode des moments appliquée aux plasmas à basse pression pour la propulsion spatiale

A. Alvarez Laguna¹, B. Esteves¹, A. Bourdon¹, et P. Chabert¹

¹Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), CNRS, Observatoire de Paris, Sorbonne Université, Université Paris Saclay, Ecole polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France

mél: alejandro.alvarez-laguna@lpp.polytechnique.fr

Les modèles se basant sur des équations fluides ne parviennent généralement pas à représenter la physique des plasmas froids dans des régimes faiblement collisionnels de manière complète puisque dans ces plasmas, l'équilibre thermodynamique local n'est plus valide et les phénomènes cinétiques sont importants. Dans cet exposé, on introduira un modèle à moments d'ordre élevé grâce à la méthode de Grad à partir de l'équation cinétique des électrons. Cette approche tient compte des processus réactifs hors de l'équilibre chimique et thermique ainsi que de l'effet d'un champ électromagnétique. Le modèle pour les électrons obtenu considère les évolutions de la densité, de la quantité de mouvement, de l'énergie, du vecteur de flux de chaleur et du quatrième moment contracté. En prenant en compte le couplage entre ces équations, l'excès de kurtosis de la population d'électrons à hautes énergies, typique des plasmas à basse température est capturé de manière auto-cohérente [1].

Les résultats d'une discrétisation numérique [2,3] de ce modèle sont ensuite comparés avec les mesures expérimentales sur la décharge inductive de PEGASES. Cette comparaison montre que le modèle à moments d'ordre supérieur qu'on a développé est capable de prédire des fonctions de distribution d'énergie des électrons qui ne sont pas maxwelliennes et des profils de densité du plasma et température électronique en concordance avec ce qui est observé dans les expériences

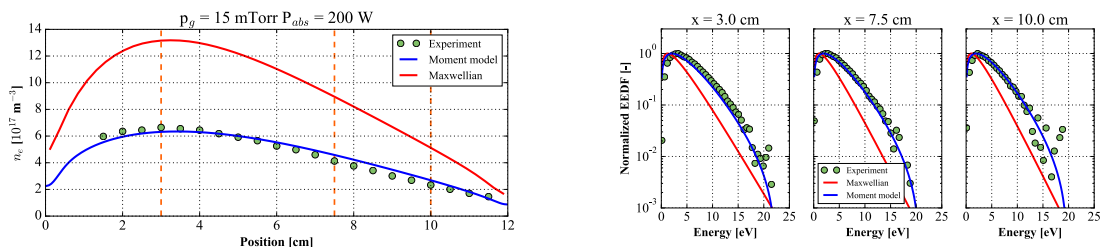


Figure 1 : Comparaison des résultats issus du modèle de moment 1D avec les mesures d'une décharge inductive d'argon. Conditions expérimentales : $p = 15$ mTorr et $P = 200$ W.

Références

- [1] A. Alvarez Laguna, B. Esteves, A. Bourdon, and P. Chabert, Submitted to Journal of Physics D Emerging Leaders Special Issue.
- [2] A. Alvarez Laguna, T. Pichard, T. Magin, P. Chabert, A. Bourdon, M. Massot, *J. Comput. Phys.*, Vol 419, (2020)
- [3] A. Alvarez-Laguna *et al* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 025003

Statut : Chargé de recherche au C.N.R.S.

Etude expérimentale du dépôt de l'énergie laser dans l'air: De la génération plasma jusqu'à émission d'une onde de choc

Alexandros Mouskeftaras¹, Olga Koritsoglou¹, Olivier Thomine², Olivier Utéza¹ et Didier Loison³

¹Aix Marseille University, CNRS, LP3 UMR 7341, Campus de Luminy, Case 917,13288, Marseille cedex 9, France

²LIS UMR 7020 CNRS, Aix Marseille University, France

³Institut de Physique de Rennes, CNRS, Université Rennes 1, F-35042 Rennes, France

mél: alexandros.mouskeftaras@univ-amu.fr

De nos jours, les lasers femtosecondes (fs) sont employés dans diverses applications [1]. Pour la plupart de ces applications, les ondes de choc (OC) induites par laser sont présentes et elles ont un impact sur la qualité du procédé [2]. L'étude des OC dans l'air présente un double intérêt : renseigner sur les mécanismes fondamentaux de génération et permettre le développement de procédés tels que le nettoyage de wafers par OC [3]. De plus dans le cas de lasers fs les différents canaux de relaxation énergétique ayant lieu après le dépôt d'énergie laser (contrairement au cas des impulsions « longues »), ainsi leur étude est assimilée à celle d'une explosion dans la micro-échelle. Cependant, il n'existe pas beaucoup d'études dans la littérature dans le cas des régimes « doux » (en dessous de seuils de propagation laser en filamentation). Dans cette étude, on présentera nos résultats qui parcourent les échelles temporelles depuis la génération d'un plasma dans l'air jusqu'à l'initiation et la propagation d'une OC dans l'espace environnant. Les expériences sont menées en utilisant un laser impulsif ayant une durée de 380 fs et émettant à 1.03 μm . Le faisceau laser est focalisé dans un spot de diamètre égal à 1.5 μm , ce qui permet d'atteindre des intensités de l'ordre de 10^{15} W/cm² ce qui les placent au-dessus du seuil d'ionisation dans l'air. En conséquence d'une densité d'énergie déposée très élevée, pression et température (P-T) augmentent brusquement dans un volume localisé et il en résulte l'émission d'une OC avec des célérités de propagation de l'ordre de km/s selon nos mesures. L'observation de ce phénomène dynamique depuis la génération d'un plasma jusqu'à la formation d'une OC (Fig. 1) est accomplie grâce à un microscope en transmission résolu en temps. Finalement, on utilise un modèle basé sur les équations de conservation et la loi des gaz parfaits pour modéliser l'interaction et obtenir une évaluation quantitative de l'évolution de la pression et température.

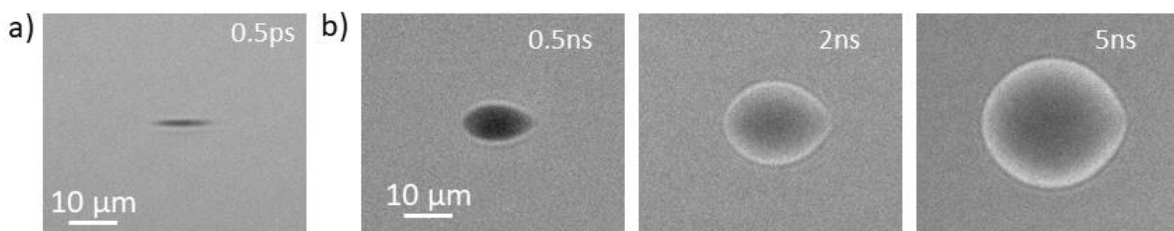


Figure 1 : Images en transmission de a) un plasma et b) une onde de choc à 0.5 ns, 2 ns et 5 ns dans l'air ambiant après irradiation avec une impulsion laser fs de 5.5 μl .

Références

- [1] K. Sugioka and Y. Cheng, "Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing," *Light Sci. Appl.*, vol. 3, no. 390, pp. 1–12, 2014
- [2] Q. Wang et al., "Structure-mediated excitation of air plasma and silicon plasma expansion in femtosecond laser pulses ablation," *Research*, vol. 2018, 2018
- [3] J. K. Park, J. W. Yoon, and S. H. Cho, "Removal of nanoparticles from a silicon wafer using plasma shockwaves excited with a femtosecond laser," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 258, no. 17, pp. 6379–6383, 2012

Statut : permanent

Oraux Jeunes

Modélisation de la fluorescence induite par laser à deux photons et des propriétés radiatives des plasmas.

M. Lesage¹, A. Favre¹, V. Morel¹, A. Bultel¹, P. Boubert¹

¹ CORIA, UMR CNRS 6614, Normandie Université, 76801 Saint-Étienne du Rouvray, France
mél: morgan.lesage@coria.fr

L'étude de l'oxydation de matériaux en situation de rentrée atmosphérique constitue un enjeu important. En effet, certains matériaux les constituants (Invar36, Inconel718, TA6V) peuvent résister à la rentrée et donc impacter le sol, une étude de leur dégradation est donc nécessaire dans l'optique de prévoir les dégâts au sol possibles. L'étude de l'interaction plasma-surface induit une analyse poussée de la physico-chimie de la couche limite d'interaction plasma-surface. La mise en œuvre de techniques de diagnostic optique telles que la spectroscopie d'émission optique (OES) ou la fluorescence induite par laser (LIF) permet d'accéder aux températures et à la densité des différentes espèces présentes dans la couche limite, et tout particulièrement l'oxygène atomique en raison de son rôle dans l'oxydation des matériaux. Pour les deux méthodes précédemment citées, OES et LIF, la précision des résultats obtenus est grandement corrélée à la précision des modèles permettant l'analyse des données expérimentales.

D'un point de vue expérimental, la fluorescence induite par laser est une méthode de diagnostic optique très répandue dans l'étude des flammes et des plasmas. Un laser dont la longueur d'onde est accordée avec une transition de l'espèce sondée permet la mesure non intrusive et simultanée de sa température cinétique et de sa densité. D'un autre côté la spectroscopie d'émission permet d'accéder à la composition du milieu étudié par un suivi des raies d'émission spécifiques.

Le modèle de fluorescence induite par laser de l'oxygène atomique développé se base sur une cinétique détaillée prenant en compte les phénomènes habituels d'interaction laser matière (absorption, émission spontanée, émission stimulée ...) mais également des phénomènes physiques souvent négligés ou approximés dans la littérature [1-3] (émission spontanée amplifiée (ASE) [4], structures électroniques fines [5], photodissociation [6]). Le but étant d'étudier des plasmas de rentrée atmosphérique, ce code est couplé à la suite de calcul MERLIN (MultiElemental Radiative equilibrium emission). MERLIN est une suite développée pour le calcul de composition et de spectres d'émission de plasma dans le cas où l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local (ETL) est vérifiée pour l'analyse des données expérimentales obtenues par OES. Nous utilisons ici le calcul de composition de MERLIN afin d'initialiser la simulation dans les conditions thermodynamiques de l'expérience que nous supposons à l'ETL. L'influence de ces différents phénomènes est discuté dans cette présentation. Le seuil en densité d'apparition de l'ASE, théorisé par *Peters et al* en 1971 [4] et observé par *Huang et al* [3], est observé par le modèle à $6 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$. L'analyse des signaux expérimentaux via le modèle de fluorescence permet l'obtention de profil de température au sein des plasmas étudiés. L'étude par spectroscopie d'émission permet quand à elle, avec l'appui de MERLIN, de d'observer l'évolution de la composition du plasma dans la couche limite plasma-matériau.

Références

- [1] Y. Zhao, X. Li, L. Ma, *Computer Physics Communication* **183**, 1588-1595 (2012)
- [2] J. Amorim, G. Baravian, *Optics Communications* **192**, 277-286 (2001)
- [3] Y. Huang, R. Gordon, *The Journal of Chemical Physics* **97**, 6363-6368 (1992)
- [4] G.I. Peters, L. Allen, *Journal of Physics A : General Physics* **4**, 238-243 (1971)
- [5] R. Saxton, J. Eichler, *Physical Review A* **34**, 199-206 (1986)
- [6] K. Yoshino, J.R. Esmond, A.S.C. Cheung, D.E. Freeman, W.H. Parkinson, *Planetary and Space Science* **40**, 185-192 (1992)

Statut : doc3

Atomic nitrogen absolute density measurements by means of Two photon Absorption Laser Induced Fluorescence in a Micro-Hollow Cathode Discharge

A. Remigy, X. Aubert, S. Prasanna, G. Lombardi, C. Lazzaroni.

Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, LSPM CNRS, UPR 3407, F-93430, Villetaneuse, France

mél: alice.remigy@lspm.cnrs.fr

A MHCD (Micro-Hollow Cathode Discharge), used in a hexagonal boron nitride (h-BN) deposition process, is studied by means of nanosecond Two photon Absorption Laser Induced Fluorescence (TALIF). h-BN is a highly attractive material for applications in electronics and photonics, thanks to its large band gap and compatibility with graphene. The N atoms necessary for its deposition are a challenge to obtain because of the high bonding energy of the N_2 molecule (~ 10 eV). The MHCD, providing high electronic density (up to 10^{15} cm^{-3}) at low injected power (1W) lets us expect high dissociation degree of molecular nitrogen, that has to be proven experimentally. The feasibility of the deposition of h-BN using this source has been shown in [1] but further study the plasma source is needed to optimize the process.

The MHCD is placed in a reactor with two chambers (represented in figure 1 (a)), communicating only through the hole of the MHCD. It is ignited in an Ar/ N_2 gas mixture, using a DC power supply. A pressure differential between the two chambers, with tens of millibars in the high pressure chamber and 1 mbar in the low pressure chamber, creates a plasma jet towards the low pressure side as shown in the photo in figure 1 (b).

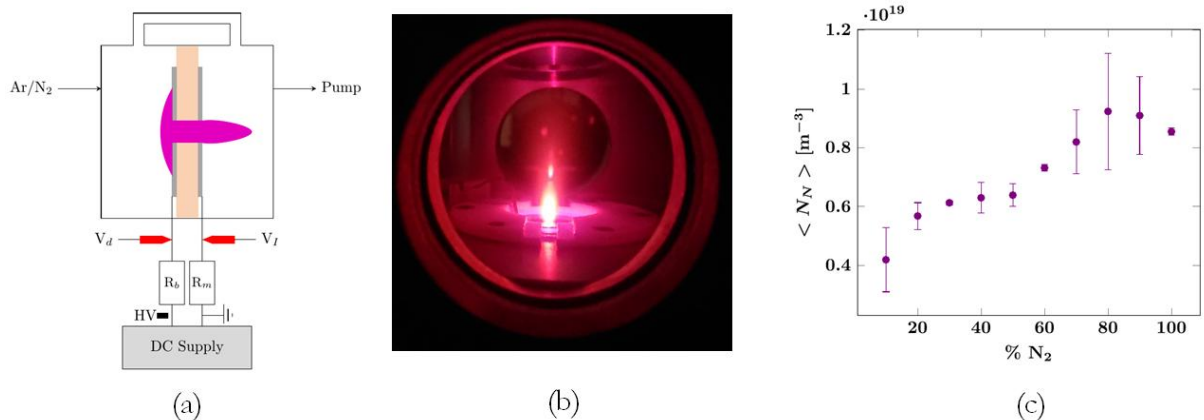


Figure 1 : (a) Schema of the reactor, (b) Photograph of the plasma jet in the low pressure chamber and (c) Density of N atoms, 4mm from the hole, along the hole axis, measured as a function of the percentage of N_2 in the gas mixture.

The absolute density of N atoms is measured, scanning the low pressure chamber to understand the spatial repartition of N atoms in the chamber where the h-BN deposition occurs, using the method developed in our lab and described in [2]. The influence of other parameters is studied such as the pressure in the high pressure chamber, the percentage of N_2 in the Ar/ N_2 gas mixture (see figure 1(c)), the gas flux and discharge current. These results will be compared to those obtained previously using Vacuum Ultra Violet Fourier Transform Absorption spectroscopy, a very sensitive technique, but not spatially resolved.

Références

- [1] H. Kabbara et al., Appl. Phys. Lett. **116**, 171902 (2020)
- [2] E. Bisceglia et al., Plasma Sources Sci. Technol. (2021)

Statut : Doctorante

Propulsion d'aéronefs par vent ionique

S. GROSSE¹, E. MOREAU¹

¹Institut PPRIME, UPR CNRS 3346, Université de Poitiers, 11 bd Marie et Pierre Curie, 86073 POITIERS CEDEX 9

mél: sylvain.grosse@univ-poitiers.fr

Dans le contexte climatique actuel, la transformation du mode de propulsion des aéronefs vers des technologies plus durables devient un sujet de plus en plus pressant. Même si les améliorations actuelles reposent sur les technologies déjà existantes, de nouveaux types de propulsion sont également considérés, telle la propulsion par vent ionique. Cette dernière a vu un récent regain d'intérêt depuis le vol d'un drone propulsé par décharges couronnes [1]. Différentes études ont été réalisées afin d'augmenter la production de force par les propulseurs électro-aérodynamiques (EAD) tout en diminuant la consommation en puissance [2-6]. Dans ce cadre, le projet PROPULS-ION a pour objectif l'amélioration des propriétés EAD des actionneurs à plasma en augmentant à la fois la poussée produite et le rapport poussée générée sur puissance consommée. Des essais ont déjà été effectués sur un banc d'essais avec une géométrie fil-cylindre avec différentes distances d entre les électrodes et différents diamètres r du fil (voir **figure 1**). Dans une telle configuration, la décharge couronne DC génère des ions qui dérivent vers le cylindre du fait du champ électrique, générant une force EAD qui correspond à la somme des forces de Coulomb agissant sur chacun des ions. Il a été démontré que l'efficacité augmente avec la distance d et lorsque diamètre du fil diminue. Actuellement, un nouveau système basé sur des décharges à barrières diélectriques est en cours d'étude et sera présenté lors du GDR.

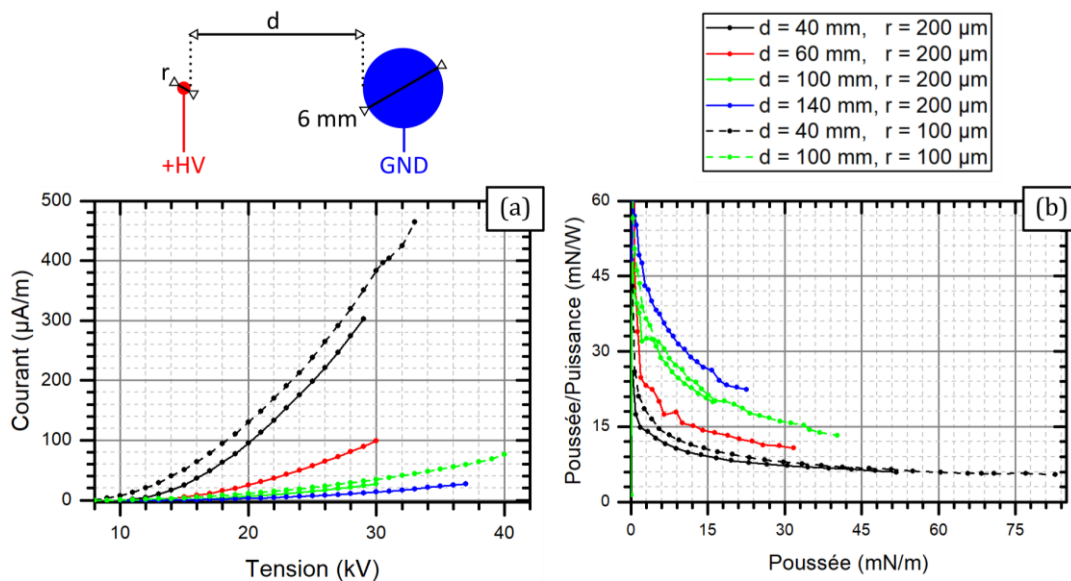


Figure 1 : Caractéristique courant-tension (a) et évolution du rapport poussée-puissance en fonction de la poussée (b) pour un actionneur fil-cylindre en fonction de la distance d et du diamètre r .

Références

- [1] H. Xu, Y. He, K. L. Strobel, C. K. Gilmore, S. P. Kelley, C. C. Hennick, T. Sebastian, M. R. Woolstone, D. J. Perreault, S. R. H. Barrett, Nature, **563**, 7732, pp. 532-535 (2018)
- [2] E. Moreau, N. Benard, J.-D. Lan-Sun-Luk, J.P. Chabriot, J. Phys. D: Appl. Phys., **46**, 47, pp. 475204 (2013)
- [3] E. Moreau, N. Benard, F. Alicalapa, A. Douyère, J. Electrostat., **76**, pp. 194-200 (2015)
- [4] H. Xu, N. Gomez-Vega, D. R. Agrawal, S. R. H. Barrett, J. Phys. D: Appl. Phys., **53**, 2, pp. 025202 (2020)
- [5] H. Xu, Y. He, S. R. H. Barrett, Appl. Phys. Lett., **114**, 25, pp. 254105 (2019)
- [6] N. Monrolin, F. Plouraboué, O. Praud, AIAA J., **55**, 12, pp. 4296-4305 (2017)

Statut : post-doc

Diagnostics expérimentaux des espèces négatives dans le propulseur PEGASES fonctionnant à l'iode

B. Esteves¹, A. Alvarez Laguna¹, A. Bourdon¹, C. Drag¹, P. Chabert¹

¹Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), CNRS, Sorbonne Université, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France
mél: benjamin.esteves@lpp.polytechnique.fr

Contexte de l'étude

L'iode est étudié pour les dispositifs de propulsion électrique des engins spatiaux dans le but de remplacer le xénon qui est coûteux, rare et nécessite la manipulation de gaz comprimé [1,2]. Cependant, la physique des plasmas électronégatifs est moins connue, et dans le cas de l'iode, les données concernant les processus réactifs sont parcellaires. Le dispositif expérimental est le propulseur à grilles PEGASES dénué de champ magnétique.

Approche expérimentale

Deux espèces négatives sont majoritaires dans les plasmas d'iode étudiés : les électrons et les ions I^- . Sur la gamme de pression (0.5 mTorr – 30 mTorr) et de puissance (50 W – 200 W) de fonctionnement de la décharge, des mesures par sonde de Langmuir, résolues spatialement le long de l'axe de poussée, permettent d'obtenir des profils de densité et de température électronique. Par ailleurs, la technique de photo-détachement par laser [3] permet d'obtenir les profils spatiaux d'électronégativité (ratio de densité des ions négatifs sur les électrons). Cette mesure, couplée à la précédente, permet d'obtenir des profils spatiaux d'ions négatifs.

Résultats

De très forts gradients spatiaux apparaissent dès que la pression augmente. L'électronégativité évolue dans l'intervalle (10^{-3} ; 5), augmentant très fortement lorsque la puissance décroît ou lorsqu'on se rapproche de la grille d'extraction ($X = 13$ cm) (voir Figure 1). Ce résultat était inattendu puisqu'il contredit très largement l'hypothèse isotherme pour les ions négatifs. A haute pression, les anions se localisent là où les électrons sont le moins nombreux.

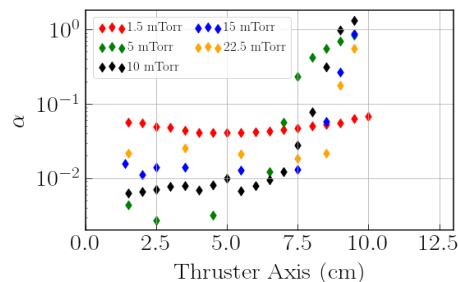


Figure 1 : Influence de la pression sur les profils spatiaux d'électronégativité (ratio de densité des ions négatifs sur la densité électronique) pour une puissance de décharge de 200W.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par la Direction Générale de l'Armement et PLAS@PAR.

Références

- [1] P. Grondein, "Investigation de l'iode Comme Propergol pour la Propulsion Ionique à Grilles", Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (2017)
- [2] F. Marmuse, "Iodine plasmas: experimental and numerical studies. Application to electric propulsion," Thèse de doctorat, Sorbonne Université (2020)
- [3] M. Bacal, Rev. Sci. Instrum. 71 3981, (2000)

Statut : doc3

Mesure OES d'un plasma de CO₂ en recombinaison

Corentin H. C. Grimaldi¹, Sean D. McGuire¹, Christophe O. Laux¹,

¹Laboratoire EM2C, CNRS UPR288 – CentraleSupélec, 3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France
mél: corentin.grimaldi@centralesupelec.fr

Des mesures acquises par spectroscopie d'émission (OES) d'un plasma de CO₂/Ar à haute température seront présentées. Une torche plasma à induction de 50kW a été utilisée pour produire le plasma de CO₂/Ar à pression atmosphérique. [2] A la sortie de la torche, le plasma est proche de l'équilibre thermodynamique à une température de 6900K. Le plasma passe ensuite à haute vitesse à travers un tube de recombinaison, provoquant ainsi un refroidissement rapide et donc sa recombinaison. L'évolution thermochimique du plasma est suivie par OES dans l'infrarouge entre 4.1 et 5.6µm afin d'avoir accès aux états non excités de CO et CO₂. Les spectres obtenus sont calibrés en intensité et comparés aux prédictions réalisées avec les codes de rayonnement raie par raie Radis et SPECAIR. [2]. Ces mesures sont destinées à constituer un cas de référence pour améliorer les prédictions des modèles cinétiques ou de CFD.

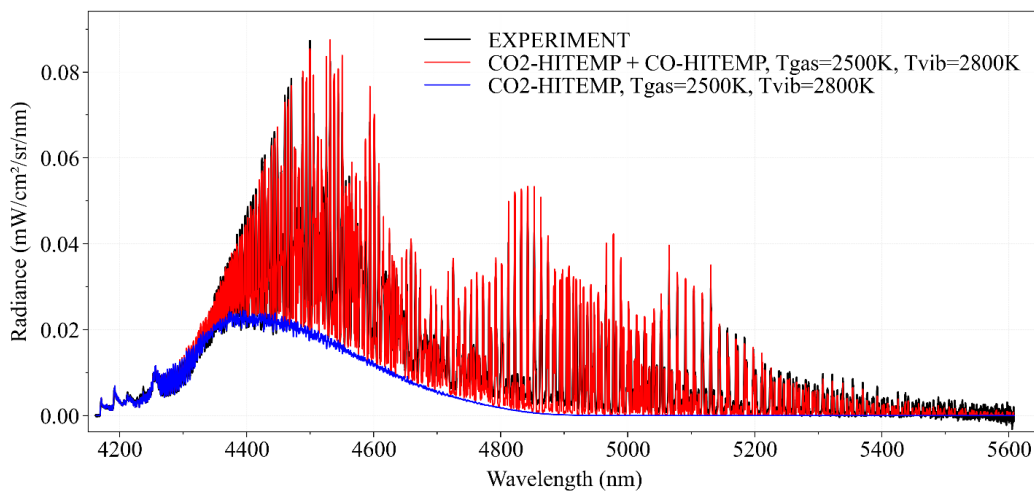


Figure 1 : Comparaison entre le spectre mesuré et la simulation avec RADIS pour CO et CO₂ en utilisant HITEMP 2010 entre 4150 and 5600 nm.

La figure 1 présente la mesure obtenue à la sortie du tube de recombinaison de 35cm en noir et les simulations réalisées avec Radis alimenté avec Hitemp-2010. [3] La contribution du CO₂ est représentée en bleu, celle du CO en rouge. Le fit optimal correspond à une température du gaz de 2500K et une température vibrationnelle de 2800K, indiquant un léger hors équilibre. Les autres mesures réalisées seront montrées lors de la présentation.

Remerciements

Ce travail est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-18-CE05-0003)

Références

- [1] C. O. Johnston, A. M. Brandis, and K. Sutton, "Shock layer radiation modeling and uncertainty for mars entry," 43rd AIAA Thermophys. Conf. 2012, no. June, pp. 1–43, 2012.
- [2] C. O. Laux, T. G. Spence, C. H. Kruger, and R. N. Zare, "Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas--- Stanford University.pdf," vol. 12, pp. 125–138, 2003.
- [3] L. S. Rothman et al., "HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., vol. 111, no. 15, pp. 2139–2150, 2010.

Statut : doc3

Etude par dynamique moléculaire de la réactivité des espèces neutres principales d'un plasma Ar/CH₄

G. Otakandza Kandjani¹, P. Brault¹, M. Mikikian¹, G. Tétard², A. Michau², K. Hassouni², J. Mougenot²

¹ GREMI UMR7344 CNRS/Université d'Orléans, 45067 Orléans, France

² LSPM UPR3407 CNRS/Université Sorbonne Paris Nord, 93430 Villetaneuse, France

mél: glenn.otakandza@etu.univ-orleans.fr

Les plasmas hydrocarbonés sont des gaz faiblement ionisés contenant des électrons, des espèces moléculaires neutres et chargées, de grands clusters et, éventuellement, des particules solides. Ils constituent aujourd'hui un outil majeur pour l'élaboration de matériaux et de nanostructures avancés en carbone et plusieurs applications clés en électronique. La chimie des hydrocarbures conduisant à de grandes espèces moléculaires est également d'un grand intérêt en astrophysique, dans les atmosphères planétaires. Malgré leur grand intérêt, ces plasmas restent très mal compris car ils sont régis par des phénomènes de nature très diverse et se déroulant à des échelles allant de la molécule à la taille du plasma, c'est-à-dire des processus de collision en phase gazeuse, par exemple des dissociations, excitations et ionisations d'électrons-atomes/molécules, des collisions d'ions (radicaux), des processus d'interaction plasma-surface, la croissance et la dynamique des nanoparticules (NP), des phénomènes de transport, des effets de plasma collectif et poussiéreux, etc. Ainsi, les plasmas hydrocarbonés sont souvent utilisés comme des boîtes noires, limitant leur extraordinaire potentiel qui ne peut être exploité sans une réelle percée dans la compréhension des processus fondamentaux qui régissent leur physique et leur chimie.

Parmi les processus fondamentaux d'intérêt, la nucléation et la croissance de nanoparticules est d'une importance capitale. En raison de sa nature moléculaire, les simulations de dynamique moléculaire réactive sont très pertinentes pour décrire de tels phénomènes [1]. De plus, des champs de force performants existent pour décrire les interactions entre hydrocarbures [2]. Parmi eux, le potentiel REBO (Reactive Empirical Bond Order) est bien adapté à la description des interactions des radicaux d'hydrocarbures avec les surfaces. La plupart de leurs caractéristiques sont cohérentes avec les calculs DFT [2].

La réactivité des espèces neutres du plasma, dont la composition a été déterminée par un modèle 1D, est étudiée en déterminant la distribution des clusters de carbone, leur ordre de liaisons et l'évolution des molécules initiales en fonction du temps.

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG) et l'Agence Nationale de la Recherche Française (ANR) : projet MONA (ANR-18-CE30-0016).

Références

[1] E. Neyts, P. Brault, *Plasma Processes and Polymers* 14 (2017) 1600145

[2] M. Zarshenas et al, *J. Phys Chem. C* 122 (2018) 15252-15263

Statut : doc2

Dispositif de protection micro-onde par décharge plasma : un modèle numérique auto-consistant confronté aux mesures expérimentales

L. Fuster^{1,2,3}, R. Pascaud³, G. Hagelaar², P. Hoffmann¹, L. Liard², O. Pascal², T. Callegari²

¹ CEA, DAM, CEA-Gramat, France

² LAPLACE, CNRS, UPS, INP, Université de Toulouse, Toulouse, France

³ ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, Toulouse, France

La multiplication des systèmes communicants sans fil en technologie planaire et le développement de sources microondes de forte puissance nécessitent de développer des limiteurs afin de protéger les chaînes de réception. Le durcissement électromagnétique dans ces topologies est traditionnellement assuré par des éléments actifs tels que les diodes PIN [1], mais celles-ci peuvent être endommagées si la puissance du signal reçu est trop importante. De par leur capacité à contrer des menaces de très haute puissance, les plasmas apparaissent alors comme de bons candidats.

Pour pouvoir se substituer aux limiteurs à semi-conducteur en technologie planaire, il faut parvenir à concevoir des dispositifs peu encombrants pouvant être insérés dans les chaînes de réception. Plusieurs topologies en technologie circuit imprimé utilisant des techniques de pré-ionisation et/ou des circuits résonnants ont été proposées par divers auteurs [2-3]. De notre côté, des premiers prototypes ont été développés, intégrant des décharges plasma localisées à une dizaine de millibars dans l'argon [4-5] et leurs capacités de protection ont été démontrées.

Au cours de cette communication, nous présenterons un limiteur en technologie microruban suspendue. Des simulations multi-physiques de ce dispositif, couplant la dynamique du plasma à celle de l'onde électromagnétique, et intégrant un modèle chimique simplifié pour l'argon, ont été conduites à l'aide d'un code de calcul développé au laboratoire LAPLACE [6], afin d'obtenir les paramètres de la décharge et de mieux comprendre les mécanismes de couplage non-linéaire microonde / plasma.

Nous présenterons tout d'abord une confrontation entre les bilans de puissance (mesure des puissances transmises absorbées et réfléchies par le plasma) expérimentaux et numériques, qui permet de relier la dynamique du plasma à l'évolution des taux de puissance. Nous expliciterons les mécanismes à l'œuvre dans l'alimentation de la décharge ainsi que la physique en jeu dans le mouvement du plasma. Pour finir, nous montrerons quelques résultats de simulation qui témoignent du fait que la dynamique du plasma est particulièrement sensible au choix de la fonction de distribution utilisée pour le calcul des paramètres de transport et des taux de réaction.

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction Générale de l'Armement (DGA), l'Agence de l'Innovation de Défense (AID) et la région Occitanie pour leur support financier.

Références

- [1] S. S. Yang, T. Y. Kim, D. K. Kong, S. S. Kim, and K. W. Yeom, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, Jun. 2009.
- [2] L. W. Cross, M. J. Almkawi, and V. K. Devabhaktuni, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Dec. 2013.
- [3] R. Pascaud, F. Pizarro, T. Callegari, L. Liard, O. Pigaglio and O. Pascal, *Electron. Lett.*, Jul. 2015.
- [4] A. Simon, R. Pascaud, T. Callegari, L. Liard, and O. Pascal, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Jul. 2018.
- [5] A. Simon, R. Pascaud, T. Callegari, L. Liard, and O. Pascal, *IEEE CAMA 2018*, Vasteras (Sweden), Sep. 2018.
- [6] G. J. M. Hagelaar *et al.*, *Journal of Physics D*, 2009.

Statut : doc3

Diffusion Thomson incohérente pour la mesure des propriétés électroniques d'une source ExB

T. Dubois¹, S. Tsikata¹, T. Minea²

¹ ICARE, CNRS Orleans, 1C Avenue De La Recherche Scientifique, 45000 Orléans

² LPGP, Université Paris Saclay, 91405 Orsay

mél: thibault.dubois@cnrs-orleans.fr

Les magnétrons planaires sont des sources plasma très utilisées pour la fabrication de couches minces en industrie, mais demeurent encore source de questionnement sur de nombreux points. Le mode de fonctionnement pulsé à fort courant (« High Power Impulse Magnetron Sputtering » (HiPIMS)), utilisé depuis 1999, [1] présente une physique complexe et dynamique, telle que l'apparition d'instabilités observées dans d'autres décharges ExB. [2,3].

Le mode HiPIMS permet sous certaines conditions d'obtenir des dépôts de couches minces ayant des propriétés supérieures à celles obtenues en mode continu. Néanmoins, le fonctionnement HiPIMS est proche du régime de l'arc, avec des courants et des densités électroniques très élevés et variant rapidement. Ces paramètres physiques et le fort champ magnétique de la source rendent difficile l'utilisation de sondes telles que les sondes de Langmuir dans une partie du plasma. Les diagnostics optiques permettent de s'affranchir des limitations des diagnostics invasifs et donne accès ainsi aux informations sur la dynamique et les propriétés plasma.

Dans ces travaux, l'étude du plasma d'un magnétron planaire en régime HiPIMS est effectuée avec la diffusion Thomson incohérente. [4]. Cette technique permet de mesurer différentes propriétés électroniques telles que la densité, la température (la fonction de distribution d'énergie des électrons) ou la dérive des électrons, et ce avec une grande résolution spatiale et temporelle. Des mesures en champ proche et résolues temporellement ont été effectuées.

Ces études ont permis une mesure directionnelle des propriétés électroniques perpendiculaire et parallèle aux lignes de champ, mettant en évidence un comportement anisotrope de la dérive des électrons.

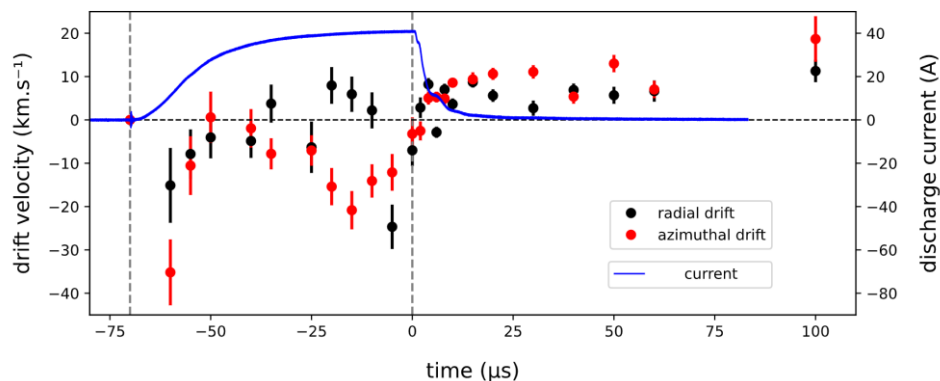


Figure 1 : Anisotropie dans la dérive des électrons. La durée du pulse est figurée par les lignes pointillés.

Références

- [1] J. Alami, "Enhanced ionized sputtering in hipims", *Vakuumin Forschung und Praxis* **25** (2013)
- [2] J.-P. Boeuf and M. Takahashi, "Rotating Spokes, Ionization Instability, and Electron Vortices in Partially Magnetized ExB Plasmas", *Phys. Rev. Lett.* **124**, 185005 (2020)
- [3] S. Tsikata and T. Minea, "Modulated Electron Cyclotron Drift Instability in a High-Power Pulsed Magnetron Discharge", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 185001 (2015)
- [4] B. Vincent, S. Tsikata, S. Mazouffre, T. Minea, and J. Fils, "A compact new incoherent thomson scattering diagnostic for low-temperature plasma studies", *Plasma Sources Science and Technology* **27**, 055002 (2018)

Statut : doc2

Stabilization of a lean premixed flame by nanosecond discharges

V.P. Blanchard¹, N.Q. Minesi¹, Y. Bechane¹, B. Fiorina¹, C.O. Laux¹

¹Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3, rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette

mél: victorien.blanchard@centralesupelec.fr

The energy production worldwide relies mainly on combustion and cannot be substituted by emission free sources in many industrial processes. Combustion is responsible for pollutant emissions that can be mitigate when burning lean premixed fuel-oxidizer mixtures. This type of flames is nevertheless very instable and subject to blowout, therefore not satisfactory for practical applications.

Plasmas have demonstrated very promising results to stabilize lean flames [1-3]. Nanosecond repetitively pulsed discharges [4-5] enable relevant choice of reduced electric field to heat the gas and brings a chemical selectivity to promote the production of radicals to increase the flame speed and thus stabilize the combustion [6-7].

Our goal is to characterize experimentally the thermal and chemical plasma effects to develop a predictive model suitable for combustion simulations without adding prohibitive computational costs. Experiments are carried out with a bluff-body burner. The methane-air flame is stabilized by nanosecond discharges of 6 kV applied at 20 kHz [8], the deposited energy is equal to 1.8 mJ per discharge. Temperature and species are measured by optical emission spectroscopy and laser induced fluorescence.

Numerical simulations of the experimental configuration are performed using a model previously developed [9-10]. Temperature and flame shape are well reproduced as shown in Fig. 1 and 2.

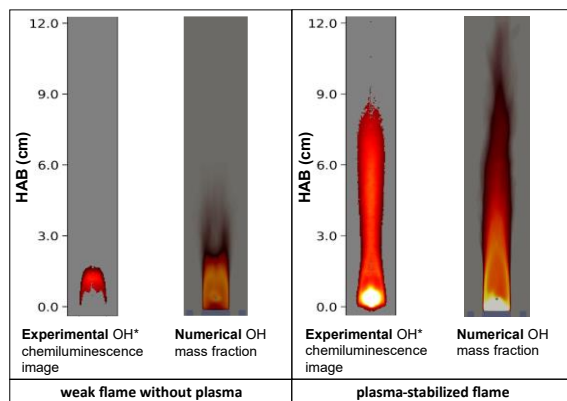


Figure 1 Comparison of numerical and experimental visualizations of the flame shape with and without plasma

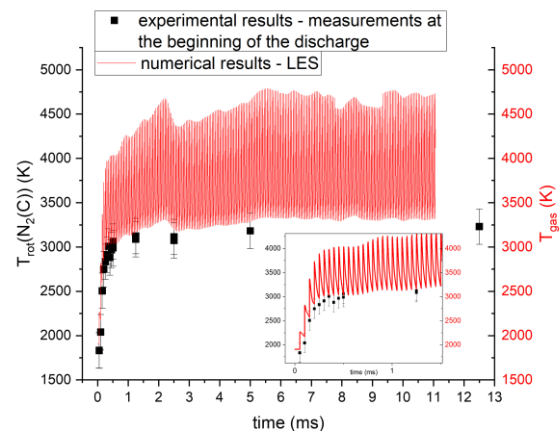


Figure 2 Comparison of numerical and experimental temperature evolutions of a lean flame stabilized by nanosecond discharges

References

- [1] A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 61–110, 2013
- [2] S. M. Starikovskaia, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 47, no. 35, 2014
- [3] Y. Ju and W. Sun, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 48, pp. 21–83, 2015
- [4] C. H. Kruger, C. O. Laux, L. Yu, D. M. Packan, and L. Pierrot, *Pure Appl. Chem.*, vol. 74, no. 3, pp. 337–347, 2002
- [5] D. Z. Pai, D. A. Lacoste, and C. O. Laux, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 19, no. 6, Nov. 2010
- [6] D. L. Rusterholtz, D. A. Lacoste, G. D. Stancu, D. Z. Pai, and C. O. Laux, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 46, , Nov. 2013
- [7] N. A. Popov, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 25, no. 4, 2016,
- [8] V. P. Blanchard, N. Q. Minesi, S. Stepanyan, G.-D. Stancu, and C. O. Laux, in *AIAA SciTech 2021 Forum*, 2021pp. 1–10
- [9] M. Castela, B. Fiorina, A. Coussement, O. Gicquel, N. Darabiha, and C. O. Laux, *Combust. Flame*, vol. 166, 2016
- [10] Y. Bechane and B. Fiorina, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 38, no. 4, pp. 6575–6582, 2021

Statut : doc3

Backward-Facing Step forced flow in a nanosecond pulsed cold atmospheric pressure argon plasma jet

T. Darny¹, G. Bauville¹, M. Fleury¹, S. Pasquiers¹ and J. Santos Sousa¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, 91405 Orsay, France

mail: thibault.darny@univ-orleans.fr

Plasma-Flow interaction in cold atmospheric pressure plasma jets (CAPPJ) is of great importance due to the direct influence on the reactive species production. So far, a majority of studies dealing with flow modifications have been devoted to helium CAPPJ. The role of the small perturbations on the highly unstable helium shear layer, due to the plasma generation, has been evidenced to explain the onset of turbulence at moderate Reynolds number [1,2]. It has also been shown that the effect of plasma heating and/or ionic wind in the plasma plume is too weak to explain the observed flow modification [3]. However, to our knowledge, the plasma-flow interaction with argon CAPPJ powered with DC pulses has never been investigated yet. This work studies the argon flow modification in a CAPPJ driven by nanosecond high voltage (HV) pulses [4], from single to multiple shots application. A Schlieren optical bench has been designed in order to visualize the argon flow downstream expansion in quiescent air, for moderate flow rates below 1 slm. A coupled approach is used between CCD Schlieren imaging and ICCD plasma plume imaging, both time-resolved. It is shown that the application of only one voltage pulse (i.e. single HV shot) is enough to disturb the flow, similarly to the model of Lietz *et al* [2]. The disturbed flow exhibits ripple propagation, on a timescale similar to the flow velocity. When operating in double HV shots, the second ionization wave can be used as a probe to instantly visualize the flow structure any time after the first voltage pulse application. For some flow rates, the ripple can increase in amplitude up to the point when it strongly deforms, or even stops, the plasma plume expansion, after which it is entrained by the flow and the plasma plume retrieves its full usual expansion. When a series of voltage pulses are applied, the maximal disturbance of the flow is achieved for a certain pulse repetition frequency, specific of each flow rate. It is associated with ripples alternation in the plasma plume, in a 3D helical-like arrangement. For greater pulse frequencies, the ripples progressively vanish, and the flow is clearly less disturbed. Once the ripples have vanished, increasing further the voltage pulse repetition frequency does not change the plasma plume and flow structures. We suggest that the repetitive plasma ignition mechanically forces the flow inside the capillary with consequences on the global flow structure, similarly to a forced backward-facing step flow with actuator [5],[6].

Acknowledgments: This research work was funded by the PLASCANCER project (INCa-PlanCancer N°17CP087-00).

References

- [1] Y. Morabit et al, Plasma Process Polym. 17:e1900217 (2021)
- [2] A.M. Lietz et al., Appl. Phys. Lett. 111, 114101 (2017)
- [3] E.R.W. Van Doremale et al., Plasma Sources Sci. Technol. 27, 095006 (2018)
- [4] Et. Es-Sebbar et al., J. Appl. Phys. 126, 073302 (2019)
- [5] N. Benard et al., Int. J. Heat Fluid Flow 61, 158 (2016)
- [6] T.Darny *et al.* submitted to Plasma Sources Sci. Technol.

Statut: Post-Doc

Session Posters - Mardi

Caractérisation d'un jet plasma d'argon/CO₂ pour traiter des plaies

Eloïse Mestre, Titaina Gibert, Sébastien Dozias et Claire Douat

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

Les plasmas connaissent un franc succès au niveau des applications biomédicales dû à leur capacité à générer diverses espèces réactives tout en produisant un champ électrique, des espèces chargées et des UV, tout en conservant une température relativement proche de la température ambiante. La combinaison de ces différents composants permet d'induire des effets synergiques intéressants, comme par exemple des effets anti-tumoraux, stérilisateurs et cicatrisants.

A l'heure actuelle, une grande partie de la communauté se focalise sur l'étude de la chimie générée par ces plasmas afin d'expliquer leurs différents effets positifs. Ces espèces sont principalement les espèces réactives de l'oxygène et de l'azote, qui sont issues de l'interaction du plasma et de l'air environnant. Mais étonnamment, le monoxyde de carbone (CO), qui peut être produit aisément par la dissociation du CO₂ ambiant par plasma a complètement été omis. Pourtant il est connu depuis longtemps que cette molécule est naturellement présente dans l'organisme et qu'elle joue un rôle clef contre le stress. C'est une molécule de signalisation, qui permet entre autres de diminuer l'inflammation et de réguler la dilatation des vaisseaux sanguins [1].

Ce poster présentera des résultats préliminaires sur l'utilisation d'un jet plasma comme source de CO en vue d'applications biomédicales [2]. L'étude portera principalement sur la caractérisation électrique d'un jet d'argon en présence ou non de quelques pourcents de CO₂.

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

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

Controlling perpendicular electric fields with biased electrodes

B.Trotabas¹, R. Gueroult¹

¹Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 31062 Toulouse, France

email: baptiste.trotabas@laplace.univ-tlse.fr

The ability to impose and control an electric field perpendicularly to magnetic surfaces in magnetized plasmas is of great importance to a broad range of applications [1]. It has notably been shown in recent years that plasma rotation in $E \times B$ configurations could offer opportunities to develop new plasma separation techniques [2], as proposed for instance for nuclear spent fuel and rare earth elements recycling [3,4].

A key step to advance these technologies is to understand how the electric potential distributes itself in a magnetized plasma column, and in particular how the perpendicular electric field can possibly be controlled via the electric bias applied on polarized electrodes terminating a magnetized plasma column (see Figure 1). Progress towards this goal requires addressing a pair of basic underlying questions, namely how the electric potential applied on a biased electrode is transferred to the plasma through the sheath [5], and how this potential then varies along a given magnetic field line in a quasi-neutral plasma [6].

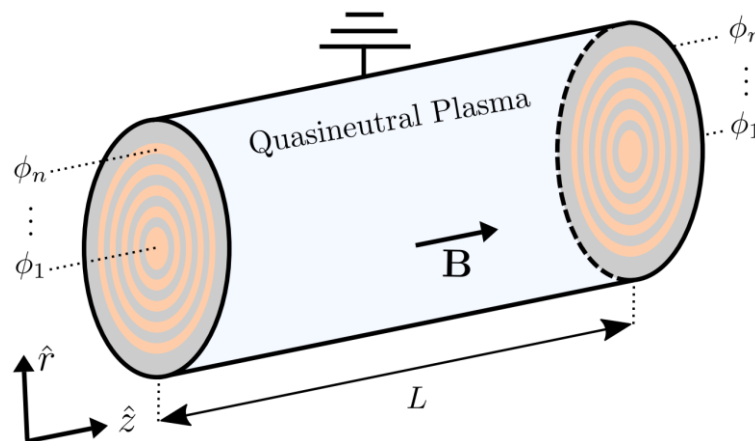


Figure 1 : Magnetized plasma column terminates on two symmetrical sets of independently biased ring electrodes (in orange) at potential (ϕ_1, \dots, ϕ_n) with respect to the grounded vacuum vessel. The entire domain is permeated by a uniform axial magnetic field $\mathbf{B} = B_0 \hat{z}$.

So far, these two problems have mostly been treated separately. In this work we consider the particular case of negatively biased electrodes and examine in a unified model the combined effects of biasing and emission on the voltage drop across the sheath and along magnetic field lines.

References

- [1] I. D. Kaganovitch *et al.* (2020), Phys. Plasmas, 27, 120601
- [2] S. J. Zweben, R. Gueroult and N. J. Fisch (2018), Phys. Plasmas, 25, 090901
- [3] R. Gueroult and N. J. Fisch (2014), Plasma Sources. Sci. Technol., 23, 035002
- [4] R. Gueroult, J.-M. Rax and N.J. Fisch (2018), J. Clean. Prod., 182, 1060
- [5] G. Liziakin, A. Gavrikov and V. Smirnov (2020) Plasma Sources Sci. Technol. 29 015008
- [6] R. Gueroult, J.-M. Rax and N. J. Fisch (2019) Phys. Plasmas 26 122106

Statut : doc3

Décharge plasma sur céramique multicouche

T. Fridlender¹, N. Bénard², E. Moreau³

^{1,2,3} Institut PPRIME - UPR 3346 – CNRS - Université de Poitiers - ISAE/ENSMA, SP2MI Téléport2 Bd Marie & Pierre Curie BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France
mél: tom.fridlender@univ-poitiers.fr

L'objectif du travail en cours à l'Institut PPRIME est de construire puis évaluer les performances d'une décharge DBD à l'échelle micrométrique sur un diélectrique multicouche. Usuellement, les DBDs se composent de deux électrodes identiques mises en regard et séparées par une fine couche de diélectrique (figure 1). Ici, pour des raisons de durabilité, le matériau diélectrique est composé d' Al_2O_3 à 96% et l'une des électrodes est encapsulée au sein du diélectrique. La géométrie des électrodes en cours de réalisation sera similaire à celle employée par Bénard et al. [4], mais la structure sera composée de mailles carrées. En effet, l'objectif du doctorat est d'étudier les échanges d'énergie multi-échelles dans l'écoulement du sillage d'une grille équipée d'un système de contrôle actif par plasma. Les grilles sont des systèmes passifs utilisés depuis les travaux de Simmons and Salter [1] afin d'étudier les interactions entre échelles turbulentes. Elles sont composées de barreaux verticaux et horizontaux régulièrement espacés formant des mailles carrées afin de générer une turbulence homogène et isotrope dans leur sillage à une distance allant de 30 à 50 mailles [2], [3]. L'ajout localisé de perturbations périodiques haute fréquence grâce à l'actionneur plasma permettra d'étudier les échanges énergétiques au sein des échelles de turbulence et de vérifier la possibilité de renforcer la cascade inverse de Kolmogorov à l'aide de décharge électrique.

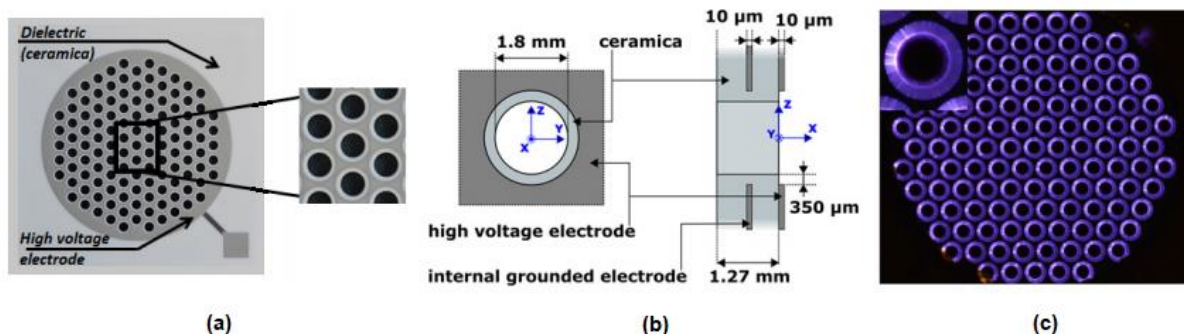


Figure 1 : Photographies de la grille étudiée par Bénard et al. (a), vue de face et coupe schématisques d'une maille (b) et décharge générée par la grille à 7 kV et 2 kHz (c) [4]

L'étude amont en cours de réalisation consiste donc à fiabiliser le procédé de réalisation de ces grilles en adoptant des techniques d'encapsulation performantes en milieu haute tension. Des essais de construction ont déjà été réalisés sur des céramiques d'alumine fines bicouche afin de produire de premiers échantillons d'actionneurs. L'institut est équipé d'un système d'usinage par laser nous permettant de construire les prototypes de grilles avec une précision de $\pm 40 \mu\text{m}$ (protolaser U4). Cet équipement permet d'obtenir la précision nécessaire afin d'amorcer puis de maintenir des décharges relativement homogènes. Cependant, il arrive fréquemment que les décharges qui partent de l'électrode haute-tension passent au régime d'arc du fait notamment d'un défaut d'isolation au niveau de l'assemblage des plaques de diélectrique.

Références

- [1] L. F. G. Simmons, C. Salter, Proceedings of the Royal Society of London, **145(854)**, pp. 212–234 (1934)
- [2] G. Comte-Bellot, S. Corrsin, Journal of Fluid Mechanics, **25(4)**, pp. 657–682 (1966)
- [3] G. Comte-Bellot, S. Corrsin, Journal of Fluid Mechanics, **48(2)**, pp. 273–337 (1971)
- [4] N. Benard, P. Audier, E. Moreau, K. Takashima, A. Mizuno, Journal of Electrostatics, **88**, pp. 15–23 (2017)

Statut : doc1

Décharges à barrière diélectrique pulsées entre deux plaques et entre une plaque et une surface liquide

V. BERRY¹, E. MOREAU¹, T. ORRIERE¹, N. BENARD¹, P. LEVEQUE²

¹PPRIME, UPR CNRS 3346, Université de Poitiers, 11 bd M. et P. Curie, 86073 POITIERS CEDEX 9

²XLIM, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 123 Av. Albert Thomas, 87000 LIMOGES

mél: eric.moreau@univ-poitiers.fr

Depuis quelques années, une méthode de traitement des cellules cancéreuses impliquant l'utilisation d'impulsions électriques est développée par l'équipe BioEM du laboratoire XLIM [1, 2]. Une collaboration entre cette équipe et l'équipe EFD de l'Institut PPRIME a été récemment initiée dans le but de caractériser les propriétés électriques et optiques de la décharge à barrière diélectrique pulsée utilisée dans [2], entre une plaque recouverte d'une barrière diélectrique et une surface liquide. Tout d'abord, de façon à mieux appréhender ce type de décharge, des mesures ont été effectuées avec une configuration de type plaque – plaque (diamètre de 18 mm) lorsque les paramètres d'entrée varient (tension jusqu'à 30 kV, gap entre 250 μm et 1.5 mm, fréquence de 1 Hz à 1 KHz) et pour différents matériaux diélectriques. Ensuite, des relevés ont été réalisés lorsque l'électrode de masse est remplacée par une plaque de verre recouverte d'ITO de façon à pouvoir observer la morphologie de la décharge depuis le dessous de cette électrode. Enfin, la décharge entre une plaque et une surface liquide a été étudiée.

A titre d'exemple, la **figure 1.a** montre les formes d'onde de la tension appliquée et du courant mesuré. La **figure 1.b** représente une image iCCD de la décharge avec la palque d'ITO. On peut voir que la décharge est relativement homogène, avec la présence de quelques filaments d'intensité variable. L'ensemble des résultats a montré que la décharge est toujours filamentaire lorsque celle-ci est établie au-dessus de la nappe liquide. Dans le cas d'une DBD plaque – plaque, la décharge devient filamentaire lorsque le gap atteint et dépasse une valeur d'environ 1 mm.

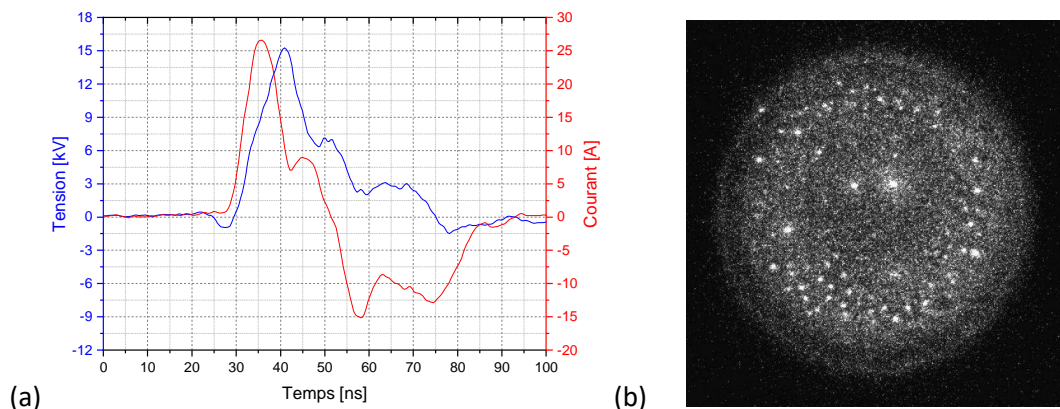


Figure 1 : Courbes de courant et de tension (a) et image de la décharge entre l'électrode active de cuivre avec une barrière diélectrique de verre et une plaque d'ITO (b).

Références

- [1] Nazila Esmaeili and Michael Friebe. Electrochemotherapy: A Review of Current Status, Alternative IGP Approaches, and Future Perspectives. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019:1–11, 2019.
- [2] Martinus Dobbelaar. Conception et réalisation de systèmes d'exposition plasma nanoseconde pour des applications biomédicales. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2017.
- [3] Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, Yan Ping, Zhang Shichang, and Pan Ruzheng. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(21):215203, 2008.

Statut : doctorant

Detection and elimination of Chromium(VI) Application to the removal of industrial liquid effluents

Truong Son NGUYEN^{1*}, C. Rond¹, A. Vega¹, X. Duten¹ and S. Forget²

¹LSPM—CNRS UPR 3407, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, 93430, France

²LPL- UMR 7538, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, 93430, France

(*)Email: son.nguyen@lspm.cnrs.fr

We investigated the reduction of chromium VI by pin-to-pin micro-pulsed discharge in water (Fig. 1a) [1]. We have studied the influence of several different parameters of plasma discharge operation: Energy injection (include apply voltage, frequency, gap between two electrodes), and pulse duration. We reported that the concentration of Cr(VI) decreased with the increased of the energy and pulse duration. (Fig.1b) shown the effect of the apply voltage to the reduction efficiency and the decreased linear with time, a complete reduction of Cr(VI) occurs after 75 min for 12kV and 120 min for 9kV.

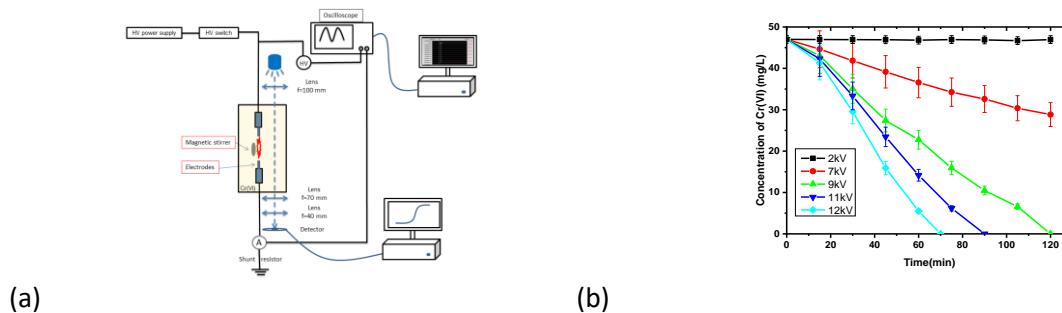


Fig. 1(a) Experimental set-up, (b) Concentration of Cr(VI) versus time

The influence of the pulse duration on the reduction efficiency have been present in fig. 2

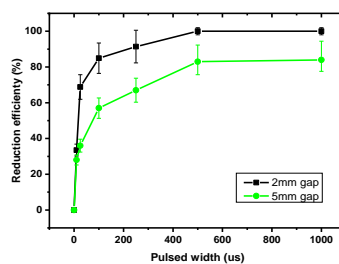


Fig. 2 Reduction efficiency versus pulse duration

The obtained results strongly depend on the pulse length and also depend on the gap between two electrodes. The huge different from 2mm gap with 5mm gap can be explain because of the characteristic of plasma discharge. We report that the reduction efficiency increased with the increased of the pulse length.

Acknowledgement

This work bearing the reference ANR-11-LABX-086 has benefited from State aid managed by the National Research Agency under the Future Investments program with the reference number ANR-18-IDEX- 0001

Références

[1] Nguyen T. S., et al. 2020 Investigation of Hydrogen Peroxide Formation After Underwater Plasma Discharge. Plasma Chemistry and Plasma Processing 40(4):955-969

Elaboration de films minces de ZnMn_2O_4 nanocristallin par un plasma RF basse pression.

L. Bekkar¹, A. Lemarchand¹, M. Nikravech¹

¹ LSPM, CNRS, Université Sorbonne Paris Nord, 93430 Villetaneuse, France

Mél: lounis.bekkar@lspm.cnrs.fr

Le besoin de développer des batteries à haute densité d'énergie, plus respectueuses de l'environnement et moins coûteuses que les batteries Li-Ion a suscité un intérêt croissant vis-à-vis des batteries Zinc-Ion (ZIB) en raison de la grande abondance du zinc et de leur sécurité intrinsèque [1,2]. Parmi les matériaux cathodiques des ZIB, le ZnMn_2O_4 spinelle avec des lacunes d'oxygène se distingue particulièrement grâce à ses performances électrochimiques [3].

Ce matériau est essentiellement fabriqué *via* des méthodes chimiques douces qui nécessitent des temps de synthèse relativement longs et un recuit à des températures dépassant généralement les 500°C pour qu'il soit bien cristallisé [4]. Cela limite donc l'utilisation des substrats de cathode sensibles aux températures élevées, dans l'optique d'une méthode d'élaboration en une seule étape. Dans ce contexte, nous avons élaboré des films minces nanostructurés de ZnMn_2O_4 en utilisant le procédé Spray Plasma CVD [5]. Grâce à la réactivité du plasma basse pression, nous avons pu synthétiser un matériau polycristallin à basse température (~160°C) et sans post traitement thermique (**Figures 1**). La cristallinité du matériau obtenu dépend cependant des caractéristiques du plasma. En perspective, nous tenterons alors d'expliquer le rôle des espèces réactives (électrons, radicaux O, OH) présentes dans le plasma dans l'obtention de l'oxyde mixte ZnMn_2O_4 .

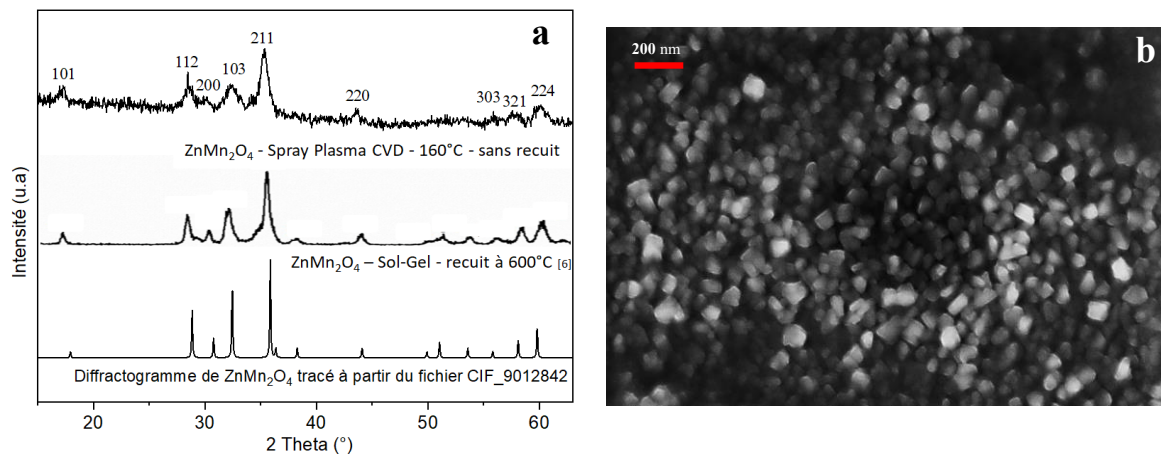


Figure1 : a) Diagramme RX du ZnMn_2O_4 élaboré avec et sans plasma. **b)** Image MEB du ZnMn_2O_4 déposé avec plasma à 160°C sans recuit.

Références

- [1] NING ZHANG, X. C., MENG YU, ZHIQIANG NIU, FANGYI CHENG, & CHEN, A. J. 2019. Materials chemistry for rechargeable zinc-ion batteries. ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY
- [2] ZENG, X., HAO, J., WANG, Z., MAO, J. & GUO, Z. 2019. Recent progress and perspectives on aqueous Zn-based rechargeable batteries with mild aqueous electrolytes. *Energy Storage Materials*, 20, 410-437.
- [3] ZHANG, H., WANG, J., LIU, Q., HE, W., LAI, Z., ZHANG, X., YU, M., TONG, Y. & LU, X. 2019. Extracting oxygen anions from ZnMn_2O_4 : Robust cathode for flexible all-solid-state Zn-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 21, 154-161.
- [4] DANG, W., WANG, F., DING, Y., FENG, C. & GUO, Z. 2017. Synthesis and electrochemical properties of ZnMn_2O_4 microspheres for lithium-ion battery application. *Journal of Alloys and Compounds*, 690, 72-79.
- [5] BABA, K. 2013. Développement et optimisation du procédé Spray Plasma de dépôt de couches minces d'oxyde de zinc - Application aux cellules photovoltaïques. Thèse de doctorat.
- [6] WU, X., XIANG, Y., PENG, Q., WU, X., LI, Y., TANG, F., SONG, R., X. 2017. Green-low-cost rechargeable aqueous zinc-ion batteries using hollow porous spinel ZnMn_2O_4 as the cathode material. *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 17990-17997.

Statut : Doc1

Étude expérimentale d'une torche à plasma d'arc segmentée

C. Ruelle¹, S. Goutier¹, A. Kéromnès¹, V. Rat¹, E. Meillot²

¹ IRCER, CNRS UMR7315, 87068 Limoges

² CEA, DAM, Le Ripault, 37260 Monts

mél: celine.ruelle@unilim.fr

Dans les torches à plasma d'arc conventionnelles, l'arc électrique créé entre les deux électrodes peut s'accrocher sur l'intégralité de la surface interne de l'anode. L'usure de l'anode étant fortement liée au temps de séjour du pied d'arc en un point, cette liberté d'accrochage permet donc de limiter son érosion. Elle présente cependant des inconvénients, notamment l'instabilité de l'arc électrique, qui va se traduire par des fluctuations de tension. En sortie de tuyère, ces instabilités vont affecter l'enthalpie du jet de plasma et favoriser le mélange avec le gaz froid environnant conduisant au refroidissement du plasma. L'injection des particules céramiques et leur traitement seront donc également affectés.

Pour pallier ces problèmes d'instabilités, des torches à plasma d'arc segmentées ont été développées. Ce type de torche se distingue d'une torche conventionnelle par la présence d'un étage supplémentaire segmenté, appelé « neutrode » (Fig. 1).

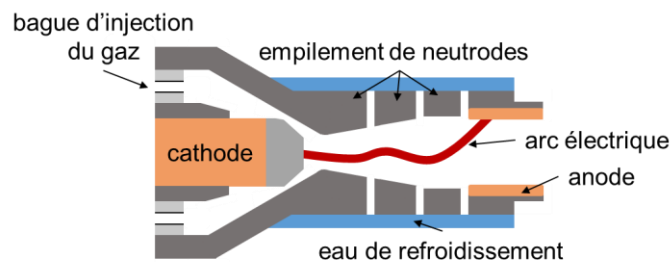


Figure 1 : Schéma en coupe d'une torche SimplexPro™.

Il s'agit d'un prolongement de l'anode, composé d'un empilement d'anneaux de cuivre isolés les uns des autres et se terminant par l'anneau anodique sur lequel l'arc électrique va se fixer. Cette configuration force l'extension de l'arc électrique, limite ses mouvements à l'anneau anodique et améliore sa stabilité. L'allongement de l'arc va se traduire par des tensions moyennes plus élevées, augmentant ainsi l'enthalpie massique du jet de plasma et conduisant à une amélioration des propriétés des dépôts. En revanche, le mouvement du pied d'arc anodique étant limité, l'anode supporte une charge thermique localisée plus importante, dépendante aussi de la nature de l'attachement de pied d'arc (diffus ou constricté).

Peu de travaux ont été réalisés sur le comportement de ces torches segmentées, tant sur les processus d'érosion des électrodes que sur le mouvement de l'arc électrique. C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse. Dans un premier temps, les propriétés du plasma seront mesurées en fonction des paramètres expérimentaux. Les processus d'érosion seront mis en relation avec la nature de l'attachement du pied d'arc anodique. Les diagnostics qui seront mis en œuvre sont, entre autres, des diagnostics électriques, de la spectroscopie d'émission optique, des mesures de vitesse du plasma et de l'imagerie résolue en temps. La deuxième partie de la thèse intégrera le comportement de ce jet de plasma en considérant l'injection de particules céramiques solides afin de qualifier les types de microstructures des dépôts.

Ces outils devraient permettre de répondre à de nombreuses questions : comment se comporte l'arc électrique dans la torche ? Quelle est sa longueur, son rayon ? Où s'attache-t-il dans la tuyère ? Quelle est l'influence des fluctuations de tension sur le jet en sortie de tuyère ? Comment va évoluer la température du jet de plasma avec l'injection de poudre ? Quelle sera l'incidence des vapeurs de céramique sur les propriétés du plasma ?

Statut : doc1

Étude préliminaire de l'oxydation d'alliages Fe-Ni, présents dans les débris spatiaux, lors de rentrées atmosphériques terrestres

M. Lesage¹, P. Boubert¹, S. Jouen²

¹ CORIA, UMR CNRS 6614, Normandie Université, 76801 Saint-Étienne du Rouvray, France

² GPM, UMR CNRS 6634, Normandie Université, 76801 Saint-Étienne du Rouvray, France
mél: morgan.lesage@coria.fr

La loi sur les opérations spatiales (LOS) votée en 2008 a en partie comme objectif de définir un cadre légal concernant la problématique des débris spatiaux et en particulier des dégâts possible engendrés par leur rentrée atmosphérique. Afin d'estimer ces dégâts le CNES (Centre National d'Études Spatiales) à développé l'outil multidisciplinaire DEBRISK [1]. Cet outil calcule, pour chaque débris, sa trajectoire en 3D, son altitude de disparition, sa masse et son énergie à l'impact au sol. Lors d'une rentrée atmosphérique terrestre hypersonique, un plasma d'air se forme en aval de l'onde de choc, ce plasma en interaction avec l'engin spatial est le principal facteur de dégradation. Le calcul de DEBRISK nécessite donc de nombreuses données caractérisant les différents matériaux dans ces conditions.

En effet, à haute température, les bases de données des propriétés aérothermochimiques sont très limitées et ne permettent pas des calculs précis. Le but est donc d'étudier la dégradation de certains matériaux dont la résistance à une rentrée atmosphérique est incertaine. Dans cet optique deux alliages Fe-Ni, Invar 36 (Fe₆₄Ni₃₆) et l'Inconel 718 (Ni₅₄Fe₁₉Cr₁₉MoTiNbAl) sont particulièrement intéressants puisque répandus dans la confection des engins spatiaux [2-4]. En laboratoire, contrairement à une rentrée atmosphérique, le plasma n'est pas obtenu par un écoulement hypersonique autour de l'objet mais par la soufflerie plasma inductif SOUPLIN du CORIA, déjà utilisée par le passé pour différentes études de rentrées atmosphériques terrestre et martienne [5]. Le principe est de reproduire les conditions plasmas rencontrées en aval de l'onde de choc d'une rentrée atmosphérique afin de simuler les interactions plasma-matière en proche paroi et, dans notre cas, l'oxydation.

De nombreux paramètres influent sur l'oxydation de ces alliages, en particulier l'enthalpie massique, la pression totale et le temps d'exposition. Ces deux premiers paramètres vont principalement influencer sur le taux de dissociation du plasma et sur sa température. Dans cette étude préliminaire seule l'influence du temps d'exposition sur la nature et la structure des oxydes est évaluée. L'étude menée est décomposée en deux étapes distinctes, la première concerne des séries de mesure *in situ* avec l'étude de la couche limite par spectroscopie d'émission et la mesure de l'évolution temporelle de la température de l'échantillon. La seconde phase, *ex situ*, s'intéresse à la composition et la structure des oxydes formés en utilisant des méthodes de diagnostic tel que la microscopie électronique à balayage, la diffraction de rayon X et la diffusion Raman.

Références

- [1] P. Omaly, C. Mangnin Vella, S. Galera, Proceedings of the 6th IAASS Conference, Montréal (Ca) (2013)
- [2] W.H. Otte, D.B. O'Donnell, S.D. Kiser, C.W. Cox, Welding Journal **75**, 51-55 (1996)
- [3] L. Barka, M. Balat-Pichelin, J.-L. Sans, E. Bêche, Journal of Alloys and Compounds **772**, 1003-1016 (2019)
- [4] M. Balat-Pichelin, J.-L. Sans, E. Bêche, V. Flaud, J. Annaloro, Materials Characterization **127**, 379-390 (2017)
- [5] N. Brémare, S. Jouen, P. Boubert, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 165-201 (2016)

Statut : doc3

Evolution d'un Plasma d'Air Induit par Impulsion Laser Picoseconde en Présence d'un Champ Magnétique

P. Dubois¹, A. Favre¹, B. Quevreur¹, S. Idlahcen¹, J. Juraszek², V. Morel¹, A. Bultel¹

¹CORIA, UMR 6614, Université de Rouen-Normandie, 76801 Saint-Étienne du Rouvray

²GPM, UMR 6634, Université de Rouen-Normandie, 76801 Saint-Étienne du Rouvray

mél: 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 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 la chambre de confinement magnétique, le champ étant activé.

Cette communication présente une étude préliminaire concernant l'effet d'un champ magnétique sur un plasma d'air induit par la focalisation d'une impulsion laser picoseconde à pression atmosphérique. Comme le montre la Figure 1, le champ magnétique statique et homogène de 0,95 T est généré par un assemblage d'aimants permanents au néodyme, dans une direction transverse à la direction de propagation de l'impulsion laser (1064 nm, 30 ps, 80 mJ).

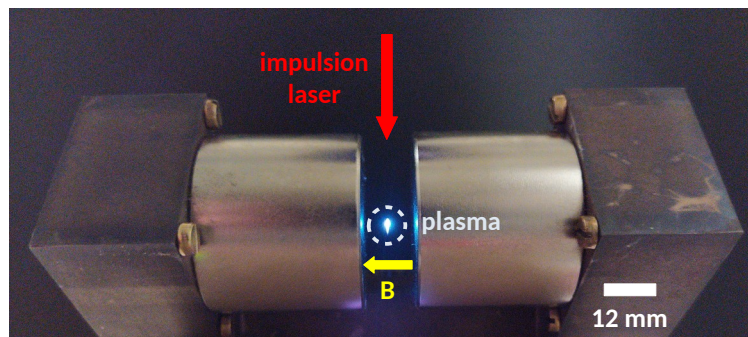


Figure 1 : Photographie d'un plasma d'air entre les deux aimants cylindriques

Un suivi temporel de la dynamique du plasma est réalisé par imagerie rapide à l'aide d'une caméra ICCD, et par spectroscopie d'émission de raies de l'azote et de l'hydrogène. Les résultats obtenus sont confrontés à un modèle de magnétohydrodynamique résistive [3]. Enfin, des perspectives sont proposées sur les prochaines expériences à réaliser pour compléter ces premiers résultats, en particulier sur des échantillons solides (tungstène et béryllium) à basse pression.

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** (2007) 1138-1147

[3] S.S. Harilal, M.S. Tillack, B. O'shay, et al., *Phys. Rev. E* **69** (2004) 026413

Statut : doc2

Focusing an intense relativistic electron beam for flash radiography

A. Dudès¹, C. Fourment¹, F. Dorchies²

¹CEA CESTA, 15 av des sablières, 33114 LE BARP

²CELIA, 351 cours Libération, 33400 TALENCE

mél : adrien.dudes@cea.fr

Flash radiography is an imaging technique used at CEA and aimed to study dense objects in fast hydrodynamic evolution. In order to produce the X-rays required by the technique, a high energy ($\sim 20\text{MeV}$) short duration ($< 100\text{ns}$) electron beam interacts with a high atomic number target foil [1]. The radiation are produced thanks to Bremsstrahlung effect in the foil. Focusing the electron beam on the target leads to a better resolution of the flash radiography image.

This work consists to study the focus of a relativistic electron beam (3.3MeV ; 60ns ; 1.9kA) thanks to a preformed plasma. This work is the continuation of the thesis of Thomas Lahens who has studied the propagation of an electron beam in a cylindrical glass full of helium gas and plasma [2]. He has shown that helium gas ($10^{-1} - 10^{-2}$ mbar) had an influence on the propagation of the electron beam comparing to vacuum ($\sim 10^{-6}$ mbar) due to the ionization of atoms by the beam.

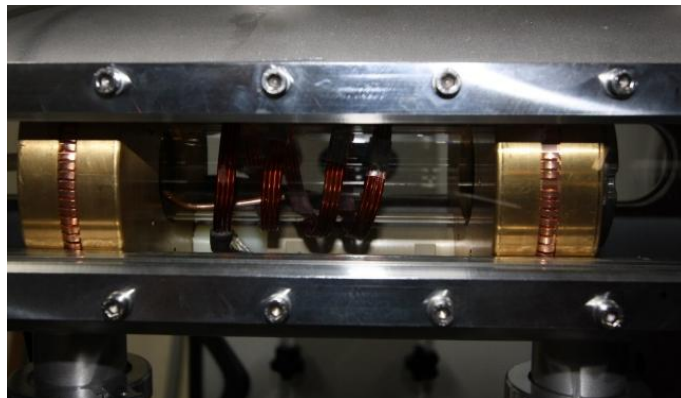


Figure 1 : *Experimental setup where the preformed plasma is generated*

In order to study the beam propagation in a preformed plasma, a high enough ionization degree is required to overcome the ionization of neutrals by the beam. Here we report how to produce a pulsed, low density plasma with ionization rate reaching $\sim 1\%$. A plasma at low pressure ($10^{-3} - 10^{-4}$ mbar) is seeded by a high-voltage spark and further ionized by inductive heating in order to pre-ionize the gas before the propagation of the beam.

Références

[1] N. Pichoff, "Les nouvelles limites de la radiographie éclair." Clefs CEA n154, pp. 59-66.

[2] T. Lahens, Propagation d'un faisceau d'électrons relativistes intense de radiographie éclair dans un plasma froid. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2019

Statut : doc1

Functionalization of MIL-53(Al) by means of ECR plasma treatment: a feasibility study.

R. Jean-Marie-Desiree¹, A. Najah¹, S. Cuynet¹, L. de Poucques¹, G. Marcos¹

¹ Institut Jean Lamour, CNRS-Université de Lorraine, Campus Artem, 2 allée André Guinier, 54011 Nancy

mél: ronny.jean-marie-desiree@univ-lorraine.fr

Metal-Organic Frameworks (MOFs) (figure 1) are an incoming class of materials, which have been extensively studied these last decades. Their high surface-to-volume ratio and low density resulting to be promising materials for many practical and industrial applications, such as gas storage [1].

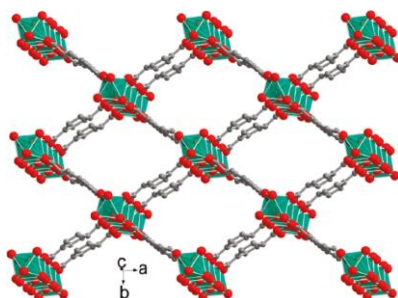


Figure 1 : Ball-and-stick representations of the 3D framework structure of MIL-53(Al) with Al atoms displayed as octahedra linked by terephthalate organic ligand (color codes: Al, bluish green; C, gray; O, red) [2].

Among the studies around MOFs, enhancing their sorption performance has been a significant challenge. Indeed, most of the well-known MOFs materials are not usable in realistic and non-ideal environments. A possible solution could be functionalizing MOFs' organic ligands to introduce specific feature depending on the chosen radicals (*i.e.* functional group).

Functionalization methods can be classified in two categories. The first one, called pre-functionalization, consists in chemically bond radicals to organic ligands right before MOFs synthesis [2]. As for the second one, called post-synthesis modification (PSM), this functionalization step occurs after MOFs synthesis [3]. The latter is a general, strategic approach due to a greater control of the functionalizing process to maintain the overall stability of the MOFs' initial lattice. While chemical wet methods have been widely carried-out, this study suggests a new route to functionalize by PSM approach: plasma treatments.

In this study, an electron cyclotron resonance (ECR) source has been used to investigate the feasibility to functionalize a MOF called MIL-53(Al) (MIL stands for Material of Institute Lavoisier) by the mean of low-pressure cold N₂-H₂ plasma (~ 4 Pa).

On the first hand, ECR plasma was diagnosed with optical emission spectroscopy in order to find an optimum condition where the NH per N₂ intensity ratio is the highest. On the other hand, material characterization (FTIR, DRX, EDX) has been done to track the efficiency of NH-functionalization with different treatment conditions.

References

- [1] G. Férey, M. Latroche, C. Serre, Chem. Commun. **24**, pp. 2976–2977 (2003)
- [2] S. Biswas, T. Ahnfeldt, N. Stock, Inorg. Chem. **Vol. -50**, pp. 9518–9526 (2011)
- [3] K.K. Tanabe, S.M. Cohen, Chem. Soc. Rev. **Vol. -40**, pp. 498-519 (2011)

Statut : doc1

Generation of guided streamers in a magnetic-coil plasma gun device (MCPG): influence of electromagnetic induction on propagation and counter-propagation kinetics

H. Decauchy¹, T. Dufour¹

¹Laboratoire de physique des plasmas, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, École Polytechnique, 4 place Jussieu 75252 PARIS
email: henri.decauchy@sorbonne-universite.fr

First, forward/backward propagation of guided streamers generated by a HV pulse generator is studied using a plasma gun device interacting with a grounded metallic target [1]. Electrical measurements combined with high-resolution (1ns) ICCD imaging are achieved to decipher the kinetics of propagation, as illustrated in Figure 1. In agreement with previous numerical [2] and experimental approaches [3], the counter-propagation of the positive guided streamers is clearly observed from 434 to 3000 ns. These observations are also partly supported by electrical measurements carried out in the target. Interestingly, a second guided streamer counter-propagates from 1100 ns to 3000 ns without entering into the capillary. Several hypotheses will be discussed to explain such phenomena.

Second, the plasma gun device is implemented with a magnetic coil coaxially placed at a distance d from the inner HV electrode, while the grounded target remains 15 mm away from the capillary's outlet. Such configuration permits to study the influence of electromagnetic induction on guided streamers propagation. ICCD imaging clearly shows that before/after passing through the magnetic coil, the streamer experiences deceleration due to a partial conversion of its kinetic energy to magnetic energy. Depending on the location of the magnetic coil, we explain how this conversion rate can be increased and to which extent. We also demonstrate a strong correlation between these ICCD measurements and measurements of current profiles carried out inside the magnetic coil and in the grounded target.

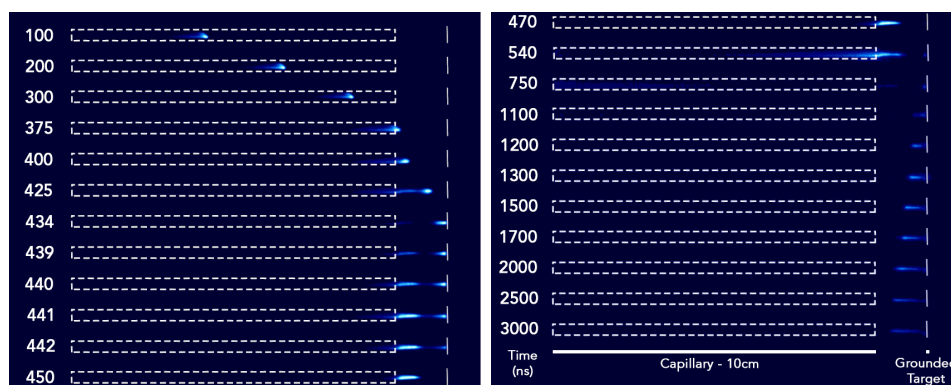


Figure 1 : Timeline of a positive guided streamer propagating in the capillary (10 cm in length) before and after interacting with a grounded target.

Références

- [1] Judée, F., & Dufour, T. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52 16 (2019)
- [2] Norberg, S. A., Johnsen, E., & Kushner, M. J. *Journal of Applied Physics*, 118 1 (2015)
- [3] Darny, T., Pouvesle, J. M., Puech, V., Douat, C., Dozias, S., & Robert, E. *PSST*, 26 4 (2017)

Statut : Doc3

Instabilités dans les décharges $E \times B$ des propulseurs à effet Hall

Federico Petronio^{1,2,*}, Alejandro Alvarez-Laguna¹, Pascal Chabert¹, Anne Bourdon¹

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Institut Polytechnique de Paris, 91128 Palaiseau, France

² Propulsion Unit, Safran Aircraft Engines, Vernon, France, *federico.petronio@lpp.polytechnique.fr

I. INTRODUCTION

Le propulseur à effet Hall (HT) pour les satellites, développé dans les années 1960/70, est un système complexe tant par sa géométrie, sa topologie magnétique et son fonctionnement qui reste peu compris analytiquement. Malgré cela, des milliers de ces propulseurs sont utilisés en ce moment. Les nanosatellites de nouvelle génération demandent des propulseurs très différents (taille, puissance, etc.) par rapport à ceux qui sont utilisés dans les missions d'exploration de l'espace lointain. L'objectif final de notre travail est donc d'avoir un code qui puisse prédire le fonctionnement des propulseurs et apporter des suggestions pour le design de nouveaux modèles.

Le code *LPPic* permet de simuler deux plans d'un propulseur HT : le plan radial-azimutal ($R - \theta$), qui permet l'étude des interactions du plasma avec les surfaces du canal du propulseur et le plan axiale-azimutal ($Z - \theta$) où la direction axiale Z , est la direction de propulsion.

II. LES INSTABILITÉS

Même si les instabilités électrostatiques dans les propulseurs ont été objet d'études durant plusieurs années dans la communauté, le spectre de toutes les instabilités qui peuvent exister dans ces systèmes est encore loin d'être entièrement connu. Ces instabilités jouent un rôle fondamental dans la physique du propulseur HT, pour cela nous les étudions et dans le plan $R - \theta$ et dans le plan $Z - \theta$.

En plus de la bien connue *Electron Cyclotron Drift Instability* (ECDI), dans les plan $R - \theta$ nous avons identifié une instabilité avec une composante radiale et une azimutale, la *Modified Two-Streams Instability* (MTSI), et nous l'avons analysé en détail, en identifiant les conditions qui favorisent la croissance de cette instabilité et certains effets de l'MTSI sur la décharge plasma [1].

Les simulations dans la direction axiale-azimutale ($Z - \theta$) permettent de prendre en compte la convection de l'instabilité ECDI et de mieux quantifier le transport anormal des électrons dans la direction axiale. Dans ce plan de simulations nous observons deux autres instabilités, le *Mode de Respiration* (BM) et la *Ion Transit-Time Instability*

PSD entre 280.00 et 320.00 μs , $x = 3.34$ cm

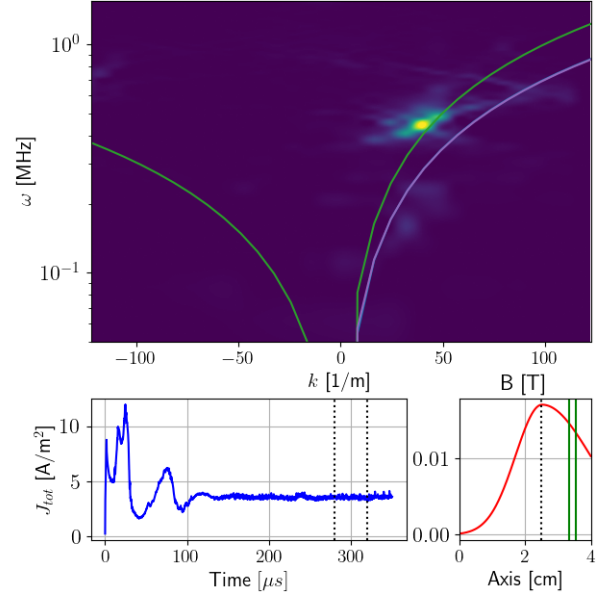


Fig. 1. Densité spectrale de puissance sur l'axe du propulseur.

(ITTI) [2]. Cette dernière a été étudiée avec une technique qui permet de reconstruire la densité spectrale de puissance "à deux points". Grâce à cette méthode, nous avons pu étudier la relation de dispersion dans le plan $Z - \theta$ et la comparer aux courbes théoriques, comme le montre la Figure 1.

III. CRÉDITS

Les travaux sur ces propulseurs à effet Hall au LPP sont menés dans le cadre d'une chaire ANR industrielle "POSEIDON" avec Safran Aircraft Engines. La thèse de FP est financée grâce à une bourse CIFRE par Safran. Les simulations ont été réalisées en collaboration avec le CINES, projet DARI A0100510439.

REFERENCES

- [1] Petronio, F. *et al.*, "Conditions of appearance and dynamics of the Modified Two-Stream Instability in $E \times B$ discharges", *Physics of Plasmas*, 2021, <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0046843>
- [2] Charoy, T. *et al.*, "The interaction between ion transit-time and electron drift instabilities and their effect on anomalous electron transport in Hall thrusters", *Plasma Sources Sci. Technol.* 2021, 10.1088/1361-6595/ac02b3

Statut : DOC2

Instant dissipated power monitoring process of a RF atmospheric pressure micro-plasma jet device : application to biological materials

S. Iséni¹, S. Bekeschus², P. Lüttjohann³ and K.-D. Weltmann²

¹ *Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés (GREMI)-UMR7344 CNRS/Université d'Orléans, 45067 Orléans, France.*

² *ZIK plasmatis, Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP), 17489 Greifswald, Germany.*

³ *neoplas GmbH, 17489 Greifswald, Germany.*

E-mail : sylvain.iseni@univ-orleans.fr

Atmospheric pressure micro-plasma jet devices are non-equilibrium plasma sources being a sizable part of the low temperature plasma community¹. With a great future ahead of its extensive development worldwide, micro-plasma jet devices contribute to very large panel of applications such as surface activation, active flow control and liquid activation. Plasma jets are also involved in societal challenges as an innovative medical approach to activate healing biological mechanisms and as promising cancer therapies. There exists plenty of different plasma jet devices among them, the so-called kINPen² has become a leading plasma source in the field of plasma applied to biology, veterinary and medicine purposes³. With the production of reactive oxygen-nitrogen species (RONS) at room temperature, the kINPen is a versatile source. However, the control of the RONS production remains a key issue as it is directly related to the elementary processes involved in the discharge considering all the input parameters such as the gas flow, molecular impurities, *electrical characteristics...*

In this study one focuses on the control of the dissipated power with regards to the molecular gas precursors and the effects on the cell viability of some human cells. The plasma source is a radio-frequency (RF) plasma jet adapted from the kINPen operated in Ar with O₂ and N₂ gases as precursors to generate a rich RONS chemistry². To measure accurately the dissipated power, a simple method inspired from Hofmann et al⁴ is proposed. While the geometry of the plasma jet device is rigorously identical to the kINPen head, the embedded high-voltage generator is substituted with an external circuit.

After a validation of the method, human blood mononuclear cells are treated with the plasma jet for different values of dissipated power and gas mixtures. Following the biological protocols, the cell viability is then investigated and analyzed by means of multi-color flow cytometry.

The results of this work bring interesting information on the following⁵,

- A convenient method to monitor the dissipated power by an accurate control of the current,
- The possibility to fix the RF dissipated power to the plasma for a specific value of the current while changing the admixture ratio from 0.0% up to 1.0% of O₂ and N₂. This leads to a very flexible capability to tailor the production of RONS.
- The first experiment of operating the kINPen with pure N₂.
- The direct impact of cytotoxicity after Ar and N₂ plasma treatments on cells at control or constant dissipated power.

References :

¹ I. Adamovich, S.D. Baalrud, A. Bogaerts, P.J. Bruggeman, et al, J. Phys. Appl. Phys. **50**, 323001 (2017).

² S. Reuter, T. von Woedtke, and K.-D. Weltmann, J. Phys. Appl. Phys. **51**, 233001 (2018).

³ S. Bekeschus, A. Schmidt, K.-D. Weltmann, and T. von Woedtke, Clin. Plasma Med. **4**, 19 (2016).

⁴ S. Hofmann, a F.H. van Gessel, T. Verreycken, and P. Bruggeman, Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 065010 (2011).

⁵ S. Bekeschus, S. Iseni, P. Lüttjohann, and K.-D. Weltmann, IEEE Trans. Plasma Sci. **1** (2021).

Statut :Chargé de Recherche CNRS

Modeling of air plasma emission in the VUV/UV spectral region

S. McGuire¹, C. Jacobs², C. Laux¹

¹Laboratoire EM2C, CNRS UPR288, CentraleSupélec, Université Paris Saclay

²School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland,

mél: sean.mc-guire@centralesupelec.fr

We present new measurements of high temperature air emission in the vacuum ultraviolet spectral region. Correctly modeling high temperature air emission is relevant for several applications. In the field of atmospheric reentry, such modeling is necessary to correctly predict the large heat flux that arrives at the surface of the reentering capsule. Understanding and accurately modeling the various molecular and atomic sources of emission is also important for optical diagnostics such as Optical Emission Spectroscopy that rely on the analysis of measured emission to determine plasma temperature and chemical composition.

The figure below shows our measured air emission spectrum in blue. The high temperature air responsible for the emission is in equilibrium and at a temperature of approximately 6700 K. At this temperature, the air is a weakly ionized plasma and electrons/ions are present in mole fractions on the order of $O(10^{-4} - 10^{-3})$. The structure of the observed spectrum is dominated by nitric oxide emission bands (γ, β, δ and ϵ systems of nitric oxide). Accurate prediction of the observed molecular nitric oxide emission is very difficult. Several emission bands overlap each other, making it difficult to individually validate the various bands responsible for the emission. Perturbations amongst the various electronic *NO* states responsible for the emission occur.[1] These perturbations must be accounted for. We use the SPECAIR radiation code to model the measured emission.[2] The figure below shows the agreement that results (SPECAIR prediction is in red). Good agreement is obtained at longer wavelengths whereas a discrepancy is observed at lower wavelengths. We will discuss the current radiation model as well as potential sources for the discrepancy that is observed.

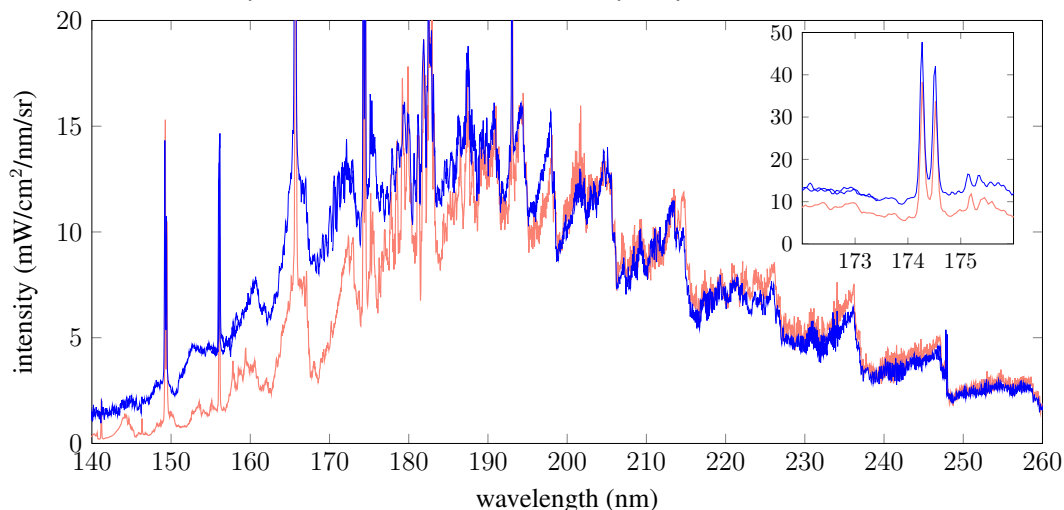


Figure 1 : Measured (blue) and calculated (red) high temperature air emission spectrum. The inset is a zoom on a strong atomic nitrogen feature.

Références

[1] R. Gallusser and K. Dressler, *Journal of Chemical Physics*, vol. 76, no. 9, pp. 4311-4327.

[2] C. Laux, "Optical Diagnostics and Radiative Emission of Air Plasmas," Stanford University, 1993.

Statut : permanent

Parametric study of methane dissociation and deposition rates in a Ar/CH₄ RF plasma

E. von Wahl¹, I. Ellien¹, T. Lecas¹, M. Mikikian¹

¹ GREMI, UMR7344, CNRS/Université d'Orléans, Orléans, France

mél: erik.von-wahl@univ-orleans.fr

As with many other hydrocarbon precursors nanoparticles can be formed in low temperature plasmas from methane. It has been documented, compared to some other gases, that relatively high power densities are required [1]. Here a systematic study concerning the ideal nanoparticle formation conditions for a Ar/CH₄ mixture in a RF plasma is presented. In general, the same dependence on the discharge power is found. However, under low pressure and low methane flow nanoparticles can also be formed at relatively low power. Furthermore, the overall methane dissociation rate is measured by means of mass spectrometry. A simple model is fitted to the evolution of the methane concentration after plasma ignition for varying discharge power, pressure and methane gas flow (figure 1). A connection can be made to the film growth rates measured additionally by quartz crystal microbalance.

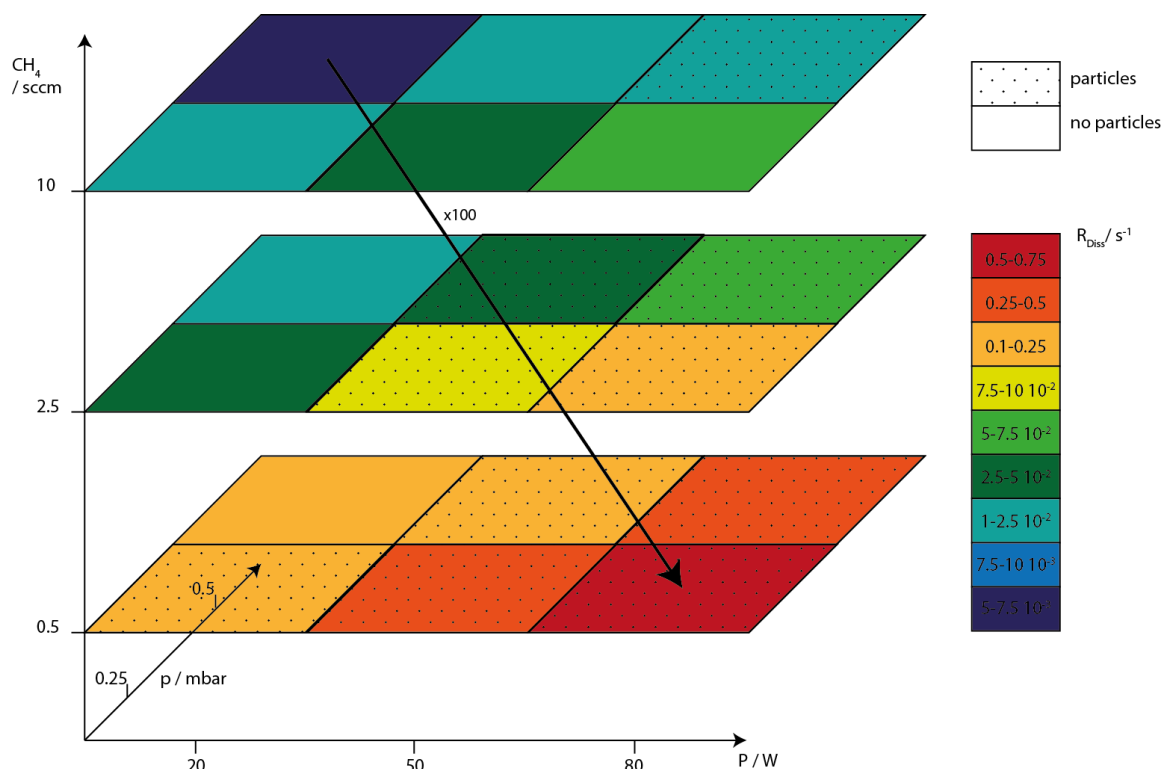


Figure 1: Total methane dissociation rates for varying pressure, methane flow and power; Nanoparticle formation was observed for the dotted parameter regions.

References

[1] J. Berndt et al., Dust particle formation in low pressure Ar/CH₄ and Ar/C₂H₂ discharges used for thin film deposition, *Vacuum* **71**, 377–39 (2003)

Statut : PostDoc

Self-organization of weakly magnetized plasmas under external forcing

O. Agullo¹, Y. Camenen¹, N. Claire¹, N. Dubuit¹, A. Escarguel¹, G. Fubiani², R. Gueroult², G. Hagelaar², V. Dolique³, N. Plihon³

¹ Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires, UMR 7345, Marseille

² Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, UMR 5212, Toulouse

³ Laboratoire de Physique, UMR 5672, Lyon

This poster summarizes a scientific program, gathering three labs in France, focusing on plasma self-organization.

A comprehensive understanding of the plasma self-organization and large-scale dynamics under external forcing is still lacking. Progress on this problem hinges on accounting for the combined effects of boundary conditions, small scale turbulence, neutrals and plasma generation mechanisms. This project aims to study this complex system using a combination of theory, numerical simulations and dedicated experiments on two linear devices, with special attention to the transition from weak to moderate magnetization regime and different ionization fractions. A practical goal will be to study the influence of boundary conditions on plasma currents and rotation, e. g. when biasing various electrodes. Both particle in cell and fluid simulations will be used to confront experimental results, each offering insights into different plasma density regimes. We consider this project to be a stepping stone both for fundamental applications, diagnostic developments and designing next device experiments.

Feedbacks and comments from the community are warmly welcome.

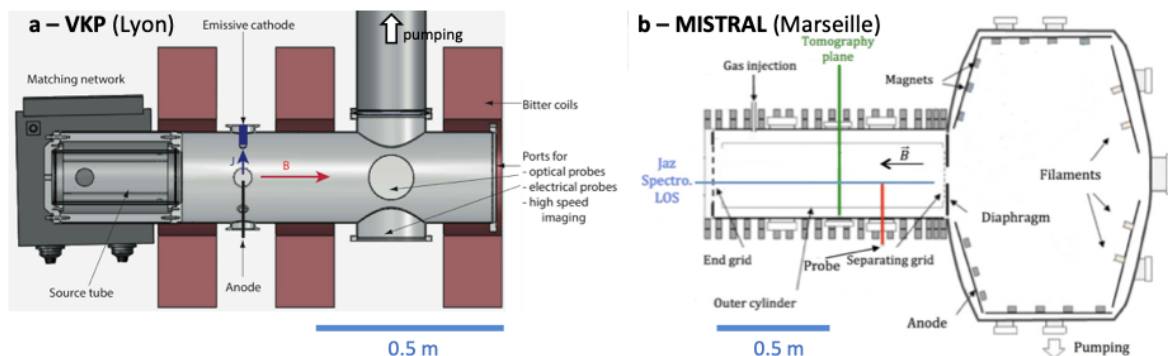


Figure 1: Linear plasma experiments to be used in the project: Von Karman plasma (VKP) experiment in Lyon (a) and Mistral in Marseille (b).

Références

- [1] Claire *et al.*, *Phys. Plasmas* **25** 061203 (2018)
- [2] Plihon *et al.*, *J. Plasma Phys.* **81** 354810102 (2015)
- [3] Gueroult *et al.*, *Phys. Plasmas* **26** 043511 (2019)
- [4] Fubiani *et al.*, *New J. Phys.* **19** 015002 (2017)
- [5] Hagelaar *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 124032 (2011)
- [6] Agullo *et al.*, *Phys. Plasmas* **24** 042308 (2017), Part I (see also Part II)
- [7] Camenen *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59** 034001 (2017)

Statut : permanents

Study of abnormal transport in a magnetized plasma column

Surabhi Aggarwal¹, Alexandre Escarguel¹, Yann Camenen¹

¹Aix-Marseille University, UMR 7345 CNRS, PIIM, Campus Saint-Jerome, Marseille, France

mail: surabhi.aggarwal@univ-amu.fr

In the presence of a magnetic field B perpendicular to an electric field E , charged particles drift in the EXB direction. Combined with plasma inhomogeneities, this drift is favorable to the apparition of instabilities that considerably increase the transport across the magnetic field B (« anomalous transport »). Cross-field configurations are exploited in numerous applications : ions sources, hall thrusters for satellites, magnetron discharges, Penning gauges, fusion plasmas... A better understanding and ultimately the control of anomalous transport is a major issue in all of them.

MISTRAL is an experimental device (linear magnetized plasma column) based at PIIM laboratory used to study EXB plasmas with magnetized electrons and weakly or not magnetized ions with some typical plasma parameters given by : plasma length = 1.2 m, plasma diameter = 20 cm, $T_e = 1-6$ eV, $n_e = 10^{14}-10^{16}$ m⁻³..... The MISTRAL plasma has been characterized experimentally [1] with several diagnostics (Langmuir probe, fast camera, emission spectroscopy) but very small amount of theoretical work has been achieved so far. Coherent structures rotating in the azimuthal direction have been observed in MISTRAL rotating at a frequency comparable to the EXB rotation frequency [2]. The Simon-Hoh instability [3,4] is one of the candidates to explain the coherent rotating structures observed in MISTRAL.

Our aim is to complete the characterization of the observed instabilities along with theoretical modelling to explain the origin of coherent structures in MISTRAL. The spatio-temporal acquisitions of plasma parameters (n_e , T_e , V_{plasma} , V_{float}) have been performed with the help of Langmuir probes for Ar and Xe plasma along with fast camera acquisitions. The graphical analysis for the dispersion relation obtained from the preliminary analytical work [5] has been done using the parameters obtained with the Langmuir probe. A theoretical model is in development for describing the instabilities in MISTRAL plasma conditions.

References

- [1] M. Matsukuma, Th. Pierre, A. Escarguel, D. Guyomarc'h, G. Leclert, F. Brochard, E. Gravier, Y. Kawai, Phys. Lett. A 314, 163 (2003)
- [2] S. Jaeger, Phd thesis, Université de Provence, Marseille
- [3] A Simon, Phys. Fluids 6, 382 (1963)
- [4] J.F. C. Hoh, Phys. Fluids 6, 1184 (1963)
- [5] R. Gueroult, J.M. Rax, and N.J. Fisch, Physics of Plasmas 24, 082102 (2017)

Status : doc1

THE INFLUENCE OF STORAGE CONDITIONS ON THE ANTI-CANCER EFFICACY OF PLASMA-TREATED SOLUTIONS

K. Sklias¹, A. Stancampiano³, K. Gazeli¹, T.-H. Chung², S. Dozias³, C. Douat³, J.-M. Pouvesle³, E. Robert³, L.M. Mir² and J. Santos Sousa¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, 91405 Orsay, France

² Université Paris-Saclay, CNRS, Institut Gustave Roussy, METSY, UMR 8203, 94805 Villejuif, France

³ GREMI, UMR 7344 CNRS/Université d'Orléans, 45067 Orléans, France

mél: kyriakos.sklias@universite-paris-saclay.fr

Over the last decade, plasma pharmacy has been an emerging research field within plasma medicine [1]. It mainly consists in the plasma activation of solutions that can then be used in contact with cells and tissues for therapeutic purposes. The anti-cancer properties of plasma-treated solutions are mainly due to the delivery of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) [2,3]. To be considered as efficient anti-cancer drugs, plasma-treated solutions should be easily produced and stored. It is also essential that they maintain their anti-cancer properties over time and, if possible, that they can be stored at conditions accessible to most of the people. Given that among the variety of plasma-generated RONS, H_2O_2 and NO_2^- have been established as the main anti-cancer drivers of plasma-treated solutions [3], the cytotoxic activity of these liquids is highly dependent on the stability over time of these two reactive species. The purpose of this work was to assess the chemical stability of plasma-treated $\text{PBS}(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})$, in terms of H_2O_2 , NO_2^- and NO_3^- degradation, as a function of storage time and temperature. An atmospheric pressure plasma jet of coaxial electrode configuration driven by high voltage pulses in the kHz range was used to produce the plasma [4]. $\text{PBS}(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})$ solutions were treated by the plasma, and then stored at 4 different temperatures: $\sim +20^\circ\text{C}$, $+4^\circ\text{C}$, -20°C and -80°C . Alongside, untreated $\text{PBS}(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})$ containing concentrations of H_2O_2 , NO_2^- and NO_3^- (i.e., mimicking solutions) were stored at the same temperatures. The absolute concentrations of H_2O_2 , NO_2^- and NO_3^- were measured in these stored solutions after 1, 7, 14, 21 and 75 days. Thus, the percentage of the degradation of those reactive species, in respect to their initial concentration, was determined. In parallel, the anti-cancer capacity of plasma-treated PBS stored at 4 or -20°C after 1, 7, 14 and 21 days was assessed on different cancer cell lines, in terms of cells viability and permeability. Our results show that for both plasma-treated and mimicking solutions of PBS, these long-lived reactive species remain stable for 21 days at room temperature or at $+4^\circ\text{C}$ and are slightly degraded after 75 days. On the contrary, significant degradation of the chemical reactivity of both plasma-treated and mimicking solutions is observed at -20 and -80°C , even after the first days of storage. This degradation is more significant for a storage temperature of -20°C , and especially for NO_2^- , whose concentration is reduced over 90% after 21 days of storage. These results were strongly supported by our findings on the cancer cells, as we show that the plasma-treated solutions stored at 4°C retain their anti-cancer effects over 21 days but not when stored at -20°C . We conclude that both plasma-treated and mimicking solutions of $\text{PBS}(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})$ can preserve their cytotoxic activity, at least for 21 days, if stored at $+20^\circ\text{C}$ or $+4^\circ\text{C}$, providing a basis for practical application of plasma-treated PBS or even mimicking solutions in cancer therapy. In the future, other storage conditions such as light and packaging should be appraised.

Acknowledgements: This work was financially supported by the PLASCANCER project (INCa-PlanCancer N°17CP087-00) and performed in the framework of the CNRS network GdR 2025 HAPPYBIO.

Références

- [1] J. Joslin et al., *Plasma Med.*, 6, 135 (2016)
- [2] T. Adachi et al., *Free Radic. Biol. Med.*, 79, 18 (2015)
- [3] P.-M. Girard et al., *Sci. Rep.*, 6, 29098 (2016)
- [4] T.-H. Chung et al., *Cancers*, 12, 219 (2020)

Statut : Doctorant

« Two-photon absorption laser induced fluorescence » (TALIF) : l'hypothèse de fluorescence proportionnelle à la section efficace à deux photons est-elle utilisée à tort et à travers ?

C. Blondel et C. Drag

Laboratoire de Physique des plasmas, C.N.R.S., Observatoire de Paris, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, École polytechnique, Institut polytechnique de Paris, route de Saclay, F-91128 Palaiseau
Courriel : christophe.blondel@lpp.polytechnique.fr

Dans la méthode TALIF, qui sert, dans les plasmas froids, à détecter certaines espèces atomiques (typiquement l'oxygène) voire à en mesurer la densité, on suppose très généralement que la fluorescence est, à chaque instant (et sauf saturation), proportionnelle à la section efficace généralisée d'absorption à deux photons et au carré de l'intensité d'excitation.

Or la dynamique atomique interne ne met pas seulement en jeu des populations mais aussi des cohérences. Et même dans le cas où ces cohérences sont très rapidement amorties, on ne peut jamais établir instantanément un équilibre entre les populations et le champ excitateur.

La figure 1 montre, en guise d'exemple dans le xénon (couramment utilisé pour calibrer les mesures de densité d'oxygène), comment, même dans le cas d'une impulsion relativement lente (de plusieurs ns), l'absorption instantanée dépend du modèle utilisé. L'hypothèse de fluorescence instantanément proportionnelle au carré du flux lumineux apparaît loin d'être celle qui produit l'absorption instantanée la plus ressemblante à celle que prévoit une modélisation rigoureuse. On examinera si les différences calculées peuvent avoir des conséquences quantitatives dans des cas réels.

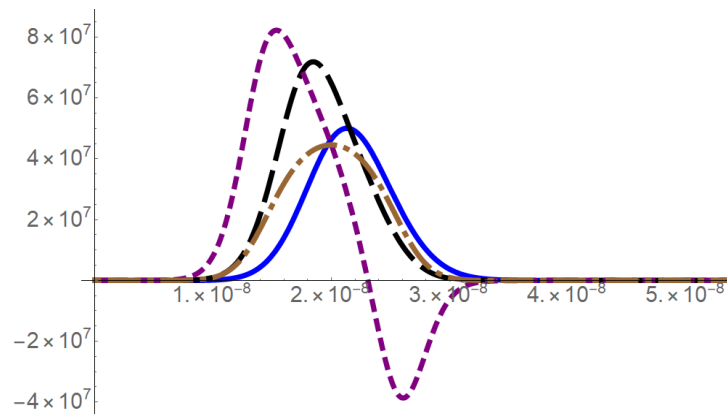


Figure 1 : calculs, selon 4 modèles différents [1], du taux d'absorption instantané, en fonction du temps (s), par un atome de xénon excité à deux photons, à résonance, vers le niveau $6p'[1/2]_0$, avec l'amortissement (encore léger) des cohérences donné par une pression de 1000 Pa de xénon pur. L'unité utilisée en ordonnée pour mesurer l'énergie absorbée par seconde est l'énergie de la transition atomique. L'impulsion laser, de durée caractéristique 6 ns, est supposée avoir une énergie d'un millijoule. La courbe continue est le résultat de l'intégration des équations de Bloch optiques. Les tirets longs donnent la description de l'absorption par une équation ne faisant intervenir que des populations. Le point-tireté donne la puissance dissipée par fluorescence dans le modèle quasi-statique où les populations seraient à chaque instant à l'équilibre avec le flux incident. Les tirets courts montrent la puissance qu'il faudrait absorber instantanément au faisceau lumineux incident pour réaliser cet hypothétique équilibre quasi-statique. Ces deux dernières puissances coïncident à l'instant où la population du niveau excité passe par son maximum et leurs intégrales temporelles sont égales.

Référence

[1] C. Drag, F. Marmuse & C. Blondel, Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 075026 (2021)

Session Posters - Mercredi

Bipolar hipims for filling silicon trenches and porous substrate

S. Atmane, N. Rochdi, A. Caillard

Laboratoire GREMI, UMR 7344, CNRS-université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP 6744, 45067 orléans cedex 2

amael.caillard@univ-orleans.fr

The bipolar HiPIMS (high-power impulse magnetron sputtering) technology has been recently developed for tailoring ions energies in thin film deposition. The effects of a positive pulse following the negative HiPIMS pulse have been intensively studied using energy-resolved mass spectrometry whereas few papers deal with the effect of this pulse on the properties of hard coatings. In this study, we investigated its effect on the filling of silicon trenches and on the penetration inside porous substrate (silicon), the filling and the penetration being characterized by scanning electron microscopy and Rutherford backscattering spectroscopy. We correlated these results to the time integrated (and time resolved) ion energy distribution obtained by an energy-resolved mass spectrometry and by a retarding field energy analyzer, to the energy influx incoming onto the substrate measured by a thermal probe.

Couplage plasma-catalyse hétérogène pour la minéralisation de polluant organique dans l'eau

O. Aubry¹, N. Korichi¹, H. Rabat¹, B. Cagnon², D. Hong¹

¹GREMI, UMR 7344, CNRS, Université d'Orléans, 45067 Orléans, France

²ICMN UMR 7374, CNRS, Université d'Orléans, 45100 Orléans, France

mél: olivier.aubry@univ-orleans.fr

De nombreux contaminants pharmaceutiques, issus de différentes sources d'émission, sont présents dans l'environnement naturel et *in-fine* peuvent se retrouver dans l'eau potable. Les traitements conventionnels des eaux n'étant pas suffisamment efficaces pour les traiter, des procédés complémentaires, tels que les procédés d'oxydation avancée (POA), sont donc étudiés. Les POA tels que les plasmas non thermiques (PNT) permettent la production d'espèces oxydantes (HO^\bullet , O_2^\bullet , H_2O_2 , O_3 , etc.) pouvant réagir avec les molécules organiques. L'utilisation de réacteurs PNT seuls peut mener à de forts taux de conversion mais peut conduire à des taux de minéralisation limités, démontrant la persistance de molécules organiques en solution malgré le traitement [1, 2].

Dans cette étude, nous proposons un procédé couplé PNT/catalyseur hétérogène afin de mener à une meilleure minéralisation tout en maintenant faible la puissance électrique consommée afin d'optimiser le rendement énergétique du procédé. Pour cela, un catalyseur maison, fer (III) supporté sur fibre de verre, a été couplé à un réacteur de type Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) en configuration pointes-plan (Figure 1a). Au cours de ce travail, nous avons comparé l'efficacité du traitement avec et sans catalyseur, sur la dégradation du paracétamol, le taux de minéralisation, les variations des propriétés physico-chimiques des solutions traitées (pH, conductivité), etc. Nous avons pu montrer le fort effet synergétique du couplage PNT-catalyse comparé au traitement sans couplage par plasma ou catalyse avec l'obtention, entre autres, d'une augmentation du taux de conversion du paracétamol accompagné d'une forte minéralisation (Figure 1b) et du doublement du rendement énergétique [3].

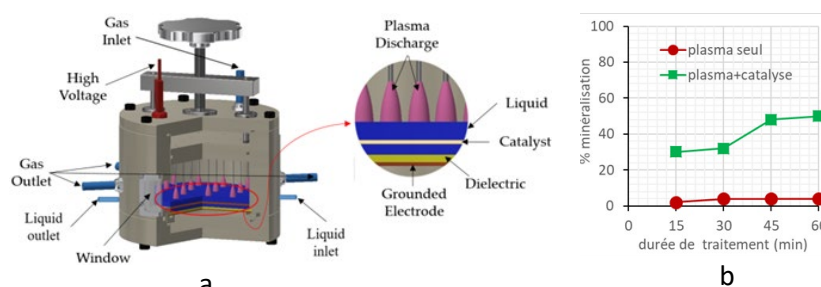


Figure 1. a) Schéma du réacteur DBD pour couplage plasma/catalyse hétérogène, b) % minéralisation en fonction de la durée du traitement.

Remerciements

Cette recherche a été partiellement soutenue par le projet PIVOTS de la Région Centre-Val de Loire (programme ARD 2020 et CPER 2015-2020) et du ministère Français de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (CPER 2015-2020 et subvention de service public au CNRS et à l'Université d'Orléans).

Références

- [1] Y. Baloul, O. Aubry, H. Rabat, C. Colas, B. Maunit, H. Hong, Eur. Phys. J. Appl. Phys. doi. 10.1051/epjap/2017160472, (2017)
- [2] I. Panorel, S. Preis, I. Kornev, H. Hatakka, M. Louhi-Kultanen, Environl Technol. doi .10.1080/01919512.2013.760415, (2013)
- [3] N. Korichi, O. Aubry, H. Rabat, B. Cagnon, D. Hong, Catalysts, doi. 10.3390/catal10090959, (2020)

Statut : permanent

Current injection impacting low frequency waves in a magnetically confined plasma column

S. Vincent¹, V. Désangles^{1,2}, V. Dolique¹, N. Plihon¹

¹ *Laboratoire de Physique - ENS de Lyon, CNRS, Lyon, France*

² *Département physique - ONERA, Paris, France*

Low frequency waves turbulence developing in magnetized plasma columns are well known to trigger important radial transport, a major issue for fusion devices [1]. We investigate here the impact of direct current injection from the plasma center to the walls on the features of such waves.

Our experimental set-up consists in a cylindrical chamber containing an Argon plasma column of 10 cm diameter of ionization rate 20% and at low pressure (~ 1 mTorr) generated via a 1 kW RF inductive source. The plasma is confined by a magnetic field ranging from 0.01 T to 0.15 T [2].

A very fast camera records images of spontaneous radiated light fluctuations in a plane transverse to the plasma column axis, at a 200 kfps rate, showing the presence of azimuthally rotating waves at frequencies of order the kHz. These modes of the form $e^{i(m\theta - \omega t)}$ are extracted by 2D axisymmetric Fourier transform analysis, giving access to their dynamic and their interactions [3]. A tungsten electrode is then inserted at the center of the column, negatively biased with respect to the chamber ground, and heated up to emissive regimes. The electrode emitted current significantly changes the radial profiles of the plasma parameters, and has a dramatic impact on the most instable modes (Figure 1). Finally the impact of this emitted current and of the azimuthal fluctuations on the turbulent radial transport is investigated using an advanced triple probe (following a 5-tips probe design [4]).

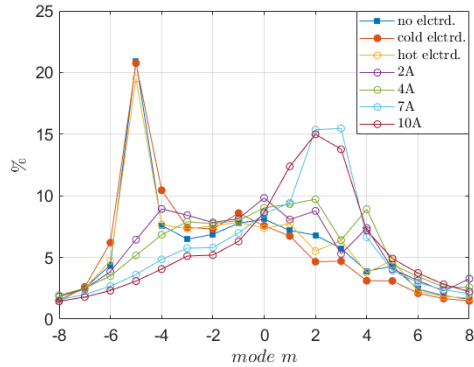


FIGURE 1 – *Impact of an emissive electrode on the m -modes amplitude, as a function of the electrode heating current (i.e. of the emitted current).*

Références

- [1] W. Horton, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 735 (1999)
- [2] N. Plihon *et al.*, *Plasma Phys.* **81**, 345810102 (2015)
- [3] C. Brandt *et al.*, *Phys. Rev. E* **84**, 056405 (2011)
- [4] C. Theiler *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 013504 (2011)

Dissociation of CO₂ and gas heating in nanosecond capillary discharge

G. Pokrovskiy¹, N. Popov², S. Starikovskaia¹

¹Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, France

²Skobeltsin Institute for Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

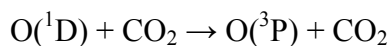
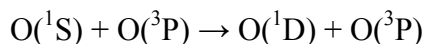
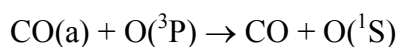
mél: georgy.pokrovskiy.m1@polytechnique.edu

Optical and electrical diagnostics of nanosecond discharge ignited in pure CO₂ at moderate (10-20 mbar) was performed. The reduced electric fields of 250-300 Td were registered after the front of the fast ionization wave. The absolute downstream densities of CO₂ dissociation products were measured by FTIR. The values of CO₂ dissociation fraction of 20% at single pulse regime and 90% at 300 Hz repetition rate have been obtained. The corresponding values of energy efficiency of both regimes were equal to 20% and 5%.

| Nº of pulse | 1 | 2 | 3 |
|----------------|------|------|------|
| Peak current | 58 A | 68 A | 27 A |
| W, eV/particle | 0.42 | 0.6 | 0.2 |

The gas temperature measurements were performed by the means of OES in CO₂:N₂ mixtures. The following values of the gas temperature were derived: 400 K, 800 K and 1100 K in 1st, 2nd and the 3rd pulses separated by 250 ns. The corresponding values of the peak current and specific deposited energy are given in the table above. It can be concluded that the phenomenon of the so called fast gas heating [1] has been observed. The radial profile of electron density has been observed by an ICCD imaging. Both gas temperature and electron density distribution are in agreement with the numerical modeling.

The numerical modelling of the discharge has shown that the vibrational kinetics is not dominant in the case of high electric fields whereas the excitation of electronic levels of CO and O plays the leading role in the discharge kinetics. More precisely, the reactions



contribute the most in the gas heating. The part of energy of the discharge energy delivered to gas heating before 2 μs after the discharge ignition was equal to 23%.

The work was partially supported by French National Research Agency, ANR (ASPEN Project) and the French-Russian international laboratory IRP KaPPA "Kinetics and physics of pulsed plasmas and their afterglow"

Références

[1] N A Popov. Fast gas heating in a nitrogen–oxygen discharge plasma: I. Kinetic mechanism. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44.28(2011), p. 285201

E-FISH for Electric Field Measurements in Non-Equilibrium Plasmas: Prospects for Future Use

T. L. Chng¹ and S. M. Starikovskaia¹

¹*Laboratoire de Physique des Plasmas, (CNRS, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay), École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-91128, Palaiseau, France*

mél: tat-loon.chng@lpp.polytechnique.fr

Electric field induced second harmonic generation, or E-FISH, is a laser based diagnostic which has recently been repurposed for the measurement of electric fields in plasmas. This method involves probing a non-polar gas sample with laser light, and quantifying its second harmonic response to an externally applied electric field that is to be measured. This second harmonic signal varies quadratically with the applied field strength, and is otherwise absent if no field is imposed. Calibration may be performed in a known electrostatic field so as to obtain absolute field information, for instance in a plasma. Key advantages of the E-FISH method include its versatility, excellent signal localization in time, and relatively straightforward implementation. The versatility of the method is demonstrated by its non-resonant nature - the technique is in theory applicable to any non-polar gas or gas mixture and does not demand a specific probe laser wavelength. The temporal resolution of the measurement is only physically limited by the laser pulse duration since the signal generation is effectively instantaneous, with pulses as short as 50 fs being shown to yield good signals. However, recent work has also shown that the E-FISH diagnostic possesses certain limitations with respect to the spatial origin of the signal. In this talk, I will elaborate on the foregoing strengths and limitations associated with effective use of E-FISH, including some strategies that our group has been pursuing to address existing problems, and the challenges we have faced. I will also present some electric field measurements in a fast ionization wave discharge made using picosecond E-FISH, and elaborate on some prospects for measuring the sign of the electric field vector using optical homodyne detection.

Acknowledgements

The work was partially supported by the French General Directorate of Armaments (DGA) under the EP-DGA convention N2790, the French National Research Agency, ANR ("Atomic Species Production via Electronically excited states in high energy density Plasmas" (ASPEN) Project) and the French–Russian international Research Project KaPPA 'Kinetics and Physics of Pulsed Plasmas and their Afterglow'.

Références

[1] Chng, T. L., Starikovskaia, S. M., & Schanne-Klein, M. C. (2020). Electric field measurements in plasmas: how focusing strongly distorts the E-FISH signal. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(12), 125002.

Statut: Postdoc

Electrical Discharges in Liquid Water: a Global Model for the Breakdown and the Post-breakdown

B. Dufour, C. Rond, A. Vega, X. Duten

LSPM-CNRS UPR3407, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, Villetaneuse, France

mél: benjamin.dufour@lspm.cnrs.fr

A 0D thermochemical global model of a pulsed electrical discharge formed directly in water has been developed. The experiment to be modelled is presented in detail in [1]. Typical current and voltage waveforms are shown in figure 1. The discharge is split in 3 time-based stages: (1) the pre-breakdown which includes the initiation and the propagation of the streamers (not modelled). (2) the breakdown which corresponds to the energy injection stage (3) the post-breakdown when the energy injection has stopped. The present study is only dedicated to the second and third stages resulting from a thermal initiation process.

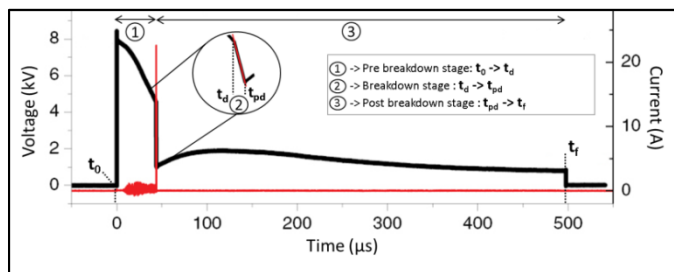


Figure. 1: Voltage and current signals monitored for an applied voltage of 9kV and a water conductivity of 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$

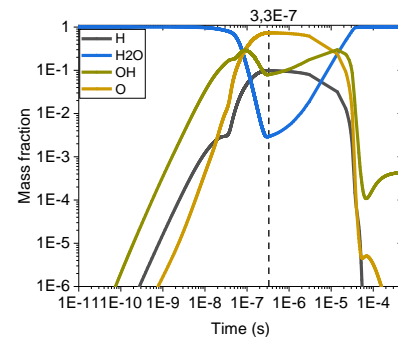


Figure. 2: Evolution of O, H, OH and H_2O density for a pure H_2O discharge

The breakdown phase, which occurs in a pre-existing gas volume formed during the initiation phase, lasts a few thousands of nanoseconds, allowing the assumption of a constant gas volume. This hypothesis is also strengthened by experimental observations [1]. The post breakdown phase begins when the deposited energy becomes negligible. During this stage the gaseous volume shows a bubble dynamic dependence: the gas volume expands and contracts just as cavitation bubbles. This type of discharge is known to be in a strong thermal and chemical non-equilibrium. The model then includes two temperatures: electron temperature and heavy species translation temperature. Equilibrium is assumed for vibrational and rotational temperatures ($T_g = T_v = T_{rot}$). The energy deposited during one pulse is estimated using voltage and current measurements. We assume that the energy is uniformly deposited in the discharge filament volume only during the breakdown phase. The EEDF is assumed to be Maxwellian because of the high prevailing pressure. To calculate the electron and gas temperature, two energy balances are solved. Each chemical species is characterized by the time evolution of its density (Fig.2). The chemical non-equilibrium is described using a 31 species scheme involving 628 reactions. Transport properties are obtained according to the Chapman-Enskog theory [2]. Diffusion towards the liquid is estimated according to Henry's law. The time evolution of the species concentrations, gas and electron temperatures will be obtained according several sets of initial conditions.

Références

- [1] C. Rond *et al.*, « Time-resolved diagnostics of a pin-to-pin pulsed discharge in water: pre-breakdown and breakdown analysis », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 51, n° 33, p. 335201, août 2018, doi: 10.1088/1361-6463/aad175.
- [2] J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, et R. B. Bird, *Molecular theory of gases and liquids*, New York, NY: Wiley, 1964.

Statut : doc3

ERIS : Nouveau moyen d'essai pour la propulsion électrique

V. Désangles¹, P.Q. Elias¹, D. Packan¹

¹DPHY, ONERA, Université Paris-Saclay, F-91123 Palaiseau, France

mél: victor.desangles@onera.fr

Le travail expérimental sur des propulseurs électriques de satellite nécessite des caissons à vide disposant de grandes vitesses de pompage. Ces objets sont destinés à être utilisés dans des environnements de vide très poussés (vide spatial). Ils injectent du gaz propulsif continuellement dans l'enceinte de test pour leur fonctionnement et représentent ainsi une fuite continue et importante du point de vue du pompage. Enfin, les propulseurs ECR développés à l'ONERA sont extrêmement sensibles à la pression dans l'enceinte et voient leurs performances rapidement se détériorer avec une augmentation de la pression.

Dans le but d'améliorer la représentativité des tests de performances et des études réalisés sur des propulseurs ainsi que d'augmenter les gammes de puissance pouvant être étudiées, l'équipe Foudre Plasma et Application (FPA) de l'ONERA se dote d'un nouveau moyen d'essai, le caisson à vide ERIS, spécialement conçu pour la propulsion électrique. Cette enceinte mesure 5 mètres de long et 2,3 mètres de diamètre. Elle est dotée d'un caisson auxiliaire de diamètre 1,25 mètres et d'une vanne guillotine pleine ouverture du même diamètre permettant d'isoler le caisson auxiliaire.



Figure 1 : Image du caisson ERIS en cours d'installation

Les fluides cryogéniques azote liquide et hélium gazeux permettant le pompage de l'enceinte circulent en circuits fermés dans des panneaux dont la géométrie est adaptée à la propulsion électrique pour permettre de maximiser le pompage avec un minimum de coûts d'utilisation, que ce soit énergétique ou fluide.

Cette communication propose de présenter la conception de cette nouvelle expérience ainsi que les tests réalisés pour les déterminer les performances de cette enceinte.

Statut : permanent

Etude d'un procédé d'oxydation avancée plasma non thermique / carbone activé fonctionnalisé pour l'élimination de l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4 D) dans l'eau

M.A. Antoissi^{1,2}, O. Aubry¹, H. Rabat¹, B. Cagnon²

¹ GREMI, UMR7344, CNRS, Université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP6744 45067 Orléans Cedex 2

² ICMN, UMR 7374, CNRS, Université d'Orléans, 1B rue de la Férollerie CS40059 45071 Orléans Cedex 2
Mél : mohamed-ali.antoissi@cncrs-orleans.fr

Depuis quelques années, le développement des techniques analytiques a révélé la présence de nombreux micropolluants dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces micropolluants posent des problèmes environnementaux majeurs ; peu ou pas éliminés par les techniques conventionnelles de traitement, ils se retrouvent alors dans l'eau de consommation. Cette problématique a conduit à l'établissement de normes beaucoup plus contraignantes sur ces composés. Parmi ces micropolluants, les herbicides tels que le glyphosate (N-(phosphonométhyl)glycine) ou le 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D) sont particulièrement surveillés notamment en Région Centre-Val de Loire. Il est donc nécessaire d'élaborer de nouvelles stratégies de dégradation innovantes permettant une élimination efficace de ces composés et de leurs métabolites.

Ce travail propose l'étude du couplage Plasma Non Thermique (PNT)/carbones activés (CA) fonctionnalisés avec du fer, de l'argent ou du cuivre. Le plasma seul peut convertir le polluant mais la minéralisation est très faible. L'objectif de cette étude est d'augmenter le taux d'abattement du polluant et la minéralisation des produits de dégradation tout en optimisant la consommation énergétique. Dans cette étude, nous avons utilisé un réacteur DBD multi-pointes-plan. Nous avons comparé l'efficacité du traitement par CA seuls, plasma seul et couplage PNT/CA. Plusieurs types de CA ont été utilisés (trois carbones commerciaux JACOBI® et sept fonctionnalisés au laboratoire ICMN). Le taux d'abattement, la minéralisation, le rendement énergétique et l'évolution d'autres paramètres physico-chimiques (pH, conductivité et production des nitrates / nitrites) ont été suivis. Nos résultats montrent que le couplage PNT/CA permet d'augmenter la vitesse d'abattement et la minéralisation. Comme le montre la figure 1, le couplage PNT / L27 greffé avec du fer élimine plus de 78 % du composé initial, minéralise plus de 28 % des produits de dégradation. Le couplage démontre également une forte synergie pour l'abattement.

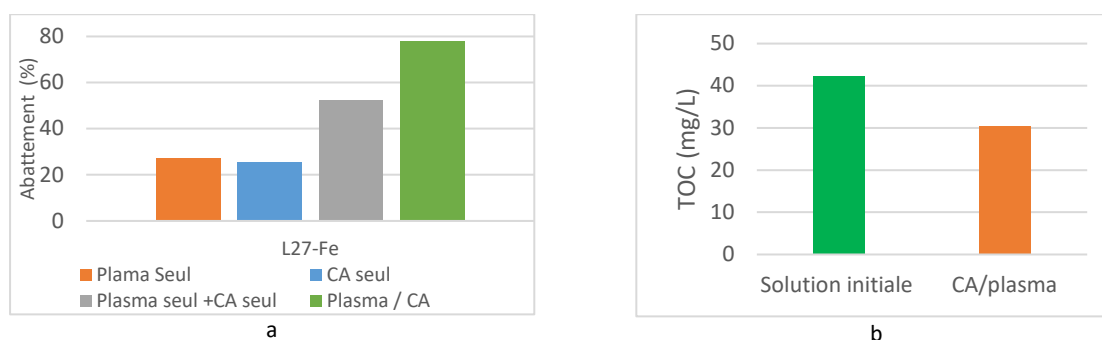


Figure 1. a) Taux d'abattement, b) concentration en Carbone Organique total initial et après traitement de 1h. $\pm 5,8$ kV, 700 Hz, débit air = $100 \text{ mL} \cdot \text{mn}^{-1}$, CA (L27-Fe), $V=40 \text{ mL}$, $C_i= 100 \text{ ppm}$

Statut : Doc 2

Etude de la stabilité d'une torche micro-plasma micro-onde destinée à l'élaboration de matériaux à base de carbone

Abdoulaye Siby¹, Jérémie Ibi¹, Swaminathan Prasanna¹, Khaled Hassouni¹

¹ LSPM, Université Sorbonne Paris Nord, CNRS UPR-3407, 99 Av.J.B. Clément, 93430 Villetaneuse, France

mél: sibyabdoulaye1@gmail.com

Dans ce travail, nous rapportons l'étude de la stabilité d'une torche micro-plasma micro-onde (2,45 GHz) afin de comprendre la limite d'application de cette torche destinée à l'élaboration de matériaux à base de carbone notamment de nanodiamants. L'objectif est de déterminer la puissance critique pour laquelle on observe une instabilité i.e. la présence d'un second plasma à l'intérieur de la torche. La torche est constituée d'une ligne de transmission en inox permettant de former le plasma par résonance. Pour faire résonner la ligne de transmission à la fréquence d'excitation (2,45GHz), la longueur de cette ligne doit être égale à $\frac{3}{4} \lambda$ (longueur d'onde de la source micro-onde) soit 122 mm. A la résonance, le champ électrique le plus élevé est obtenu à l'extrémité de la ligne de transmission où le plasma doit être allumé [1]. Les analyses ont été réalisées en utilisant un plasma d'hydrogène (H₂) à la pression de 100 mbar.

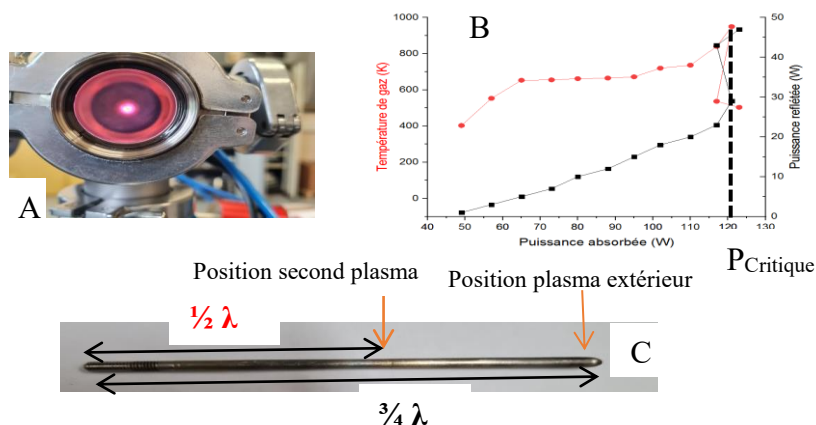


Figure 1 : A : Torche micro-plasma, Conditions : H₂ = 100 sccm ; B : Représentation de la température de gaz et puissance réfléchie en fonction de la puissance absorbée ; C : Spots des plasmas formés

L'étude de la stabilité du plasma est effectuée en évaluant la puissance réfléchie par la torche et la température de gaz déterminée par spectroscopie optique d'émission (SOE). Il a été constaté que la puissance absorbée a un effet sur la stabilité du plasma. En effet, l'augmentation de la puissance absorbée entraîne une instabilité du plasma accompagnée d'une zone de transition à partir d'une puissance critique de 120W. Lorsque l'instabilité a lieu, un second plasma est formé à l'intérieur de la torche et on peut observer des changements de signature dans le plasma : la puissance réfléchie augmente et la température du gaz diminue brusquement. Le second plasma est produit à une position correspondant à la mi-longueur d'onde, i.e., $\frac{1}{2} \lambda$ soit 66 mm. La position du second plasma est la même pour toutes les pressions et correspond au deuxième maximum de résonance du circuit d'excitation de la torche.

Références

[1] J Choi, F Iza, H J Do, J K Lee and M H Cho, Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator, Plasma Sources Sci. Technol. 18 (2009) 025029

Statut : doc1

Etude du plasma de la Torche à Injection Axiale (TIA) par spectroscopie optique d'émission (SEO)

L. Renoux¹, C. Dublanche-Tixier¹, C. Chazelas¹, P. Tristant¹

¹ Université de Limoges, CNRS, IRCER, UMR 7315, F-87000 Limoges, France

* laura.renoux@unilim.fr

Actuellement, les torches à plasma trouvent des applications dans une grande variété de domaines tels que la production de couches minces, le traitement de surface ou encore la stérilisation [1,2,3]. L'utilisation du plasma présente un avantage significatif d'un point de vue environnemental par rapport aux procédés utilisant des phases liquides qui génèrent des effluents à retraiter. Le dispositif utilisé pour cette étude est composé d'une torche micro-ondes fonctionnant à pression atmosphérique appelée Torche à Injection Axiale (TIA).

A l'IRCER, la TIA est principalement utilisée pour l'élaboration de dépôts en couches minces [4] et les traitements de surface. Le jet de plasma généré par la TIA est caractérisé par spectroscopie d'émission optique qui est une méthode non intrusive. Elle permet d'identifier de manière qualitative les espèces présentes dans la décharge et de déterminer, par exemple, les températures caractéristiques (excitation, vibration, rotation).

Afin d'être plus représentatif des conditions de traitement, un substrat est positionné dans l'axe de la décharge à des différentes distances de la buse selon l'application visée (production de couches minces ou désinfection). L'ajout de ce substrat semble avoir une influence sur les températures caractéristiques du plasma. Cette influence est plus ou moins importante en fonction de la distance buse - substrat et des paramètres du procédé (puissance micro-onde, débit). Les températures d'excitation varient également en fonction de la nature du substrat, cette influence n'est pour l'instant pas expliquée : il a été envisagé qu'elle soit liée à la permittivité du substrat néanmoins la corrélation n'est pas probante.

Références

- [1] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen, Spectrochimica Acta Part B 57 (2002)
- [2] A. Ricard, M. Sixou, Revue trimestrielle du Réseau ECRIN, n°55, ecrin.asso.free.fr/pdf/rts/rts55-d3.pdf
- [3] M. Moisan, J. Barbeau, S. Moreau, J. Pelletier, M. Tabrizian, L. H. Yahia, International Journal of Pharmaceutics 226 (2001)
- [4] A. Perraudau, Couches mésoporeuses de TiO₂ déposées par PECVD à la pression atmosphérique en vue d'applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, 2019

Statut : doc3

Influence de l'émission stimulée sur le signal de fluorescence induite par absorption de deux photons laser des atomes de krypton déterminée par un système d'excitation et de détection de résolution picoseconde

L. Invernizzi¹, C. Y. Duluard¹, X. Aubert¹, S. Prasanna¹, K. Gazeli¹, G. Lombardi¹ and K. Hassouni¹

¹Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (LSPM), CNRS, UPR 3407, Université Sorbonne Paris Nord, 99 avenue J.B. Clément, 93430 Villetaneuse, France

Mél : laurent.invernizzi@lspm.cnrs.fr

La fluorescence induite par absorption à deux photons laser (TALIF) a été popularisée dans le domaine des plasmas froids, permettant de quantifier, avec une très bonne résolution spatiale et temporelle, les densités absolues d'atomes réactifs (H, N, O, C, etc.) dans leur état fondamental. La connaissance de ces densités est essentielle pour la validation de travaux de modélisation et la détermination de la cinétique, ainsi que pour l'optimisation du procédé plasma dans les applications ciblées (gravure, dépôt, etc.). La quantification de ces densités absolues nécessite l'implémentation d'une mesure d'étalonnage en appliquant la TALIF sur un gaz rare dont la densité est connue [1]. Toutefois, si aucune précaution n'est prise, les mesures de densité du gaz d'intérêt comme celles du gaz rare peuvent être biaisées par des processus tels que l'émission stimulée et/ou la photo-ionisation [2]. Dans ce travail, l'influence de l'émission stimulée sur le signal de fluorescence du krypton est mise en avant par l'utilisation combinée d'un laser picoseconde (Ekspla®) et d'une caméra à balayage de fentes dite « streak » (C10910-05, Hamamatsu®).

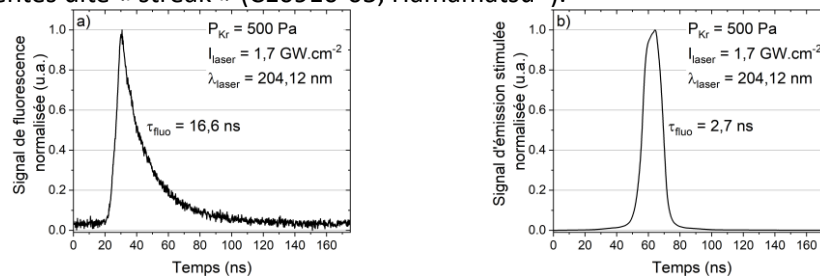


Figure 1 : Signaux a) de fluorescence et b) d'émission stimulée normalisés obtenus à 204,12 nm, avec une pression de krypton de 500 Pa et une intensité laser de $1,7 \text{ GW.cm}^{-2}$ dans la zone où la fluorescence est collectée.

La **Figure 1** présente des signaux a) de fluorescence et b) d'émission stimulée obtenus en Kr dans les mêmes conditions expérimentales. Les signaux sont ici normalisés comme la comparaison des intensités est difficilement réalisable du fait de la nature même de ces deux événements lumineux (l'émission stimulée augmente exponentiellement le long de la ligne de visée du laser, tandis que la fluorescence est collectée sur un faible volume de l'interaction laser/gaz). Par la modification des paramètres du laser et du système optique (intensité laser) ainsi qu'au krypton (pression), l'influence de l'émission stimulée sur le signal de fluorescence peut être minimisée. Il est toutefois à noter que d'autres effets peuvent s'ajouter à l'émission stimulée. La photo-ionisation étant l'autre phénomène majoritaire [3] dont la quantification expérimentale est prévue dans la suite de ce travail.

Financement

Financé dans le cadre du projet ANR ASPEN (contrat ANR-16-CE30-0004) et du projet régional IDF SESAME DIAGPLAS.

Références

- [1] K. Niemi, J. Phys. D: Appl. Phys. **34** 2330–2335 (2001)
- [2] G. D. Stancu, Plasma Sources Sci. Technol. **29** 054001 (2020)
- [3] K. Gazeli, Phys. Plasmas **28** 043301 (2021)

Statut : Post-doc

Mass spectrometry and surface adsorption measurements in a nanoparticle forming Ar/ethanol RF plasma

E. von Wahl¹, T. Lecas¹, M. Mikikian¹

¹GREMI, UMR7344, CNRS/Université d'Orléans, Orléans, France

mél: erik.von-wahl@univ-orleans.fr

Whereas nanoparticle formation is well studied for some hydrocarbon precursors like methane, acetylene or ethylene, unconventional precursors like ethanol are far less investigated. Here, the kinetics of the nanoparticle forming chemistry in a low pressure RF discharge of an argon ethanol mixture are analysed by means of mass spectrometry. Meantime, the film growth rate is measured with a quartz crystal microbalance (QCM). As it turns out, the adsorption of ethanol on dirty surfaces, e.g. thin film material, could potentially play an important role in the process. Hence, the QCM is also utilised to specify the amount of adsorbed ethanol on the reactor surfaces prior to plasma ignition. Key species formed in the plasma are revealed, that render nanoparticle formation likely and other species suppressing the necessary formation of big molecules are also identified. Furthermore, the time evolution of chosen masses is tracked during the growth of nanoparticles (see figure 1).

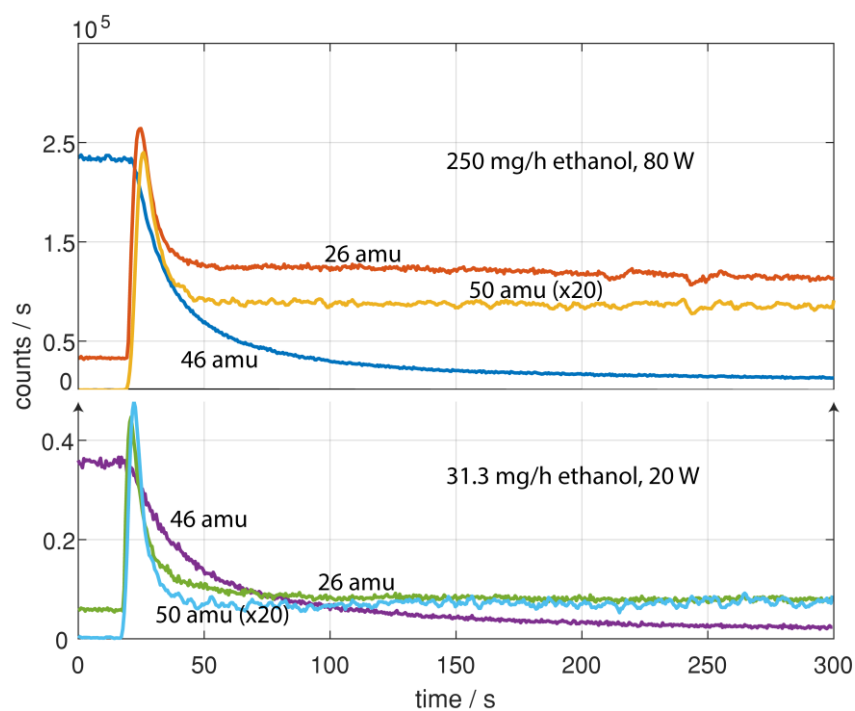


Figure 1: time evolution of ethanol ($q/m = 46$), acetylene ($q/m = 26$) and butadiyne ($q/m = 50$) for high ethanol concentration and high power (top) and low ethanol concentration and low power (bottom).

Statut : PostDoc

Nucléation dans les plasmas RF Ar/C₂H₂

G. Tetard¹, A. Michau¹, S. Prasanna¹, J. Mougenot¹, P. Brault², K. Hassouni¹

¹ LSPM, UPR 3407 CNRS, Université Paris 13, 93430 Villetaneuse, France

² GREMI CNRS - Université d'Orléans, BP744 Orléans Cedex 2, France

Mél : gautier.tetard@lspm.cnrs.fr

Pour étudier les plasmas RF capacitifs Ar/C₂H₂ basse pression, nous avons développé un modèle fluide 1D. Ce modèle couple la résolution de la décharge RF avec la description détaillée de l'écoulement, du transport et de la chimie fine des espèces hydrocarbonées responsables de la nucléation de nanoparticules généralement observées dans ces plasmas. Nous avons utilisé ce modèle pour l'étude de la cinétique de la nucléation dans différentes décharges dont les paramètres sont listés dans le tableau 1.

| Paramètres | Pression | Température | Potentiel RF | Fréquence | Distance | Débit | % C ₂ H ₂ |
|------------|----------|-------------|--------------|-----------|----------|-------------|---------------------------------|
| Valeurs | 10 Pa | 300 K | 100 V | 13.56 MHz | 2.54 cm | 20-200 sccm | 4-99% |

Tableau 1 : Paramètres des décharges étudiées.

Les simulations montrent qu'à faible débit, i.e. 20 sccm, et pour une alimentation pauvre en acétylène, typiquement inférieure à 10%, la décharge est dominée par l'Argon. À haut flux d'acétylène, les ions hydrocarbonés deviennent majoritaires et une région électronégative apparaît au centre de la décharge. Comme le montre la figure 1, cette zone électronégative va agir telle une pseudo-cathode qui piège les ions de la décharge favorisant ainsi la croissance moléculaire, ce qui rend possible la nucléation de particules solides. Ainsi, pour une alimentation constituée pour moitié de C₂H₂, cet effet permet une croissance moléculaire importante en volume. En effet, les distributions en taille des espèces moléculaires hydrocarbonées présentées figure 2 montrent que les populations restent significatives même pour les clusters de taille importante. Ce résultat est la conséquence du couplage entre la dynamique de décharge Ar/C₂H₂ et la cinétique de croissance des espèces hydrocarbonées qui met en jeu non seulement les ions négatifs mais également les ions positifs C_xH_y⁺.

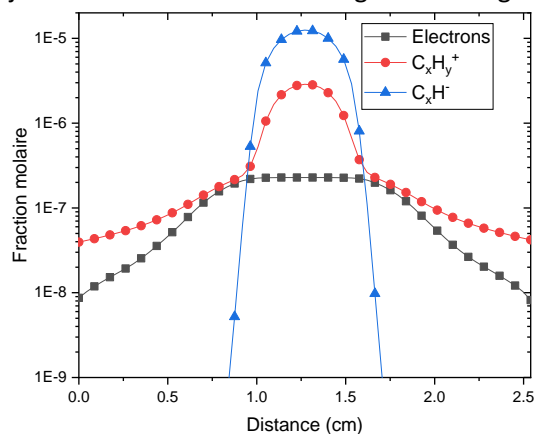


Figure 1 : Fractions molaires des espèces chargées à 50% de C₂H₂ à 20 sccm.

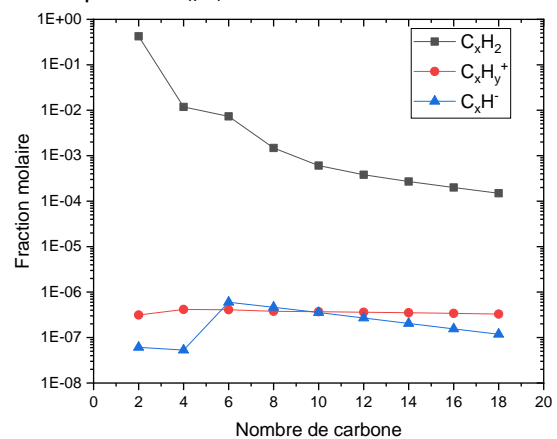


Figure 2 : Distribution des espèces hydrocarbonées dans le centre de la décharge à 50% de C₂H₂ à 20 sccm.

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet MONA financé par l'ANR (ANR-18-CE30-0016)

Statut : doc3

Oxydation du n-hexane dans l'air par une DBD : efficacité de la décharge et analyse des sous-produits.

P. Trad¹, N. Blin-Simiand¹, M. Fleury¹, M. Heninger², P. Jeanney¹, S. Pasquier¹

¹ LPGP, CNRS, bat. 210 Univ. Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France

² ICP, CNRS, bat. 350 Univ. Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France

Mél : perla.trad@universite-paris-saclay.fr

Ce travail se situe dans le contexte d'une collaboration de recherche ayant pour but d'évaluer la pertinence de l'association d'une technique de séparation membranaire et d'un procédé d'oxydation pour le traitement de COV dans l'air. Nous avons travaillé sur le n-hexane, un polluant issu des industries textile, pharmaceutique, alimentaire ... Nous présentons ici le procédé d'oxydation qui est un plasma non-thermique choisi pour sa capacité à dégrader les COV [1]. On utilise une décharge à barrière diélectrique, créée dans un réacteur de géométrie fil-cylindre, où l'électrode centrale est une tige en tungstène placée sur l'axe d'un tube en alumine. Elle est reliée à un générateur haute tension impulsionnelle conçu au LPGP. L'électrode de masse est un scotch en cuivre enroulé sur le tube. La décharge a un volume de 3.9 cm³ et fonctionne à température ambiante et à pression atmosphérique, avec des débits de gaz de 0,5 L/min ou de 1 L/min. La figure 1 présente les résultats pour le traitement du n-hexane dans l'air synthétique avec des concentrations entre 5 ppm et 100 ppm.

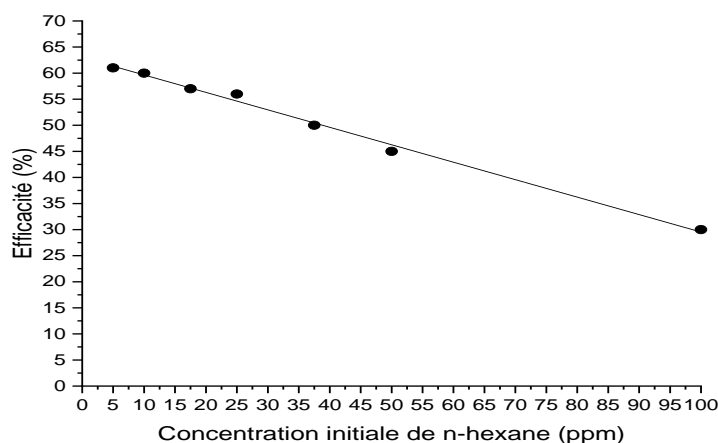


Figure 1 : Efficacité de la DBD en fonction des concentrations initiales du n-hexane à 260 J/L, 0,5 L/min, 500 Hz

Nous avons aussi caractérisé et quantifié les sous-produits issus de la conversion du n-hexane pour comprendre la cinétique physico-chimique mise en jeu, dans le but d'optimiser le couplage oxydation-membrane. Les mesures des différentes molécules sont faites par chromatographie en phase gazeuse (micro-gc Fusion), spectrométrie de masse haute résolution CI-FTICR (BTrap) et des détecteurs spécifiques pour le CO₂ et l'ozone. Le spectromètre BTrap, développé par AlyXan, permet la détection des molécules présentes dans l'effluent à l'état de traces en temps réel. Ce travail est réalisé en collaboration avec l'ICP de Paris-Saclay.

Thèse financée par l'INRS dans le cadre d'un contrat de collaboration de recherche entre le LPGP de Paris-Saclay, le LRGP de l'Université de Lorraine, et le Laboratoire PROCEP de l'INRS.

Références

[1] H.-H. Kim, Plasma Processes Polym., 1: 91-110 (2004)

Statut : Doc2

Plasma enhanced physical vapor deposition of epitaxial III-V materials (GaN)

Lakshman Srinivasan^{1,2}, Karim Ouaras¹, Pere Roca i Cabarrocas^{1,2}

¹ *Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM), CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91128 Palaiseau*

² *IPVF - Ile-de-France Photovoltaïque Institute, Palaiseau*
mél: lakshman.SRINIVASAN@ipvf.fr

Direct Heteroepitaxy of III-V materials on silicon (Si) has always been a challenge and there are various strategies to integrate these materials. Conventional growth methods like MOCVD and MBE use an additional buffer layer or a nucleation layer and require high temperatures (> 600°C) for the growth [1]. Sputtering, a physical vapor deposition (PVD) technique is a promising approach to grow III-V layers directly on substrates such as sapphire or silicon at low temperature.

Our objective is to grow high quality epitaxial GaN at low temperature using plasma enhanced PVD. In this method, high flux and low energy ion bombardment can be used to increase the crystallinity of the films at low growth temperatures. Further, compared to MOCVD and MBE, PVD is more environmentally friendly and has the potential for large scale production [2].

To achieve GaN epitaxy by RF sputtering system (magnetron), non-toxic gases such as reactive Nitrogen (N₂) and Argon (Ar) are used for processing. Argon (Ar) is used to increase the sputter yield from the target. Liquid Gallium is used as the target.

Although GaN epitaxy on Si is a well-established technology, there are still many unexplored areas, especially when it comes to growth at low temperatures. The major challenge is to be able to grow epitaxial grade GaN via sputtering [3]. What ideal substrate temperature should be used for its growth? What are the growth mechanisms of III-V epitaxy by plasma? The novelty of our research work focuses on answering such questions throughout its tenure.

Modifying the plasma parameters towards an optimized growth of epitaxial GaN is essential. To facilitate the optimization, we will rely on in-situ spectroscopic diagnostics to study the plasma chemistry of Ga, N₂ and Ar.

From an application stand-point, high quality GaN heterostructures have vast potential ranging from multi-junction solar cells to various power electronic devices [4]. With several advantages such as the use of eco-friendly gases, high scalability, low growth temperatures and low cost, plasma enhanced PVD of GaN has the potential of replacing conventional methods in the industry. This work is a step further towards that goal.

In this poster, we will present the main advancements in the development of the GaN reactor and the spectroscopic diagnostics that we aim at developing to analyze both the plasma and the material.

Références

- [1] Prabaswara, Aditya, et al. "Review of GaN thin film and nanorod growth using magnetron sputter epitaxy." *Applied Sciences* 10.9 (2020): 3050.
- [2] Baptista, Andresa, et al. "Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands." *Coatings* 8.11 (2018): 402.
- [3] Junaid, Muhammad. *Magnetron Sputter Epitaxy of GaN*. Diss. Linköping University Electronic Press, 2011.
- [4] Neufeld, Carl J., et al. "High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap." *Applied Physics Letters* 93.14 (2008): 143502.

Statut : doc1

SPEKTRE, futur équipement de recherche d'envergure pour les plasmas magnétisés

F. Brochard, D. Genève, S. Heuraux, M. Belmahi, S. Cuynet, L. de Poucques, D. Del Sarto, E. Deriaz, E. Faudot, A. Ghizzo, E. Gravier, G. Henrion, R. Hugon, N. Lemoine, M. Lesur, J. Moritz, C. Noël, T. Réveillé, équipes « Physique des Plasmas Chauds » et « Plasma, Procédés, Surfaces »

Institut Jean Lamour, Université de Lorraine-CNRS, campus ARTEM, Nancy, France
mél: frederic.brochard@uiv-lorraine.fr

SPEKTRE (Sheaths, Plasma Edge & Kinetic Turbulence Radio-Frequency Experiment) est un projet de plateforme de recherche en physique des plasmas en champ magnétique en cours d'installation à l'Institut Jean Lamour. Ce projet s'appuie sur un accord de collaboration conclu avec l'Institut Max-Planck de physique des plasmas de Garching, qui fournit de nombreux équipements dont 13 grandes bobines de cuivre du précédent stellarator Wendelstein 7.

SPEKTRE permettra de choisir entre 2 modes de fonctionnement distincts, qui feront l'objet de campagnes de mesures séparées :

- Un fonctionnement pulsé, avec un champ magnétique voisin de 0.5 Tesla pendant 1 seconde, pour la recherche sur la fusion nucléaire par confinement magnétique,
- Un fonctionnement stationnaire, avec un champ de 0.1 Tesla, pour étudier des procédés de traitement de surface en champ magnétique homogène.

Au cours de la présentation, nous passerons en revue les principales caractéristiques de SPEKTRE, les objectifs scientifiques du projet, les opportunités de collaboration, et présenterons l'état d'avancement du projet et les étapes à venir.

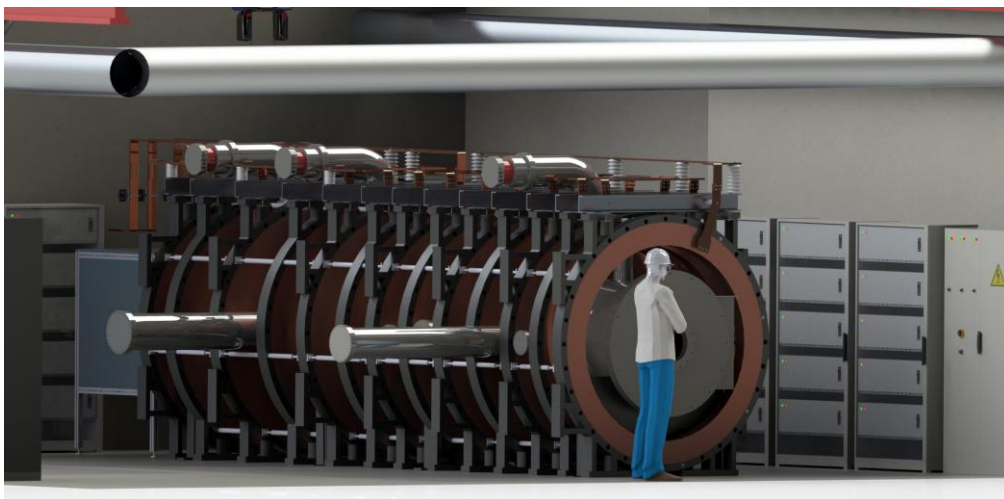


Figure 1 : *Dessin de conception de SPEKTRE*

Statut : permanent

Sputtering process of Aluminum in Ar/He mixtures

S. Ibrahim¹, A. Caillard, P. Brault, T. Lecas, A.L. Thomann

¹Laboratoire GREMI, UMR 7344, CNRS-université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP 6744, 45067 orléans cedex 2

mél: sara.ibrahim@univ-orleans.fr

In the frame of fusion research, the interaction of helium with various materials has been widely studied. For instance, it has been proved that He implantation in tungsten at high substrate temperature and low ion kinetic energy leads to the formation of fiberform nanostructures, called “fuzz” [1]. It has been observed that this nanostructure is formed at a kinetic energy below the atomic displacement threshold, and exhibits high porosity (90 %), which could be of great interest for various applications (light absorption, catalysis etc.). Further investigations have evidenced the formation of various porous structures on molybdenum, nickel, iron or aluminum surfaces [2]. The underlying formation mechanism seems to be related to the very particular behavior of He inside metal lattices [3]. To take advantage of He insertion and release at metal surfaces, several authors have investigated the deposition of metal thin films by magnetron sputtering in helium gas. Various results have been obtained like formation of He filled bubbles in the film thickness and/or apparition of porosity [4,5].

In the present work, we studied Al target sputtering in various He/Ar mixtures in the aim to synthesize nanostructured films for hydrogen production application. The evolution of the magnetron discharge depending on the He percentage in the gas phase was characterized by following the cathode voltage at a fixed current. By comparing with the deposition rate evolution, three sputtering regimes have been evidenced leading to very different depositions conditions at the substrate and thus, to different film morphologies. The nature and energy distribution function of sputtered and backscattered atoms from the target were analysed by performing SRIM simulations. The ion energy distribution function of Al⁺, Ar⁺ and He⁺ ions was determined using mass spectrometry. Good correlations have been obtained between calculations and experiments for sputtered Al atoms. Nevertheless, unexpected Ar⁺ and He⁺ distribution functions were found at high He % and/or low gas pressure inside the chamber. Moreover, SRIM simulations predict that high energy He⁺ (60 eV) are backscattered at the target, reaching the substrate. Since they are neutralized at the target, they were not detected, although their role on film growth seems tremendous. Therefore, this poster will give us the opportunity to discuss both problems.

Références

- [1] M. Tokitani, S. Kajita, S. Masuzaki, Y. Hirahata, N. Ohno, T. Tanabe, Exfoliation of the tungsten fibreform nanostructure by unipolar arcing in the LHD divertor plasma, *Nucl. Fusion* **51** (2011) 102001
- [2] S. Kajita, T. Yoshida, D. Kitaoka, R. Etoh, M. Yajima, N. Ohno, H. Yoshida, N. Yoshida, Y. Terao, Helium plasma implantation on metals: Nanostructure formation and visible-light photocatalytic response, *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 134301
- [3] L. Pentecoste, A.-L. Thomann, P. Brault, T. Lecas, P. Desgardin, T. Sauvage, M.-F. Barthe, Substrate temperature and ion kinetic energy effects on first steps of He⁺ implantation in tungsten: Experiments and simulations, *Acta Materialia* **141** (2017) 47-58
- [4] L. Shi, C. Liu, S. Xu, Z.Y. Zhou, Helium-charged titanium films deposited by direct current magnetron sputtering, *Thin Solid Films*. **479** (2005) 52–58
- [5] V. Godinho, P. Moskovkin, R. Álvarez, J. Caballero-Hernández, R. Schierholz, B. Bera, J. Demarche, A. Palmero, A. Fernández, S. Lucas, On the formation of the porous structure in nanostructured a-Si coatings deposited by dc magnetron sputtering at oblique angles, *Nanotechnology*. **25** (2014) 355705

Statut :

Transferts thermiques à l'interface plasma/solide

L. Alomari¹, N. Benard¹, M. Fenot¹, E. Moreau¹

¹Institut PPRIME, CNRS UPR 3346, Université de Poitiers, 11 Bd Marie et Pierre Curie, 86073 POITIERS CEDEX 9

Mél : lara.alomari@etu.univ-poitiers.fr

L'actionneur plasma de type SDBD (décharge à barrière diélectrique de surface) est constitué de deux électrodes métalliques, déposées asymétriquement de part et d'autre d'un diélectrique. Ce type d'actionneurs est notamment utilisé dans le cadre du contrôle d'écoulement au sein de l'Institut PPRIME. Pourtant, en condition atmosphérique standard, le rendement électromécanique (rapport entre puissance mécanique et puissance électrique) de ce type d'actionneurs est très faible (< 0.2 %) [1] et une majeure partie de la puissance électrique consommée est convertie en puissance thermique au sein du diélectrique, dans le gaz ionisé et dans le gaz qui environne la zone de plasma.

L'objectif de notre projet est d'étudier l'échauffement thermique d'un actionneur SDBD au niveau de son diélectrique par thermographie IR. Deux matériaux aux coefficients d'échange thermique différents d'un ordre de grandeur sont à l'étude : l'alumine Al_2O_3 pure à 99.6% (coefficient thermique de 250 W/m.K) et le nitrure d'Alumine AlN (coefficient thermique de 10 W/m.K). Comme montré récemment par Bian *et al.* [2], l' Al_2O_3 consomme plus de puissance que l' AlN et peut monter plus en température. A la différence de [2], l'influence de l'épaisseur du diélectrique est également étudiée pour des valeurs allant de 0.38 à 1 mm. Le protocole de référence consiste à allumer la décharge pendant 10 minutes environ, et d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la température de la surface du diélectrique pour différentes tensions (de 4 à 10 kV) et fréquences (1 à 4 kHz). Les premiers résultats montrent une augmentation de la température du diélectrique pouvant atteindre 50°C. Une comparaison de la montée en température (par rapport à la température initiale) du diélectrique composé d' AlN et d' Al_2O_3 est proposée en figure 1.

Cette étude constitue une part des essais préliminaires visant à identifier les opportunités d'utilisation des actionneurs plasma de surface en tant que système de dégivrage ou d'antigivrage pour les applications aéronautiques civiles et militaires (projet ASTRID VERGLAS 2021-2024).

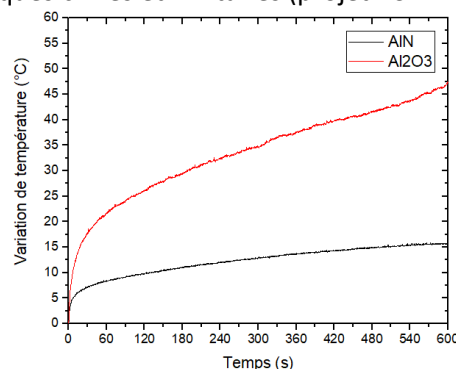


Figure 1 : Variation temporelle de la température : épaisseur = 0.65 mm, tension = 8 kV, fréquence = 4 kHz.

Références

- [1] N. Benard, E. Moreau, Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control, *Exp. Fluids*. 55 (2014) 1846
- [2] D. Bian, Y. Wu, M. Jia, C. Long, S. Jiao, Comparison between AlN and Al_2O_3 ceramics applied to barrier dielectric of plasma actuator, *Chin. Phys. B* Vol. 26, No. 8 (2017) 084703

Statut : Stagiaire

Trapped electrons studies of an ECR ion source with new magnetic topology

A. Khandelwal¹, L. Maunoury¹, J.E. Ducret¹

¹*Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, bd Henri Becquerel, BP 55027, F-14076 Caen cedex 05, France*

Mél : arpan.khandelwal@ganil.fr

The current generation of ECR ion sources used to produce beams of high charge state (HCS) ions have performance limitations due to in-homogenous star shaped beams as a radial multipole confinement magnets and mechanical limitations on scale up to high frequencies. A 10GHz ECR ion source (PK-GANESA) with a new magnetic topology has been developed in a GANIL – Pantechnik collaboration [1] to address these issues. Experimental investigation of the device provided no evidence on the production of HCS ions. To investigate the reason for this behavior, the performance of this source has been analyzed through simulations of electrons prior to collisions for 20 μ s using TrapCAD, a code which computes the tracking of electrons inside the magnetic-field map as well as the electron acceleration due to the electric field of the injected microwave. The electron-energy distribution function (EEDF) obtained from the simulations has been characterized with respect to radio-frequency, heating power, and simulation time. The simulation results have demonstrated an improvement of electron confinement (~10 times) with increasing RF heating when compared to a more traditional 10 GHz ECRIS (NANOGAN3) [2] present at GANIL, with simulation parameters normalized to electron density. In addition, an interpretation has been established for the poor experimental performances of the source, opening new ideas to improve significantly them. This contribution will deal with the results obtained from the simulations and their implications with regard to the PK-GANESA source.

Références

[1] P. Salou et al., AIP Conference Proceedings 2011, 040021 (2018)

[2] A.C.C. Villari et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B I26 (1997)

Statut : doc1

Liste des auteurs

- Achard Jocelyn, 37
Aggarwal Surabhi, 72
Agullo Olivier, 71
Alejandro Alvarez Laguna, 39
Allouch Amal, 19
Alomari Lara, 94
Alvarez Laguna Alejandro, 46, 67
Antoissi Mohamed Ali, 84
Arnas Cécile, 19
Atmane Soumya, 77
Aubert Xavier, 44, 87
Aubry Olivier, 78
- Bauville Gérard, 52
Bechane Yacine, 51
Bekeschus Sander, 68
Bekkar Lounis Hakim, 60
Belmonte Thierry, 20
Benard Nicolas, 57, 58, 94
Benedic Fabien, 19, 37
Berry Valentin, 58
Berthe Laurent, 18
Blanchard Victorien, 51
Blin-Simiand Nicole, 90
Blondel Christophe, 74
Bois Léo, 32
Boubert Pascal, 43, 62
Bourdon Anne, 39, 46, 67
Brault Pascal, 29, 48, 89, 93
Brinza Ovidiu, 37
Brochard Frédéric, 92
Bultel Arnaud, 43, 63
- Caillard Amael, 77, 93
Callegari Thierry, 49
Camenen Yann, 71
Cathy Rond, 19, 59
Cavadias Siméon, 30
Chabert Pascal, 39, 46, 67
Chng Tat Loon, 81
Claire Nicolas, 71
Clergereaux Richard, 28
Crouseilles Nicolas, 32
Cuynet Stéphane, 65
- Dap Simon, 28
Darny Thibault, 52
De Poucques Ludovic, 65
Decauchy Henri, 66
Dolique Vincent, 71, 79
Dorchies Fabien, 64
- Douat Claire, 55
Dozias Sebastien, 35, 55
Drag Cyril, 46, 74
Dubois Paul, 63
Dubois Thibault, 50
Dubuit Nicolas, 71
Ducret Jean-Eric, 95
Dudes Adrien, 64
Dufour Benjamin, 82
Dufour Thierry, 66
Duluard Corinne, 87
Duten Xavier, 19
Désangles Victor, 79, 83
- Elias Paul-Quentin, 27
Ellien Ianis, 70
Escarguel Alexandre, 71
Escot Bocanegra Pablo, 35
Esteves Benjamin, 39, 46
- Favre Aurélien, 43, 63
Fensterbank Louis, 30
Fiorina Benoît, 51
Fleury Michel, 52, 90
Fourment Claude, 64
Franck Emmanuel, 32
Fridlender Tom, 57
Fubiani Gwenael, 71
Fuster Lucas, 49
- Gazeli Kristaq, 87
Geneve Damien, 92
Gibert Titaina, 55
Goutier Simon, 61
Gries Thomas, 20
Grimaldi Corentin, 47
Grojo David, 26
Grosse Sylvain, 45
Grégory Marcos, 65
Gueroult Renaud, 56, 71
Guillaume Gomit, 36
- Hagelaar Gerardus, 49
Hagelaar Gerjan, 71
Hassouni Khaled, 19, 48, 85, 87, 89
Heuraux Stéphane, 21, 92
Hoffmann Patrick, 49
Héninger Michel, 90
- Ibi Jeremie, 85
Ibrahim Sara, 93

Idlahcen Said, 63
 Invernizzi Laurent, 87
 Issaoui Riadh, 37
 Iséni Sylvain, 68

 Jacobs Carolyn, 69
 Jean-Marie-Desiree Ronny, 65
 Jeanney Pascal, 90
 Jouen Samuel, 62
 Juraszek Jean, 63

 Karim Ouaras Karim Ouaras, 91
 Keromnes Alan, 61
 Khandelwal Arpan, 95

 Laux Christophe, 25, 47, 51, 69
 Lazzaroni Claudia, 44
 Lecas Thomas, 70, 88, 93
 Lemarchand Alex, 60
 Lesage Morgan, 43, 62
 Leveque Philippe, 58
 Liard Laurent, 28, 49
 Lombardi Guillaume, 19, 44, 87
 Longo Savino, 19
 Lüttjohann Pau, 68

 Mahi Chaimaa, 37
 Massines Francoise, 22
 Maunoury Laurent, 95
 Mazières Valentin, 28
 Mcguire Sean, 47, 69
 Meillot Erick, 61
 Mestre Eloïse, 55
 Michau Armelle, 19, 48, 89
 Michaël Tatoulian, 30
 Mikikian Maxime, 48, 70, 88
 Milichko Valentin, 20
 Minea Tiberiu, 50
 Minesi Nicolas, 51
 Mohasseb Francis, 19
 Moreau Eric, 45, 57, 58, 94
 Morel Vincent, 43, 63
 Mougnot Jonathan, 19, 48, 89
 Mouskeftaras Alexandros, 40

 Najah Aymane, 65
 Navoret Laurent, 32
 Nguyen Truong Son, 59
 Nikravech Mehrdad, 60
 Noel Cédric, 20
 Nominé Alexandre, 20

 Ognier Stéphanie, 30
 Oliveira Joao, 36
 Ollivier Cyril, 30
 Orriere Thomas, 36

 Otakandza Kandjani Glenn Christopher, 48
 Ouaras Karim, 19

 Pascal Olivier, 28, 49
 Pascaud Romain, 28, 49
 Pasquiers Stéphane, 52, 90
 Pellerin Stéphane, 31
 Petronio Federico, 67
 Plihon Nicolas, 71, 79
 Pokrovskiy Georgy, 80
 Popov Nikolay, 80
 Pouvesle Jean-Michel, 35
 Prasanna Swaminathan, 19, 44, 87, 89

 Quevieux Benjamin, 63

 Rat Vincent, 61
 Redolfi Michael, 19
 Remigy Alice, 44
 Renoux Laura, 86
 Robert Eric, 35
 Rochdi Nouhaila, 77
 Rond Cathy, 82
 Ruelle Céline, 61

 Sadeghi Nader, 17
 Santos Sousa Joao, 52
 Sebastien Forget, 59
 Siby Abdoulaye, 85
 Sklias Kyriakos, 73
 Srinivasan Lakshman, 91
 Stancampiano Augusto, 35
 Starikovskaia Svetlana, 80, 81
 Steimer Guillaume, 32
 Swaminathan Prasanna, 85

 Tetard Gautier, 19, 48, 89
 Thomann Anne-Lise, 93
 Thomas Orriere, 58
 Trad Perla, 90
 Trotabas Baptiste, 56
 Tsikata Sedina, 50

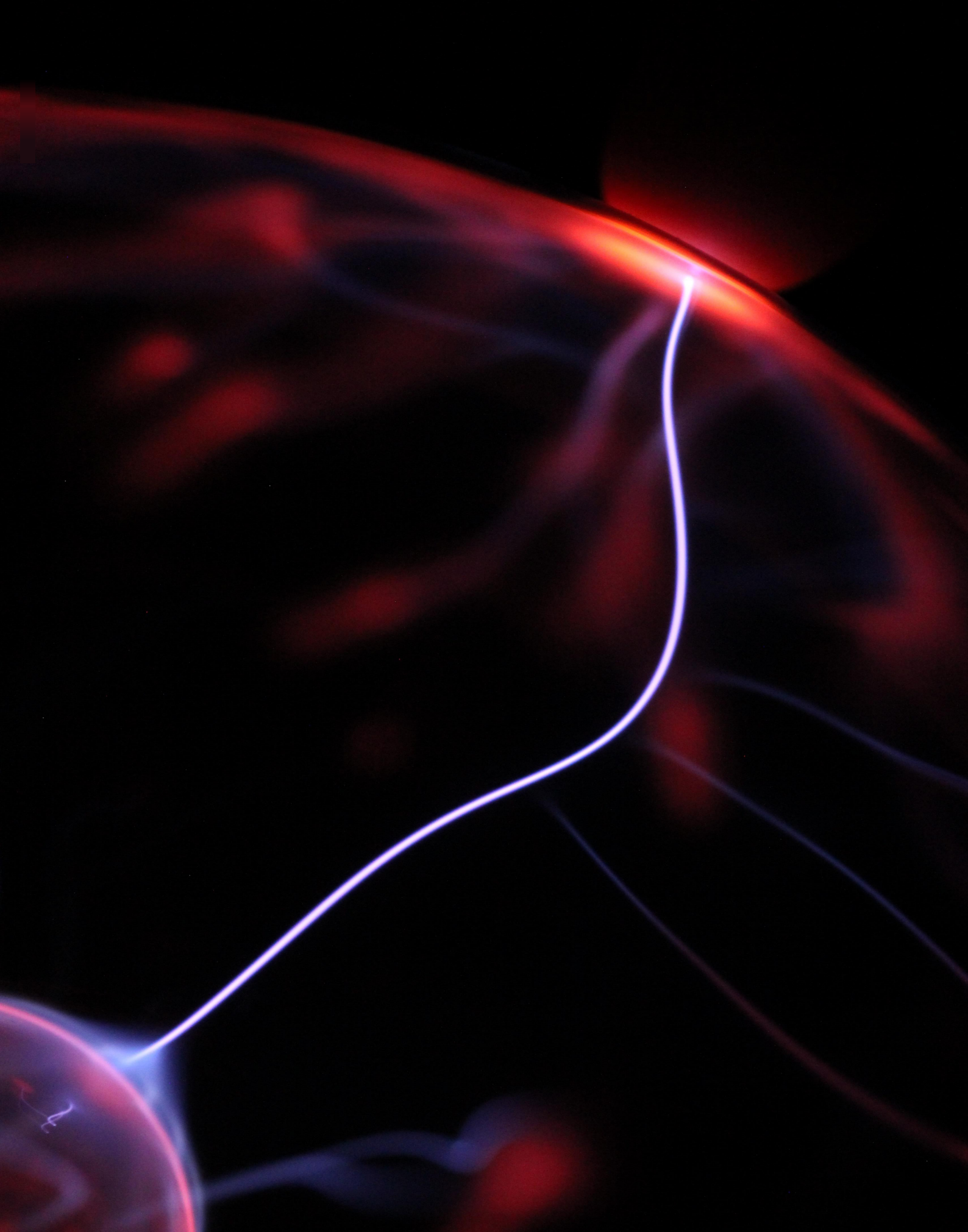
 Valinattaj Omran Azadeh, 37
 Vega Arlette, 59, 82
 Videau Laurent, 18
 Vigon Vincent, 32
 Vincent Simon, 79
 Von Wahl Erik, 70, 88

 Weltmann Klaus-Dieter, 68

 Xavier Duten, 30, 59, 82

 Youssef Laurène, 38

 Zhang Mengxue, 30



EDR Groupement
de recherche

EMILI Étude des milieux ionisés
Plasmas froids créés par décharge
et laser