



GDR Groupement de recherche

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

Journées 2023 du GDR EMILI

23 au 26 octobre 2023

INIST, Nancy

Site web des journées :
<https://emili2023.sciencesconf.org>



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



GDR Groupement de recherche
EMILI Étude des milieux ionisés
Plasmas froids créés par décharge et laser

Journées 2023
Nancy

Crédit image : Cédric Noel _ IJL

Organisation locale



Sponsors



Edito

Créé en 2021, le [GDR EMILI](#) est le résultat d'une réflexion de la communauté initiée en 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, l'objectif était de trouver un moyen de restructurer la communauté plasmas/laser française, 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 entraîné la création du GDR afin de redynamiser la communauté et permettre à l'ensemble des acteurs concernés (chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants) de se retrouver régulièrement pour échanger sur les aspects fondamentaux de ces milieux complexes. Depuis, près de 350 personnels, représentant plus d'une quarantaine de laboratoires, ont rejoint ce GDR soutenu par l'INSIS.

Les Journées sont l'action phare du GDR avec l'ambition qu'elles soient un moment de rencontre incontournable pour la communauté française des plasmas froids et laser. [Les premières Journées](#) se sont déroulées en 2021 à Palaiseau. Organisées par le LPP et le LPICM, elles ont montré une adhésion forte à ce type d'évènement. Pour cette deuxième édition, c'est l'IJL qui organise ces Journées à Nancy et grâce à leur énorme travail d'organisation, le soutien financier de nos tutelles et des nombreux sponsors qui nous ont une fois de plus accordé leur confiance, ces Journées ont toutes les chances de se dérouler sous les meilleurs auspices ! Nous tenons également à remercier l'INIST/Jean Zay qui nous accueille dans ses locaux ainsi que la délégation régionale Centre-Est du CNRS qui met des salles à disposition. Nous remercions également l'université de Lorraine qui participe notamment à l'animation d'un des ateliers.

Durant ces Journées, ce sont près de 100 participants qui se retrouveront autour de 30 oraux et 20 posters pour dresser un panorama des recherches actuelles dans les laboratoires français. Ces Journées seront également un lieu permettant aux jeunes chercheurs, futur de la communauté, de présenter leurs recherches et de rencontrer la communauté. Les exposés et les posters les plus convaincants des doctorants et post-doctorants seront récompensés par des prix. Les nouveaux entrants au CNRS et dans une université auront aussi l'opportunité d'intervenir à l'oral pour présenter leur parcours et leur projet de recherche.

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. 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 ateliers ont été prévus pour favoriser les interactions et les discussions. Ces ateliers porteront sur des sujets scientifiques précis ou sur certains aspects du monde de la recherche comme par exemple sur les pratiques de publication pour lequel un questionnaire a été envoyé à l'ensemble de la communauté. Les échanges se feront aussi avec grand plaisir pendant les moments de pause et de convivialité prévus dans le programme en espérant que cela favorisera l'émergence de collaborations fructueuses.

Ce recueil de résumés permet de faire un point d'étape des recherches actuellement menées dans les laboratoires de la communauté. Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

Le comité de pilotage du GDR EMILI

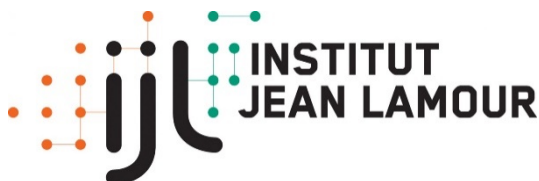
Comité de pilotage du GDR / Comité de programme

David AMANS	ILM	Villeurbanne
Stéphane BECHU	LPSC	Grenoble
Bruno BOUSQUET	CELIA	Talence
Arnaud BULTEL	CORIA	St Etienne du
Gilles CARTRY	PIIM	Marseille
Xavier DUTEN	LSPM	Villetaneuse
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
Pierre TARDIVEAU	LPGP	Orsay
Corinne DELHAYE (Gestion du GDR)	GREMI	Orléans

Comité local d'organisation

Permanents :

Grégory MARCOS
Gérard HENRION
Robert HUGON



Mohammed BELMAHI
Frédéric BROCHARD
Ludovic DE POUQUES
Jérôme MORITZ

Thierry BELMONTE
Stéphane CUYNET
Thomas GRIES
Cédric NOEL

Jamal BOUGDIRA
Thierry CZERWIEC
Julien MARTIN
Régis PEIGNIER

Post-doctorants :

Anna Paula CREMA
Lucile PENTECOSTE-CUYNET

Benjamin DUFOUR **Alexis GARCIA WONG**

Doctorants :

Majed AWAJI
Lucas MAGNIEZ

Arthur HELLE
Arthur MAIZERAY

Ronny JEAN-MARIE DESIREE
Anna NOMINE

Administration :

Isabelle FOURNELLE

Marine JACQUEMIN

Sophie KLEIN

Sponsors





Lundi 23 octobre	Mardi 24 octobre	Mercredi 25 octobre	Jeudi 26 octobre
---------------------	---------------------	------------------------	---------------------

	08:45	Grand Prix 1 Jean-Pierre Bœuf LAPLACE, Toulouse	08:45	Revue 3 Olivier Guaitella LPP, Palaiseau	08:45	Revue 5 David Amans ILM, Villeurbanne
	09:30	Session IA Mario Maglione ICMCB, Pessac Francisco Chinesta (Visio) PIMM, Paris	09:30	Oraux Jeunes Léo Gosse CORIA, St-Etienne du Rouvray Alexandre Perdrau PROMES, Perpignan Abdoulaye Siby LSPM, Villetaneuse Mohamed Saadana PPRIME, Poitiers	09:30	Grand prix 2 Pascal Chabert LPP, Palaiseau
	10:30	Pause café	10:30	Pause café	10:15	Oraux Entrants Cédric Mannequin IMN, Nantes
	11:00	Ateliers IA Plasma/Liquide Recrutements	11:00	Ateliers Phases solide/liquide Logiciels libres Publications	11:00	Oraux Entrants Alexandra Brisset EM2C, Gif-sur-Yvette
12:30		Accueil	12:30	Déjeuner	11:15	Table ronde
14:00		Ouverture	14:00	Revue 2 Pierre Fretton LAPLACE, Toulouse	12:10	Clôture
14:20		Revue 1 Gérard Henrion IJL, Nancy	14:45	Oraux Entrants Nicolas Minesi EM2C, Gif-sur-Yvette	12:30	Déjeuner
15:05		Sujets d'actu Amélie Ferré LP3, Marseille Frédéric Brochard IJL, Nancy Catherine Batiot-Dupeyrat IC2MP, Poitiers Clément Zaepffel ONERA, Palaiseau	15:00	Oraux Jeunes Tojo Rasoanarivo IMN, Nantes Julien Herbelot PIIM, Marseille	14:00	Revue 4 Armelle Cessou CORIA, St-Etienne du Rouvray
16:25		Pause café	15:30	Retour Arpege Simon Dap LAPLACE, Toulouse	14:45	Sujets d'actu Emilie Despiau-Pujo LTM, Grenoble
16:55		Oraux Entrants Kristaq Gazeli LSPM, Villetaneuse Rim Ettouri IMN, Nantes	15:45	Session Industriels Teledyne Lecroy, Neyco, Tektronix	15:05	Retours ateliers Plasmas magnet. / DDB
17:25		Oraux Jeunes Francis Pagaud ENS, Lyon Ronny Jean-Marie-Désirée IJL, Nancy	16:25	Pause café	15:25	Session Posters
17:55			16:55	Session Posters	16:25	Pause Café
18:30		Cocktail de bienvenue	18:30		16:55	Visite IJL
21:00			19:30-23:00	Banquet		

Lundi 23 octobre

12:30	Accueil - INIST	
14:00	Ouverture	
14:20	Revue	
14:20	Diagnostiques des plasmas : la pression monte !	Gérard Henrion IJL, Nancy
15:05	Sujets d'actu	
15:05	Source de rayonnement X générée par laser femtoseconde pour la spectroscopie et l'imagerie	Amélie Ferré LP3, Marseille
15:25	SPEKTRE, une plateforme de recherche sur les plasmas magnétisés	Frédéric Brochard IJL, Nancy
15:45	Couplage plasma-catalyse pour la production de gaz synthèse	Catherine Batiot-Dupeyrat IC2MP, Poitiers
16:05	La foudre : Phénoménologie, simulation expérimentale et numérique, impact sur l'aéronautique	Clément Zaepffel ONERA, Palaiseau
16:25	Pause café	
16:55	Oraux Entrants	
16:55	Production et optimisation de microplasmas pour la génération de l'azote atomique	Kristaq Gazeli LSPM, Villeneuve
17:10	De l'expérimental à la simulation : vers une compréhension approfondie et une optimisation des interactions plasma	
17:10		Rim Ettouri IMN, Nantes
17:25	Oraux Jeunes	
17:25	Emissive cathode immersed in a plasma: plasma-cathode interactions, operation and stability	Francis Pagaud ENS, Lyon
17:40	Etude temporelle d'une décharge à barrière diélectrique impulsionnelle en ammoniac par diagnostic laser (E-FISH)	Ronny Jean-Marie-Désirée IJL, Nancy
17:55	Fin de la journée	
18:30	Cocktail de bienvenue	

Mardi 26 octobre

08:45	Grand Prix	
08:45	Phénomènes de rotation dans les plasmas partiellement magnétisés	Jean-Pierre Boeuf LAPLACE, Toulouse
09:30	Session IA	
09:30	Présentation du PEPR DIADEM	Mario Maglione ICMCB, Pessac
10:00	Présentation du GDR I-GAIA	Francisco Chinesta (visio) PIMM, Paris
10:30	Pause café	
11:00	Ateliers en //	
	Intelligence artificielle et machine learning pour les plasmas froids et lasers	Arnaud Bultel (CORIA), Maxime Mikikian (GREMI), Vincent Motto-Ros (ILM), Vincent Rat (IRCER), Augusto Stancampiano (GREMI)
	Interactions plasma/laser-liquide	Xavier Duten (LSPM)
	Recrutements sur des postes académiques	Cédric Mannequin (IMN), Grégory Marcos (IJL), Armelle Michau (LSPM), Nicolas Minési (EM2C), Khaled Hassouni (LSPM)
12:30	Déjeuner	
14:00	Revue	
14:00	Mécanismes physiques et approche numérique pour décrire la phase fort courant d'un disjoncteur haute tension : 10 ans de construction d'un modèle d'arc	Pierre Freton LAPLACE, Toulouse
14:45	Oraux Entrants	
14:45	Kinetic mechanism and sub-ns measurements of nanosecond thermal spark in air	Nicolas Minesi EM2C, Gif-sur-Yvette
15:00	Oraux Jeunes	
15:00	Modélisation d'un plasma C12/Ar pour la gravure du GaN par ALE	Tojo Rasoanarivo IMN, Nantes
15:15	Mesure d'un champ électrique dans un environnement magnétisé avec le diagnostic EFILÉ	Julien Herbelot PIIM, Marseille
15:30	Retour ARPEGE	
15:30	Mesures d'absorption IR dans une DBD de CO2	Simon Dap LAPLACE, Toulouse
15:45	Session Industriels	
15:30	Présentation de l'entreprise et de ses produits	Teledyne Lecroy Neyco Tektronix
16:25	Pause café	
16:55	Session Posters	
	<p>Ammonia decomposition by microwave plasma discharges - Majed Awaji (IJL)</p> <p>Approche de dynamique moléculaire pour l'étude de la réactivité en surface des espèces neutres dans un plasma Ar/CH4 - Glenn Christopher Otakandza-Kandjani (GREMI)</p> <p>Caractérisation électrique et optique d'une décharge de Townsend à pression atmosphérique en CO2 - Corentin Bajon (LAPLACE)</p> <p>Dépôts métalliques par pulvérisation magnétron dans l'hélium: quels mécanismes de formation de porosité ouverte ou fermée ? - Dimitri Boivin (GREMI)</p> <p>Determination of accurate fluorescence decay times in reactive plasmas using ps-TALIF assisted by a streak camera - Dimitrios Stefanos (LSPM)</p> <p>Diagnostics optiques sur un microplasma N2/Ar pour le dépôt de nitrure de bore hexagonal - Belkacem Menacer (LSPM)</p> <p>Diagnostiques par caméra rapide d'un arc créé par séparation de contacts : Etude des particules éjectées aux électrodes - Arthur Hellé (IJL)</p> <p>Étude expérimentale de la fluorescence induite par laser à 2 photons appliquée à l'oxygène atomique contenu dans un plasma d'air à couplage inductif en présence d'Invar 36 - Adrien Brault (CORIA)</p> <p>Génération d'ondes helicon toroidales dans TORPEX, Simon Vincent (EPFL)</p> <p>Multi-periodic atmospheric pressure plasma jet for biomedical applications - Louis Saugé (LPP)</p> <p>Observation expérimentale du couplage d'instabilités basse fréquence à différentes échelles dans un propulseur de Hall - Quentin Delavrière-Delion (LAPLACE)</p> <p>Plasma characterization during etching of V2O3 materials - Tatiana Chancelle Mbouja Signe (IMN)</p> <p>Simulation by COMSOL® for the Dynamics of Nanoparticles in a Plasma - Ghina Saab (ESIB)</p> <p>Study of glow and RF discharges in CO2 and H2 mixtures - Sophie Bravo (LPP)</p> <p>Study of III-V thin films growth directly on silicon by remote-plasma CVD for a reduction in solar cell industrialisation costs - Lise Watrin (IPVF, LPICM)</p> <p>Water decontamination using a plasma-in-liquid technique, application to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) treatment - Rendy Prastiko (LSPM)</p> <p>Fluorescence induite par absorption laser à deux photons (TALIF) de l'iode atomique - Cyril Drag (LPP)</p> <p>Profils de raies en spectroscopie d'émission optique appliqués au diagnostic de micro-plasmas - Sylvain Iséni (GREMI)</p> <p>Work function measurements of materials exposed to hydrogen plasmas, correlation with the negative ion surface production efficiency - Jean-Marc Layet (PIIM)</p> <p>Using evaporation to create hydrophobic coating - Aurélien Lefèvre (Bronkhorst)</p>	
18:30	Fin de la journée	

Mercredi 27 octobre

08:45	Revue	
08:45	Rôle des états électroniques et vibrationnels excités dans la cinétique des plasmas de CO ₂	Olivier Guaitella LPP, Palaiseau
09:30	Oraux Jeunes	
09:30	Étude spectroscopique de l'émission du triplet de l'oxygène atomique à 777 nm sur des plasmas éthanol-argon induits par laser	Léo Gosse CORIA, St-Etienne du Rouvray
09:45	Synthèse de nanocomposites or/polymère dans une décharge contrôlée par barrière diélectrique en Ar et Ar/NH ₃	Alexandre Perdrau PROMES, Perpignan
10:00	Utilité de la ps-TALIF pour la mesure de la température de gaz dans un plasma d'hydrogène hautement collisionnel	Abdoulaye Siby LSPM, Villeneuve
10:15	Development of a numerical modeling strategy for joint experimental/simulation analysis of plasma/catalysis interactions	Mohamed Saadana PPRIME, Poitiers
10:30	Pause café	
11:00	Ateliers en //	
	Phases solide et liquide dans un plasma	Agnès Granier (IMN), Armelle Michau (LSPM), Maxime Mikikian (GREMI), Karim Ouaras (LPICM)
	Pratiques de publication	Aricia Bassinet (UL), Virginie Lang (UL), Xavier Launois (INIST), Grégory Marcos (IJL), Jérôme Moritz (IJL)
	Logiciels libres pour la recherche	David Amans (ILM), Laurent Garrigues (LAPLACE), Glenn Otakandza-Kandjani (GREMI)
12:30	Déjeuner	
14:00	Revue	
14:00	Combustion assistée par plasma : Du Challenge de la mesure de température en combustion turbulente à un diagnostic attractif pour les décharges nanosecondes	Armelle Cessou CORIA, St-Etienne du Rouvray
14:45	Sujets d'actu	
14:45	Etude des interactions plasma-surface par dynamique moléculaire : quels apports pour la modélisation des plasmas froids ?	Emilie Despiau-Pujo LTM, Grenoble
15:05	Retour Ateliers	
15:05	Retour sur l'atelier Plasmas magnétisés (octobre 2022, Orléans)	Laurent Garrigues LAPLACE, Toulouse
15:15	Retour sur l'atelier Données de base (juin 2023, St-Etienne du Rouvray)	Arnaud Bultel CORIA, St-Etienne du Rouvray
15:25	Session Posters	
15:25	Voir Session du mardi	
16:25	Pause café	
16:55	Visite IJL	
18:30	Fin de la journée	
19:30-23:00	Banquet	

Jeudi 28 octobre

08:45	Revue	
08:45	Diagnostic des plasmas laser produits sous liquide	David Amans (ILM) ILM, Villeurbanne
09:30	Grand Prix	
09:30	Y a t'il encore des questions fondamentales en physique des décharges ?	Pascal Chabert LPP, Palaiseau
10:15	Oraux Entrants	
10:15	Mécanismes de gravure dans les procédés plasma d'Atomic Layer Etching	Cédric Mannequin IMN, Nantes
10:30	Pause café	
11:00	Oraux Entrants	
11:00	Nanosecond pulsed discharges induced in air by high overvoltages	Alexandra Brisset EM2C, Gif-sur-Yvette
11:15	Table ronde	
12:10	Clôture	
12:30	Déjeuner	
14:00	Fin de la journée	

Table des matières

Grands prix	14
Phénomènes de rotation dans les plasmas partiellement magnétisés, Boeuf Jean-Pierre	16
Existe-t-il encore des questions fondamentales en physique des décharges ?, Chabert Pascal	17
Exposés de revue	18
Diagnostic des plasmas : la pression monte !, Henrion Gérard	20
Mécanismes physiques et approche numérique pour décrire la phase fort courant d'un disjoncteur haute tension : 10 ans de construction d'un modèle d'arc, Freton Pierre	21
Rôle des états électroniques et vibrationnels excités dans la cinétique des plasmas de CO ₂ , Guaitella Olivier [et al.]	22
Combustion assistée par plasma : Du Challenge de la mesure de température en combustion turbulente à un diagnostic attractif pour les décharges nanosecondes, Cessou Armelle	23
Diagnostics des plasmas produits par ablation laser à une interface liquide-solide, Amans David	24
Sujets d'actualité	26
X-ray source generated by femtosecond laser for spectroscopy and imaging applications, Ferré Amélie [et al.]	28
SPEKTRE, une plateforme de recherche sur les plasmas magnétisés, Brochard Frédéric	29
Couplage plasma-catalyse pour la production de gaz de synthèse, Dupeyrat Catherine [et al.]	30
La foudre : Phénoménologie, simulation expérimentale et numérique, impact sur l'aéronautique, Zaepffel Clement	31
Etude des interactions plasma-surface par dynamique moléculaire : quels apports pour la modélisation des plasmas froids ?, Despiau-Pujo Emilie	32
Mesures d'absorption IR dans une DBD de CO ₂ , Bajon Corentin	33
Oraux - Entrants	34
Production et optimisation de microplasmas pour la génération de l'azote atomique, Gazeli Kristaq	36

De l'expérimental à la simulation : vers une compréhension approfondie et une optimisation des interactions plasma, Ettouri Rim [et al.]	37
Kinetic mechanism and sub-ns measurements of nanosecond thermal sparks in air, Minesi Nicolas	38
Décharges diffuses générées par de fortes surtensions, Brisset Alexandra	39
Oraux - Jeunes	40
Emissive cathode immersed in a plasma: plasma-cathode interactions, operation and stability, Pagaud Francis [et al.]	42
Etude temporelle d'une décharge à barrière diélectrique impulsionnelle en ammoniac par diagnostic laser (E-FISH), Jean-Marie-Desiree Ronny [et al.]	43
Modélisation d'un plasma Cl ₂ /Ar pour la gravure du GaN par ALE, Rasoanarivo Tojo	44
Mesure d'un champ électrique dans un environnement magnétisé avec le diagnostic EFILE, Herbelot Julien [et al.]	45
Étude spectroscopique de l'émission du triplet de l'oxygène atomique à 777 nm sur des plasmas éthanol-argon induits par laser, Gosse Léo [et al.]	46
Synthèse de nanocomposites or/polymère dans une décharge contrôlée par barrière diélectrique en Ar et Ar/NH ₃ , Perdrau Alexandre [et al.]	47
Utilité de la ps-TALIF pour la mesure de la température de gaz dans un plasma d'hydrogène hautement collisionnel, Siby Abdoulaye [et al.]	48
Development of a numerical modeling strategy for joint experimental/simulation analysis of plasma/catalysis interactions., Saadana Mohamed [et al.]	49
Posters	50
Ammonia decomposition by microwave plasma discharges, Awaji Majed [et al.]	52
Approche de dynamique moléculaire pour l'étude de la réactivité en surface des espèces neutres dans un plasma Ar/CH ₄ , Otakandza Kandjani Glenn Christopher [et al.]	53
Caractérisation électrique et optique d'une décharge de Townsend à pression atmosphérique en CO ₂ , Bajon Corentin	54
Dépôts métalliques par pulvérisation magnétron dans l'hélium: quels mécanismes de formation de porosité ouverte ou fermée ?, Boivin Dimitri [et al.]	55
Determination of accurate fluorescence decay times in reactive plasmas using ps-TALIF assisted by a streak camera, Stefas Dimitrios [et al.]	56
Diagnostics optiques sur un microplasma N ₂ /Ar pour le dépôt de nitrure de bore hexagonal., Menacer Belkacem	57
Diagnostics par caméra rapide d'un arc créé par séparation de contacts : Etude des particules éjectées aux électrodes, Hellé Arthur [et al.]	58
Étude expérimentale de la fluorescence induite par laser à deux photons appliquée à l'oxygène atomique contenu dans un plasma d'air à couplage inductif en présence d'Invar 36, Brault Adrien [et al.]	59
Génération d'ondes helicon toroïdales dans TORPEX, Vincent Simon [et al.]	60

Multi-periodic atmospheric pressure plasma jet for biomedical applications, Saugé Louis	61
Observation expérimentale du couplage d'instabilités basse fréquence à différentes échelles dans un propulseur de Hall, Delavière–Delion Quentin [et al.]	62
Plasma characterization during etching of V2O3 materials, Mbouja Signe Tatiana Chancelle [et al.]	63
Simulation by COMSOL® for the Dynamics of Nanoparticles in a Plasma, Saab Ghina [et al.]	64
Study of glow and RF discharges in CO2 and H2 mixtures, Bravo Sophie [et al.]	65
Study of III-V thin films growth directly on silicon by remote-plasma CVD for a reduction in solar cell industrialisation costs, Watrin Lise [et al.]	66
Water decontamination using a plasma-in-liquid technique, application to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) treatment, Prastiko Rendy	67
Fluorescence induite par absorption laser à deux photons (TALIF) de l'iode atomique, Drag Cyril [et al.]	68
Profils de raies en spectroscopie d'émission optique appliqués au diagnostic de micro-plasmas, Iséni Sylvain [et al.]	69
Work function measurements of materials exposed to hydrogen plasmas, correlation with the negative ion surface production efficiency, Layet Jean-Marc [et al.]	70
Using evaporation to create hydrophobic coating, Lefèvre Aurélien [et al.]	71
Liste des auteurs	72

Grands prix

Phénomènes de rotation dans les plasmas partiellement magnétisés

J.P. Boeuf

¹LAPLACE, CNRS, Université de Toulouse
jpb@laplace.univ-tlse.fr

Dans les plasmas froids à basse pression, on peut utiliser un champ magnétique externe appliqué perpendiculairement au courant de décharge ou au champ électrique appliqué pour augmenter le temps de résidence des électrons dans la décharge et permettre l'ionisation et le maintien du plasma dans des conditions de basse pression (fraction de mtorr à quelques mtorr) et dans des dispositifs de relativement petites dimensions (quelques cm). Dans ces conditions les libres parcours des particules chargées sont très supérieurs aux dimensions du dispositif et le champ magnétique permet de confiner les électrons. De telles configurations à champs électrique et magnétique croisés ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) sont utilisées dans diverses applications telles que les moteurs à courant de Hall pour la propulsion des satellites, les décharges de magnétrons pour le traitement de surface, les sources d'ions négatifs pour l'injection de faisceau de neutres rapides pour chauffer les plasmas de fusion ou les tuyères magnétiques de propulseurs à plasma. Les plasmas dans ces dispositifs sont partiellement magnétisés, c'est-à-dire que les électrons sont fortement magnétisés tandis que les ions ne le sont pas ou peu, et ils sont soumis à diverses micro et macro-instabilités très distinctes des instabilités dans les plasmas de fusion^{1,2}. Ces instabilités sont souvent dues à la grande différence de vitesses de dérive des électrons et des ions dans la direction $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Elles ont pour conséquence un transport électronique perpendiculaire au champ magnétique beaucoup plus grand que ce que prévoit la théorie classique (« transport anormal »). La possibilité de maintenir un champ électrique important dans le plasma quasineutre des propulseurs à courant de Hall malgré le transport anormal des électrons, ou la présence de fortes doubles couches associées à la rotation azimutale de structures de plasma (« rotating spokes ») dans les décharges de magnétrons et les propulseurs à courant de Hall, sont des exemples de la physique difficile mais passionnante des dispositifs à configuration $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Dans cette présentation, nous décrivons certains aspects importants de cette physique et les avancées récentes, basées sur des simulations, la théorie et les expériences, dans notre compréhension des différents types d'instabilités (instabilité de dérive cyclotronique électronique, instabilité de Simon Hoh, ondes d'ionisation tournant dans la direction $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ...) présentes dans ces plasmas et de leurs conséquences sur le fonctionnement des dispositifs.

Références

- [1] J.P. Boeuf and A. Smolyakov, *Physics and instabilities of low-temperature $E \times B$ plasmas for spacecraft propulsion and other applications*, *Physics of Plasmas* 30, 050901 (2023).
- [2] I. D. Kaganovich, A. Smolyakov, Y. Raitses, E. Ahedo, I. G. Mikellides, B. Jorns, F. Taccogna, R. Gueroult, S. Tsikata, A. Bourdon, J.-P. Boeuf, M. Keidar, A. T. Powis, M. Merino, M. Cappelli, K. Hara, J. A. Carlsson, N. J. Fisch, P. Chabert, I. Schweigert, T. Lafleur, K. Matyash, A. V. Khrabrov, R. W. Boswell and A. Fruchtman, *Physics of $E \times B$ discharges relevant to plasma propulsion and similar technologies*, *Phys. Plasmas* 27, 120601 (2020).

Existe-t-il encore des questions fondamentales en physique des décharges ?

P. Chabert¹

¹Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne Université, Route de Saclay, 91128 Palaiseau
mél: pascal.chabert@lpp.polytechnique.fr

Il arrive parfois que la première question adressée à un jeune chercheur lors de sa première présentation en conférence ne soit pas une question mais le commentaire suivant : « This has been done 30 years ago ! », où même plus direct « I did this a long time ago you should read the literature ». Il serait dommage de ne pas voir dans ce type de commentaire un encouragement plutôt qu'une critique. En effet, une découverte brillante faite 30 ans plutôt mais passée totalement inaperçue mérite d'être redécouverte !

Les chercheurs expérimentés (lire proches de la retraite), dont je fais (bientôt) partie, peuvent avoir la tentation de penser que leur domaine va s'éteindre avec eux car il ne reste plus de questions fondamentales auxquelles répondre ; il n'en est heureusement rien. Vous avez donc la réponse à la question posée dans le titre !



Figure 1 : Discussion intergénérationnelle sur l'état de notre domaine de recherche en 2001 (gauche) et ferme engagement de la jeunesse de l'époque à se lancer malgré tout (droite).

Le but de cette présentation est de donner envie à de jeunes chercheurs de faire de la recherche fondamentale en physique des décharges ; bref de la recherche qui ne sert à rien. Je prendrai des exemples de sujets qui m'ont intéressé durant ma carrière, et j'expliquerai comment je suis arrivé à une conclusion a priori totalement paradoxale : les recherches que j'ai menées étaient plus fondamentales lorsqu'elles étaient motivées par une application qui fonctionnait parfaitement dans l'industrie que lorsqu'elles défrichaient un domaine applicatif nouveau.

Statut : permanent

Exposés de revue

Diagnostic des plasmas : la pression monte !

G. Henrion

Université de Lorraine, CNRS – Institut Jean Lamour, F54011 Nancy
mél: gerard.henrion@univ-lorraine.fr

Depuis une trentaine d'années, les plasmas à haute pression connaissent un essor grandissant, d'abord avec les décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique puis, plus récemment avec le développement de plasmas dans les milieux denses, notamment les liquides, pour différentes applications. Dès lors, les techniques de diagnostic des plasmas, développées au préalable pour les plasmas à basse pression ne sont plus forcément adaptées, ou, a minima, requièrent des adaptations et/ou des précautions particulières du fait de la haute pression et, par conséquent, des mécanismes collisionnels entre espèces lourdes qui ne peuvent plus être négligés.

Parallèlement à l'augmentation de pression (physique) dans les plasmas, les dernières décennies ont vu également se développer les plasmas de taille de plus en plus petite (micro-plasmas) et de durée de plus en plus courte (typiquement ns). Là encore, la pression (intellectuelle) est montée dans la communauté afin d'innover en matière de caractérisation des plasmas à ces échelles micro- voire nano-métriques dans des milieux le plus souvent multiphasiques, en même temps que se développaient des outils mieux adaptés à ces échelles, notamment temporelles.

Sur la base d'exemples concrets, l'exposé mettra l'accent sur les points de vigilance à observer ainsi que sur l'adaptation des techniques de diagnostics selon les caractéristiques macroscopiques des plasmas étudiés.

Mécanismes physiques et approche numérique pour décrire la phase fort courant d'un disjoncteur haute tension : 10 ans de construction d'un modèle d'arc

Pierre Freton, Jean-Jacques Gonzalez

LAPLACE, UMR 5213 CNRS_UPS-INP, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier - 118, route de Narbonne - bât 3R3 - 31062 Toulouse cedex 9
pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr

Les disjoncteurs haute-tension auto-soufflés en présence de SF₆ sont des dispositifs particulièrement complexes qui interviennent lors de la coupure du courant sur les réseaux haute tension. Leur principe de fonctionnement est basé sur un soufflage de l'arc au moment du passage par zéro du courant AC. Leur mise au point expérimentale est particulièrement difficile et onéreuse et pourtant nécessaire notamment en vue de l'utilisation de gaz de substitution au SF₆.

En vue de l'optimisation et de la compréhension du fonctionnement de ces dispositifs, nous travaillons depuis plus d'une dizaine d'années, en collaboration avec le groupe Siemens (Berlin), sur le développement d'un modèle multi-physique prenant en compte l'arc et son interaction avec son environnement (Paroi, tuyères, électrodes). Nous nous intéressons particulièrement au comportement de ces appareils de coupure au moment de la phase fort courant pour laquelle un certain nombre de papiers ont été publiés [1-6].

Lors de cette présentation, nous rappellerons les mécanismes qui conduisent à la coupure du courant puis expliquerons la démarche qui a amené à la construction d'un modèle avec la prise en compte de nombreux phénomènes comme la turbulence, le champ magnétique auto-induit, le rayonnement, l'ablation des parois en PTFE ou le mouvement mécanique des pièces. Le modèle que nous avons développé s'est ainsi enrichi au cours des années tout en étant confronté à des validations expérimentales (Taux d'ablation, déformation des tuyères, signatures électriques, montée en pression, ...).

Nous proposons dans ce papier de faire une présentation de la démarche de développement que nous avons suivie en nous attachant particulièrement aux phénomènes physiques nécessaires pour permettre une prédiction et une compréhension fine du comportement de ces dispositifs.

Références

- [1] A Petchanka, F Reichert, J-J Gonzalez and P Freton, "Modelling of the deformation of PTFE-nozzles in a high voltage circuit breaker due to multiple interruptions", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 135201, (2016)
- [2] J-J. Gonzalez, P. Freton, F. Reichert et al, "PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers", *IEEE Transactions on Plasma Science*, **43**, 8, (2015) 2703-2714
- [3] F. Reichert, J-J. Gonzalez, P. Freton, "Modelling and simulation of radiative energy transfer in high-voltage circuit breakers", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, (2012), 11p
- [4] J-J. Gonzalez, P. Freton, F. Reichert, D. Randrianarivao, "Turbulence and magnetic field calculations in high-voltage circuit breakers", *IEEE Transactions on Plasma Science*, **40**, (2012), p936-940
- [5] P Freton, J-J. Gonzalez, M Masquère and Frank Reichert, « Magnetic field approaches in dc thermal plasma modelling », *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, (2011), 16p
- [6] P. Freton, J-J. Gonzalez, A. Harry Solo, F. Reichert, A. Petchanka, "Influence of copper vapours in SF₆ plasma", *Plasma Physics and Technology*, **Vol. 6** n°2, (2019)

Rôle des états électroniques et vibrationnels excités dans la cinétique des plasmas de CO₂

O. Guaitella¹, S. Bravo¹, D. Sadi¹, C.A. Garcia-Soto¹, E. Baratte¹, T. Silva², V. Guerra²

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

²Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal
mél: olivier.guaitella@lpp.polytechnique.fr <mailto:mon-email@moi.fr>

L'étude des plasmas de CO₂ pur ou en mélange, a bénéficié d'un regain d'intérêt depuis une dizaine d'année en lien avec les problématiques environnementales. Différentes stratégies de valorisation du CO₂ sont explorées, qu'il s'agisse de procédés de méthanation, de reformage à sec du méthane ou de méthanolisation par exemple. La plupart de ces procédés de synthèse de molécules reposent sur l'association d'un plasma avec un catalyseur, ajoutant ainsi à la complexité des systèmes étudiés. A l'origine, l'utilisation de plasmas froids pour ces applications a été motivée par la possibilité de bénéficier du pompage vibrationnel du mode asymétrique de la molécule de CO₂ comme décrit notamment dans le livre sur la chimie des plasmas de Fridman [1]. S'il est assez clair aujourd'hui que la dissociation du CO₂ purement par pompage vibrationnel n'est pas viable en terme de cout énergétique, le rôle de l'excitation vibrationnelle du CO₂ mais aussi du CO et des autres réactants (H₂, CH₄, etc...) n'en est pas moins très importante. En effet, que ce soit de par leur impact sur l'énergie moyenne des électrons, sur l'efficacité de certaines réactions chimiques, ou simplement sur les vitesses de chauffage du gaz, les vibrations de ces molécules restent au centre de la dynamique des plasmas contenant du CO₂. Pourtant, il y a encore relativement peu de données expérimentales décrivant l'évolution des températures vibrationnelles en plasmas de CO₂ [2]. Au-delà des vibrations, des résultats récents suggèrent l'importance de certains états électroniques excités, ce qui n'est pas si surprenant si l'on prend en compte le fait que la dissociation par impact électronique du CO₂ produit soit l'état O(¹D) soit l'état CO(a³Π) [3]. Comme souvent, le manque de données de base limite grandement le caractère prédictif des modèles qui peuvent être développés pour ces plasmas. En complément des approches visant à optimiser les performances de conversion du CO₂ avec des sources plasma DBD, micro-ondes, nanosecondes pulsée, ou encore radiofréquence, il est donc indispensable de développer aussi des mesures dans des décharges plus simples permettant de véritablement contraindre les modèles avec des jeux de données les plus complets possibles. Cette présentation aura donc deux objectifs :

- Dans un premier temps une vue d'ensemble des dernières avancées de la communauté sur les performances et la compréhension de diverses sources plasma utilisées pour la conversion du CO₂ sera présentée.
- Dans un deuxième temps la méthode de validation systématique de modèle cinétique réalisée en collaboration avec l'IST Lisbonne sera décrite. En particulier l'intérêt de mesures infrarouge in situ résolue en temps effectuée dans des décharges lumineuse et radiofréquence pulsées à des pressions de quelques mbar sera discutée.

Références

[1] F., Alexander. Plasma chemistry. Cambridge university press, (2008).

L.D. Pietanza, et al. "Advances in non-equilibrium CO₂ plasma kinetics: A theoretical and experimental review." The European Physical Journal D 75, no. 9 (2021): 237.

[2] Morillo-Candas, Ana Sofia, Vasco Guerra, and Olivier Guaitella. The Journal of Physical Chemistry C 124, no. 32 (2020): 17459-17475

Statut :

Combustion assistée par plasma : Du Challenge de la mesure de température en combustion turbulente à un diagnostic attractif pour les décharges nanosecondes

A. Cessou

CORIA UMR6614, CNRS, Université Rouen Normandie, INSA Rouen Normandie, Rouen
mél: armelle.cessou@coria.fr

Les spécialistes de combustion turbulentes sont confrontés à un objectif complexe : Comment étudier un écoulement réactif à haute température, caractérisé par de faibles échelles spatiales et temporelles ?

Etonnamment, compte-tenu du rôle essentiel de cette grandeur physique, les techniques de mesures disponibles pour la mesure de température dans les flammes turbulentes sont rares. Le challenge est de disposer d'une technique de mesure locale, instantanée, dans un milieu lumineux, avec une qualité de signal adaptée. Les thermocouples, mesure intrusive, présentent le désavantage de nécessiter de souder de très petits diamètres pour limiter les perturbations thermiques, catalytiques et aérodynamiques, réduire le temps d'acquisition, et de nécessiter des corrections de mesures (pertes par convection et rayonnement). La nécessité de petit diamètre (<50 μ m) rend de plus ces thermocouples fragiles et encore plus dans les écoulements turbulents. La fluorescence induite par laser est un diagnostic très intéressant par son potentiel à offrir de forts rapports signal-sur-bruit, mais demande de sonder simultanément plusieurs niveaux rotationnels et d'être en mesure d'apporter des corrections de transferts collisionnels (quenching) fiables. La diffusion Raman spontanée se présente dès les années 70 [1] comme une méthode intéressante pour la température dans les flammes. Il s'avère qu'encore une fois, comme dans toute l'histoire de l'application de la diffusion Raman, les moyens technologiques de l'époque limitent le rapport signal-sur-bruit et ainsi son application pour la mesure dans les flammes, qui plus est turbulentes [2]. Depuis, différents progrès technologiques ont permis de revisiter cette technique de mesure par ajustement de spectres pour la combustion turbulente : rapport signal-sur-bruit acceptable, temps de mesure adapté au phénomène physique et cela dans des volumes de mesures adaptés aux échelles spatiales de flammes turbulentes [3]. Cette quête a permis aussi de disposer d'un diagnostic attractif pour la caractérisation de plasmas hors-équilibre [4] : dépôt d'énergie de décharges nanosecondes, en fournissant des données spatio-temporelles nouvelles dans la post-décharge permettant de fournir plus que la ou les températures : la distribution vibrationnelle de l'azote et sa relaxation dans le temps et l'espace [5,6]. Ces données sont tout à fait attractives pour caractériser la combustion assistée par plasma.

Remerciements : cette synthèse repose sur nombreuses collaborations me conduisant à chaleureusement remercier G. Cléon, A. Lo, P. Vervisch, H. Ajrouche, F. Guichard, B. Lecordier, L. Lacour, D. Honoré, P. Tardiveau, A. Brisset.

Références

- [1] M. Lapp, L.M. Goldman, C.M. Penney, *Science*, 175 (1972) 1112-&.
- [2] N.M. Laurendeau, *Progress in Energy and Combustion Science*, 14 (1988) 147-17
- [3] H. Ajrouche, A. Lo, P. Vervisch, A. Cessou, *Measurement Science and Technology*, 26 (2015) 075501
- [4] A. Lo, G. Cléon, P. Vervisch, A. Cessou, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 107 (2012) 229-242
- [5] Lo A, Cessou A, Boubert P and Vervisch P 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 115201
- [6] Lo A, Cessou A and Vervisch P 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 115202

Statut : permanent

Diagnosics des plasmas produits par ablation laser à une interface liquide-solide

D. Amans

Institut Lumière Matière, Univ. Claude Bernard Lyon 1, CNRS, UMR5306, Villeurbanne F-69100, France.
 mél: david.amans@univ-lyon1.fr

Les plasmas obtenus par claquage laser à une interface solide-liquide sont caractérisés par une forte densité électronique N_e et une faible température électronique T_e , les plaçant à une position originale dans le diagramme température/densité [1]. Au-delà du développement de l'ablation laser en liquide pour des applications concrètes, telles que l'analyse de compositions chimiques élémentaires en milieu marin (LIBS) ou la production de colloïdes [2], l'étude de ces plasmas confinés présente un intérêt intrinsèque à leurs caractéristiques originales. Je présenterais les expériences développées pour caractériser les propriétés thermodynamiques de ces plasmas, mais également des phénomènes induits par laser en liquides, tel que la génération d'ondes de chocs et la formation de bulles de cavitations. Je présenterai également deux travaux récents. L'un s'appuie sur l'imagerie au temps court, quelques dizaines de nanosecondes, et semble montrer que la formation des bulles de cavitation est provoquée par la propagation de l'onde choc déclenchée par l'ablation de la cible. Le second s'appuie sur l'utilisation de la LIF pour sonder la population des niveaux rotationnels dans l'état électronique fondamental des molécules diatomiques, et permet d'interroger la définition des températures moléculaires.

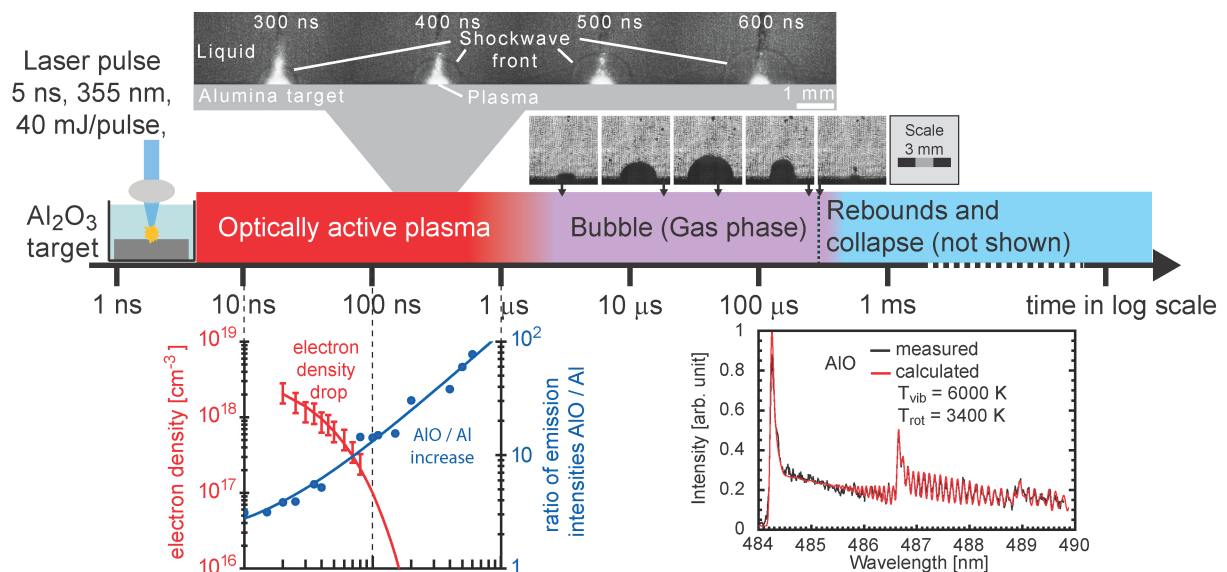


Figure 1 : Frise temporelle illustrant les méthodes d'imagerie et de spectroscopie permettant de caractériser les phénomènes induits par un claquage laser à une interface solide-liquide.

Références

- [1] G A. Kanitz, M. R. Kalus, E. L. Gurevich, A. Ostendorf, S. Barcikowski and D. Amans, Plasma Sources Science and Technology **28**, 103001 (2019).
- [2] V. Amendola, D. Amans, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, S. Scirè, G. Compagnini, S. Reichenberger and S. Barcikowski, Chemistry A European Journal **26**, 9206 – 9242 (2020).

Statut : Permanent (Maître de conférences)

Sujets d'actualité

X-ray source generated by femtosecond laser for spectroscopy and imaging applications

A. Ferré^{1,*}, R. Clady¹, M. Gambari¹, A. Stolidi², L. Videau^{3,4}, O. Peyrusse¹, M. Sentis¹ and O. Utéza¹

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

²Université Paris-Saclay, CEA, List F- 91120, Palaiseau, France

³CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

⁴Laboratoire Matière Conditions Extrêmes, CEA, Université Paris-Saclay, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

mél: amelie.ferre@univ-amu.fr

The interest towards developing intense and compact ultrashort x-ray sources is motivated both by scientific applications like time-resolved X-ray diffraction or X-ray absorption spectroscopy^[1] and societal applications such as phase contrast imaging for biology and medicine^[2]. At LP3 laboratory, such objectives are today achievable thanks to development of hard K α X-ray pulsed laser plasma source generated by interaction of an ultrahigh intensity femtosecond laser delivering by ASUR laser facility with a solid target. We first determined the absolute yield of the K α X-ray source (at 17.48 keV) and the X-ray spot size for a wide range of laser intensity ($I \sim 10^{17} - 2.8 \times 10^{19}$ W/cm²) and for four values of the temporal contrast ratio ($6.7 \times 10^7 < CR < 3.3 \times 10^{10}$) (figure 1 a) and b)). In particular, we measured the highest molybdenum K α photon production reported to date at 100 Hz^[3,4] with a K α photon flux of 1×10^{11} ph/(sr.s) with an X-ray source size less than 90 μ m at the driving laser intensity of $\sim 10^{19}$ W/cm².

Based on the exploitation of unique performances (figure 1 a) and b)), recent developments will be presented, namely stations of time resolved X-ray diffraction with first measured rocking curves of gold samples and phase contrast X-ray imaging instrument^[5] (figure c)). For the first time, we will present quantitative measurements of refractive index extracted with advanced phase contrast imaging technique, named Multilateral Shearing Interferometry in collaboration with CEA List.

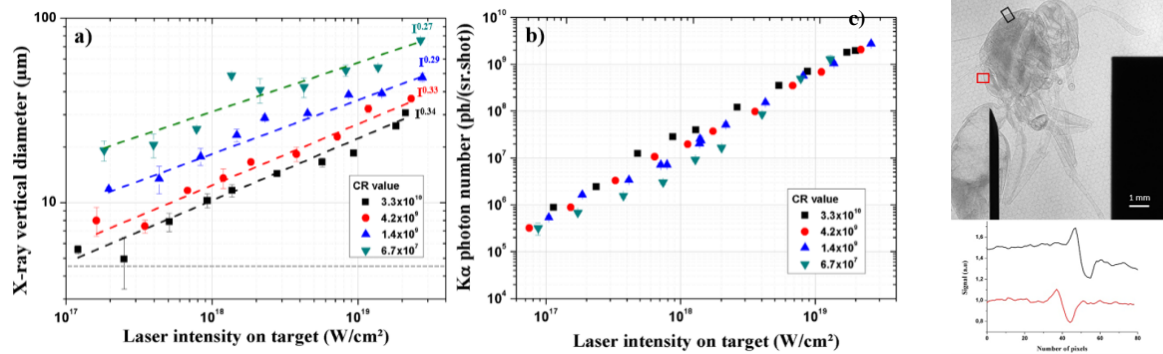


Figure 1. a) FWHM X-ray vertical diameter versus laser intensity on target. Fitting power functions in form of I^ϵ with ϵ varying with the contrast ratio value are shown by dashed lines. The grey horizontal dashed line is the FWHM vertical laser focal diameter (~ 4.6 μ m). b) K α photon number versus laser intensity on target. c) Raw phase contrast imaging on biological sample (wasp)

Références

- [1] T. Elsaesser et al, The Journal of Chemical Physics, 140, 020901 (2014)
- [2] R. Toth et al., Review of Scientific Instruments 76, 083701 (2005).
- [3] Y. Azamoum et al., Scientific Report **8**, 4119 (2018).
- [4] M. Gambari et al., Scientific Report **11**, 23318 (2021).
- [5] M. Gambari et al., Scientific Report **10**, 6766 (2020).

Statut : Permanent

SPEKTRE, une plateforme de recherche sur les plasmas magnétisés

Frédéric Brochard et l'équipe SPEKTRE

Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy

SPEKTRE (Sheaths, Plasma Edge & Kinetic Turbulence Radio-Frequency Experiment) est une plateforme de recherche sur les plasmas magnétisés actuellement en construction à l'Institut Jean Lamour à Nancy. Cet équipement permettra de produire un plasma de grande dimension, dans un champ magnétique homogène de 6 mètres de long et 40 cm de diamètre. Le plasma sera créé par une source hélicon située à une extrémité de la colonne de plasma. Deux modes de fonctionnement seront possibles :

- Un fonctionnement en régime stationnaire avec un champ magnétique n'excédant pas 0.1 Tesla, pour des études sur les instabilités et les traitements de surface dans des plasmas froids magnétisés ;
- Un fonctionnement pulsé, avec un champ magnétique pouvant atteindre 0.5 Tesla durant deux secondes et des décharges espacées de quelques minutes, pour des recherches en fusion thermonucléaire contrôlée.

SPEKTRE est conçu pour permettre une grande flexibilité dans l'installation d'échantillons et de diagnostics. Un premier plasma est prévu pour la fin de l'année 2023 et sera suivi d'une montée en puissance progressive qui s'étalera jusqu'à l'horizon 2027. Cette présentation donnera un aperçu des capacités techniques de l'équipement et des principales études envisagées pour son exploitation.

Couplage plasma-catalyse pour la production de gaz synthèse

E. Fourné, C. Batiot-Dupeyrat

IC2MP, UMR CNRS 7285, Université de Poitiers, ENSIP, 1 rue Marcel Doré, TSA 41105 86073 Poitiers cedex 9

mél: catherine.batiot.dupeyrat@univ-poitiers.fr

La réaction de reformage sec du méthane (ou dry reforming) pour produire du gaz de synthèse (ou syngas) est une voie particulièrement intéressante car elle permet non seulement de valoriser deux gaz à effet de serre, le CH₄ et le CO₂, mais aussi d'obtenir un syngas avec un rapport H₂/CO égal à 1. Ce rapport est en effet optimal pour la production d'hydrocarbures de synthèse via le procédé Fischer-Tropsch. Néanmoins le coût énergétique élevé lié à la forte endothermicité de la réaction et la désactivation des catalyseurs au cours du temps par dépôt carboné constituent un frein au développement de ce procédé thermo-catalytique à l'échelle industrielle [1].

Dans ce contexte, des études ont montré que le plasma non-thermique pouvait constituer une méthode d'activation efficace des réactifs et facilite les réactions thermodynamiquement défavorables comme le reformage sec du méthane et ce à température et pression ambiante [2]. Cependant, sous plasma, la collision des électrons avec les molécules de gaz se traduit par la formation d'un très grand nombre d'espèces moléculaires, ioniques ou encore radicalaires ce qui se traduit par une faible sélectivité en produit recherché. Pour remédier à ce problème le couplage du plasma à la catalyse a été proposé, l'objectif étant de coupler la réactivité élevée du plasma à la sélectivité du catalyseur. Les différentes études expérimentales parues dans ce domaine font apparaître des résultats souvent contradictoires, la présence d'un catalyseur pouvant apporter un gain d'activité ou au contraire conduire à des rendements plus faibles en produit recherché [3].

L'association plasma-catalyse est en effet un système complexe mettant en jeu de nombreuses interactions chimiques et physiques comme illustré Figure 1.

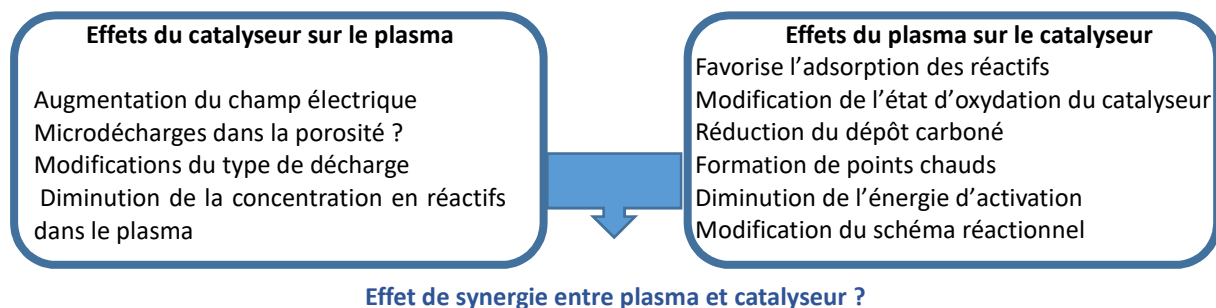


Figure 1 : Effets du catalyseur sur le plasma et du plasma sur le catalyseur (adapté de [4])

Les différents paramètres physico-chimiques mis en jeu seront discutés en s'appuyant sur des données expérimentales ainsi que sur des travaux de modélisation extraits de la littérature. Enfin des perspectives de recherches seront proposées afin de mieux comprendre l'interaction plasma-catalyse en vue d'optimiser la production de gaz de synthèse par plasma-catalyse.

Références

- [1] Z. Alipour, V. B. Borugadda, H. Wang, A.K. Dalai, Chem. Eng. J. **452**, 139416 (2023)
- [2] Y. Vadikkeettil, Y. Subramaniam, R. Murugan, P.V. Ananthapadmanabhan, J. Mostaghimi, L. Pershin, C. Batiot-Dupeyrat, Y. Kobayashi, Renew. and Sustain. En. Reviews **161**, 112343 (2022)
- [3] B. Loenders, R. Michiels, A. Bogaerts, J. En. Chem. **85**, 501 (2023)
- [4] E.C. Neyts, A. Bogaerts, J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 224010 (2014)

Statut : Permanent

La foudre : Phénoménologie, simulation expérimentale et numérique, impact sur l'aéronautique

C. Zaepffel¹, M. Buguet¹, Fabien Tholin¹

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

mél: clement.zaepffel@onera.fr

La foudre est un plasma naturel aisément observable à la surface de la terre (Figure 1). Elle engendre chaque année une quantité importante de dommage au point qu'un suivi de l'activité orageuse se généralise à travers le monde avec un grand nombre de stations de mesures, première étape d'une chaîne permettant de se prémunir de ce risque. La compréhension de ce phénomène doit permettre de non seulement améliorer les prévisions de ce risque mais également les méthodes de protection. C'est pour cela que l'équipe foudre plasmas et applications du département DPHY de l'ONERA travaille sur les divers aspects de cette problématique, de la détection, à la modélisation et aux mesures en laboratoire, en passant par les mesures au sol ou aéroportées. On se propose dans une première partie de présenter ce phénomène : du générateur électrique qu'est le nuage, à la phase de propagation du canal leader jusqu'à la phase de conduction de l'arc en retour une fois le circuit électrique formé par le nuage et le sol connecté. Dans une seconde partie, l'impact de ce phénomène sur l'aéronautique et notamment le foudroiement des avions est décrit. Cette problématique est régie par des recommandations internationales justifiées par l'observation du phénomène ainsi que par le retour d'expérience des acteurs de ce domaine. Des essais sur des éprouvettes académiques ou des éprouvettes représentatives permettent de remonter à certaines propriétés du plasma et des températures et des pressions supérieures respectivement à 30 kK et 30 bars sont mesurées [1]. Ces résultats sont confirmés par des simulations MHD (Magnéto-Hydro-Dynamique) du problème. Pour finir, les enjeux du domaine seront discutés.

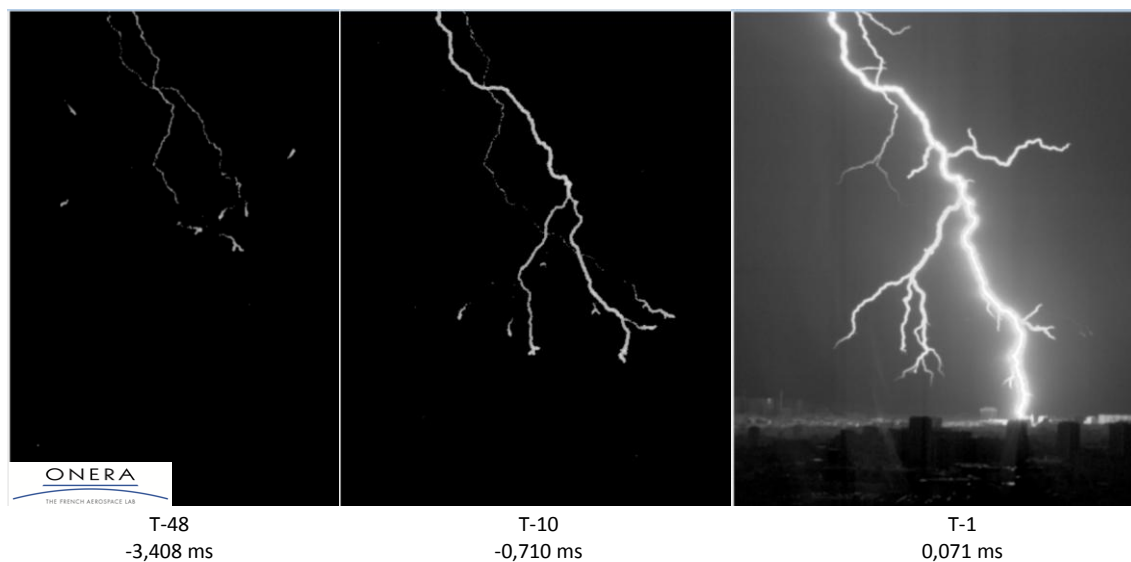


Figure 1 : Foudroiement nuage-sol sur les toits de Paris (juillet 2013)

Les auteurs souhaitent remercier la DGAC, France Relance et NextGenerationEU pour leurs financements.

Références

[1] R. Sousa Martins *et al*, J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 185203 (2019)

Statut : Permanent

Etude des interactions plasma-surface par dynamique moléculaire : quels apports pour la modélisation des plasmas froids ?

E. Despiau-Pujo¹

¹Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM), Université Grenoble Alpes/CNRS, 17 avenue des Martyrs, F-38054 Grenoble
mél: emilie.despiau-pujo@univ-grenoble-alpes.fr

Le développement de procédés plasma pour le traitement de surfaces (gravure, dépôt, activation de surface, etc.) nécessite une compréhension des mécanismes réactionnels impliqués dans l'interaction plasma-matériau. Associée à des diagnostics in-situ du plasma et des surfaces, la dynamique moléculaire (MD) peut fournir des informations sur les processus mis en jeu à l'échelle atomique et aider à comprendre les mécanismes fondamentaux qui régissent cette interaction dans les plasmas froids basse pression. Ces simulations atomistiques peuvent être utilisées pour étudier des réactions de surface élémentaires [1], expliquer des mécanismes physico-chimiques difficilement sondables expérimentalement, ou encore étudier comment la nature, le flux et l'énergie des espèces plasma (ions, radicaux réactifs) affectent la modification structurale et chimique des matériaux [2].

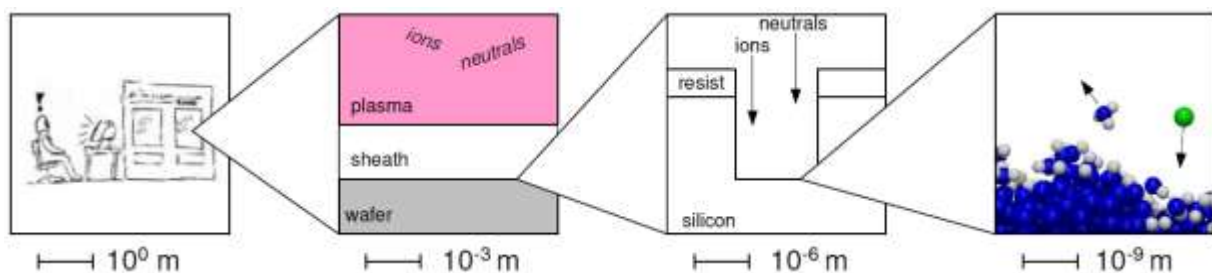


Figure 1 : Simulations de dynamique moléculaire de l'interaction plasma-surface : du réacteur plasma à l'échelle atomique.

Dans une approche multi-échelles, l'étude de l'interaction plasma-surface par dynamique moléculaire peut également fournir des « données de base » utiles aux autres modèles - mésoscopiques (PIC, Monte-Carlo) ou macroscopiques (modèles fluides) - des plasmas froids. Ces données de base peuvent être relatives aux processus de transport ou à la physico-chimie des interactions entre le plasma et son environnement au sens large (gravure, catalyse, dépôt d'énergie, etc.). Ainsi, les coefficients d'accommodation thermique ou les taux de perte/création d'espèces en surface (probabilité de collage, de recombinaison ou de formation de produits de gravure) en fonction de la nature ou de la température des surfaces, sont autant de données nécessaires pour l'établissement des autres modèles, données qui sont souvent mal connues bien qu'elles puissent changer drastiquement l'équilibre du plasma en phase gazeuse.

Dans cette présentation, je présenterai les bases de la dynamique moléculaire appliquée aux interactions plasma-matériau et discuterai d'exemples de « données de base » que ce type de simulation peut apporter à la communauté des plasmas froids, notamment dans le domaine de la modélisation. Les limitations de cette méthode (échelles de temps et de longueur associées aux systèmes étudiés, existence de potentiels interatomiques robustes pour des systèmes chimiques variés, etc.) seront également discutées.

Références

- [1] E. Despiau-Pujo, A. Davydova, G. Cunge, DB Graves, J. Appl. Phys. 113, 114302 (2013)
- [2] P Brichon, E Despiau-Pujo, O Mourey, O Joubert, J. Appl. Phys. 118, 053303 (2015)

Statut : Permanent (MCF)

Mesures d'absorption IR dans une DBD de CO₂

C. Bajon¹, D. Sadi², E. Baratte², O. Guaitella², N. Naudé¹, S. Dap¹

¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

²Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Saclay, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91128 Palaiseau, France

mél: simon.dap@laplace.univ-tlse.fr

Grâce au soutien du GDR EMILI à travers le dispositif ARPEGE et du réseau plasma froids à travers le dispositif d'ITC, des mesures d'absorption IR in-situ ont été réalisées dans une DBD en collaboration entre le LPP et le LAPLACE. La DBD en configuration plan-plan fonctionnait en CO₂ pur ou en mélange N₂/CO₂, principalement à la pression atmosphérique. Les mesures d'absorption ont quant à elles été réalisées à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier.

La campagne de mesure d'une semaine a été réalisée au LPP dans une cellule de décharge transportable conçue au LAPLACE. Les mesures ont permis la réalisation de nombreux spectres dans différentes conditions. Deux régimes de décharge distincts ont en particulier été investigués : une décharge de Townsend à la pression atmosphérique (DTPA) correspondant à une décharge diffuse et le régime filamentaire, plus classiquement rencontré dans ces conditions.

Bien que les spectres réalisés soient toujours en cours d'étude, les premiers résultats préliminaires sont encourageants. Les fractions de dissociation ont pu être déterminées, ainsi que la température rotationnelle et les températures vibrationnelles du CO (produit de dissociation) et des trois modes du CO₂. Ces données serviront notamment à tester la robustesse des modèles actuels, le champ réduit étant très facilement estimable dans une DTPA.

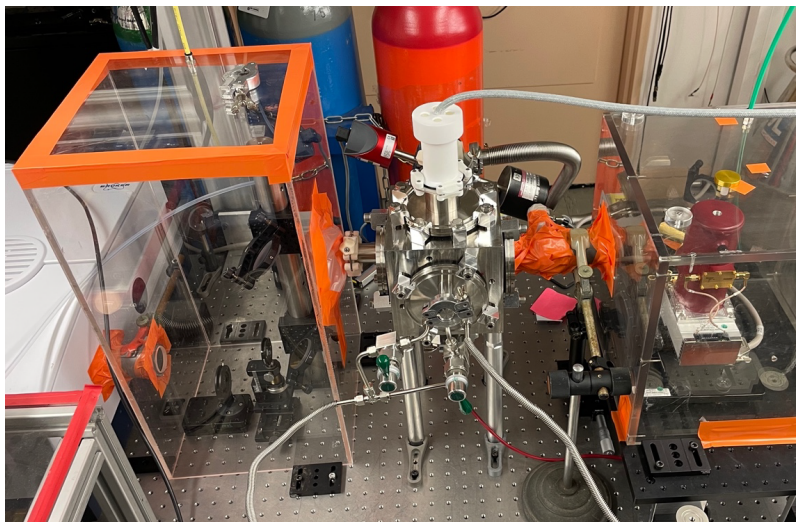


Figure 1. Photographie du dispositif expérimental

Oraux - Entrants

Production et optimisation de microplasmas pour la génération de l'azote atomique

K. Gazeli

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

mél: kristag.gazeli@lspm.cnrs.fr

Ce travail porte sur le développement d'une nouvelle source microplasma d'azote atomique. Elle sera fabriquée sur la base d'une configuration de microdécharge à cathode creuse (MHCD) consommant très peu d'énergie en atteignant de larges densités de puissance, améliorant ainsi la possibilité d'augmenter la dissociation de l'azote moléculaire [1,2]. L'application visée est le dépôt sur de grands substrats (échelle cm) de nitrure de bore hexagonal (h-BN) [3], un matériau stratégique en photonique, optoélectronique, etc. (cf. **Figure 1**) [4]. La MHCD sera alimentée par deux hautes tensions différentes: continue (DC) qui a fait l'objet d'études antérieures du groupe [2], et pulsée qui pourrait même déclencher de multiples MHCD en augmentant le volume du plasma généré [1]. Notre ambition est d'obtenir un plasma avec des gradients raides de densités d'électrons et d'espèces réactives, améliorant ainsi sa réactivité tout en diminuant la température moyenne de dépôt. La nouvelle MHCD sera caractérisée en termes de fonctionnement stable sur de différents gaz (N_2 pur, N_2/Ar , etc.), matériaux (diélectrique et électrodes) et géométrie structurelle. La physique et la dynamique de la microdécharge, notamment la cinétique des atomes N, seront étudiées par de diagnostics optiques avancés tels que l'imagerie rapide, la spectroscopie d'émission optique, et la TALIF ultrarapide picoseconde (ps) couplée à une caméra à balayage des fentes dite streak (résolution temporelle: quelques ps) [5]. Les résultats obtenus serviront à valider les modèles de MHCD développés par le groupe. Pour effectuer le dépôt de films h-BN de qualité, différents précurseurs seront étudiés, et la qualité du film sera évaluée expérimentalement et corrélée aux propriétés de la décharge.

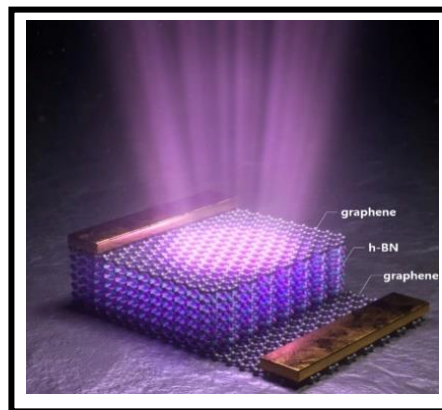


Figure 1 : LED émettant sur le profonde UV (hétérostructure Van der Waals type graphene/h-BN/graphene).

Remerciements

Tous les membres de l'opération de recherche IPS- μ P du LSPM; projets ANR : *SPECTRON* (ANR-23-CE51-0004-01), *ULTRAMAP* (ANR-20-CE510020), *Labex SEAM* (ANR-10-LABX-0096; ANR-18-IDEX-0001); IDF projet régional *SESAME DIAGPLAS*.

Références

- [1] S. Kasri *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **28**, 035003 (2019)
- [2] A. Remigy *et al.*, Phys. Plasmas **29**, 113508 (2022)
- [3] H. Kabbara *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 171902 (2020)
- [4] Su-Beom Song *et al.*, Nat. Commun. **12**, 7134 (2021)
- [5] L. Invernizzi *et al.*, Meas. Sci. Technol. **34**, 095203 (2023)

Statut : CRCN CNRS

De l'expérimental à la simulation : vers une compréhension approfondie et une optimisation des interactions plasma

R. Ettouri¹, T. Rasoanarivo^{1,2}, A. Rhallabi¹

¹ Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel, IMN, CNRS, Nantes Université, 44322 Nantes, France

² STMicroelectronics, 37100, Tours, France

mél: rim.ettouri@cns-imn.fr

La compréhension et l'amélioration des techniques de gravure par plasma ont longtemps été ancrées dans des démarches expérimentales. Bien que ces méthodes offrent des résultats tangibles, elles se heurtent à des contraintes en matière d'évolutivité, de répétabilité et de compréhension globale. Face à l'émergence d'outils de calcul avancés et d'algorithmes de modélisation élaborés, la communauté scientifique des plasmas gravite progressivement vers une approche fondée sur la modélisation et la simulation prédictives. Cette évolution promet non seulement d'accroître la précision des procédés de gravure par plasma, mais également d'ouvrir la voie à de futures innovations, nourries par une synergie entre expérimentation et modélisation.

Face à cet impératif de modéliser des plasmas réactifs complexes multidimensionnels pour diverses applications industrielles, l'intérêt se porte sur des méthodes de calcul épurées. Traditionnellement, trois approches sont privilégiées : les modèles fluides [1,2], les modèles cinétiques [3,4], et enfin les méthodes hybrides qui combinent les caractéristiques des deux premiers [5]. À ces trois approches, il faut ajouter les méthodes particulières (Particle-In-Cell (PIC) [6,7], Monte-Carlo [8],...).

Les modèles traditionnels de plasmas, souvent contraints à des échelles ou phénomènes spécifiques, ont leurs limites lorsqu'il s'agit de décrire l'ensemble des phénomènes complexes se produisant dans les plasmas réactifs [9]. Jusque-là, notre initiative multi-échelle à l'IMN adoptait une approche hybride basée sur la combinaison du modèle cinétique pour décrire la décharge plasma et l'approche Monte-Carlo pour étudier le transport des ions dans la gaine. Ces techniques permettent une modélisation complète des phénomènes, offrant des prédictions satisfaisantes en un temps de calcul raisonnable.

Aujourd'hui, l'une des perspectives majeures consiste à revisiter l'approche *Particle-In-Cell*. La vision est d'exploiter les avancées en matière de puissance de calcul _ressources qui n'étaient pas disponibles auparavant_ pour potentiellement étendre le PIC à des configurations plus complexes en 2D voire, ultérieurement, en 3D. Ceci vise à extraire davantage d'informations et de précision du modèle, tout en permettant une meilleure compréhension des plasmas. Parallèlement, concernant les modèles de surface, nous envisageons d'utiliser la méthode cinétique de Monte-Carlo en la couplant à l'approche *ab initio* [5], fusionnant ainsi les atouts de deux techniques éprouvées. Cette combinaison promet de simuler les interactions plasma-surface à l'échelle atomique avec une finesse accrue, tout en intégrant les phénomènes à plus grande échelle. Ce travail vise à présenter en détail ces méthodes, explorant les horizons qu'elles ouvrent dans le domaine de la modélisation des plasmas.

Références

- [1] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation* (CRC Press, 1991).
- [2] F. F. Chen, in *Introd. Plasma Phys. Control. Fusion* (Springer International Publishing, Cham, 1984), pp. 51–74.
- [3] R. Chanson *et al.*, *Plasma Process. Polym.* **10**, 213 (2013).
- [4] G. Le Dain *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **35**, 03E113 (2017).
- [5] M. Holmström, in *Numer. Math. Adv. Appl. 2009* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2010), pp. 451–458.
- [6] R. W. Hockney and J. W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles* (CRC Press, 1981).
- [7] J. P. Verboncoeur, *Plasma Phys. Control. Fusion* **47**, A231 (2005).
- [8] Y. Haidar *et al.*, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 065037 (2014).
- [9] C. K. Birdsall, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19**, 65 (1991).

Statut : Maîtresse de Conférences

Kinetic mechanism and sub-ns measurements of nanosecond thermal sparks in air

N. Q. Minesi^{1,2}, P. B. Mariotto¹, E. Pannier¹, A. Vincent-Randonnier², G. D. Stancu¹, C. O. Laux¹

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

²ONERA—Multi-Physics Department for Energy, Chemin de la Hunière, 91123 Palaiseau, France
mél: nicolas.minesi_at_centralesupelec.fr

This presentation will cover the experimental and numerical findings related to the thermal sparks generated by nanosecond discharges [1–3]. An increase of the electron number density up to 10^{19} cm^{-3} was measured with sub-nanosecond resolution via three techniques based on optical emission spectroscopy (OES): Stark broadening of H_α , Stark broadening of N^+/O^+ , and the continuum emission of electrons. The discharge diameter is measured with sub-nanosecond resolution using calibrated OES of the N^+ and O^+ lines. All measurements indicate a transition to a micrometric-size filament of fully ionized plasma in approximately 0.5 ns. The second main contribution of this work is the development of a 0D kinetic mechanism to explain this observation. The mechanism includes 100 reactions, 12 species, and 12 excited electronic states. Particular attention is paid to modeling the N_2 , N_2^+ , N, and O electronic state kinetics using the electronic states as additional pseudo-species. Our results show that including the electron-impact ionization of the excited electronic states of N and O, in addition to those of N_2 , is necessary to explain the experimental results, emphasizing the key role of excited state kinetics in the thermal spark formation.

At the end of the presentation, the potential impact of this new type of discharge will be discussed regarding plasma-assisted combustion of NH_3 .

Références

- [1] Minesi N, Stepanyan S, Mariotto P, Stancu G D and Laux C O 2020 Fully ionized nanosecond discharges in air: the thermal spark *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 85003
- [2] Minesi N, Mariotto P, Pannier E, Stancu G D and Laux C O 2021 The role of excited electronic states in ambient air ionization by a nanosecond discharge *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 035008
- [3] Minesi N Q, Mariotto P B, Pannier E, Vincent-Randonnier A, Stancu G D and Laux C O 2023 Kinetic mechanism and sub-ns measurements of the thermal spark in air *Plasma Sources Sci. Technol.* **32** 044005

Statut : Maitre de Conférence

Décharges diffuses générées par de fortes surtensions

A. Brisset¹

¹EM2C, 3 rue Joliot Curie, Gif-sur-Yvette

mél: alexandra.brisset@centralesupelec.fr

Les ondes d'ionisation rapide (acronyme anglais FIW pour Fast Ionization Waves) sont des décharges caractérisées par de forts champs électriques réduits (ratio du champ électrique et de la densité du gaz) maintenus pendant quelques nanosecondes, conférant à la décharge des densités élevées d'espèces réactives (électrons, espèces excitées, radicaux, ions) et un chauffage rapide du gaz qui peut être en partie contrôlé. Ces décharges sont également caractérisées par un volume exceptionnellement large aux propriétés très homogènes [1-6]. Elles peuvent être obtenues en appliquant des impulsions de tension ultracourtes et intenses à une électrode pointue ($>20 \text{ kV}\cdot\text{ns}^{-1}$ dans l'air à pression atmosphérique). En raison de leurs caractéristiques physicochimiques uniques, elles sont très prometteuses pour des applications telles que le traitement des gaz, la stérilisation, le reformage des combustibles, la combustion assistée par plasma, pour ne citer que quelques-unes des plus prometteuses. Cependant, de nombreux processus fondamentaux et de cinétique chimique restent obscurs. Dans cette perspective, l'approche de recherche suivie consiste à identifier, quantifier et contrôler les processus fondamentaux qui se déroulent dans les ondes d'ionisation rapides et l'angle applicatif choisi est celui de la combustion assistée par plasma de flammes pauvres et de flammes de carburants décarbonés et durables (hydrogène, biocarburants).

Références

- [1] Bozhenkov, S. A. et al. *Combustion and Flame* 133, 133–146 (2003).
- [2] Starikovskaia, S. M. et al. *Combustion Theory and Modelling* 5, 97–129 (2001).
- [3] Tardiveau, P. et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* 25, 054005 (2016)
- [4] Brisset, A. et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 055016 (2019)
- [3] Shao, T. et al. *Applied Physics Letters* 98, 021503 (2011).
- [4] Bentaleb, S. et al. *Aerospace Lab* (2015) doi:10.12762/2015.AL10-09.

Statut : permanent

Oraux - Jeunes

Emissive cathode immersed in a plasma: plasma-cathode interactions, operation and stability

E. Pagaud¹, V. Dolique¹, N. Plihon¹

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

Emissive cathodes are widely used as a source of primary electrons to ignite and sustain laboratory plasmas. They have recently been proposed as an external control parameter on a pre-existing plasma, for plasma potential control [1, 2, 3], or the modification of instabilities [4].

In this work, we report on detailed measurements and modeling of the operation of a hot emissive cathode consisting in a 500 μm diameter spiral wound tungsten filament, operated to control the characteristics of a high-density magnetized plasma column [3, 5]. The pre-existing plasma is generated in a 20-cm diameter cylindrical chamber in Argon at low pressure, using a 1 kW RF inductive source.

The electron current emitted by the cathode, controlled by the cathode temperature T_W , reaches up to 15 A and strongly affects the plasma parameters (ϕ_p , n , T_e). Optical measurements performed with a pyrometer revealed strong temperature heterogeneities along the cathode curvilinear coordinate x . Moreover, when the cathode voltage bias exceeds a threshold, the maximum temperature of the filament increases with time and finally diverges, leading to a divergence of the emitted current (see the temporal evolution of T_W in Fig. 1).

A complete thermal modeling of the cathode, including plasma-surface interactions, very accurately reproduces the experimental measurements. This remarkable understanding is an essential tool for further works on plasma parameters control using emissive cathodes, and confrontation with theoretical predictions [1].

References

- [1] B. Trotabas and R. Gueroult, *Plasma Sources Sci. Technol.* **31**, 025001 (2022)
- [2] S. Jin *et al.*, *Phys. Plasmas* **21**, 022105 (2019)
- [3] V. Désangles *et al.*, *J. Plasma Physics* **87** 90587030821, (2021)
- [4] S. Karbasheski *et al.*, *Phys. Plasmas* **29**, 112309 (2022)
- [5] N. Plihon *et al.*, *J. Plasma Physics* **81**, 345810102 (2015)

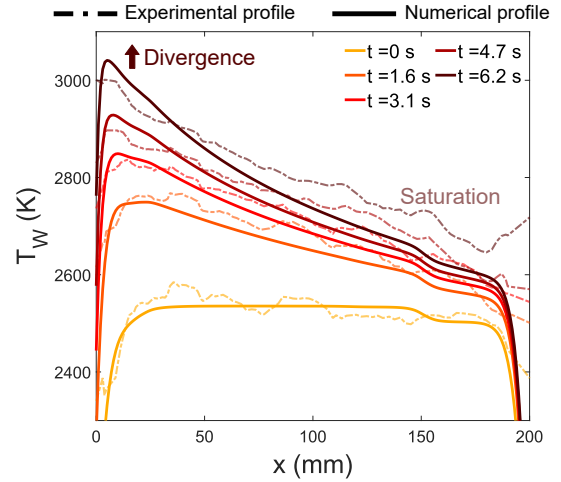


Figure 1: *Experimental and modelled temperature profiles along the cathode*

Etude temporelle d'une décharge à barrière diélectrique impulsionnelle en ammoniac par diagnostic laser (E-FISH)

R. Jean-Marie-Désirée¹, A. Najah², S. Cuynet¹, and L. de Poucques¹

¹Institut de Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy, France

²Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, Université d'Orléans, Orléans, France

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

Cette étude a pour objectif la caractérisation de l'intensité du champ électrique axial qui se développe dans **une décharge à barrière diélectrique impulsionnelle (iDBD) en ammoniac pur** à l'aide d'un diagnostic de génération de seconde harmonique induite par le champ électrique (**E-FISH**). Le contrôle fin d'un laser nanoseconde Nd:YAG conventionnel permet une résolution spatiale de **70 μm** , une résolution temporelle de **2 ns** et une sensibilité d'environ **100 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$** , correspondant aux échelles **millimétriques et nanosecondes de la décharge**. En effet, cette dernière est générée par une tension appliquée symétrique et périodique de 250 μs , induisant une décharge uniquement pendant le régime transitoire ($< 1 \mu\text{s}$) entre deux diélectriques plans et symétriques. L'évolution temporelle du champ électrique axial dans la décharge a été étudiée selon trois ensembles de paramètres expérimentaux : la tension appliquée, la pression en gaz et l'espace inter-diélectrique.

D'une part, les mesures E-FISH faites pour une condition ne produisant pas de décharge, par rapport à celles avec plasma, révèlent **un contre-champ (E_{cf})** dont les variations s'opposent au champ électrique résultant de la tension appliquée aux électrodes, **quelle que soit la condition expérimentale étudiée**. Ce champ contraire résulte de l'accumulation d'espèces chargées en surface sur la plaque diélectrique survenant après la décharge précédente. D'autre part, le champ électrique axial mesuré dans l'espace inter-diélectrique décrit plusieurs tendances en fonction des conditions étudiées. Enfin, la prochaine étape consistera à étudier l'évolution temporelle du champ électrique axial à travers l'espace, puisque la question des charges résiduelles demeure dans notre cas [1]. Enfin, ces résultats représentent une première étape pour comprendre la physique d'une telle iDBD, en particulier dans l'ammoniac pur, grâce au diagnostic E-FISH.

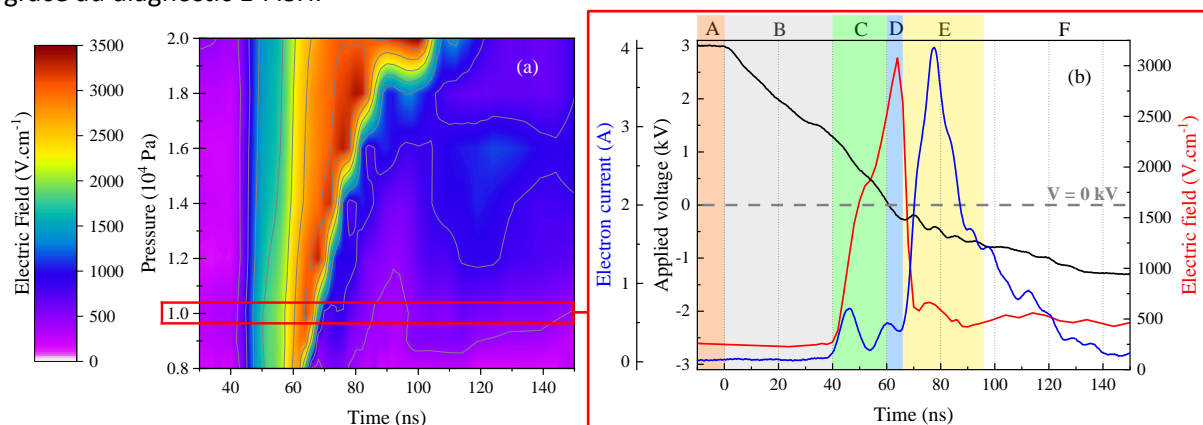


Figure 1 : (a) Cartographie de la variation de l'intensité du champ électrique en fonction du temps et de la pression (de 0.8 à 2.0×10^4 Pa), mesurée pendant la transition de la polarisation positive vers négative de l'électrode supérieure. (b) Zoom sur la variation de l'intensité du champ électrique (en rouge) tracée avec les mesures électriques (la tension appliquée et le courant d'électron respectivement en noire et bleu) pour la condition à 10^4 Pa. Avec une distance inter-diélectrique de 3 mm en gaz d'ammoniac pure.

Références

[1] F. Massines, et al., EPJ Appl. Phys. **47**, 2 (2009)

Statut : doc3

Modélisation d'un plasma Cl₂/Ar pour la gravure du GaN par ALE

T.Rasoanarivo^{1,2}, C.Mannequin¹, F.Roqueta², M.Boufnichel², A.Rhallabi¹

¹Institut des Matériaux de Nantes Jean ROUXEL, CNRS, 2 rue. de la Houssinière, 44300 Nantes

²STMICROELECTRONICS TOURS, 10 rue Thalès de Milet, 37100 Tours

mél : tojo.rasoanarivo@cnrs-imn.fr

Ces dernières années, l'émergence de nouveaux marchés technologiques comme la voiture électrique a fait croître la demande de composants électroniques de puissance opérant dans les hautes fréquences. Ces exigences nécessitent l'exploration de nouvelles filières de matériaux autres que le silicium [1]. Dans ce contexte, le nitrure de gallium GaN est un matériau qui est qualifié pour répondre à ces critères. En effet, le GaN est un semi-conducteur III-V à gap direct présentant d'intéressantes propriétés pour la microélectronique et l'optoélectronique [2]. La large bande interdite du GaN de 3,4 eV et son champ électrique critique à 3 MV.cm⁻¹ permettent une résistance à de fortes tensions et un fonctionnement à haute puissance. L'importante mobilité électronique (jusqu'à 2.10⁷ cm.s⁻¹) autorise le GaN à opérer à de hautes fréquences tandis que sa conductivité thermique élevée permet de dissiper la chaleur aisément.

La gravure du semi-conducteur reste une étape cruciale dans la fabrication des transistors à base de GaN. L'étude expérimentale de la gravure du GaN par ALE (Atomic Layer Etching), procédé de gravure cyclique permettant de contrôler la gravure à la couche atomique près, est en plein essor [3]. Afin de prédire les propriétés structurales de GaN gravé par procédé ALE, nous développons un simulateur multi-échelle de gravure du GaN par procédé ALE en plasma chlorés. Ce simulateur est divisé en trois parties : le module plasma, le module de gaine et le module d'interaction plasma/surface. Le module plasma est un modèle global 0D décrivant la cinétique du comportement du plasma Cl₂ et de Ar. Dans cette étude, nous présentons les premiers résultats issus des modèles cinétiques de Cl₂ et Ar notamment les densités d'espèces neutres et chargées en fonctions des paramètres machine du procédé ALE. Une attention particulière est consacrée à l'étude des phénomènes de transition entre le pulse associé au plasma Cl₂ et celui de Ar.

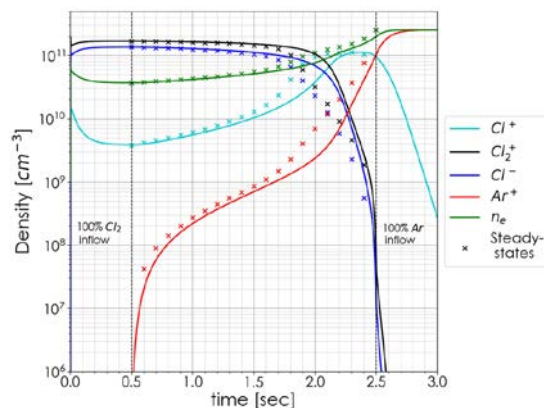


Figure 1 : Evolution temporelle de la densité électronique et des ions lors de de la décharge plasma Cl₂ en transition vers Ar.

Références

- [1] Meneghini, M., Meneghesso, G., & Zanoni, Cham: Springer International Publishing E. (2017).
- [2] M.F.Fatahilah, K.Strempel, F.Yu, S.Vodapally, A.Waag et H.S.Wasisto, Micro and Nano Engineering, t.3, p. 59-81 (2019)
- [3] Kanarik, K. J., Lill, T., Hudson, E. A., Sriraman, S., Tan, S., Marks & Gottscho, R. A. Journal of Vacuum Science & Technology A, 33(2), t. 33, n°2, p. 020 802 (2015).

Statut : doc1

Mesure d'un champ électrique dans un environnement magnétisé avec le diagnostic EFILE

J. Herbelot¹, S. Ferri¹, V. Gonzalez-Fernandez², A. Escarguel¹, L. Chérigier-Kovacic¹

¹Aix Marseille University, CNRS, PIIM UMR 7345, Marseille, France

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

mél: julien.herbelot@univ-amu.fr

EFILE (Electric Field Induced Lyman- α Emission) est un diagnostic qui a été développé pour mesurer des champs électriques dans le vide ou dans des plasmas. La mesure du champ électrique est basée sur l'émission Lyman- α d'un faisceau d'hydrogène, dans l'état électronique métastable 2s, dirigé sur la zone de mesure. L'effet Stark induit par le champ électrique mélange les états 2s et 2p de l'atome d'hydrogène. L'état 2p n'étant pas métastable, il y a désexcitation de nos atomes. La lumière émise est mesurée, de celle-ci nous déduisons le champ électrique à la position de mesure. Le but de ma thèse est de montrer que EFILE est un diagnostic pouvant mesurer des champs électriques dans des plasmas magnétisés. Pour cela nous voulons mesurer le champ électrique dans le plasma magnétisé de la machine MISTRAL du PIIM.

Le champ magnétique de MISTRAL complexifiera la mesure car nous devons maintenant prendre en compte l'effet Zeeman et l'effet MSE (Motional Stark Effect). Nous avons souhaité nous assurer que nous étions toujours capables de comprendre notre signal malgré la présence de ces effets.

Pour cela nous avons construit, ainsi que mesuré et modélisé les caractéristiques d'un électroaimant. Nous avons réalisé des mesures du signal émis par l'émission Lyman- α de nos atomes d'hydrogènes en présence d'un champ électrique et du champ magnétique produit par l'électroaimant. En prenant en compte l'effet MSE, un bon accord entre le signal mesuré et calculé a été trouvé.

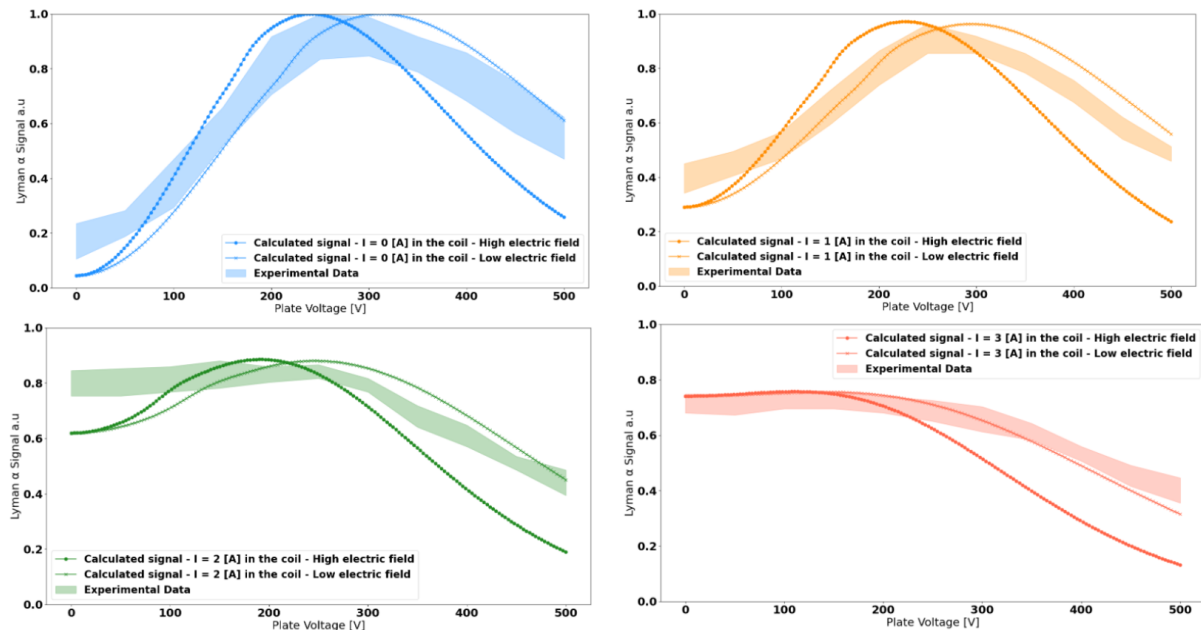


Figure 1. Signal Lyman- α mesuré pour différents courants dans la bobine de l'électroaimant et différentes tensions aux bornes des plaques produisant le champ électrique. Le trait plein représente la mesure expérimentale et ces incertitudes et les traits pointillés représentent le signal théorique en tenant compte de l'homogénéité des champs mesurés

Statut : doc2

Étude spectroscopique de l'émission du triplet de l'oxygène atomique à 777 nm sur des plasmas éthanol-argon induits par laser

L. Gosse¹, A. Favre¹, V. Morel¹, A. Bultel¹, S. Djurović²

¹UMR 6614 CORIA, Université de Rouen Normandie, 76800 Saint-Etienne-du-Rouvray, France

²Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, 21000 Novi Sad, Serbia

mél: gossel@coria.fr

Les niveaux supérieurs des transitions des raies du triplet de l'oxygène atomique à 777 nm sont facilement excitables (leur énergie d'excitation étant de l'ordre de 10,7 eV), et leur coefficient d'Einstein est élevé (de l'ordre de $4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$). Ces raies sont donc potentiellement utilisables pour étudier les caractéristiques d'un plasma contenant de l'oxygène, notamment pour estimer la densité électronique. Toutefois, ces raies d'émissions sont spectralement très proches (777,2 nm, 777,4 nm, 777,5 nm), donc souvent non résolues, ce qui rend l'analyse complexe. L'objectif ici est donc de mettre en évidence une relation empirique entre la largeur à mi-hauteur du triplet pris dans sa globalité et la densité électronique du plasma.

Cette étude expérimentale porte sur l'analyse d'un mélange gazeux d'argon et d'éthanol (95% Ar + 5% C₂H₆O) par spectroscopie de plasmas induits par impulsion laser. Nous utilisons un laser picoseconde Nd:YAG à 1064 nm. La fluence au waist est de l'ordre de 10^3 J cm^{-2} . L'analyse spectroscopique est effectuée à l'aide d'un spectromètre Czerny-Turner muni d'un réseau à 600 t/mm, 2400 t/mm et 3600 t/mm, et à l'aide d'un spectromètre ECHELLE permettant l'acquisition de spectres larges bandes très résolus. La présence d'hydrogène dans le mélange permet de déterminer la densité électronique du plasma par étude de la largeur à mi-hauteur des raies H_α (à 656 nm) et H_β (à 486 nm) [1] [2], ainsi que par étude de la séparation des deux pics de la raie H_β [3]. Les raies d'émission de l'hydrogène sont très bien documentées, l'estimation de la densité électronique est donc fiable. Le diagnostic du plasma est effectué pour des temps allant de 300 ns à 5000 ns, nous donnant accès à une large gamme de densités électroniques. L'analyse est complétée par comparaison des spectres expérimentaux à des spectres calculés à l'équilibre thermodynamique local par le code de calcul MERLIN [4] développé au laboratoire.

L'observation aux mêmes instants des raies atomiques de l'oxygène à 777 nm permet la détermination d'une première relation entre la densité électronique et la largeur à mi-hauteur du triplet de l'oxygène non résolu et résolu. Ces mesures sont croisées avec les résultats d'une étude effectuée par l'équipe de S. Djurovic du département de physique de l'université de Novi Sad sur un arc électrique stabilisé dans un mélange gazeux argon/hydrogène/dioxyde de carbone.

Références

- [1] H. Griem, (2012). Spectral line broadening by plasmas. Elsevier
- [2] M.A. Gigosos, M.A Gonzalez, V. Cardenoso (2003). Computer simulated Balmer-alpha, -beta, -gamma Stark line profiles for non-equilibrium plasmas diagnostics. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 58(8), 1489-1504
- [3] D.M Surmick, C.G. Parigger (2014). Empirical Formulae for Electron Density Diagnostics from H α and H β Line Profiles. *International Review of Atomic and Molecular Physics*, 5(December), 73
- [4] A. Favre, M. Lesage, V. Morel, A. Bultel, P. Boubert (2020) MERLIN, a RT-LTE software supporting the diagnostic application of LIBS to H- isotopes measurements, Proc. International Workshop on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, University of Szeged, Dec 2020, Szeged, Hungary.

Statut : doc2

Synthèse de nanocomposites or/polymère dans une décharge contrôlée par barrière diélectrique en Ar et Ar/NH₃

A. Perdrau^{1,2}, R. Rincón³, N. Barros^{1,2}, H. Glénat¹, B. Plujat^{1,2}, F. Massines¹

¹ Laboratoire PROMES-CNRS, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France

² Université de Perpignan Via Domitia, 52 Avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan, France

³ Université de Cordoue, Département de Physique, Cordoue, Espagne

mél: alexandre.perdrau@univ-perp.fr

Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma à pression atmosphérique (AP-PECVD) est un procédé à basse température utilisé pour la croissance de couches minces. Un des avantages est que des précurseurs peuvent être facilement injectés sous forme d'aérosol dans le plasma. En sélectionnant des précurseurs d'une matrice carbonée et de nanoparticules (NPs) il est possible d'obtenir des couches minces nanocomposites multifonctionnelles. Une étude précédente[1] utilisant un aérosol d'une solution colloïdale de nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂) a mis en évidence l'intérêt d'alterner une fréquence plasma élevée, responsable de la polymérisation de la matrice, et une basse fréquence, pour contrôler le transport des NPs vers le substrat. Plus récemment, l'injection d'un aérosol de sel d'or (HAuCl₄, précurseur de NPs d'or) dissout dans de l'isopropanol (solvant polymérisable agissant comme précurseur de la matrice) dans une décharge à barrière diélectrique (DBD) a été explorée[2]. L'un des principaux avantages de cette méthode est que les NPs ne sont pas manipulées directement, ce qui rend le procédé « safe by design ».

La présente étude propose d'explorer l'impact des paramètres du plasma sur les propriétés des nanocomposites. En ce qui concerne les paramètres électriques : une DBD alternant les hautes et basses fréquences comme précédemment est utilisée à la différence que la basse fréquence est appliquée en continu tandis que la fréquence la plus élevée est modulée ; elle n'est appliquée que durant 2.5 ms toutes les 10 ms. Pour ce qui est du choix du gaz vecteur, deux types de gaz ont été testés : (i) argon (Ar) pur et (ii) Ar avec 133 ppm d'ammoniac (NH₃), un mélange Penning qui favorise l'obtention d'une décharge homogène à pression atmosphérique. Ces gaz sont utilisés pour l'injection d'un aérosol de sel d'or dissout dans de l'isopropanol. Les deux mélanges de gaz amènent à la synthèse de couches minces différentes ; celles obtenues en Ar pur présentent une réponse plasmonique caractéristique de la formation de NPs d'or, alors que celles réalisées en mélange Penning en sont dépourvues.

Afin de comprendre les mécanismes menant à cette différence, la décharge est étudiée via la spectroscopie d'émission optique. Les résultats suggèrent une réaction chimique entre le sel d'or et le NH₃ qui a pour effet de limiter la formation de NPs d'or. Les caractérisations morphologiques et chimiques des dépôts confirment que le sel est entièrement réduit dans une DBD dans l'Ar alors qu'il ne l'est que partiellement dans une DBD Ar/NH₃. Ces résultats montrent que l'on peut synthétiser des NPs d'or dans une DBD et les inclure, sans qu'elles s'agglomèrent, dans un nanocomposite.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet ANR-21-CE08-0038 et par NextGenerationEU et le Ministerio de Universidades (Plan de Recuperacion, Transformación y Resiliencia) espagnol.

Références

- [1] P. Brunet, R. Rincón, Z. Matouk, M. Chaker, et F. Massines, *Langmuir*, vol. 34, n° 5, p. 1865-1872, févr. 2018, doi: 10.1021/acs.langmuir.7b03563.
- [2] E. Nadal, N. Milaniak, H. Glénat, G. Laroche, et F. Massines, *Nanotechnology*, vol. 32, n° 17, p. 175601, févr. 2021, doi: 10.1088/1361-6528/abdd60.

Statut : doc3

Utilité de la ps-TALIF pour la mesure de la température de gaz dans un plasma d'hydrogène hautement collisionnel

A. Siby¹, D. Stefas¹, Y. Agha¹, L. Invernizzi¹, K. Gazeli¹, G. Lombardi¹, K. Hassouni¹, S. Prasanna¹

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: abdoulaye.siby@lspm.cnrs.fr

Les diagnostics optiques des plasmas collisionnels permettent une compréhension de base des conditions réactives locales en servant d'indicateurs utiles qui révèlent les processus complexes se déroulant dans les flux réactifs. La théorie fondamentale de ces diagnostics consiste à sonder une espèce chimique radiative [1, 2]. La température du gaz (T_g) est l'une des propriétés fondamentales les plus importantes dont la mesure précise reste compliquée dans les plasmas réactifs fortement non équilibrés. Différentes méthodes optiques non invasives telles que les spectres d'émission rotationnelle [3], les techniques de diffusion de la lumière [4], la spectroscopie Raman anti-Stokes cohérente (CARS) [5], etc. ont été proposées pour la mesurer, tandis que le développement de nouvelles techniques continue à susciter un vif intérêt.

Dans ce travail, nous présentons et discutons des mesures simultanées de densités absolues d'hydrogène atomique H et de températures de gaz réalisées dans un microplasma à pression modérée d'hydrogène pur à l'aide d'un diagnostic ps-TALIF avancé. En outre, l'utilisation d'une caméra streak permet de mesurer la durée de vie effective de l'espèce excitée (τ_H) par le laser sur des échelles de temps de l'ordre de la ps. Il a été démontré que la détermination des températures de gaz à partir de τ_H est possible à condition que le critère de collisionnalité $\gamma \rightarrow 1$. Les températures de gaz mesurées en utilisant $\sigma_{H/H_2} = 98 \text{ \AA}^2$ se comparent bien ($\pm 25\%$) à celles mesurées à partir des spectres d'émission de la bande G de la molécule de H_2 , comme le montre la figure 1.a. Cette méthodologie a donc été appliquée pour obtenir une distribution 2D de la température du gaz et des densités d'atomes H dans la région en aval de la décharge du microplasma (fig.1b).

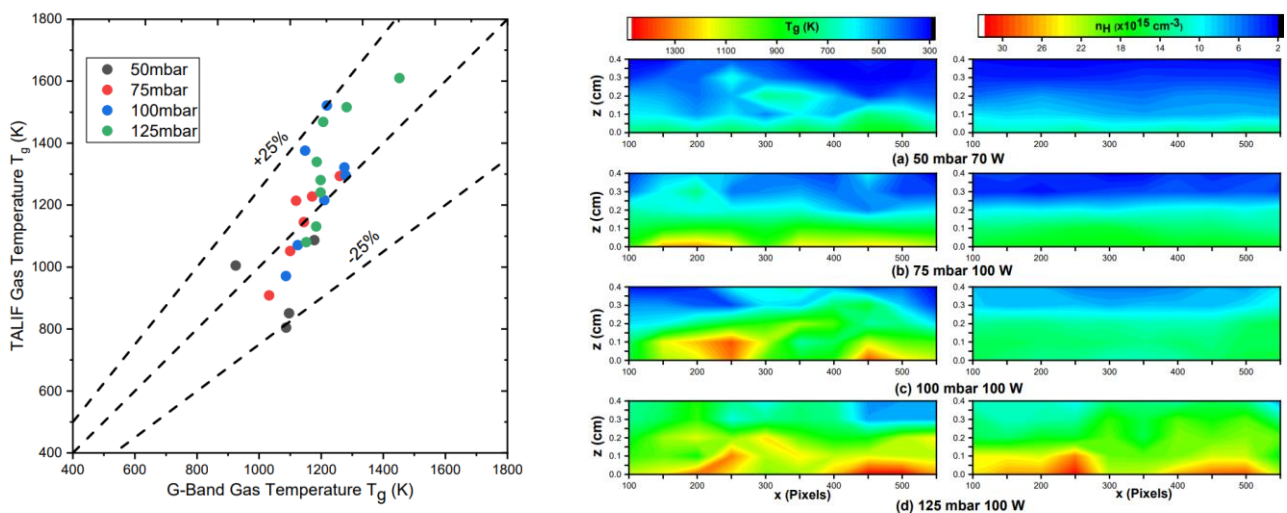


Figure 1 : (a) Graphique de parité comparant la mesure de la température du gaz de la bande G de H_2 et la ps-TALIF en utilisant $\sigma_{H/H_2} = 98 \text{ \AA}^2$ et (b) Diagrammes de contour 2D construits de la densité d'atomes H et de la T_g pour différentes pressions.

Références

- [1] R. A. Gottscho and T. A. Miller, Pure and Applied Chemistry 56, 189 (1984).
- [2] R. Engeln, B. Klarenaar, and O. Guaitella, Plasma Sources Science and Technology 29, 063001 (2020).
- [3] P. J. Bruggeman, N. Sadeghi, D. C. Schram, and V. Linss, Plasma Sources Science and Technology 23, 023001 (2014).
- [4] N. M. Laurendeau, Progress in Energy and Combustion Science 14, 147 (1988).
- [5] S. Roy, J. R. Gord, and A. K. Patnaik, Progress in Energy and Combustion Science 36, 280 (2010).

Statut : doc 3

Development of a numerical modeling strategy for joint experimental/simulation analysis of plasma/catalysis interactions

M. Saadana¹, G. Peyrichon¹, H. Oueslati¹, V. Robin¹, Z. Al Zayed², E. Fourré², C. Batiot-Dupeyrat², S. Rossignol³, N. Barléon⁴ and L. Cheng⁴

¹Prime Institute, FTC department, 1 Av. Clément Ader, 86360 Chasseneuil-du-Poitou, France

²IC2MP, ENSIP, 1 rue Marcel Doré, Poitiers, cedex 9 86073, France

³IRCER, 12 Rue Atlantis, 87068 Limoges, France

⁴CERFACS, 42 Avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, Cedex 1 31057, France

mél: mohamed.saadana@univ-poitiers.fr

The transition towards a bioeconomy requires the development of novel technologies capable of efficiently and flexibly utilizing resources. Within this context, the conversion of biogas into chemical compounds that are valuable to industry during periods of decreased heat or electricity demand is a method of effectively storing chemical energy. The synthesis of methanol from biogas emerges as a promising alternative to the conventional process reliant on fossil carbon. Nonetheless, existing methanol production systems are characterized by their large size, utilization of rare or costly materials, and operation at high pressures and temperatures. An alternative and promising technology is non-thermal plasma-assisted catalysis. This process operates at atmospheric pressure and room temperature in "on/off" mode. However, there is still a need to improve its energy efficiency and the selectivity of the target product to facilitate effective industrial development. Despite recent advancements in the field of plasma/catalysis research [1], a deeper comprehension of the interaction between the active species generated in the gas phase and the catalyst's surface can only be achieved by combining experimental and simulation results. This study focused on developing a dedicated numerical tool for simulating a DBD catalytic reactor [2] with flexible structural configurations and operating conditions, enabling progressive validation of the simulation strategy, kinetic schemes, and physical models. The catalyst may be placed on the inner wall of the DBD reactor or within a ceramic foam with controlled pores; however, the initial validations were conducted with bare walls. A 1-D simulation of methane oxidation was first considered using a coupled Boltzmann/kinetic solver [3] based on two open-source libraries Cantera and Bolos. Subsequently, the numerical parameters of the 1-D model were set incorporating experimental data.

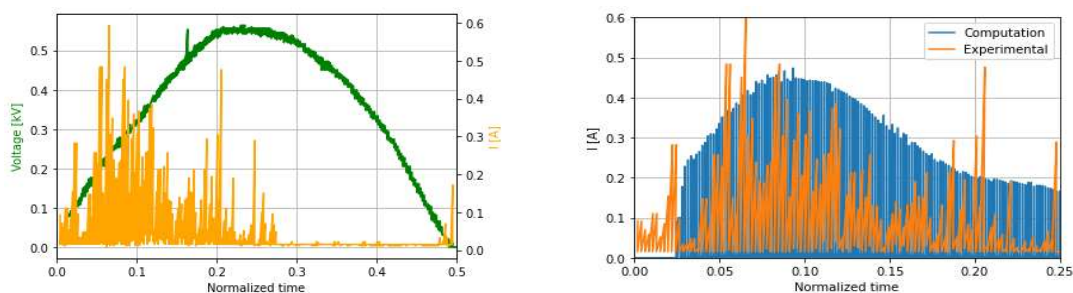


Figure 1 : Experimental voltage-current waveforms for DBD reactor (left). Experimental and computed current waveforms comparison (right).

Références

- [1] A. Bogaerts, et al., The 2020 plasma catalysis roadmap, *Journal of Physics D: Applied Physics* 53, 443001 (2020).
- [2] N. Bouchoul, et al., Plasma-metal oxides coupling for CH₄-CO₂ transformation into syngas and/or hydrocarbons, *Catalysis Today* 369, 62 (2021).
- [3] L. Cheng, et al., Plasma assisted combustion of methane-air mixtures: Validation and reduction, *Combustion and Flame* 240, 111990 (2022)

Statut : Doc3

Posters

Ammonia decomposition by microwave plasma discharges

M. Y. Awaji, L. Pentecoste*, C. Noel, M. Belmahi, T. Gries, T. Belmonte

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

*lucile.pentecoste-cuynet@univ-lorraine.fr

Ammonia is a promising energy vector as it is much easier to store and transport than hydrogen. It benefits from large infrastructures already available worldwide and about 20 million metric tons of NH₃ are traded every year for a year production of 150 million tons. If many works focus on the production of ammonia by electrical discharges [1], only a few are devoted to the cracking of ammonia and mostly focus on catalysis [2].

In this work, we propose to study the decomposition of ammonia by microwave (MW) plasma. A MW cavity, that confines an electromagnetic field excited at 2.45 GHz, is used to ignite an electrodeless plasma in a fused silica tube. NH₃ and NH₃:N₂ mixtures are partially ionized. The plasma is characterized by optical emission spectrometry in order to determine the various light emitting species produced and plasma parameters such as rotational and vibrational temperatures of some species. The trend of dissociation yield of ammonia has been determined by in-situ FTIR as a function of experimental parameters [3]. Further analysis of the reactor effluents by gas chromatography completes the study of the process efficiency.

The influence of the input power at near atmospheric pressure and flowrate will be discussed as they are key parameters to evaluate the process yield. It must be compared with thermal processes with or without catalysts such as ruthenium which are the most efficient methods to crack ammonia known to date.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Department of Physics, College of Science, Jazan University, Jazan 45142, Saudi Arabia, for the financial support to M. Awaji, and to SAKOWIN for the financial support to L. Pentecoste.

Références

- [1] D. Zhou, R. Zhou, R. Zhou, et al., Chem. Eng. J., **421** (2021)
- [2] I. Lucentini, X. Garcia, X. Vendrell, J. Llorca, Ind. Eng. Chem. Res., **60** (2021)
- [3] M. Awaji, T. Belmonte, C. Noel, M. Belmahi, T. Gries, Dissociation of Ammonia by Microwave Discharges in Medium Pressure Range: An Experimental Study, Poster presentation at PLATHINIUM, 11-15 September 2023, Antibes.

Statut : doc3, postdoc

Approche de dynamique moléculaire pour l'étude de la réactivité en surface des espèces neutres dans un plasma Ar/CH₄

G.C Otakandza.Kandjani¹, P. Brault¹, M. Mikikian¹, A. Michau², K. Hassouni²

¹ GREMI, UMR7344, CNRS-Université d'Orléans, F-45067 Orléans Cedex 2, France

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

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

Les plasmas basse pression contenant des gaz hydrocarbonés tels que le méthane ou l'acétylène, sont utilisés dans de nombreuses applications telles que l'élaboration de matériaux à base de carbone, le dépôt de couches minces ou la synthèse de nanoparticules et de nanocomposites. [1] La chimie complexe de ces plasmas rend cependant leur compréhension et leur contrôle assez difficiles, particulièrement lorsque certaines espèces sortent du plasma pour interagir avec les surfaces environnantes, engendrant des réactions en surface qui conduisent à la croissance d'un film hydrocarboné et à la formation d'espèces volatiles réalimentant la phase gaz. La solution est donc de recourir aux simulations numériques pour la compréhension des mécanismes fondamentaux impliquant certaines espèces atomiques et moléculaires, en particulier les espèces neutres et les ions positifs.

Ce travail présente des résultats de simulations de dynamique moléculaire pour l'étude de la réactivité en surface impliquant les principales espèces neutres (H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, C₂H et CH₃) issues d'une modélisation fluide 1D d'un plasma Ar/CH₄ à basse pression. [1], [2] Les simulations ont été réalisées pour des températures de 300 à 1000 K en envoyant un total de 49600 molécules vers une surface en acier inoxydable imitant les électrodes d'un réacteur plasma. Les espèces ont été envoyées les unes après les autres en tenant compte de leurs fractions molaires issues du modèle fluide 1D. Les résultats ont montré que la croissance des films est principalement due au radical C₂H à toutes les températures (Fig. 1a) et que la formation d'espèces volatiles provient des deux radicaux C₂H et CH₃ (Fig. 1b), la contribution de CH₃ diminuant lorsque la température augmente. [3] Aux premiers instants, c'est-à-dire avant la formation de la première monocouche hydrocarbonée, les espèces stables (CH₄, C₂H₄ et C₂H₂) contribuent également au dépôt. Les caractérisations des films C:H formés à la surface ont montré que ceux-ci étaient principalement constitués par des doubles liaisons C=C et des carbones CN³ (carbone ayant un nombre de coordination égal à 3) à toutes les températures.

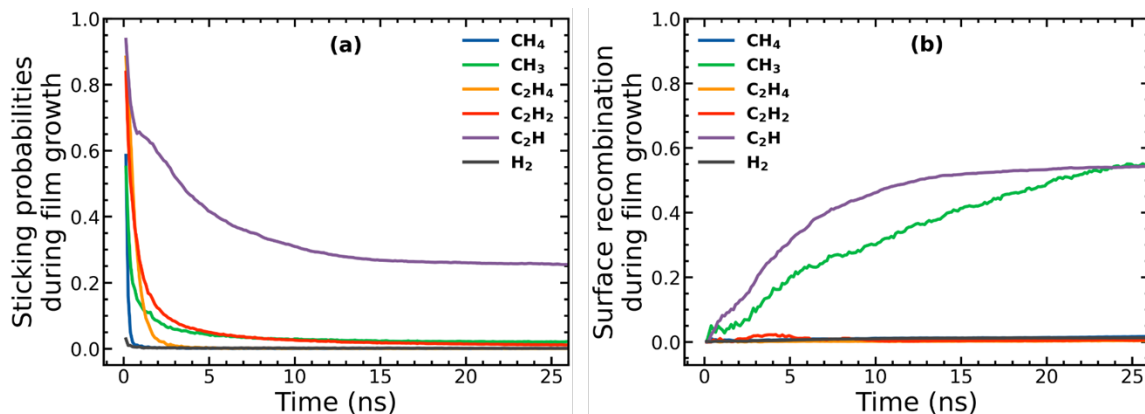


Figure 1 : (a) Probabilités de collage et (b) probabilités de recombinaison en surface, des espèces neutres incidentes au cours de la croissance du film C:H à 300K.

Références

- [1] G. O. Kandjani et al., *Plasma Processes & Polymers*, vol. **20**, 4 (2023)
- [2] G. Tetard et al., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **30**, 10 (2021)
- [3] G. Otakandza-Kandjani et al., *Plasma Processes & Polymers*, p. e2300120, (2023)

Statut : post-doc

Caractérisation électrique et optique d'une décharge de Townsend à pression atmosphérique en CO₂

C. Bajon¹, S. Dap¹, A. Belinger¹, O. Guaitella², T. Hoder³, N. Naudé¹

¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

²Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, Route de Saclay, F-91128, Palaiseau Cedex, France

³Department of Plasma Physics and Technology, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlářská 2, 61137 Brno, Czech Republic

mél: cbajon@laplace.univ-tlse.fr

Face aux enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les études de conversion du CO₂ ont gagné en intérêt. Par exemple, des travaux proposent de créer de l'oxygène à partir du CO₂ présent dans l'atmosphère Martien ou encore de convertir le CO₂ pour produire des carburants [1].

Dans ce cadre, les plasmas hors équilibre, et particulièrement les décharges à barrière diélectrique (DBDs), constituent un moyen intéressant pour induire une chimie dans un gaz et ainsi, dissocier la molécule de CO₂. Généralement, à la pression atmosphérique ces décharges fonctionnent en régime filamentaire. Cependant, sous certaines conditions il est possible d'obtenir des décharges diffuses en N₂ ou dans l'air [2,3]. Dans un article récent [4], nous avons montré qu'il est également possible d'obtenir une décharge diffuse en CO₂. Des études électrique et optique ont permis de montrer que cette décharge fonctionne en régime de Townsend. En effet, l'oscillogramme de la décharge Figure 1-a présente des caractéristiques similaires à une décharge de Townsend obtenue à la pression atmosphérique (APTD) en N₂ [5]. De plus, l'imagerie rapide de la décharge Figure 1-b montre une lueur plus intense du côté de l'anode ce qui est caractéristique de ce type de décharge. Une étude approfondie des spectres d'émission optique obtenus dans la gamme UV-Visible, en régime diffus et filamentaire, est réalisée. Ces travaux ouvrent la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de dissociation et d'excitation des décharges en CO₂, en apportant de nouvelles données obtenues pour des conditions différentes en termes de champ réduits E/n, puissance et énergie.

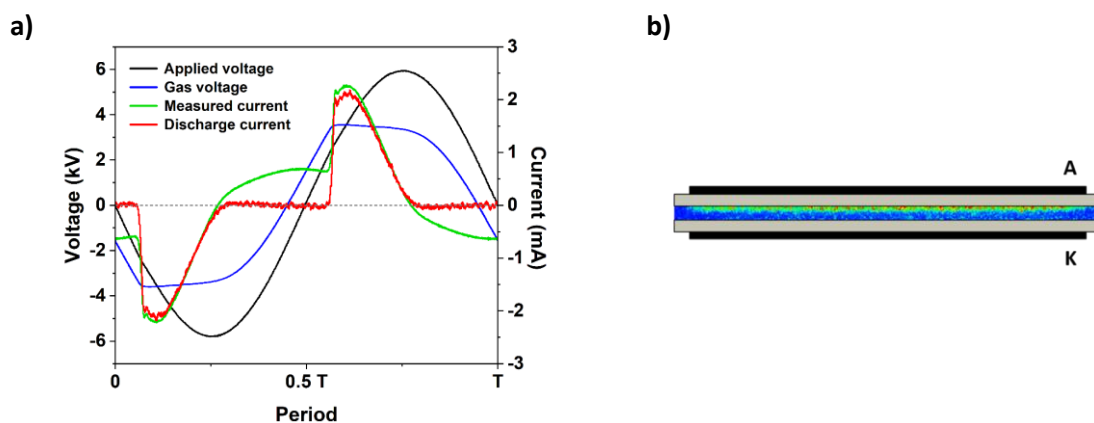


Figure 1 : Oscillogramme **a)** et image iCCD **b)** (temps d'exposition = demi-période) d'une décharge diffuse en CO₂ (gap gazeux = 1 mm).

Références

- [1] P. Ogloblina *et al.*, Plasma Sources Science and Technology **30** (2021)
- [2] N. Osawa *et al.*, Eur. Phys. J. Appl. Phys. **61** 24317 (2013)
- [3] F. Massines *et al.*, Eur. Phys. J. Appl. Phys. **47** 22805 (2009)
- [4] C. Bajon *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **32** 045012 (2023)
- [5] C. Tyl *et al.*, Journal of Physics D: Applied Physics **51** (2018)

Statut : doc 3

Dépôts métalliques par pulvérisation magnétron dans l'hélium: quels mécanismes de formation de porosité ouverte ou fermée ?

T. Penaud, S. Ibrahim, D. Boivin, A. Caillard, P. Brault, L. Gimenez, A.-L. Thomann

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

Il est connu que l'implantation de He^+ à basse énergie (<50 eV) permet de synthétiser des matériaux nanostructurés et/ou poreux. Ces nanostructures modifient les propriétés des matériaux, ce qui peut être utile pour différentes applications. Récemment, lors de dépôts par pulvérisation magnétron sous atmosphère d'hélium, il a été montré que l'incorporation d'hélium pouvait mener à des films minces poreux composés de nano fibres et/ou à la formation de bulles remplies de He de taille nanométrique [1].

Dans cette présentation, nous comparerons des films synthétisés par pulvérisation plasma magnétron sous atmosphère d'He ou d'Ar. Trois métaux purs (Al, Cu, Ti) ainsi que des alliages de ces métaux (CuTi, AlTi, AlCu et AlCuTi) ont été étudiés. Les caractéristiques morphologiques, structurales et chimiques des dépôts sont analysées par MEB (Microscopie Electronique à Balayage), EDS (Energy Dispersive X ray Spectroscopy), DRX (Diffraction des Rayons X), RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) et EPBS (Elastic Proton Backscattering Spectroscopy). Des structures très différentes, dont certaines surprenantes, ont été obtenues comme le montre la figure 1 où un film poreux de Cu supporté sur des plots est mis en évidence. De premiers travaux sur l'aluminium ont permis de mettre en évidence le rôle essentiel des ions He^+ rétrodiffusés au niveau de la cible qui assistent la croissance du film [2]. Cependant de nombreuses questions restent posées. Ce poster, en couplant ce qui peut être connu de la phase gazeuse (spectrométrie de masse, simulations SRIM de la pulvérisation puis du transport des espèces) aux caractéristiques des films dans les deux cas Ar et He, sera l'occasion de tenter de mieux comprendre les mécanismes d'incorporation de l'hélium, la formation de nanopores, ou de bulles. Il s'agira notamment de tenter d'identifier les paramètres clés (conditions de dépôt/nature du matériau) pour l'insertion et la rétention stable d'He dans le film.

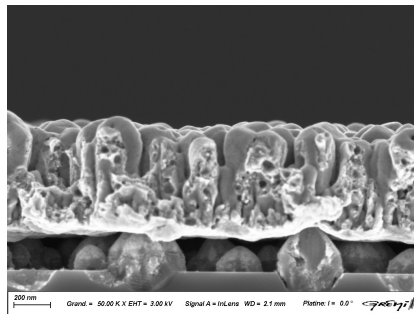


Figure 1 : Image MEB d'un film de Cuivre déposé sous atmosphère d'hélium à 1.5 Pa de 60 min à une distance cible-substrat de 11.5 cm.

Références

- [1] A. Fernandez, T. Sauvage, B. Diallo, D. Hufschmidt, M.C. Jiménez de Haro, O. Montes, J.M. Martínez-Blanes, J. Caballero, V. Godinho, F.J. Ferrer, S. Ibrahim, P. Brault, A.-L. Thomann, Microstructural characterization and thermal stability of He charged amorphous silicon films prepared by magnetron sputtering in helium, *Materials Chemistry and Physics* 301 (2023) 127674.
- [2] S. Ibrahim, F. Zahrae Lahboub, P. Brault, A. Petit, A. Caillard, E. Millon, T. Sauvage, A. Fernandez, A.-L. Thomann, Influence of helium incorporation on growth process and properties of aluminum thin films deposited by DC magnetron sputtering, *Surface & Coatings Technology* 426 (2021) 127808.

Statut: Post-Doc

Determination of accurate fluorescence decay times in reactive plasmas using ps-TALIF assisted by a streak camera

D. Stefas, A. Siby, Y. Agha, L. Invernizzi, C. Y. Duluard, K. Hassouni, S. Prasanna, K. Gazeli, G. Lombardi

Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, LSPM, CNRS, Université Sorbonne Paris Nord, UPR 3407, F-93430 Villetaneuse, France
mail: dimitrios.stefas@lspm.cnrs.fr

Laser-based plasma diagnostics are crucial for understanding fundamental plasma properties for various applications. Techniques like Laser-Induced Fluorescence (LIF) and Two-Photon Absorption Laser-Induced Fluorescence (TALIF) enable a precise probing and characterization of transient reactive species in plasmas [1]. TALIF, overcomes limitations of LIF, such as the need for VUV laser photons for species excitation. TALIF uses two UV photons to excite reactive species and provides exceptional time and spatial resolutions, as long as secondary effects like photoionization and stimulated emission are minimized [1,2]. When measuring atomic densities (e.g., H, N, O, etc.) in highly-collisional plasmas, it is crucial to accurately determine the effective fluorescence lifetime (τ) of the laser-excited species, which may fall down to sub-ns timescales [1,3]. This necessitates selecting a laser source with a pulse duration much shorter than τ . Furthermore, the use of a suitable detector with similar temporal resolution is required. In this work, we probe the transient behavior of atomic H in a microwave H_2 plasma, microwave H_2/CH_4 plasma torch, and atmospheric pressure helium plasma jet. To be able to determine τ_H , we employed a picosecond (ps) laser (10 ps pulse duration) and an ultrafast detector (streak camera; few ps time resolution). Despite the apparent advantage of these diagnostics for TALIF studies of reactive plasmas, we demonstrate that integrating a streak camera into ps-TALIF and effectively handling the collected data is challenging. For instance, determining an ideal time range (TR) for capturing the entire duration of an ultrafast luminous event while maintaining a suitable resolution depends on both the signal's timescale and the intrinsic features of the streak camera [3]. To demonstrate this, a systematic investigation that highlights the effect of TR and slit width of the camera on the fluorescence signals. A dedicated algorithm has been developed to perform a reliable analysis of ps-TALIF signals by considering the peculiarities of the streak camera and TALIF properties. This is shown in Figure 1. In this context, the suitability of ps-TALIF and streak camera as a state-of-the-art plasma diagnostics is interrogated and justified.

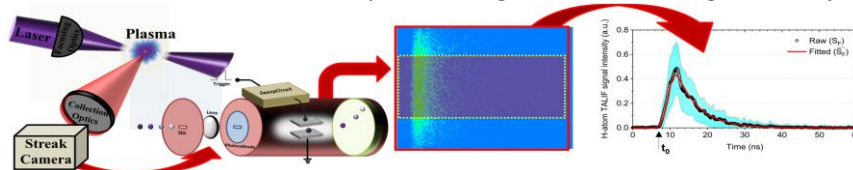


Figure 1 : Schematic representation of ps-TALIF assisted by streak camera imaging and determination of fluorescence effective lifetimes of a plasma reactive species.

Acknowledgements

ANR ULTRAMAP project (ANR-20-CE510020), ANR and CGI Labex SEAM (ANR-10-LABX-0096; ANR-18-IDEX-0001), Nanodiaplas (ANR-22-CE51-0013), Projet d'Établissement USPN 2023 (K. Gazeli), and IDF regional project SESAME DIAGPLAS.

References

- [1] K. Gazeli et al., *Plasma* **4**, 145-172 (2021)
- [2] K. Gazeli et al., *Phys. Plasmas* **28**, 043301 (2021)
- [3] L. Invernizzi et al., *Meas. Sci. Technol.* **34**, 095203 (2023)

Statut : post-doc

Diagnosics optiques sur un microplasma N₂/Ar pour le dépôt de nitrure de bore hexagonal.

Belkacem Menacer¹, Alice Remigy¹, Xavier Aubert¹, Swaminathan Prasanna¹, Guillaume Lombardi¹, Kristaq Gazeli¹, Claudia Lazzaroni¹, Clément Barraud²

¹ Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, LSPM, CNRS - VILLETANEUSE

² Université Paris Cité, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantique, MPQ, CNRS – PARIS

Mel : Belkacem.menacer@lspm.cnrs.fr

Le nitrure de bore hexagonal (*h*-BN) est un matériau remarquable qui présente des propriétés intéressantes pour diverses applications, notamment en liaison avec les hétérostructures de Van der Waals (VdW). Par exemple, il est possible de réaliser, en utilisant des hétérostructures de VdW à base de graphène et de *h*-BN [1], des jonctions magnétiques à effet tunnel (ou Magnetic Tunneling Junction *MTJ*) ou des transistors à effet tunnel (ou Tunneling Field-Effect Transistors *TFET*). L'objectif principal de mon travail de thèse est le dépôt de *h*-BN à l'aide d'une micro-décharge à cathode creuse (Micro Hollow Cathode Discharge *MHCD*) fonctionnant dans un mélange N₂/Ar couplée à un substrat polarisé (situé à quelques centimètres de la *MHCD*). Cette configuration est connue sous le nom de Micro Cathode Sustained Discharge (*MCS**SD*). Afin d'optimiser le processus de dépôt de *h*-BN, une étude détaillée des principales propriétés du plasma, notamment la température du gaz (T_{Gaz}) et la densité des atomes d'azote, est donc indispensable. Pour comprendre la dynamique des espèces réactives d'azote et d'argon, nous avons utilisé la spectroscopie d'émission optique. La spectroscopie d'émission optique a également été utilisée pour déterminer la température rotationnelle de N₂(C) et OH(A), qui peut être supposée proche de T_{Gaz} . L'azote atomique étant une espèce clé dans le processus de dépôt du *h*-BN, sa densité absolue a été déterminée dans la chambre de dépôt au moyen de la fluorescence induite par absorption laser à deux photons [2] (Two-photon Absorption Laser Induced Fluorescence *TALIF*) ainsi que de la spectrométrie à transformée de Fourier dans le VUV (VUV-FTS). Pour les mesures *TALIF*, les densités absolues d'azote atomique ont été obtenues en réalisant des calibrations avec du krypton. Les mesures *TALIF* ont permis l'élaboration de cartographies 2D de la densité d'azote dans différentes conditions de décharge (diamètre du trou, jet et jet + 3ème électrode). Pour les mesures de VUV-FTS, la densité absolue d'azote atomique a été obtenue directement par absorption du rayonnement pour quatre positions différentes à l'extérieur de la *MHCD*. Lorsqu'une grande partie du courant électrique est délivrée au substrat (3ème électrode), une homogénéisation de la densité d'atomes d'azote dans la chambre de dépôt au niveau du substrat est observée. Les mesures de spectroscopie d'émission optique indiquent quant à elles que la température du gaz ne varie pas de façon significative en fonction du courant électrique, de la pression et du %N₂ dans le mélange gazeux.

Références

[1] S. J. Liang, et al *Advanced Materials* 32, page 1903800, 2019

[2] A. Remigy et al. *Phys. Plasmas* 29, page 113508, 2022

Statut : Doctorant 1ère année

Diagnostique par caméra rapide d'un arc créé par séparation de contacts : Etude des particules éjectées aux électrodes

A. Hellé^{1,2}, R. Hugon¹, F. Brochard², S. Chouchène², G. Marcos¹ et P. Schweitzer³

Institut Jean Lamour (IJL), UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, BP 50840, 54000 Nancy, France

¹ Dpt CP2S : Chimie et physique des surfaces et des solides

² Dpt P2M : Physique de la matière et des matériaux

³ Dpt N2EV: Nanomatériaux, Electronique et Vivant

Mél : arthur.helle7@etu.univ-lorraine.fr

L'électrification grandissante des moyens de transports (avion, automobile...) repose sur l'utilisation de systèmes électriques à courant continu (DC). Le besoin en puissance de ces systèmes ne fait que croître. Le risque d'apparition d'arcs électriques dans ce type d'installations est de plus en plus problématique et nécessite d'être étudié pour d'évidentes raisons de sécurité. Ces études devraient permettre le développement de systèmes de protection spécifiques de haute précision. Notre étude est en partie basée sur l'étude du bruit de ligne, l'objectif étant de relier la présence d'arcs avec des caractéristiques électriques de celui-ci (tension/ courant). Le diagnostic optique réalisé avec une caméra rapide permettra la détermination précise du début de l'arc ainsi que l'étude de son comportement pour rendre possible ces travaux.

Un réacteur réalisé au laboratoire permet de créer un plasma d'arc entre deux électrodes en cuivre. Un courant de quelques ampères est tout d'abord établi dans le circuit. Un moteur pas à pas permet de séparer les deux électrodes à vitesse constante et donc de créer l'arc électrique. Un trigger, généré par une carte Arduino utilisée pour commander le déplacement de l'anode, permet de synchroniser le mouvement de l'électrode et les différents diagnostics utilisés. Des mesures courant-tension et la réalisation de films à très haute vitesse d'échantillonnage (plusieurs centaines de milliers d'images par seconde) sont les outils mis en place pour cette étude. Ce dispositif permet la réalisation de mesures dans une gamme de pressions allant de quelques torrs à la pression atmosphérique, le courant maximal pouvant être généré par l'alimentation DC est de 30 A.

Dans cette contribution, nous nous focaliserons sur l'impact de l'éjection de matière issue des électrodes sur les valeurs du courant et de la tension d'arc. Une corrélation forte sera établie entre ces deux phénomènes. Une partie du bruit d'arc pour des valeurs de fréquence de l'ordre du kHz est clairement attribuée à l'éjection de matière (figure 1). La dynamique des particules de tailles supérieures à quelques microns sera également présentée. Enfin, l'étude de l'oscillation des gaines sera abordée et corrélée à une partie du bruit présent sur les signaux électriques.

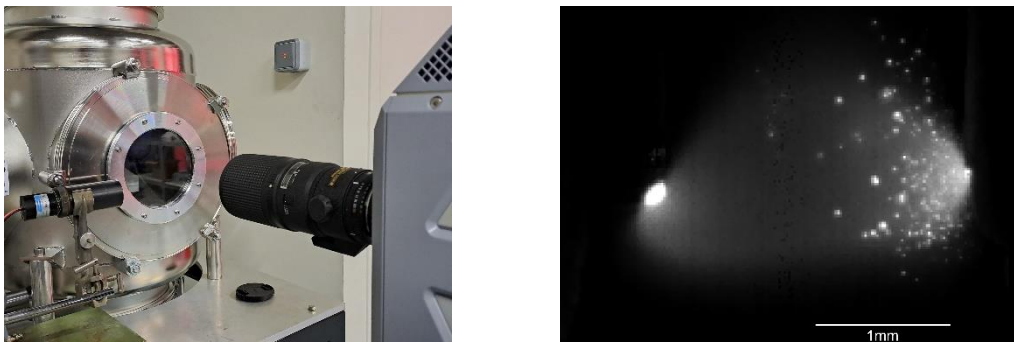


Figure 1 : Caméra rapide orientée vers le réacteur (à gauche) et image issue de la caméra rapide de l'éjection de matière provoquée par l'arc au niveau de la cathode (à droite)

Étude expérimentale de la fluorescence induite par laser à deux photons appliquée à l'oxygène atomique contenu dans un plasma d'air à couplage inductif en présence d'Invar 36

A. Brault¹, M. Lesage¹, P. Boubert¹

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

Depuis 2008, la loi française relative aux opérations spatiales (LOS) régule tout nouvel envoi de satellites, afin de limiter le nombre croissant de débris spatiaux dans l'atmosphère terrestre. Lors d'une rentrée atmosphérique terrestre, un plasma d'air se crée derrière l'onde de choc produite par l'interaction gaz-surface. Ce plasma interagit avec le satellite et le dégrade. Parmi les matériaux servant à la confection de véhicules spatiaux, les alliages métalliques tel que l'Invar 36 ($\text{Fe}_{64}\text{Ni}_{36}$) [1] sont très utilisés.

La fluorescence induite par laser à deux photons (TALIF, Two-photon Absorption Laser-Induced Fluorescence) [2] permet de déterminer la température du plasma et la densité des espèces présentes dans la couche limite, notamment l'oxygène atomique. Cette technique de diagnostic optique non-intrusive emploie un système laser, dont la longueur d'onde d'excitation est choisie de manière à atteindre un niveau d'énergie spécifique de l'espèce sondée, dont résulte une longueur d'onde de fluorescence spécifique.

Au cours de cette étude expérimentale, la TALIF est tout d'abord appliquée à une cellule contenant du xénon à température ambiante, afin de calibrer les mesures sur l'oxygène atomique [3]. Cette étape de calibration permet de déterminer l'élargissement spectral du système laser et de lier le signal de fluorescence à la densité d'oxygène atomique. Pour cette étape de calibration, les longueurs d'onde laser et de fluorescence sont respectivement $\lambda_{\text{laser, Xe}} = 224.31 \text{ nm}$ et $\lambda_{\text{flu, Xe}} = 834.91 \text{ nm}$.

Dans un second temps, la TALIF est appliquée à l'oxygène atomique contenu dans un plasma d'air à couplage inductif dans la soufflerie SOUPLIN [4] en présence d'un échantillon d'Invar 36. La soufflerie SOUPLIN permet de reproduire des conditions de rentrées atmosphériques terrestres en aval de l'onde de choc. Au cours de ces expériences, les longueurs d'onde laser et de fluorescence sont respectivement $\lambda_{\text{laser, O}} = 225.65 \text{ nm}$ et $\lambda_{\text{flu, O}} = 844.87 \text{ nm}$. Des mesures sans et avec échantillon à des temps d'exposition différents sont réalisés dans le but d'observer l'influence de l'Invar 36 sur le signal de fluorescence.

Références

- [1] L. Barka, M. Balat-Pichelin, J.-L. Sans, E. Bêche, Journal of Alloys and Compounds **772**, 1003-1016 (2019)
- [2] K. Niemi, V. Schulz-von der Gathen and H. F. Döbele, Plasma Sources Sci. Technol. **14** 375 (2005)
- [3] K. Niemi, V. Schulz-von der Gathen and H. F. Döbele, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 2330 (2001)
- [4] N. Brémare, S. Jouen, P. Boubert, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 165-201 (2016)

Statut : doc2

Génération d'ondes helicon toroïdales dans TORPEX

S. Vincent¹, Ph. Guittienne¹, C. Sepulchre¹, P. Quigley¹, M. Baquero-Ruiz¹, R. Jacquier¹,
A. Howling¹ and I. Furno¹

¹ EPFL, Swiss Plasma Center (SPC), CH-1015 Lausanne, Suisse

Les antennes helicon sont connues pour être des sources plasma particulièrement efficaces, et sont installées sur de nombreuses machines linéaires de plasma de laboratoire dans le monde. Au cours des dernières décennies ces ondes ont été le sujet de nombreuses études tant théoriques qu'expérimentales [1]. Principalement restreintes au domaine des plasmas froids jusqu'ici, les ondes helicon sont maintenant envisagées comme potentiellement efficaces pour la génération de courant dans les tokamaks [2]. Cependant à l'exception de quelques machines toroïdales de petites dimensions [3, 4], la caractérisation expérimentale des ondes helicon en géométrie toroïdale est pratiquement absente de la littérature.

Pour répondre à ce besoin, une antenne helicon a été assemblée et installée sur TORPEX, une machine toroïdale de grand et petit rayons 1 m and 0.2 m respectivement [5]. Installer une antenne helicon qui entoure la section poloïdale, sur une machine toroïdale de la taille de TORPEX, est inédit. Le succès de ce projet repose sur l'utilisation d'une antenne helicon de type "birdcage" [6]. Sur TORPEX cette antenne consiste en un réseau résonnant de 15 barreaux de cuivre connectés en parallèle par des condensateurs de 1820 pF. L'antenne a un diamètre de 32.5 cm et une longueur de 25 cm, et est installée autour d'un tube en verre de diamètre 30 cm connecté à la chambre de TORPEX via des brides dédiées. Alimentée par un générateur radio-fréquence de 13.56 MHz pouvant atteindre une puissance de 1 kW, l'antenne résonnante produit un champ magnétique oscillant et transverse à son axe central.

Des ondes helicon sont ainsi excitées, et mesurées par sonde B-dot, dans un plasma pré-existant généré par magnétron. Les capacités de l'antenne helicon à générer du plasma dans TORPEX, avec ou sans magnétron, sont ensuite évaluées en fonction de la pression (variant de 10⁻⁴ mbar à 10⁻³ mbar) et du gaz (hydrogène ou argon). Les conditions de propagation, ainsi que les caractéristiques des ondes helicon (polarisation, excentricité) sont enfin explorées.

Références

- [1] F. F. Chen, *Plasma Sources Sci. Technol.* 24, 014001 (2015)
- [2] B. Van Compernelle, *Nucl. Fusion* 61, 116034 (2021)
- [3] Y. Sakawa *et al.*, *Phys. Plasmas* 11, 311 (2004)
- [4] M. Kr. Paula and D. Bora, *Phys. Plasmas* 12, 062510 (2005)
- [5] A. Fasoli *et al.*, *Nat. Phys.* 15, 872-875 (2019)
- [6] Ph. Guittienne *et al.*, *Plasma Sources Sci. Technol.* 30, 075023 (2021)

Multi-periodic atmospheric pressure plasma jet for biomedical applications

Louis Saugé¹, Antoine Rousseau¹

¹Laboratoire de Physique Des Plasmas, École Polytechnique
mél: louis.sauge@lpp.polytechnique.fr

Atmospheric pressure plasma jets (APPJs) are studied for the biomedical field due to the transmission of Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS) to biological targets combined with electric field and charged particles. RONS can activate cells, including the production of collagen, which is one of the main structural proteins and is omnipresent on skin.

In this study, we investigate an innovative methodology for generating APPJs, facilitating the transition from generating plasma pulses at each applied voltage period ; to generating plasma pulses every n periods of applied voltage, where n denotes the multiplicity. The multi-periodicity is achieved by adding a ground electrode beneath the high voltage electrode. Previous studies [1][2][3] have examined this phenomenon, suggesting its potential application in the biomedical domain to enhance control over dosage and treatment duration.

The dual electrode configuration shows two types of modes :

- Random modes, the most common type, where the number of ionization fronts created for each period is random
- Multi-periodic modes, rare phenomena, and create ionization fronts every n period, with n the multiplicity

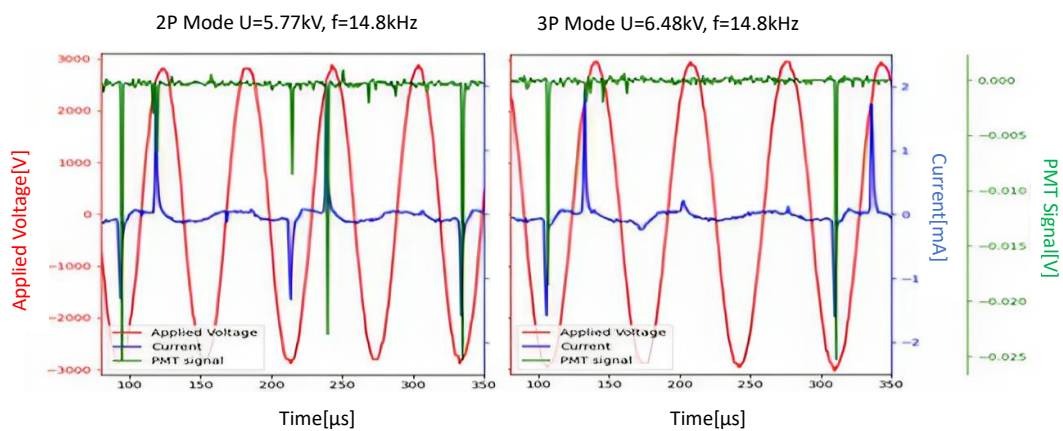


Figure 1 : Different Multi-Periodic Modes. The 2P mode is achieved with an applied voltage of 5.77 kV and a frequency of 14.8 kHz, whereas the 3P mode is attained with $U=6.48$ kV and $f=14.8$ kHz.

The emergence of multi-periodic modes is contingent upon a multitude of factors, primarily including applied voltage and frequency. Additionally, the presence or absence of plasma interaction with a target, electrode width [4][5], gas composition, and the characteristics of the target material also play pivotal roles in this phenomenon.

Références

- [1] Jun-Seok Oh et al 2012 Plasma Sources Sci. Technol. 21 034020
- [2] Xiong, Z., Lu, X., Xian, Y., Jiang, Z., & Pan, Y. (2010 Journal of Applied Physics, 108(10).
- [3] Hang Yang thesis (2023)
- [4] Hang Yang and Antoine Rousseau 2023 Plasma Sources Sci. Technol. 32 015011
- [5] Yang, H., Van Zwol, A., Burdonov, K., Fuchs, J., & Rousseau, A. (2023)

Statut :2nd Year PhD Student

Observation expérimentale du couplage d'instabilités basse fréquence à différentes échelles dans un propulseur de Hall

Q. Delavière--Delion¹, F. Gaboriau¹, G. Fubiani¹

¹LAPLACE - Laboratoire PLASMA et Conversion d'Énergie, Université Paul Sabatier, CNRS, INP, Toulouse
mél: quentin.delaviere@laplace.univ-tlse.fr

Dans un propulseur de Hall, un champ électrique axial E et un champ magnétique radial B sont imposés à travers un canal d'ionisation. L'application de ces champs perpendiculaires entre eux, génère un courant électronique dans la direction $E \times B$. Cet important courant d'électron résulte principalement d'une ionisation efficace du gaz, mais est aussi une source d'énergie pour le développement de nombreuses instabilités dans le plasma. Ces instabilités ont été observées expérimentalement sur une large gamme de fréquences (de kHz à GHz) [1] [5]. Même si des simulations numériques parviennent à reproduire certaines instabilités [3,4], et malgré les progrès théoriques réalisés, l'interdépendance des oscillations à différentes échelles rend ces phénomènes particulièrement complexes et leur compréhension difficile. Certaines de ces instabilités sont l'une des causes les plus probables pour expliquer le transport électronique anormal à travers la barrière magnétique [4]. Elles sont aussi responsables de fluctuations globales du plasma pouvant avoir des conséquences néfastes sur la stabilité de la décharge et sur l'alimentation électrique embarqué. C'est pourquoi, il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes gouvernant ces instabilités afin de mieux les contrôler.

L'étude a été réalisée sur le propulseur expérimental ID-Hall-2, développé au laboratoire Laplace et dérivé du prototype ID-Hall-1 [5]. Nous nous sommes intéressés aux instabilités à basse fréquence (de 10^3 à 10^6 Hz). Ces oscillations ont été étudiées à l'aide de différents diagnostics tels que des sondes physiques comme le RPA ou la sonde de Faraday et des techniques d'imagerie rapide, par le biais de différentes méthodes dont l'analyse en ondelettes.

L'étude du plasma a révélé la coexistence et l'interdépendance d'au moins trois types d'instabilités avec différentes longueurs d'onde et se propageant dans des directions différentes (axiale et azimutale). L'existence d'au moins trois régimes distincts d'oscillation à basse fréquence en fonction de la tension de décharge a été mise en évidence. Il a été montré que l'une des transitions entre les régimes se produit lorsque la fréquence d'une des harmoniques des oscillations du Breathing Mode devient un multiple de la fréquence des oscillations rapides, ce qui pourrait conduire à une résonance expliquant le doublement de l'amplitude du courant de décharge. Les fonctions de distribution des ions ont également été mesurées à la fois de manière intégrée et en fonction du temps. Des comportements différents ont été observés dans chacun des régimes précédemment identifiés, mettant en évidence des oscillations d'ITTO (Ion Transit Time Oscillation). Des instabilités se déplaçant azimutalement à une vitesse inférieure d'un ordre de grandeur au courant $E \times B$ ont été observées (rotating spokes) et sont en cours d'étude. Leur impact sur le transport électronique doit être estimé dans leur régime d'existence.

Références

- [1] E. Y. Choueiri, Plasma oscillations in Hall thrusters, *Physics of Plasmas* (2001)
- [2] J. P. Boeuf, L. Garrigues, $E \times B$ electron drift instability in Hall thrusters: Particle-in-cell simulations vs. theory, *Physics of Plasmas* (2018)
- [3] W. Frias, A. I. Smolyakov, Long wavelength gradient drift instability in Hall plasma devices. I. Fluid theory, *Physics of Plasmas* (2012)
- [4] J.-P. Boeuf, Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters, *Journal of Applied Physics* (2017)
- [5] A. Guglielmi, F. Gaboriau and J.P. Boeuf, Simultaneous measurements of axial motion and azimuthal rotation of non-uniformities (spokes) in Hall thruster, *Physics of Plasmas* (2022)

Statut : doc3

Plasma characterization during etching of V2O3 materials

Tatiana Chancelle Mbouja Signe¹, Cédric Mannequin¹, Aurélie Girard¹, Christophe Cardinaud¹

¹Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (IMN), CNRS, Nantes Université, UMR 6502
2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes, France

mél: Tatiana.SIGNE@cnsr-immn.fr

Vanadium Oxides have gathered particular interest over the past three decades for their diverse applications as thermal insulators (glazing for smart windows) [1], catalysts (to facilitate oxidation reactions) [2], supercapacitors [3], memory devices [4], and neuromorphic networks [5] for the microelectronics industry. For the latter two applications, control and understanding of the manufacturing process is crucial to ensure optimum and reliable performances of the targeted microelectronic devices. In particular, the etching processes by cold plasma (also called Reactive Ion Etching) can downsize the material for its functionalization into a given device while maintaining the properties observed at the macroscale. These RIE processes must ensure compliance with the critical dimension of the pattern and limit the introduction of structural or chemical defects that could impede the performance or lead to a breakdown of the device. In the case of vanadium oxide, reports on RIE process are scarce and many opened questions have to be addressed: Which plasma chemistry to use to ensure the formation of volatile products, and for which plasma parameters? What plasma surface interaction mechanisms are involved and what are the surface states of vanadium oxides during/after the etching process? My PhD will try to answer these questions and consists of a joint investigation of the plasma characteristics and surface properties of vanadium oxide.

I investigate and characterize the electrical and chemical properties of the plasma through *in situ* diagnostics tools such as the Langmuir probe, Optical Emission Spectroscopy (OES), and later Mass spectrometry (MS). Regarding the plasma/surface interactions, I rely on *in situ* X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) to investigate the surface chemical state and the overall composition of the oxides before, during, and after the plasma process. I also characterize surface morphology changes through Atomic Force Microscopy (AFM) or Scanning Electron Microscope (SEM). Finally, I can measure the etched depth through profilometry.

The first studies of XPS were performed on vanadium oxide (V₂O₃) in order to study the chemical composition of the surface of the material. Then we focused on the electrical characterization of argon (Ar), sulfur hexafluoride (SF₆), and oxygen (O₂) plasma using the Langmuir probe. Additionally, we utilized Optical Emission Spectroscopy (OES) to investigate the impact of process parameters on plasma properties.

References:

- [1] Yen-Shin Chen et al. Infrared Physics & Technology Volume 102, November 2019, 103019
- [2] Claudia Miceli et al. ACS Catal. 2017, 7, 2367–2373
- [3] Y. Yan et al. / Journal of Power Sources 329 (2016) 148e169
- [4] Dongwook Kim et al. Journal of Alloys and Compounds Volume 559, 15 May 2013, Pages 1-4
- [5] Ge li et al. Nature communications | (2022) 13:1729

Doc2

Simulation by COMSOL® for the Dynamics of Nanoparticles in a Plasma

G. Saab¹, C. Lahoud², S. Youssef¹, M. Mikikian³.

¹ *Université Saint-Joseph, Ecole supérieure d'ingénieurs de Beyrouth, Campus des Sciences et Technologies, Mar Roukoz, B.P. 1514 - Riad El Solh Beyrouth, 1107 2050, Liban*

² *University of Balamand, Faculty of Engineering, Al Koura Campus, P.O. Box 100 Tripoli, Lebanon*

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

Mél : ghinab.saab@gmail.com

Dusty plasmas are ionized gases containing solid particles ranging in size from nanometers to millimeters. These unique environments are encountered in various domains, including planetary atmospheres, comet tails, microelectronics, nanotechnologies, and thermonuclear fusion reactors [1]. The objective of this work is to investigate the distribution of nanoparticles within the plasma under different conditions. To achieve this, the initial step involves simulating the plasma parameters (density, electronic temperature, plasma potential, etc.) in the absence of nanoparticles. Subsequently, we will integrate the nanoparticles into the model, taking into consideration the fact that these particles become electrically charged within the plasma [2]. This charge is contingent upon the plasma parameters and, in turn, influences the surrounding plasma, resulting in a strong coupling of the equations. Once this coupling is established, we will proceed to calculate the various forces acting on the nanoparticles [3,4]. This analysis will enable us to define their distribution and dynamics within the plasma.

To simulate a dusty radio-frequency argon discharge within a CCP reactor with dimensions following the PKE-Nefedov configuration [5], we will employ one- and two-dimensional fluid models using the COMSOL Multiphysics® software. In this model, we will calculate key quantities such as fluxes, densities, and electric fields. The results obtained from this simulation are presented in the figures below and compared to the findings of Akdim et al. [2,3]. Remarkably, a high level of agreement exists between the two sets of results.

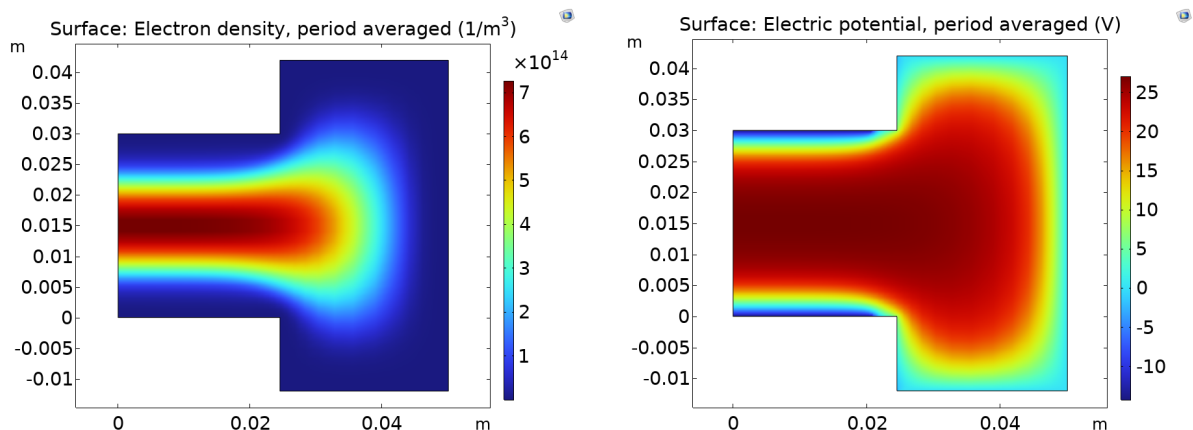


Figure 1 : 2 D results

References

- [1] J. Beckers et al., "Physics and applications of dusty plasmas: The perspectives 2023", to be published, *Phys. Plasmas* (2023)
- [2] M.R. Akdim and W.J. Goedheer, "Modelling of voids in colloidal plasma", *Phys. Rev. E*, **65**, 015401(R) (2002)
- [3] M.R. Akdim and W.J. Goedheer, "Modeling the effect of dust on the plasma parameters in a dusty argon discharge under microgravity" *Phys. Rev. E* **67**, 066407 (2003)
- [4] M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi, "Dusty Plasmas: Synthesis, Structure and Dynamics of a Dust Cloud in a Plasma", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **49**, 13106 (2010)
- [5] A.P. Nefedov et al., "PKE–Nefedov: plasma crystal experiments on the International Space Station", *New J. Phys.* **5**, 33 (2003)

Status: doc1

Study of Glow and RF discharges in CO₂/H₂ mixtures

S. Bravo¹, D. Sadi¹, E. Baratte¹, O. Guaitella¹

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

mél: sophie.bravo@lpp.polytechnique.fr

The study of Non Thermal Plasmas in CO₂/H₂ mixtures is particularly interesting because of its importance in methanation [1]. To achieve high yield of CH₄ production, these plasmas are usually coupled with catalytic surfaces. The chemistry induced in such system is complex and many unknowns remain to identify the main chemical paths. In order to better understand the thermal and chemical kinetics in continuous and pulsed discharge regimes on CO₂/H₂ plasmas, 2 different setups dedicated to fundamental studies have been designed to allow time resolved *in situ* measurements of molecular densities but also gas and vibrational temperature as well as electric field in order to constraint OD kinetic models.

The first one is an homogenous glow discharge flushed with a 7.4sccm gas flow at a few mbar (from ~0.5 to 6.6 mbar). The homogeneity of the positive column allow for line of sight integrated measurements such as infrared absorption to determine molecular densities as well as rotational and vibrational temperatures in the plasma. Moreover the electric field can be simply determined with two floating potential probes, which provides the E/N values taking into account the gas temperature. This setup is already very informative but the chemical conversion is partially influenced by the renewal of the gas due to the gas flow.

A complementary experiment is performed with the second setup, so called "Building Up" experiment which is a pulsed RF plasma discharge in CO₂/H₂ mixtures in a closed reactor (without any gas flow). Trains of consecutive RF plasma pulses are ignited while the evolution of IR-active molecules densities are monitored by infra-red absorption. This configuration allow to follow the time dependence of the gas composition from the initial mixture until all the CO₂ and H₂ dissociation reactions reach a steady-state being compensated by back-reaction mechanisms [2]. Playing with the plasma pulse duration and frequency (duty cycle ratio) allows investigating the influence of processes with different characteristic times on the chemical paths. A typical result of this type of experiment is given on figure 1, showing the evolution of molecular densities as a function of the total plasma ON time which is the sum of the duration of all the plasma pulses of 5 ms. From an initial mixture of 87% CO₂ and 13% H₂, mostly CO and H₂O are being produced within a few seconds of plasma at 40W (about 20W really transferred to the gas). This setup gives a full picture of the chemical kinetics but contrary to the glow discharge, the gas temperature and electric field are more difficult to determine.

The combination of these two complementary experimental approaches will provide a unique set of data to constraint OD kinetic model developed with Loki Boltzmann solver.

Références

- [1] E. Baratte, An experimental and numerical investigation of the fundamental mechanisms in CO₂-CH₄ plasmas, p. 9 (2023)
- [2] A. Morillo Candas, Investigation of fundamental mechanisms of CO₂ plasmas, p. 151 (2019)

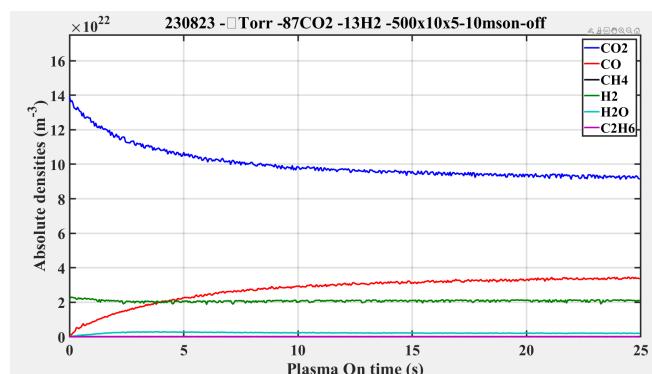


Figure 1: Time evolution of molecular densities as function of total plasma ON time (= sum of all 5ms RF plasma pulses) during a typical so called "Building Up" experiment at 5 Torr

Statut :Doc1

Study of III-V thin films growth directly on silicon by remote-plasma CVD for a reduction in solar cell industrialisation costs

Lise Watrin^{1,2}, François Silva², Cyril Jadaud², Pavel Bulkin², Jean-Charles Vanel², Erik V. Johnson², Karim Ouaras², and Pere Roca i Cabarrocas^{1,2}.

¹*Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF), 18 Bvd Thomas Gobert, 91120, Palaiseau, France*

²*LPICM, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, route de Saclay, 91128, Palaiseau, France*

mail: lise.watrin@ipvf.fr

Solar cells based on III-V materials have reached the highest efficiency of any technology available today, i.e. up to 47% under concentration [1]. Nevertheless, their cost is a hundred times higher than that of c-Si solar cells [2]. Most of this cost difference comes from i) the substrate required to grow a single crystal layer and ii) the growth process. In a recent project we have shown how the use of a virtual substrate can tackle the first part of the challenge [3]. In this work, we address the second one.

To this end, we have developed a new strategy for the epitaxial growth of III-V thin films by using Remote-Plasma Chemical Vapor Deposition (RPCVD) technique. Indeed, plasma use allows us to work at lower temperatures thus reducing thermal stresses and hopefully defects, especially the risks of dislocations. Moreover, this process enables low pressure operation, which reduces drastically the precursor consumption when compared to classical Metal Organic CVD (MOCVD). Some works showing the feasibility of such an approach were published in the 1980s [4] and the subject is again attracting interest [5] due to the strong growth of the photovoltaic market.

Recently, we have shown that it is possible to grow gallium nitride (GaN) films by RPCVD at rather low temperature (500°C). By tuning the deposition conditions, thanks to a large number of parameters such as precursor flow rates, plasma power, chamber pressure, substrate and trimethylgallium bubbler temperatures, we were able to grow GaN layers directly on silicon substrates. An Optical Emission Spectroscopy (OES) study was carried out in order to qualify the ICP plasma source of the reactor. The obtained thin films show columnar grain structure and uniform Ga and N depth profiles with Ga/N ratio close to 1:1. The crystalline quality is promising with a growth really oriented along the c-axis of the wurtzite structure. An arsine line has been recently added to the RPCVD reactor in order to move on to the study of GaAs growth.

Our preliminary results raise the prospects of a more affordable method for the growth of III-V materials, with the potential to obtain large-scale epitaxial films, thus addressing the important issue of costs for III-V device industry.

References

- [1] JF Geisz et al. Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nat. Energy*. (2020). Volume 5, pp. 326-335.
- [2] B Smith et al. Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results. (2021).
- [3] M Ghosh et al. Ultrathin Ge epilayers on Si produced by low-temperature PECVD acting as virtual substrates for III-V/c-Si tandem solar cells. *Sol. Energy Mater Sol. Cells* (2022). Volume 236,111535.
- [4] KP Pande et al. Low Temperature Plasma-Enhanced Epitaxy of GaAs. *J Solid State Sci Technol*. (1984). Volume 131, 1357.
- [5] AV Uvarov et al. J. Low temperature epitaxial growth of GaP on Si by atomic-layer deposition with plasma activation. *Phys. D: Appl. Phys.* (2020). Volume 53, 345105.

Statut : Doctorant fin 2^{ème} année

Water decontamination using a plasma-in-liquid technique, application to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) treatment

R. Prastiko, A. Vega-Gonzalez, and X. Duten

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

mél: rendy.prastiko@lspm.cnrs.fr

Hundreds of everyday products from non-stick cookware, cosmetics, cleaning products, food packaging, and many others are made with highly toxic chemicals called PFAS. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are a large family of fluorinated organic anthropogenic chemicals that are resistant to degradation in the natural environment due to their stability and strength of the C-F bonds, the strongest covalent bond in organic chemistry [1]. The massive use and non-degradable properties of these “forever chemicals” have not only resulted in contamination in the environment such as surface water, seawater, groundwater, and potable water but also human health issues. Thus, the European Union has set a directive for drinking water at 0.1 µg/L for the sum of 20 PFAS and 0.5 µg/L for total PFAS. Today, non-thermal plasma has been deemed an eco-friendly alternative technology in wastewater treatment. Non-thermal plasma can generate many reactive chemical species like reactive oxygen species (ROS) such as H₂O₂ and O₃, reactive nitrogen species (RNS) such as peroxyxynitrite and peroxyxynitrate, radicals H•, O•, OH•, NO•, NO₂•, as well as hydrated electrons [2]. Thus, the objective of this research is to use the interaction of non-thermal plasma with liquids for the treatment of PFAS-polluted waters, taking advantage of the possibilities offered by this technology of allowing rather complex chemistry, while limiting the use of solvents and other chemical products. It is especially this last point which justifies the adoption of this technique for PFAS degradation, a water pollution which constitutes a worldwide public health emergency.

Références

[1] D. O'Hagan, Chem. Soc. Rev. 37, 308 (2008)

[2] C. A. Aggelopoulos, J. Chem. Eng. 428, 131657 (2022)

Statut : doc1

Fluorescence induite par absorption laser à deux photons (TALIF) de l'iode atomique

B. Esteves¹, C. Blondel¹, P. Chabert¹, C. Drag¹,

¹Laboratoire de Physique des Plasmas (UMR 7648), Centre national de la recherche scientifique, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Observatoire de Paris, École polytechnique, Institut polytechnique de Paris, route de Saclay, F-91128 Palaiseau cedex, France
mél: cyril.drag@lpp.polytechnique.fr

Afin de perfectionner l'utilisation de l'iode, au lieu du xénon, dans les propulseurs à plasmas, une expérience de fluorescence induite par absorption laser à deux photons (TALIF) de l'iode atomique a été mise en place [1]. La spectroscopie à deux photons sans effet Doppler, vers les niveaux $(^3P_2)6p^2[1]_{3/2}^o$ et $(^3P_2)6p^2[3]_{7/2}^o$, a confirmé que les intensités relatives des composantes hyperfines suivent les règles générales bien connues de la spectroscopie à deux photons, ce qui permet de dissocier la structure hyperfine du ^{127}I de l'élargissement Doppler (cf. Fig. 1). Malgré la masse relativement lourde de l'atome d'iode, des mesures précises de la température ont été réalisées, pour la première fois dans un plasma d'iode.

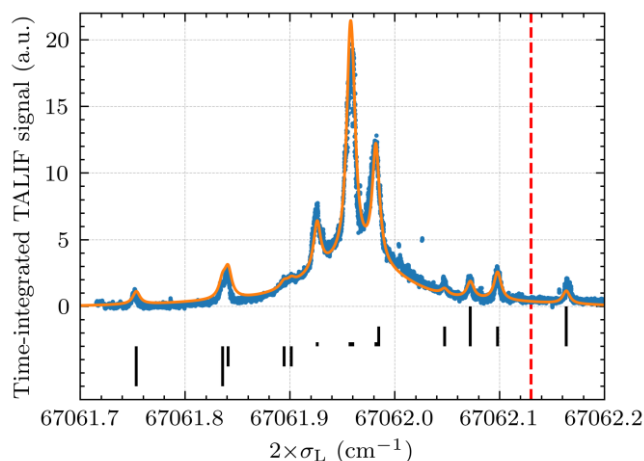


Figure 1 : Spectre de fluorescence sans effet Doppler, après excitation à 2 photons du $(^3P_2)6p^2[1]_{3/2}^o$ avec les 14 composantes hyperfines ($I=5/2$). Le seul paramètre d'ajustement libre est le rapport d'excitation isotrope/quadrupole. La position moyenne attendue de la transition est représentée par une ligne verticale rouge en pointillés. Les mesures TALIF suggèrent une révision des énergies de tous les niveaux excités de I, dans la table du NIST (la précision est de $\pm 0,005 \text{ cm}^{-1}$, de $0,169(11) \text{ cm}^{-1}$ [1].

En utilisant un laser pulsé nanoseconde injecté [2], dont le triplement de fréquence a fourni le rayonnement d'environ 300 nm utilisé pour l'excitation, les mesures de l'énergie absolue des niveaux excités à deux photons ont révélé que tous les niveaux d'énergie supérieurs de I I doivent être révisés à la baisse, de $-0,169(11) \text{ cm}^{-1}$, ce qui éloigne chaque niveau d'énergie de sa valeur actuellement tabulée de plus de trente fois la barre d'incertitude actuellement admise.

La durée de vie radiative du niveau $(^3P_2)6p^2[1]_{3/2}^o$ a également été mesurée et déterminée à $35,5(9) \text{ ns}$, ce qui semble cohérent avec les $32,5(1,2) \text{ ns}$ prévus par les calculs les plus récents [3].

Références

- [1] B. Esteves & al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **56**, 055002 (2023)
- [2] P. Lottigier & al., *Applied Phys. B* **125**, 1 (2019)
- [3] D. Filin & al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **53**, 145003 (2000)

Statut : permanent

Profils de raies en spectroscopie d'émission optique appliqués au diagnostic de micro-plasmas

S. Iseni¹, E. Kouadou¹, T. Nishime², T. Gerling² et R. Dussart¹

¹ Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés (GREMI) — UMR7344 CNRS / Université d'Orléans, 14 rue d'Issoudun, BP6744, 45067 Orléans, France.

² Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP), Felix-Hausdorff-Str. 2, 17489 Greifswald, Germany.

Auteur de correspondance : sylvain.iseni@univ-orleans.fr

La spectroscopie d'émission optique (OES) apparaît *souvent* comme une méthode de choix pour l'étude expérimentale des décharges —principalement grâce à sa nature non intrusive du milieu sondé. Qui plus est, le spectre de rayonnement d'un plasma peut être regardé comme une véritable signature des processus élémentaires qui gouvernent ce dernier. Néanmoins, l'information est souvent —voire quasiment— inaccessible lors de l'analyse tant la manifestation optique de chaque phénomène peuvent être confondue. La réalisation se complexifie davantage lorsque l'on s'intéresse à des sources de type micro-plasmas et pourtant, l'OES reste pour ainsi dire une des approches les plus favorables du fait de l'échelle submillimétrique.

Cette affiche présentera quelques exemples de mise en application de l'OES à très haute résolution spectrale et spatiale. Les décharges utilisées sont de types micro-décharge à cathode creuse (MHCD) fabriquée sur silicium (1) ainsi que d'un jet micro-plasma (2) —avec ou sans coflow— destinée à des applications endoscopiques. L'analyse des profils de raies atomiques et de bandes moléculaires rotationnelles permettront de remonter à différents paramètres de la décharge moyennant les hypothèses qui seront également discutées.

- La température des neutres (ou du gaz) sera estimée à partir de l'analyse des spectres rotationnels de N₂(C-B) et de OH(A-X). Ces résultats seront comparés avec des valeurs obtenues par l'analyse de raie résonnantes (1). Des profils de températures à l'échelle micrométrique seront par ailleurs présentés.
- Les forces électrohydrodynamiques - vents ioniques - et / ou la fraction molaire d'impureté diffusant dans un écoulement seront évaluées par l'intermédiaire de raies résonnantes (3).
- Le champ électrique et la densité électronique seront aussi déduites à partir de profils de Stark. Les limitations (4) ainsi que des interrogations sur l'analyse de l'effet Stark basée sur des résultats expérimentaux seront discutés. La possibilité de mesures de densité électronique inférieure à $1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ sera illustrée à partir de profils de Stark de H _{β} .

Références

1. S. Iseni *et al.*, en, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 065003, ISSN : 0963-0252 (mai 2019).
2. J. Winter *et al.*, en, *J. Phys. D : Appl. Phys.* **52**, 024005, ISSN : 0022-3727 (nov. 2018).
3. S. Iseni, C. Pichard, A. Khacef, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 034102, ISSN : 0003-6951 (juill. 2019).
4. N. Konjevic, M. Ivkovic, N. Sakan, *Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy* **76**, 16-26, ISSN : 0584-8547 (oct. 2012).

Statut : Chargé de Recherche

Work function measurements of materials exposed to hydrogen plasmas, correlation with the negative ion surface production efficiency

J-M Layet¹, R.Magee³, T.Gans⁵, J.Dedrick³, M.Sasao², H.Nakao⁴, J.P Broude Garcia¹,
M.Minissale¹ G. Cartry¹

¹PIIM, UMR 6633, Aix-Marseille University -CNRS Centre de St Jérôme, case 241,
13397 Marseille Cedex 20, France

² Organization for research initiatives and development, Doshisha University Kyoto 602
85-80 Kyoto

³ York Plasma Institute, Dept of Physics, University of York, Heslington, York, YO105DD, UK.

⁴ NIFS Toki, Japan and Grad.School of Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

⁵ National Centre for Plasma Science and Technology, Dublin City University, Ireland

jean-marc.layet@univ-amu.fr

This work deals with the production of negative-ions on HOPG, C12A7 electride and other materials surfaces exposed to low pressure hydrogen (H) or deuterium (D) plasmas (P=2Pa) [1]. The aim is to enable the development of cesium-free negative-ion sources, which would be valuable for many applications, microelectronics processing, ions thrusters and neutral beam injectors for future nuclear fusion reactors.

Negative-ion surface production in plasma is relying on the backscattering of an incoming hydrogen particle or the sputtering of an adsorbed one, together with the capture of an electron on the surface. The surface ionization probability describes the probability that a backscattered or a sputtered hydrogen particle is negatively ionized.

This probability is strongly depending on the surface work-function for metallic surfaces and on the ionization energy and gap width for semi-conductive or insulating surfaces. The present work is devoted to study the negative ion formation (H⁻, D⁻) at the surface of different materials in correlation with the evolution of their surface electronic properties upon hydrogen (Deuterium)t plasma exposure. For this purpose, we have developed a photoemission yield spectroscopy (PYS) original diagnostic that allows us to measure in-situ the ionisation energy after plasma exposure. We combine PYS and the Fowler method to determine the insulating or metallic character of plasma-exposed HOPG, Diamond, C12A7 electride and Gadolinium. We show that the surface electronic properties strongly evolve as a function of the plasma exposure experimental conditions (positive ion energy, surface temperature...) and correlate those changes with the evolution of the negative-ion yields.

Références

[1] Sasao, R. Moussaoui, D. Kogut, J. Ellis, G. Cartry, M. Wada, K. Tsumori, and H. Hosono. Negative-hydrogen-ion production from a nanoporous 12CaO⁷Al₂O₃ electride surface. Applied Physics Express, 11(6), 2018. ISSN 18820786. doi:[10.7567/APEX.11.066201](https://doi.org/10.7567/APEX.11.066201).

Permanent

Using evaporation to create hydrophobic coating

A. Lefèvre¹, M. Soobaroyen¹

¹Bronkhorst France - Montigny les Cormeilles (France)

Empa, a Swiss Federal Laboratory for Materials Science and Technology, uses a Bronkhorst evaporation system named CEM (Controlled Evaporation & Mixing) in their quest to develop hydrophobic coatings for water-repellent fabric. Empa uses plasma polymerization to deposit thin layers on top of fabrics and fibers.

The vacuum polymerization process at Empa activates the HMDSO ($C_6H_{18}OSi_2$). The primary objective is to polymerize and deposit the vapor onto the surface of the fiber. To achieve a stable flow of the polymer precursor vapor, precise control is required for both the liquid HMDSO flow and the carrier gas flow. The HMDSO vapor is introduced into the plasma chamber at defined flow rates, where higher rates facilitate rapid deposition and processing.

In this process, liquid HMDSO is supplied from a pressurised vessels at ambient temperature, and the flow rate is measured and controlled by a mass LFC combined to a mixing valve. This valve mix also the liquid HMDSO with the carrier gas Argon, coming from a MFC. The mixed fluid is instantly evaporate due to a heat exchanger, enabling the liquid phase to change to the vapour phase.

Empa achieves a higher gas yield of 50 ml/min compared to the previous bubbler system, which only allowed 4-5 ml/min of gas flow and the flow of HMDSO liquid has been increased. The results demonstrate a very stable, precise and efficiently regulated vapour flow. This setup enables polysiloxane coatings at low temperatures, making it suitable for coating textile fibers that cannot withstand high temperatures.

Empa's efforts to conduct plasma polymerization at low-pressure aim to increase production yield by facilitating heterogeneous deposition on the fiber's surface and reducing the amount of chemicals involved.

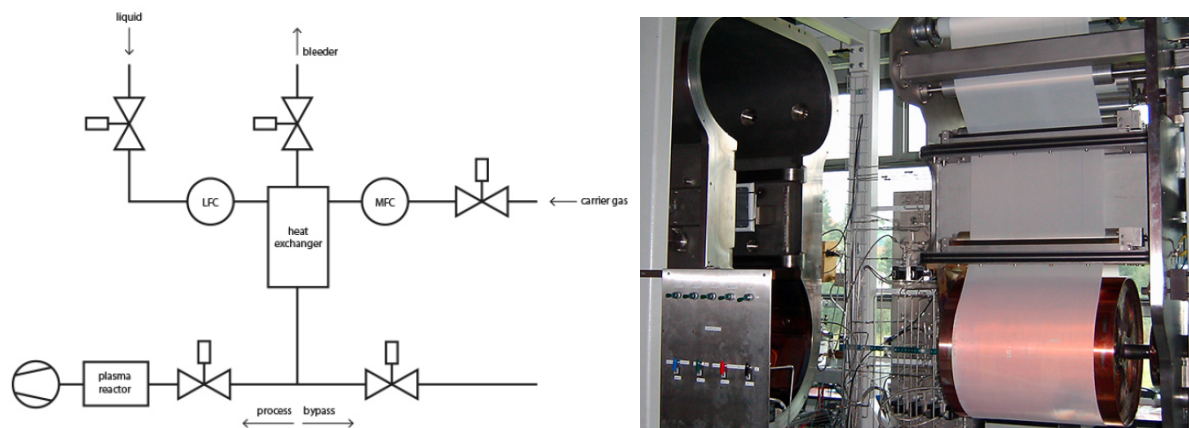


Figure 1. (a) Flow scheme showing CEM evaporation system, (b) Plasma Coating

Acknowledgement to EMPA, Bronkhorst SW and Bronkhorst High-Tech.

References

Bronkhorst Application note A078.

Liste des auteurs

A

Agha Yanis	48, 56
Al Zayed Zeina	49
Amans David	24
Awaji Majed	52

B

Bajon Corentin	33, 54
Baquero-Ruiz Marcelo	60
Baratte Edmond	22, 33, 65
Barleon Nicolas	49
Barros Noemi	47
Batiot Dupeyrat Catherine	49
Belmahi Mohammed	52
Belmonte Thierry	52
Blondel Christophe	68
Boeuf Jean-Pierre	16
Boivin Dimitri	55
Boubert Pascal	59
Braut Adrien	59
Braut Pascal	53, 55
Bravo Sophie	22, 65
Brisset Alexandra	39
Brochard Frédéric	29, 58
Broude Juan Pablo	70
Bulkin Pavel	66
Bultel Arnaud	46

C

Caillard Amael	55
Cardinaud Christophe	63
Cartry Gilles	70
Cessou Armelle	23
Chabert Pascal	17, 68
Cheng Lionel	49
Chouchene Sarah	58
Chérigier-Kovacic Laurence	45
Clady Raphaël	28
Cuynet Stéphane	43

D

Dap Simon	33
De Poucques Ludovic	43
Dedrick James	70
Delavière-Delion Quentin	62
Despiau-Pujo Emilie	32
Djurović Stevica	46
Dolique Vincent	42
Drag Cyril	68
Duluard Corinne	56
Dupeyrat Catherine	30

Dussart Rémi	69
--------------------	----

E

Escarguel Alexandre	45
Esteves Benjamin	68
Ettouri Rim	37

F

Favre Aurélien	46
Fernández-González Veronica	45
Ferri Sandrine	45
Ferré Amélie	28
Fouillé Elodie	30, 49
Freton Pierre	21
Fubiani Gwenael	62
Furno Ivo	60

G

Gaboriau Freddy	62
Gambari Mathieu	28
Gans Timo	70
Garcia Soto Carolina	22
Gazeli Kristaq	36, 48, 56
Gerling Torsten	69
Gimenez Loic	55
Girard Aurélie	63
Glénat Hervé	47
Gonzalez Jean-Jacques	21
Gosse Léo	46
Gries Thomas	52
Guaitella Olivier	22, 33, 65
Guerra Vasco	22
Guittienne Philippe	60

H

Hassouni Khaled	48, 53, 56
Hellé Arthur	58
Henrion Gérard	20
Herbelot Julien	45
Howling Alan	60
Hugon Robert	58

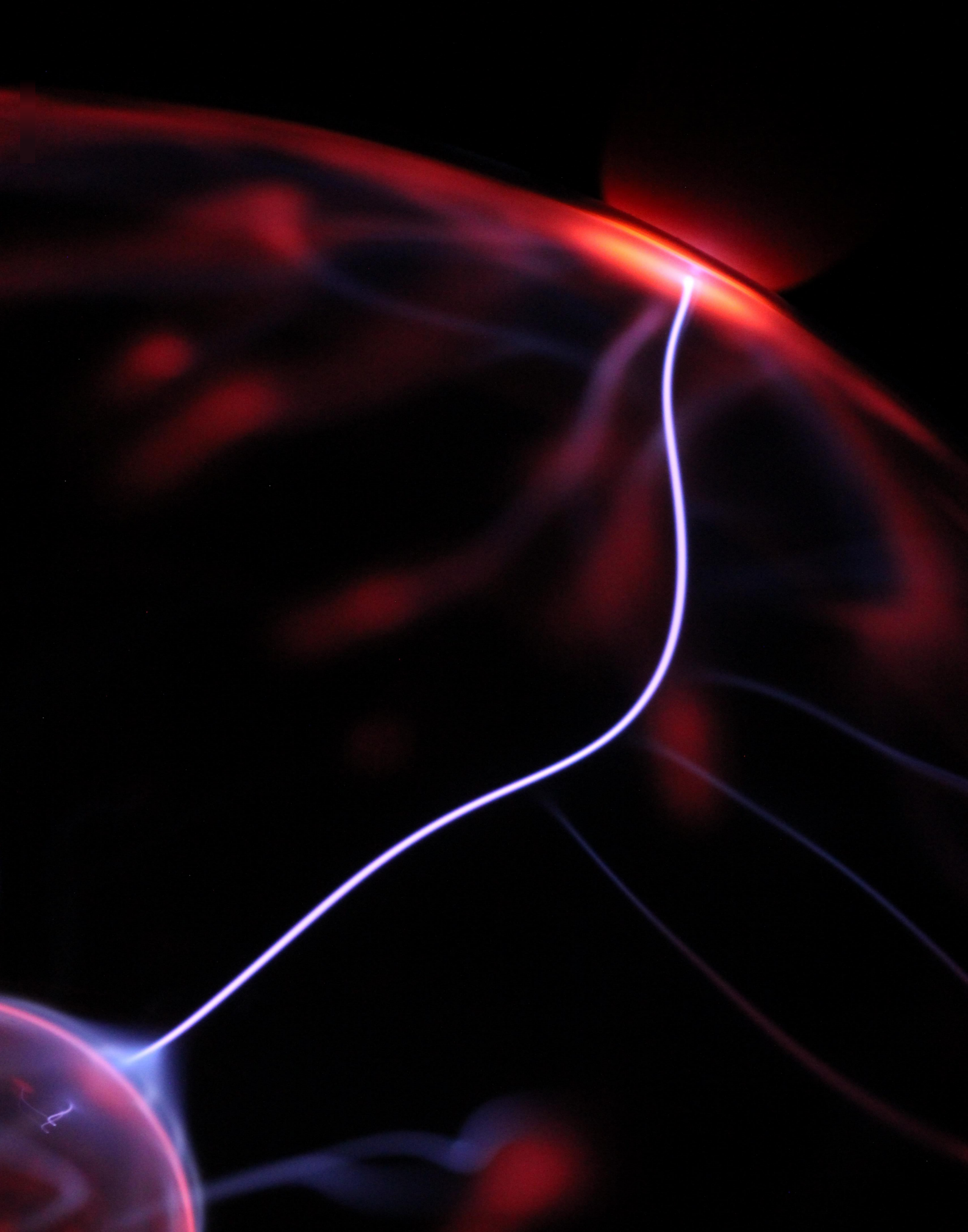
I

Ibrahim Sarah	55
Invernizzi Laurent	48, 56
Iséni Sylvain	69

J

Jacquier Remy	60
Jadaud Cyril	66
Jean-Marie-Desiree Ronny	43

K		
Kouadou Elane	.....	69
L		
Lahoud Chawki	.....	64
Layet Jean-Marc	.....	70
Lefèvre Aurélien	.....	71
Lesage Morgan	.....	59
Lombardi Guillaume	.....	48, 56
M		
Magee Ryan	.....	70
Mannequin Cédric	.....	63
Marcos Gregory	.....	58
Massines Francoise	.....	47
Mbouja Signe Tatiana Chancelle	.....	63
Menacer Belkacem	.....	57
Michau Armelle	.....	53
Mikikian Maxime	.....	53, 64
Minesi Nicolas	.....	38
Minissalle Marco	.....	70
Morel Vincent	.....	46
N		
Najah Aymane	.....	43
Nakao Hisashi	.....	70
Naudé Nicolas	.....	33
Nishime Thalita M. C.	.....	69
Noel Cédric	.....	52
O		
Otakandza Kandjani Glenn Christopher	....	53
Ouaras Karim	.....	66
Oueslati Hanan	.....	49
P		
Pagaud Francis	.....	42
Penaud Théo	.....	55
Pentecoste Lucile	.....	52
Perdrau Alexandre	.....	47
Peyrichon Guillaume	.....	49
Peyrusse Olivier	.....	28
Plihon Nicolas	.....	42
Plujat Béatrice	.....	47
Prasanna Swaminathan	.....	56
Prastiko Rendy	.....	67
Q		
Quigley Patrick	.....	60
R		
Rasoanarivo Tojo	.....	37, 44
Rhallabi Ahmed	.....	37
Rincón Rocio	.....	47
Robin Vincent	.....	49
Roca I Cabarrocas Pere	.....	66
Rossignol Sylvie	.....	49
S		
Saab Ghina	.....	64
Saadana Mohamed	.....	49
Sadi Dihya	.....	22, 33, 65
Sasao Mamiko	.....	70
Saugé Louis	.....	61
Schweitzer Patrick	.....	58
Sentis Marc	.....	28
Sepulchre Cyrille	.....	60
Siby Abdoulaye	.....	48, 56
Silva François	.....	66
Silva Tiago	.....	22
Soobaroyen Mickaël	.....	71
Stefas Dimitrios	.....	48, 56
Stolidi Adrien	.....	28
Swaminathan Prasanna	.....	48
T		
Thomann Anne-Lise	.....	55
U		
Utéza Olivier	.....	28
V		
V. Johnson Erik	.....	66
Vanel Jean-Charles	.....	66
Videau Laurent	.....	28
Vincent Simon	.....	60
W		
Watrin Lise	.....	66
Y		
Youssef Sami	.....	64
Z		
Zaepffel Clement	.....	31



EDR Groupement
de recherche

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