

**ETUDE DU COUPLAGE ENTRE PLASMA ET ÉCOULEMENT DANS DES JETS DE PLASMA FROID À
PRESSION ATMOSPHÉRIQUE****STUDY OF THE COUPLING BETWEEN PLASMA AND FLOW IN COLD PLASMA JETS AT
ATMOSPHERIC PRESSURE****Etablissement** Université Paris-Saclay GS Physique**École doctorale** Ondes et Matière**Spécialité** Physique**Domaine Scientifique** Physique**Unité de recherche** Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas**Encadrement de la thèse** Stéphane PASQUIERS**Co-Encadrant** Joao SANTOS SOUSA**Financement** du 01-10-2026 au 30-09-2029 *origine* Concours EDOM *Employeur* Université Paris-Saclay**Début de la thèse le** 1 octobre 2026**Date limite de candidature (à 23h59)** 30 avril 2026**Mots clés - Keywords**

physique des plasmas froids, plasma froid en régime impulsif, électro-hydrodynamique, instabilités hydrodynamiques, Spectroscopie d'émission et d'absorption, strioscopie

Physics of cold plasmas, Pulsed Cold Plasmas, Electro-hydrodynamics, Hydrodynamic instabilities, Emission and absorption spectroscopy, Schlieren imaging

Description de la problématique de recherche - Project description

Les jets de plasma froid à pression atmosphérique sont des dispositifs offrant une grande diversité d'applications : biomédicales [1],[2], traitements de surfaces et synthèses de nanomatériaux [3],[4]. Cette diversité d'applications repose essentiellement sur leur capacité à pouvoir propager du plasma à distance de la zone de génération inter-électrodes et à produire, par voies hors équilibre thermodynamique, une grande variété d'espèces réactives. La simplicité de conception de ces dispositifs contraste avec la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Le plasma se propage selon un mécanisme d'onde d'ionisation. Le front concentre une densité importante d'électrons (entre 10^{13} et 10^{14} cm⁻³) chauds (quelques 104 K) avec un fort champ électrique local de charge d'espace (quelques 10 kV/cm), sur des diamètres typiques de quelques centaines de microns. Il peut ainsi se propager à distance de la zone de génération inter-électrode (jusqu'à quelques dizaines de centimètres) à des vitesses de l'ordre de 10^6 - 10^7 cm/s et laisse dans son sillage une colonne plasma conductrice. Les espèces réactives se forment dans la partie du jet se mélangeant à l'air environnant, à température ambiante. La détermination expérimentale des paramètres physiques liés (densité électronique, champ électrique, densité des espèces réactives) reste difficile, puisque les mesures doivent allier bonnes résolutions spatiale et temporelle tout en étant non intrusives. Les diagnostics optiques (spectroscopie d'émission et d'absorption [5],[6],[7],[8],[9], diffusion Thomson [10]) sont des outils privilégiés.

A cela s'ajoute une strate de difficulté supplémentaire. En effet, nous avons montré que l'initiation du plasma n'est pas sans influence sur la structure de l'écoulement [11]. La génération d'une seule décharge est suffisante pour faire éclater la zone laminaire du jet et entraver la propagation des décharges suivantes, jusqu'à ce que la perturbation soit évacuée par l'écoulement. La question des effets mémoires entre chaque impulsion de tension n'est donc plus uniquement réduite aux charges électriques déposées sur la paroi du capillaire, mais s'élargit donc aussi à la relaxation mécanique de l'écoulement, après le claquage ultra-rapide de la décharge. Ce couplage s'opère donc à travers 6 ordres de grandeurs (de la nanoseconde à la milliseconde). Lorsque les décharges sont générées de façon répétitive, nous avons déjà observé que pour certains couples débit-fréquence, l'écoulement est fortement affecté. Le plasma présente alors des régularités spatiales stationnaires, avec des motifs hélicoïdaux stables. Le contrôle de l'écoulement est un véritable défi de compréhension fondamentale avec des retombées applicatives fortes, puisque le degré de mélange entre le gaz rare et l'air ambiant influence directement la production des espèces réactives.

Ce couplage entre plasma et écoulement présente des analogies avec ce qui est décrit dans la communauté du contrôle d'écoulement par décharge à barrière diélectrique de surface. Dans la communauté des jets de plasma froid, devoir « accorder » plasma et écoulement

apporte un éclairage nouveau et amène à repenser la façon dont nous devons aborder les diagnostics, en lien avec les instabilités hydrodynamiques forcées par l'initiation du plasma. De nombreux points restent à étudier expérimentalement, notamment la mesure des paramètres clés du plasma au niveau des zones perturbées, tenant compte des spécificités de la géométrie d'injection du gaz. La thèse récemment soutenue [12] a permis de développer en collaboration un premier modèle numérique sur cet interaction plasma-écoulement. Ce socle commun collaboratif permettra d'affiner notre compréhension des phénomènes mis en jeux par de futurs travaux, entre les modèles numériques développés à l'IPFN (IST Lisbonne) et les diagnostics expérimentaux au LPGP.

Cold plasma jets at atmospheric pressure are devices offering a wide range of applications: biomedical [1],[2], surface treatments and nanomaterial synthesis [3],[4]. This diversity of applications is primarily based on their ability to propagate plasma away from the inter-electrode generation zone and to produce a wide variety of reactive species through non-equilibrium thermodynamic processes. The simplicity of their design contrasts with the complexity of the physical phenomena involved.

Plasma propagates via an ionization wave mechanism. The front of this wave concentrates a high density of hot electrons (between 10^{13} and 10^{14} cm^{-3}) with temperatures of a few 10^4 K and a strong local space-charge electric field (a few tens of kV/cm) over a typical diameter of a few hundred microns. As a result, it can propagate away from the inter-electrode generation zone (up to a few tens of centimeters) at speeds on the order of 10^6 – 10^7 cm/s, leaving behind a conductive plasma column. Reactive species are formed in the region of the jet that mixes with the surrounding air at ambient temperature. Experimentally determining the associated physical parameters (electron density, electric field, and reactive species density) remains challenging, as measurements must combine good spatial and temporal resolution while being non-intrusive. Optical diagnostics (emission and absorption spectroscopy [5],[6],[7],[8],[9], Thomson scattering [10]) are preferred tools for these investigations.

An additional layer of complexity arises from the fact that plasma initiation influences the flow structure [11]. The generation of a single discharge is sufficient to disrupt the laminar region of the jet and hinder the propagation of subsequent discharges until the perturbation is carried away by the flow. Thus, memory effects between successive voltage pulses are no longer solely limited to the electric charges deposited on the capillary wall; they also extend to the mechanical relaxation of the flow following the ultrafast breakdown of the discharge. This coupling spans six orders of magnitude in time (from nanoseconds to milliseconds). When discharges are generated repetitively, we have observed that for certain flow rate–frequency pairs, the flow is significantly affected. The plasma then exhibits stationary spatial regularities, with stable helical patterns. Understanding and controlling the flow is a major fundamental challenge with strong applied implications, as the degree of mixing between the rare gas and ambient air directly influences the production of reactive species. This coupling between plasma and flow has analogies with what is described in the field of flow control by surface dielectric barrier discharge. In the cold plasma jet research community, the need to 'tune' the plasma and the flow provides new insight and leads to a reconsideration of how diagnostics should be approached, in relation to the hydrodynamic instabilities induced by plasma initiation. Many aspects still need to be studied experimentally, particularly the measurement of key plasma parameters in disturbed regions, taking into account the specificities of the gas injection geometry. The recently defended thesis [12] has enabled the collaborative development of an initial numerical model of plasma-flow interaction. This collaborative foundation will allow for a refined understanding of the underlying phenomena in future work, combining numerical models developed at IPFN (IST Lisbon) with experimental diagnostics at LPGP.

Thématique / Domaine / Contexte

physique expérimentale des plasmas froids

physique des plasmas froids, mécanique des fluides

Des travaux préliminaires, dans le cadre d'un contrat postdoctoral, ont déjà permis de mettre en place un banc de striescopie de forte sensibilité, de concevoir une nouvelle méthode de visualisation de l'écoulement par la propagation du plasma et de mettre en évidence un mécanisme de forçage de l'écoulement par l'initiation répétée du plasma [11]. Ce sujet a ensuite fait l'objet d'une thèse en co-tutelle avec l'IPFN de l'IST à Lisbonne [12] (équipe N-PRIME du Professeur Luís Lemos Alves), ce qui a notamment permis le développement d'un premier modèle numérique de la modification de l'écoulement par plasma. Ce sujet d'étude a également fait l'objet de 3 stages de niveau de L3 (2 étudiants du magistère de physique fondamentale de la Faculté des Sciences d'Orsay, 1 étudiant de l'ENS Paris-Saclay) et d'un stage de niveau M2 (1 étudiant du M2 PPF). Plusieurs articles sont actuellement en cours de rédaction pour publication dans des revues internationales.

Objectifs

Le sujet de recherche proposé a pour but :

- d'étudier le mécanisme de couplage entre le plasma et l'écoulement du jet de gaz
- de faire évoluer le banc optique de striescopie en implémentant des méthodes quantitatives (BOS : Background Oriented Schlieren)
- de mesurer les grandeurs clés du plasma (densité électronique, température électronique) dans les zones perturbées de l'écoulement
- de quantifier l'impact de la modification de l'écoulement sur la production d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote

Méthode

Mesures de tension et de courant, imagerie ultra-rapide, diagnostics optiques (spectroscopie, strioscopie), diagnostics par laser (absorption, diffusion Thomson).

Résultats attendus - Expected results

Voir partie « Objectifs ».

Références bibliographiques

- [1] S. Reuter, T. Von Woedtke, and K.-D. Weltmann, "The kINPen—a review on physics and chemistry of the atmospheric pressure plasma jet and its applications," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 23, p. 233001, Jun. 2018, doi: 10.1088/1361-6463/aab3ad.
- [2] K. Sklias, J. Santos Sousa, and P.-M. Girard, "Role of Short- and Long-Lived Reactive Species on the Selectivity and Anti-Cancer Action of Plasma Treatment In Vitro," *Cancers*, vol. 13, no. 4, p. 615, Feb. 2021, doi: 10.3390/cancers13040615.
- [3] O. V. Penkov, M. Khadem, W.-S. Lim, and D.-E. Kim, "A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing," *J. Coat. Technol. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 225–235, Mar. 2015, doi: 10.1007/s11998-014-9638-z.
- [4] F. Fanelli and F. Fracassi, "Atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet technology: general features, specificities and applications in surface processing of materials," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 322, pp. 174–201, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.027.
- [5] J. S. Sousa, K. Niemi, L. J. Cox, Q. Th. Algwari, T. Gans, and D. O'Connell, "Cold atmospheric pressure plasma jets as sources of singlet delta oxygen for biomedical applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 12, p. 123302, Jun. 2011, doi: 10.1063/1.3601347.
- [6] C. Douat, I. Kacem, N. Sadeghi, G. Bauville, M. Fleury, and V. Puech, "Space-time resolved density of helium metastable atoms in a nanosecond pulsed plasma jet: influence of high voltage and pulse frequency," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 28, p. 285204, Jul. 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/28/285204.
- [7] T. Darny, J.-M. Pouvesle, V. Puech, C. Douat, S. Dozias, and E. Robert, "Analysis of conductive target influence in plasma jet experiments through helium metastable and electric field measurements," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 26, no. 4, p. 045008, Mar. 2017, doi: 10.1088/1361-6595/aa5b15.
- [8] K. Gazeli et al., "Ar(1s 5) absolute radial densities in a ns-pulsed argon plasma jet impinging on dielectric targets at floating potential - plasma action on organic molecules," *Plasma Process. Polym.*, vol. 15, no. 10, p. 1800080, Oct. 2018, doi: 10.1002/ppap.201800080.
- [9] K. Gazeli et al., "Effect of the gas flow rate on the spatiotemporal distribution of Ar(1s 5) absolute densities in a ns pulsed plasma jet impinging on a glass surface," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 27, no. 6, p. 065003, Jun. 2018, doi: 10.1088/1361-6595/aac5b3.
- [10] S. Hübner, J. S. Sousa, V. Puech, G. M. W. Kroesen, and N. Sadeghi, "Electron properties in an atmospheric helium plasma jet determined by Thomson scattering," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 43, p. 432001, Oct. 2014, doi: 10.1088/0022-3727/47/43/432001.
- [11] T. Darny, G. Bauville, M. Fleury, S. Pasquiers, and J. Santos Sousa, "Periodic forced flow in a nanosecond pulsed cold atmospheric pressure argon plasma jet," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 30, no. 10, p. 105021, Oct. 2021, doi: 10.1088/1361-6595/ac2a18.
- [12] D. Gonçalves, "Aerodynamic study of atmospheric-pressure plasma jets," Université Paris-Saclay & Instituto Superior Técnico (Université de Lisbonne), 2024.

Contexte du poste : Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant - Details on the thesis supervision

2ème co-encadrant: DARNY Thibault (124151)

Travail réalisé au LPGP, laboratoire soumis à la ZRR.

Candidat financé uniquement par le concours EDOM.

Le (la) doctorant(e) sera accueilli(e) dans l'équipe Dirébio du LPGP (J. Santos Sousa et collaborateurs) pour travailler sur les manipulations expérimentales et l'analyse de données, en collaboration avec l'équipe TMP-DS du LPGP (Th. Darny). Des réunions de travail régulières seront organisées.

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

Travail réalisé au LPGP, laboratoire soumis à la ZRR. Candidat financé uniquement par le concours EDOM.

Le (la) doctorant(e) sera accueilli(e) dans l'équipe Dirébio du LPGP (J. Santos Sousa et collaborateurs) pour travailler sur les manipulations expérimentales et l'analyse de données, en collaboration avec l'équipe TMP-DS du LPGP (Th. Darny). Des réunions de travail régulières seront organisées.

Ouverture Internationale

Portugal, Institute for Plasmas and Nuclear Fusion (IPFN) à Instituto Superior Técnico (IST) (Lisbonne).

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...

Publications des résultats dans des revues à comité de lecture et présentations en congrès nationaux et internationaux. Droits suivant les règles des laboratoires.

(Publication of results in peer-reviewed journals and presentations at international conferences. Rights of publication according to laboratory rules.)

Collaborations envisagées

Institute for Plasmas and Nuclear Fusion (IPFN) à Instituto Superior Técnico (IST) (Lisbonne).

Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

Niveau Master 2 dans le domaine de la physique des plasmas. Fort intérêt pour la physique expérimentale. Des connaissances de base en mécanique des fluides et en traitement d'images seront appréciées. Une bonne maîtrise de l'anglais parlé et écrit est souhaitable.

Master's level (M2) in the field of plasma physics. Strong interest in experimental physics. Basic knowledge of fluid mechanics and image processing would be appreciated. Good spoken and written English would be appreciated.

Dernière mise à jour le 5 janvier 2026