

## ETUDE PHYSIQUE DE DÉCHARGES DIFFUSES À TRÈS FORTES SURTENSIONS DANS DIFFÉRENTS MÉLANGES DE GAZ

### PHYSICAL STUDY ON THE ATMOSPHERIC DIFFUSE DISCHARGES UNDER EXTREME OVERVOLTAGES IN MULTICOMPONENT GASES

*Etablissement* **Université Paris-Saclay GS Physique**

*École doctorale* **Ondes et Matière**

*Spécialité* **Physique**

*Unité de recherche* **Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas**

*Encadrement de la thèse* **Pierre TARDIVEAU**

**Financement** du 05-09-2022 au 30-08-2024 *origine* **Demande d'un financement par le programme ADI 2022** *Employeur* **Université Paris-Saclay**

#### Cotutelle CHINE

*Début de la thèse le* **2 novembre 2022**

*Date limite de candidature (à 23h59)* **27 mai 2022**

#### Mots clés - Keywords

Plasmas froids, Décharges nanosecondes, Diagnostics Laser, Modélisation, Champ électrique, Electrons rapides

Cold plasmas, Nanosecond discharges, Laser diagnostics, Numerical modeling, Electric field, Fast electrons

#### Description de la problématique de recherche - Project description

Les décharges diffuses nanosecondes induites par des surtensions extrêmement élevées dans de courts intervalles gazeux sont un moyen important et relativement nouveau de produire des espèces actives à haute énergie dans un grand volume. Elles ont donc un grand potentiel dans leur application pour diverses applications comme la combustion assistée par plasma. L'application d'une impulsion de tension à temps de montée rapide de plusieurs dizaines de kilovolts par nanoseconde sur un court espace conduit à de forts champs électriques et à des électrons à haute énergie. Ceux-ci peuvent exciter et ioniser des atomes et des molécules à des niveaux d'énergie élevés dans un grand volume et montrer la capacité de faire de l'allumage multipoints. Cependant, les mécanismes inhérents à ces décharges atmosphériques nanosecondes dans divers gaz, en particulier les différents processus de réactivité chimique, le processus de photo-ionisation ou encore la création d'électrons runaway (RAE), sont très complexes et pas encore entièrement compris. Ce projet vise à acquérir de nouvelles connaissances sur ces mécanismes physiques dans les mélanges N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> en utilisant des modélisations du plasma combinées à des expériences et des diagnostics. Des mesures électriques et d'imagerie rapide seront réalisées pour étudier les caractéristiques des streamers induits. D'autres paramètres tels que la température du gaz, la distribution du champ électrique et l'évolution de la densité de différentes espèces seront obtenus grâce à des diagnostics spectraux. Un modèle fluide 2D et un modèle cinétique plasma 0D seront utilisés pour faire une comparaison directe avec les expériences, en particulier la densité d'espèces et l'évolution du champ électrique réduit (REF) en tenant compte de multiples réactions. En outre, en modifiant le modèle existant, un modèle de couplage multiphysique plasma-combustion sera établi de manière préliminaire, et la simulation des processus physiques pouvant conduire une décharge diffuse nanoseconde à assurer un processus de combustion efficace sera réalisée.

Short gap nanosecond diffuse discharge with extremely high overvoltage is an important way to produce high-energy active species in a large volume, thus it has great potential in the application of plasma-assisted combustion. The application of a steep rise time voltage pulse of tens of kilovolts per nanosecond on a short gap leads to strong electric fields and high energy electrons, which can excite and ionize atoms and molecules to high energy levels in a large volume and show the ability for a multi-point ignitions. However, the underlying mechanisms in the atmospheric short gap nanosecond discharges, especially its chemical process, photoionization process, run-away electrons(RAEs) in various gases, are very complex and not yet fully understood. This project aims to gain new insights into the physical mechanisms in atmospheric short gap nanosecond discharges in N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixtures using plasma modeling combined with experiments and

diagnostics. Experiments with electrical and fast imaging measurements will be done to investigate streamer characteristics. Other parameters such as gas temperature, electric field distribution, and species density evolution will be obtained through spectral diagnostics. A 2D fluid model and a 0D plasma kinetic model will be used to make a direct comparison to the experiments, especially the specie density and reduced electric field(REF) evolution considering multiple reactions. Besides, by modifying the existing model, a multiphysics plasma-combustion coupling model will be preliminarily established, and the physical process simulation of short gap nanosecond diffuse discharge in assisting combustion will be carried out.

## Thématique / Domaine / Contexte

---

Plasmas de décharge dans l'air à pression atmosphérique sous champ électrique intense

Physique des plasmas hors-équilibre

Le type de décharges considéré dans ce travail a fait l'objet d'un projet ANR de 5 ans terminé en février 2019 et de plusieurs thèses dont la dernière a été soutenue en décembre 2019. Les études ont permis une première caractérisation des décharges dans l'air sec et humide, ainsi qu'en présence d'acétone (mesure de densités d'espèces primaires, champ électrique, températures, certains radicaux en post-décharge) et de comprendre les effets des paramètres expérimentaux (caractéristiques de la haute tension, géométrie des électrodes, composition du gaz) sur la décharge. L'ensemble de ces résultats a pu être valorisé dans de nombreuses conférences internationales et a fait l'objet de plusieurs oraux invités, ce qui montre l'intérêt porté par la communauté scientifique à ce nouveau type de décharges électriques.

Du point de vue expérimental, les décharges diffuses considérées dans ce projet ont fait l'objet d'un programme ANR de 5 ans terminé il y a 3 ans et de plusieurs thèses au LPGP dont la dernière a été soutenue en décembre 2019. Les études ont permis une première caractérisation des décharges dans l'air sec et humide, ainsi qu'en présence d'acétone (mesure de densités d'espèces primaires, champ électrique, températures, certains radicaux en post-décharge) et de comprendre les effets des paramètres expérimentaux (caractéristiques de la haute tension, géométrie des électrodes) sur la décharge. L'ensemble de ces résultats a pu être valorisé dans de nombreuses conférences internationales et a fait l'objet de plusieurs oraux invités, ce qui montre l'intérêt porté par la communauté scientifique à ce nouveau type de décharges électriques.

Les différents résultats obtenus ont toutefois soulevé plusieurs questions et mis en évidence certains écarts par rapport à la théorie classique du streamer, telles qu'une augmentation importante du champ électrique réduit près de la pointe après la jonction au plan et un déphasage entre le maximum de champ électrique et le front d'émission lumineuse au cours de la propagation de la décharge. Aussi, la grande majorité des expériences ont été réalisées dans l'air ambiant pour des proportions relatives d'azote et d'oxygène moléculaires invariables. Une meilleure compréhension des processus inhérents à ces décharge (photo-ionisation, électrons runaway, rayonnement X, ...) nécessite de modifier la nature et la proportion des gaz utilisés. Cette modification permettra également de se placer dans des conditions plus proches des applications comme la combustion assistée par plasma.

Du point de vue modélisation, différentes tentatives ont été lancées pour simuler les décharges diffuses à très fortes surtensions. En particulier, le modèle fluide s'est avéré être un compromis valable pour étudier ce type de décharge, en obtenant un bon accord sur des paramètres tels que la vitesse de propagation, la largeur d'extension radiale de la décharge, ou encore l'évolution du champ électrique. Toutefois, ce type de modèle est majoritairement basé sur l'approximation de champ local (LFA) qui suppose que les électrons sont constamment en équilibre avec le champ électrique. Marode et al. ont utilisé un modèle fluide LFA pour comparer les distributions d'électrons et de champ électrique pour différents front de montée en tension, et ont discuté de l'existence possible d'électrons runaway dans la décharge diffuse. Le modèle fluide LFA de A. Bourdon et al. a également permis de comparer l'évolution du champ électrique simulé pour différents fronts de montée avec les résultats expérimentaux obtenus par Chng et al. par diagnostic EFISH. Dernièrement, les travaux numériques de Y. Zhu ont pu montrer que le modèle d'approximation de l'énergie moyenne locale (LMEA) semble plus adapté à la description de l'évolution du champ électrique mesuré dans les expériences. Par conséquent, en partant d'un modèle fluide de type LMEA, en le comparant aux résultats expérimentaux obtenus dans différentes conditions opératoires, et ne le combinant avec des modèles cinétiques, il est très probable que nous pourrions mieux comprendre les processus propres aux décharges diffuses nanosecondes et appréhender leur intérêt pour les applications.

## Objectifs

---

Les objectifs sont de comprendre les mécanismes de développement de décharges électriques dans l'air sous champ électrique intense et de déterminer en quoi elles se différencient des décharges de streamer classiques. Cela passe par la mise en place de diagnostics expérimentaux dédiés et surtout par la confrontation des résultats aux données issues des modèles numériques développés par l'équipe de recherche chinoise avec laquelle ce projet est mené.

Une grande partie du travail sera consacrée à la comparaison expérience / modélisation pour des décharges initiées dans des mélanges variés de gaz moléculaires avec différentes proportions de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub> et éventuellement d'autres types de molécules en plus faible proportion. La variation du mélange permettra très certainement de préciser le rôle de la photo-ionisation, des électrons runaway et des différents processus réactifs en post-décharge.

Leur analyse doit également permettre d'identifier le potentiel de ce type de décharge pour diverses applications énergétiques et environnementales, dont la combustion assistée par plasma.

## Méthode

---

L'étude expérimentale sera menée en France au LPGP et correspondra à un peu moins que la moitié de la durée de la thèse (18 mois). L'étude de modélisation sera menée en Chine.

Une configuration d'électrodes pointe-plan sera utilisée pour générer des décharges diffuses dans un réacteur permettant le contrôle du mélange de gaz. L'effet de différents paramètres comme la distance inter-électrodes, l'amplitude de la tension appliquée et le temps de montée, on encore les proportions et la nature du mélange gazeux, sera étudié. En ce qui concerne les méthodes de diagnostic, des caractéristiques telles que la vitesse, la largeur et l'intensité de l'émission lumineuse seront obtenues par imagerie intensifiée rapide. L'énergie de décharge sera calculée à partir de la mesure du courant et de la tension de décharge. La température du gaz sera estimée par l'analyse du spectre rotationnel du 2nd système positif de N<sub>2</sub>. La distribution spatio-temporelle du champ électrique sera obtenue par spectroscopie d'émission, en utilisant la méthode du comptage de photons. La densité et la température électronique pourront être déterminée par diffusion Thomson en collaboration avec S. Tsikata du laboratoire ICARE. Les densités d'espèces telles que N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et O pourront également être obtenues par diagnostic laser soit au LPGP, soit au travers de collaborations.

Un modèle fluide 2D auto-cohérent de la décharge, déjà existant, sera optimisé dans le cadre de ce projet. Il est de type LMEA et intègre les équations fluides d'Euler, les équations de Poisson et un modèle de photo-ionisation efficace. Il est couplé à une cinétique 0D détaillée (Zero-Dimensional Plasma Kinetics solver) permettant de faire une comparaison directe avec les expériences tant sur les premiers instants de la décharge à l'échelle de la nanoseconde qu'à l'échelle de la post-décharge (ms). Le modèle se focalisera sur l'analyse du champ électrique et la possibilité de créer des électrons runaway. Il regardera également le rôle de la photo-ionisation sur le développement de la décharge. Pour les temps plus longs, il suivra les densités d'espèces et l'évolution de leurs températures.

## Références bibliographiques

---

### Références expériences :

Brisset A., Tardiveau P., Gazeli K., Bournonville B., Jeanney P., Ouaras K., Magne L. and Pasquiers S., "Experimental study of the effect of water vapor on dynamics of a high electric field non-equilibrium diffuse discharge in air", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 54, 215204 (2021)

Brisset A., Guichard F., Cessou A. and Tardiveau P., "Energy relaxation and heating in the afterglow of high electric field ns-discharges in ambient air using spontaneous Raman scattering", *Plasma Sources Sci. Technol.* 30, 035013 (2021)

Brisset A., Gazeli K., Magne L., Pasquiers S., Jeanney P., Marode E. and Tardiveau P., "Modification of the electric field distribution in a diffuse streamer-induced discharge under extreme overvoltage", *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 055016 (2019)

T.-L. Chng, A. Brisset, P. Jeanney, S. Starikovskaia, I. Adamovich, P. Tardiveau, "Electric Field Evolution in a Diffuse Ionization Wave Nanosecond Pulse Discharge in Atmospheric Pressure Air", *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 09LT02 (2019)

Tardiveau P., Magne L. Marode E. Ouaras K., Jeanney P., Bournonville B., "Sub-nanosecond time resolved light emission study for diffuse discharges in air under steep high voltage pulses", *Plasma Sources Sci. Technol.*, 25, 054005 (2016).

### Références modélisations :

Zhu Y. F., Chen X., Wu Y., Hao J., Ma X., Lu P. and Tardiveau P., "Simulation of ionization-wave discharges: a direct comparison between the fluid model and E-FISH measurements", *Plasma Sources Sci. & Technol.* 30, 075025 (2021)

Bourdon A., Pechereau F., Tholin F. and Bonaventura Z., "study of the electric field in a diffuse nanosecond positive ionization wave generated in a pin-to-plane geometry in atmospheric pressure air", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 54, 075204 (2021)

Naidis G.V., Tarasenko V.F., Babaeva N.Y. and Lomaev M.I., "subnanosecond breakdown in high-pressure gases. *Plasma Sources Sci. & Technol.* 27, 013001 (2018)

Marode E., Dessante P., Tardiveau P., "2D Positive streamers modelling in NTP air under extreme pulse front. What about runaway electrons?", *Plasma Sources Sci. Technol.*, 25, 064004 (2016).

## Précisions sur l'encadrement - Details on the thesis supervision

---

La co-direction est envisagée avec le professeur Anbang SUN, professeur à la School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University. La thèse a démarré en Chine en mars 2021 et se terminera en mars 2025 (4 ans). Le séjour de 2 ans en France se déroulera de septembre 2022 à septembre 2024.

## Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

---

Le travail expérimental repose sur des installations existantes. Une salle entière est dédiée à l'étude des décharges sous fort champ. Sont disponibles tous les outils de diagnostics nécessaires (sondes, oscilloscopes, générateurs, spectromètre,...). Les conditions de sécurité liées à l'utilisation de très haute tension et de laser sont garanties. Des formations spécifiques sont imposées aux manipulateurs de ces outils. Une demande de financement de projet ANR sera faite à la rentrée 2022 pour venir en appui de ce projet de thèse en cotutelle. Le travail de modélisation effectué en Chine repose également sur des outils déjà existants mais qu'il conviendra d'adapter et d'optimiser.

## Ouverture Internationale

---

Des collaborations avec des groupes de recherche étrangers pourront être envisagées au cours de la thèse, permettant de bénéficier de l'expertise et des outils de pointe développés par ces groupes (sous réserve d'obtention des financements nécessaires).

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

---

Les objectifs de valorisation sont la publication régulière des résultats dans des revues internationales à comité de lecture (PSST, J. Phys.D.,...) et la participation à des conférences (ISPC, ICPIG, ESCAMPIG, GEC, ICOPS,..).

## Collaborations envisagées

---

Des collaborations au niveau national (LPP, Icare,...) pourront également être envisagées afin d'avancer plus efficacement sur le sujet.

## Complément sur le sujet

---

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02466313> (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02466313>)

## Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

---

Profil Master 2 ou Ingénieur.  
Connaissances approfondies en plasmas froids et en particulier sur les plasmas froids à pression atmosphérique.  
Candidat intéressé par l'approche expérimentale.  
Master graduate or Engineer  
Deep knowledge in non-equilibrium plasmas and, more specifically, in cold plasmas at atmospheric pressure.  
Candidate interested in experimental work.

Dernière mise à jour le 14 avril 2022