

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modélisation numérique des plasmas et application à l'ElectroHydroDynamique

Référence : **SNA-DTIS-2025-21**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 01/03/2025

Mots clés : Modélisation des plasmas, Schémas Implicites, Analyse numérique, Méthodes multi-échelles, Contrôle d'écoulements

Profil et compétences recherchées : Master 2 Recherche ou équivalent en Mathématiques Appliquées, Ingénieur des grandes Ecoles

Connaissance des Equations aux Dérivées Partielles, en analyse numérique, bonnes connaissances en physique ou en mécanique des fluides

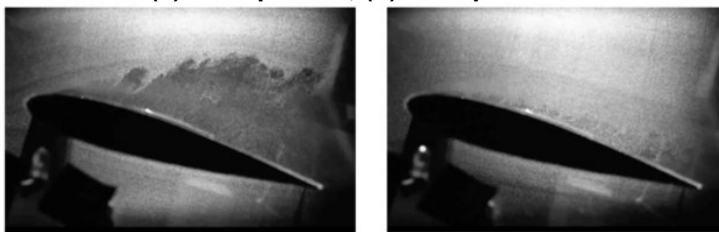
Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

L'augmentation drastique du fret et du transport de passagers, ainsi que les contraintes environnementales liées à la production de Nox requièrent des améliorations significatives des performances des avions. Ainsi, la diminution de la traînée de frottement de quelques pourcents peut permettre d'obtenir une économie de carburant importante et un allègement de la consommation considérables. Des travaux menés durant les deux dernières décennies ont montré que des dispositifs électriques (les DBDs, voir figure ci-dessous) générant des décharges continues, alternatives ou impulsives peuvent modifier les propriétés d'un écoulement et ainsi conduire à contrôler l'écoulement. L'énergie électrique fournie par un tel dispositif permet de transformer localement l'air en gaz ionisé (un plasma) qui lui-même va céder par collisions sa quantité de mouvement et ainsi créer un déplacement des molécules d'air. On représente cet effet par une force appelée la force ElectroHydroDynamique (EHD).

Ces processus sont complexes à modéliser car ils mettent en jeu de multiples phénomènes à des

Visualisation du recollement d'une couche limite à l'aide d'une DBD :

(a) sans plasma, (b) avec plasma.



(a)

(b)

Le point lumineux correspond à la position de la DBD.

échelles très différentes : cinétique, dérive des ions et des électrons, effets de charge d'espace, etc. Un système d'équations de convection-diffusion-réaction décrit le mouvement, la création et la destruction des différents composants du plasma. Ce système est couplé à l'équation de Poisson du champ électrique qui lui-même est modifié par la présence des densités de charges locales. Il faut également prendre en compte des phénomènes non-locaux, comme la photoionisation, qui tient compte de la génération d'électrons par le rayonnement induit

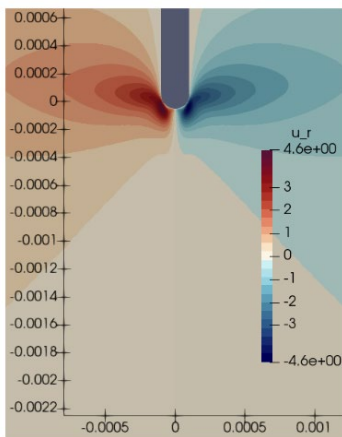
par la décharge. La résolution numérique de ces équations conduit à des simulations numériques très coûteuses en raison de la multiplicité des échelles temporelles. De plus, la prise en compte de phénomènes de gaines (la zone de transition entre le plasma et l'air), de taille micrométrique, est nécessaire car elles sont le siège de la force EHD. Il faut donc des maillages localement très raffinés pour capturer ces zones.

Un code de calcul modélisant ces décharges électriques (COPAIEP [1,2,3]) a été développé à l'ONERA. COPAIEP calcule la dynamique du plasma et permet d'obtenir le profil et l'intensité de la force EHD générée. En introduisant cette force dans un code CFD, on peut alors estimer l'effet induit par le plasma. Les schémas numériques développés dans COPAIEP sont soit explicites, ce qui nécessite donc de satisfaire une condition CFL sur le pas de temps très stricte, soit semi-

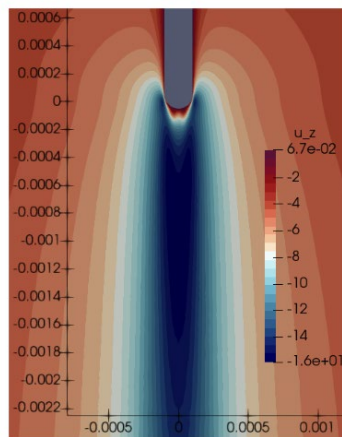
implicites [4], ce qui permet d'éliminer certaines échelles de temps mais garde la contrainte des parties restées en explicite. Cela rend le calcul très couteux en nombre de pas de temps. Une méthode complètement implicite est donc essentielle si on veut effectuer des simulations dans des temps réalistes. Un premier travail en ce sens a été initié durant la thèse de D. Nguyen [5,6] sur la formulation d'un schéma implicite pour la résolution du système global couplé.

L'objectif de cette thèse est de revisiter l'ensemble des différentes méthodes numériques qui ont été implémentées afin de progresser dans la simulation numérique et notamment vers la simulation de géométries 3D.

Dans un premier temps on se propose de revoir la formulation de l'ensemble des équations. Un



(a) u_r



(b) u_z

travail sera mené à partir de l'équation de conservation du courant, ce qui conduira à des questions de positivité de la densité des électrons qu'il faudra maîtriser. Nous partirons pour cela des travaux de thèse de TD Nguyen [5,6], ce qui devrait permettre d'aboutir à une formulation implicite du système complet.

On s'intéressera également à la montée en précision du système. Les schémas de haute-précision (Galerkin Discontinu, schémas aux différences spectraux) connaissent

depuis une dizaine d'années un succès croissant et ont vu leur application dans de multiples domaines et notamment en mécanique des fluides. Ils permettent d'augmenter l'ordre d'approximation localement en fonction de la régularité de la solution. Couplés à des schémas temporels d'ordre élevé et/ou implicites ils permettent de limiter l'erreur de dispersion qui peut être importante sur de grands pas de temps. On envisage d'adapter ces schémas numériques dans le cadre du système plasma. Une difficulté particulière réside dans le traitement du couplage avec le champ électrique local, solution d'une équation elliptique, tandis que les densités des espèces vérifient une équation hyperbolique.

Le raffinement local et dynamique pourra être également envisagé. En effet, dans certaines conditions une zone de plasma très fine (appelée streamer) peut se déclencher et se propager à des vitesses importantes. Or ces régions sont très importantes à capturer. Une approche de capture dynamique doit donc être développée pour suivre les fronts de ces zones de densité de plasma importante. On s'intéressera donc à définir des bons indicateurs de remaillage ainsi qu'une stratégie de projections des inconnues de l'ancien maillage vers le nouveau.

La prise en compte du phénomène de photoionisation, qui amène à la résolution d'un autre problème elliptique proche du système de Poisson, sera également étudiée sur la base des travaux initiés par Bourdon *et al.* [7], afin de proposer un modèle mathématique couplé à un schéma numérique efficace. Enfin, on envisagera si le temps le permet de revoir la stratégie de parallélisation par sous-domaines pour faire face aux questions d'équilibrage relatifs aux aspects de raffinement dynamique.

Bibliographie :

- [1] G. Dufour, F. Rogier. "Numerical Modeling of Dielectric Barrier Discharge Based Plasma Actuators for Flow Control : the COPAIER/CEDRE Example". AerospaceLab, 2015
- [2] Kourtzanidis, Konstantinos, Guillaume Dufour, and François Rogier. "Self-consistent modeling of a surface AC dielectric barrier discharge actuator: In-depth analysis of positive and negative phases." *Journal of Physics D: Applied Physics* 54.4 (2020): 045203.
- [3] Kourtzanidis, Konstantinos, Guillaume Dufour, and François Rogier. "The electrohydrodynamic force distribution in surface AC dielectric barrier discharge actuators: do streamers dictate the ionic

wind profiles?." Journal of Physics D: Applied Physics 54.26 (2021): 26LT01.

[4] Andrea Villa, Luca Barbieri, Marco Gondola, and Roberto Malgesini. "An asymptotic preserving scheme for the streamer simulation." Journal of Computational Physics, Volume 242 , 1 June 2013, Pages 86-102, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.02.016>

[5] Dung, Nguyen Tuan, Christophe Besse, and François Rogier. "An implicit time integration approach for simulation of corona discharges." Computer Physics Communications 294 (2024): 108906.

[6] Nguyen, Tuan Dung, « Développement d'une méthode numérique multiéchelle pour les plasmas atmosphériques et application au contrôle d'écoulements », Thèse de doctorat Mathématiques et Applications Toulouse 3, 2023. <http://www.theses.fr/2023TOU30334/document>

[7] Bourdon, A., Pasko, V. P., Liu, N. Y., Célestin, S., Ségur, P., & Marode, E. (2007). Efficient models for photoionization produced by non-thermal gas discharges in air based on radiative transfer and the Helmholtz equations. Plasma Sources Science and Technology, 16(3), 656.

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Toulouse ou Palaiseau

Contact : Guillaume Dufour

Tél. : 05 62 25 28 64 Email : Guillaume.Dufour@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

Directeur de thèse

Nom : Dufour Guillaume

Laboratoire : MOIS (DTIS/MACI)

Tél. : 05 62 25 28 64

Email : Guillaume.Dufour@onera.fr