

Soutenance de thèse

Emanuele ARCESE soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein du laboratoire LAPLACE et de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA MOIS, intitulée «*Modélisation numérique des actionneurs plasma de décharge micro-ondes pour le contrôle d'écoulement aérodynamique*»

Le 5 juillet 2019 à 10h00, Amphithéâtre 4 - ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Jean-Pierre BOEUF	Directeur de Recherche LAPLACE	Directeur de thèse
Mme Ute EBERT	Professeure Eindhoven University of Technology	Rapporteur
M. Alexei LOZINSKI	Professeur Université de Franche-Comté	Rapporteur
M. François ROGIER	Ingénieur de Recherche ONERA/DTIS	Co-directeur de thèse
M. Gerjan HAGELAAR	Directeur de Recherche LAPLACE	
M. Bruno DUBROCA	Directeur de Recherche Institut de Mathématiques Bordeaux	

Résumé Au cours des dernières décennies, les plasmas créés par une décharge micro-ondes ont de plus en plus attiré l'attention de la communauté scientifique aérospatiale sur le sujet du contrôle d'écoulements. En effet, il a été démontré expérimentalement que le dépôt d'énergie obtenu par le plasma peut modifier les propriétés aérodynamiques de l'écoulement autour d'un objet telle que la trainée de frottement. Or, la conception et l'optimisation de ces actionneurs plasma en tant que technique de contrôle d'écoulements nécessitent une compréhension approfondie de la physique sous-jacente que les seules expériences sont incapables de fournir. Dans ce contexte, nous nous intéressons à la modélisation numérique de l'interaction des ondes électromagnétiques avec un plasma et le gaz afin de mieux comprendre la nature des décharges micro-ondes et leur applicabilité. La modélisation de ces phénomènes présente des difficultés importantes en raison du couplage multi-physique et donc de la multiplicité des échelles spatiales et temporelles qui apparaissent. Ce travail de thèse traite des questions à la fois de physique et de mathématiques appliquées soulevées par la modélisation numérique de ces plasmas. La première partie du travail se focalise sur les questions de validité du modèle physique du claquage micro-onde fondé sur l'approximation de champ effectif local. En raison des gradients de densité du plasma très élevés, la validité du concept de champ effectif local peut être mis en doute. Pour cela, un modèle fluide de second ordre est développé en incluant une équation d'énergie électronique non-locale. Cette modélisation permet de décrire de façon plus précise le dépôt d'énergie par plasma induisant la formation d'ondes de choc dans le gaz. Une analyse dimensionnelle du système d'équations fluide permet de caractériser la non-localité en espace du bilan d'énergie électronique en fonction du champ électrique réduit et de la fréquence de l'onde réduite. Une discussion est également menée sur d'autres approximations des coefficients de transport électronique. Dans une deuxième partie, la construction et l'analyse d'une méthode multi-échelles de résolution numérique du problème de propagation des ondes électromagnétiques dans le plasma sont réalisées. Il s'agit du couplage entre les équations de Maxwell dans le domaine temporel avec une équation de quantité de mouvement pour les électrons. L'approche s'appuie sur la méthode de décomposition de domaine de type Schwartz, basée sur une formulation variationnelle du schéma de Yee et utilisant deux niveaux de grilles Cartésiennes emboîtées. Une grille locale, appelée patch, est utilisée pour calculer de manière itérative la solution dans la région du plasma où une meilleure précision est requise. La méthode proposée permet le raffinement local et dynamique du maillage spatial tout en conservant l'énergie du système. Une analyse théorique de la convergence de l'algorithme pour les résolutions temporelles explicite et implicite est également réalisée. Dans la dernière partie, des simulations numériques sur le claquage micro-ondes et la formation de structures filamenteuses de plasma sont conduites. Les effets de différents types d'approximations sur le modèle physique du plasma sont analysés. Puis, ces expériences numériques démontrent la précision et l'efficacité, en terme de temps de calcul,

de la méthode multi-échelle proposée. Enfin, on étudie les effets de chauffage du gaz sur la formation et l'entretien de structures filamenteuses dans l'air à pression atmosphérique. Pour cela, le modèle micro-onde-plasma développé est couplé avec les équations de Navier-Stokes instationnaires pour les écoulements compressibles. Les simulations montrent des caractéristiques intéressantes de la dynamique de ces structures plasma pendant le processus de chauffage du gaz, qui sont en accord étroit avec les données expérimentales.

Mots-clés : décharge micro-ondes, modélisation fluide du plasma, méthode de décomposition de domaine multi-échelle, interaction ondes électromagnétiques-plasma-gaz, effets de chauffage du gaz

Summary: In recent decades, microwave discharge plasmas have attracted increasing attention of aerospace scientific community to the subject of aerodynamic flow control because of their capability of substantially modifying the properties of the flow around bodies by effective energy deposition. The design and optimization of these plasma actuators as flow control technique require a comprehensive understanding of the complex physics involved that the sole experiments are incapable to provide. In this context, we have interest in the numerical modeling of the mutual interaction of electromagnetic waves with plasma and gas in order to better understand the nature of microwave discharges and their applicability. A challenging problem arises when modeling such phenomena because of the coupling of different physics and therefore the multiplicity of spatial and temporal scales involved. A solution is provided by this thesis work which addresses both physics and applied mathematics questions related to microwave plasma modeling. The first part of this doctorate deals with validity matters of the physical model of microwave breakdown based on the local effective field concept. Because of large plasma density gradients, the local effective field approximation is questionable and thus a second-order plasma fluid model is developed, where the latter approximation is replaced by the local mean energy approximation. This modeling approach enables to take into account the non-locality in space of the electron energy balance that provides a more accurate description of the energy deposition by microwave plasma leading to the shock waves formation into the gas. A dimensionless analysis of the plasma fluid system is performed in order to theoretically characterize the non-locality of the introduced electron energy equation as function of the reduced electric field and wave frequency. It also discusses other approximations related to the choice and method of calculation of electron transport coefficients. Concerning the mathematical aspects, the thesis work focuses on the design and the analysis of a multiscale method for numerically solving the problem of electromagnetic wave propagation in microwave plasma. The system of interest consists of time-dependent Maxwell's equations coupled with a momentum transfer equation for electrons. The developed approach consists of a Schwartz type domain decomposition method based on a variational formulation of the standard Yee's scheme and using two levels of nested Cartesian grids. A local patch of finite elements is used to calculate in an iterative manner the solution in the plasma region where a better precision is required. The proposed technique enables a conservative local and dynamic refinement of the spatial mesh. The convergence behavior of the iterative resolution algorithm both in an explicit and implicit time-stepping formulation is then analyzed. In the last part of the doctorate, a series of numerical simulations of microwave breakdown and the filamentary plasma array formation in air are performed. They allow to study in detail the consequences of the different types of physical approximations adopted in the plasma fluid model. Then, these numerical experiments demonstrate the accuracy and the computational efficiency of the proposed patch correction method for the problem of interest. Lastly, a numerical investigation of the effects of gas heating on the formation and sustaining of the filamentary plasma array in atmospheric-pressure air is carried out. For doing this, the developed microwave-plasma model is coupled with unsteady Navier-Stokes equations for compressible flows. The simulations provide interesting features of the plasma array dynamics during the process of gas heating, in close agreement with experimental data.

Keywords: microwave discharge, plasma fluid modeling, multiscale domain decomposition method, microwave-plasma-gas interaction, effects of gas heating