

Modélisation et simulation numérique des écoulements plasmas pour les applications hypersoniques

Thierry MAGIN, von Karman Institute for Fluid Dynamics - Rhode-Saint-Genèse, Belgium

De nombreux défis dans la modélisation et la simulation numérique des écoulements plasmas pour les applications hypersoniques sont liés à l'aérothermochimie. Ce terme a été inventé par von Kármán [1] pour désigner le domaine multidisciplinaire combinant la mécanique des fluides, la thermodynamique et la chimie physique. Le vol hypersonique est généralement compris comme un vol dans une atmosphère planétaire à un nombre de Mach supérieur à 5. L'effet du plasma enveloppant un véhicule hypersonique sur la propagation des ondes électromagnétiques, ainsi que des moyens de contrôle utilisant des champs électriques et magnétiques externes, peuvent être étudiés au moyen de calculs numériques. Les interactions plasma-surface, telles que la recombinaison catalytique des atomes au niveau de la paroi ainsi que l'ablation des matériaux de protection thermique, sont des phénomènes à modéliser avec précision lors de la conception du bouclier thermique garantissant l'intégrité d'un engin hypersonique. D'autres applications hypersoniques sont la signature des véhicules de croisière, les météores, ou encore la rentrée et la destruction des débris spatiaux artificiels. La chimie détaillée joue également un rôle important dans la formation de la gaine de plasma présente dans des applications technologiques disruptives, telles que l'émission d'électrons pour le refroidissement par transpiration de véhicules hypersoniques.

La théorie cinétique est un outil indispensable pour décrire les écoulements de plasmas dans le régime raréfié au delà de la ligne de Kármán. Elle permet aussi d'établir des solutions asymptotiques de type fluide dans les régimes transitionnel et continu à des altitudes plus basses. Une analyse dimensionnelle de l'équation cinétique permet d'identifier les petits paramètres conduisant au scaling adéquat. Les écoulements plasmas hypersoniques sont caractérisés par une multitude d'échelles temporelles et spatiales, induisant des difficultés dans le développement des équations constitutives et des méthodes numériques associées. En particulier, une description du déséquilibre thermo-chimique reste un problème ouvert dans le développement d'équations de type Navier-Stokes pour la prise en compte rigoureuse de l'énergie interne au sein d'un plasma. A la frontière du régime continu, les descriptions basées sur les méthodes de moments doivent être enrichies pour décrire le couplage entre l'écoulement, le champ électro-magnétique et les mécanismes chimiques.

Les limitations des méthodes numériques conventionnelles seront présentées au départ d'applications hypersoniques concrètes, à la fois pour la simulation d'écoulements plasmas à l'aide d'équations cinétiques résolues par des méthodes de particules stochastiques et des équations fluides discrétisées par des techniques déterministes. Enfin, les défis de l'aérothermochimie incluent la réduction des mécanismes détaillés et leur couplage efficace aux solveurs d'écoulement pour les régimes raréfié et continu afin de réaliser des simulations prédictives. Les solveurs multiphysiques couplés à des mécanismes chimiques détaillés nécessitent la validation et la calibration des modèles en utilisant des techniques de quantification des incertitudes basées sur des données expérimentales obtenues dans les moyens d'essai au sol et en vol.

[1] T. von Kármán. *Aerothermodynamics and combustion theory*. L'Aerotecnica, **33**, 80 – 86, 1953.