

Invitation à la soutenance de thèse

HYBRID CFD-DSMC SIMULATION FOR HIGH ALTITUDE ROCKET MOTOR PLUMES

Antoine CLOUT

10 octobre 2025 14h

Salle Jacques Dorey, bât. J3, ONERA Palaiseau

Devant le jury composé de :

Martin Grabe	DLR Göttingen	Rapporteur
Julien Mathiaud	IRMAR, Université de Rennes	Rapporteur
Thierry Magin	Von Karman Institute	Examinatrice
Marc Massot	CMAP, Ecole Polytechnique	Examineur
Damien Toussaint	CEA	Examineur
Franck Hervy	DGA/AID	Invité
Julien Labaune	DMPE, ONERA	Directeur de thèse
Luc Mieussens	IMB, Université de Bordeaux	Co-directeur de thèse
Adrien Langenais	DMPE, ONERA	Encadrant
Yann Dauvois	DMPE, ONERA	Encadrant

Résumé

À haute altitude, l'expansion des panaches de fusée dans des atmosphères raréfiées génère des écoulements complexes, caractérisés par de forts effets de non-équilibre. Une prédiction précise de cet environnement est essentielle pour évaluer la signature des lanceurs ainsi que les risques d'interruptions de communication. Les méthodes classiques de CFD, basées sur les équations de Navier–Stokes, ne permettent pas de capturer les phénomènes liés à la raréfaction, tandis que les solveurs de gaz raréfié, tels que le DSMC, deviennent prohibitifs en termes de coût de calcul dans les régions denses. En conséquence, des approches hybrides couplant CFD et DSMC ont été proposées, bien que leur application à des systèmes de propulsion à l'échelle réelle reste encore limitée.

Ce travail évalue et étend les méthodologies de couplage hybride pour la simulation des panaches de fusée en haute altitude. Dans un premier temps, la méthode de chaînage one-way, où la CFD fournit les conditions aux limites au DSMC, est validée à l'aide de configurations de jets libres froids. Il est montré que la loi de paroi de Maxwell–Smoluchowski améliore la précision de la CFD à proximité de la paroi de la tuyère et permet de remonter l'interface de couplage vers l'aval. Lorsque des critères de raréfaction conservatifs sont utilisés, les solutions hybrides reproduisent fidèlement les résultats DSMC de référence en termes de vitesse et de densité. En revanche, les champs thermiques requièrent un positionnement soigneux de l'interface de couplage.

La méthode de couplage two-way, autorisant une rétroaction de la DSMC vers la CFD, est ensuite évaluée au travers de trois cas tests : jet libre, jet impactant, et jet à contre courant. Si le chaînage one-way demeure suffisant dans les écoulements dominés par l'expansion, seul le couplage two-way permet de capturer correctement les interactions amont dans les configurations de jet à contre courant.

La méthode one-way est ensuite appliquée au troisième étage du lanceur M-V de la JAXA. Les simulations mettent en évidence deux phénomènes clés : le retour en amont des espèces du jet vers le véhicule (backflow), et la ségrégation radiale des espèces légères telles que l'hydrogène. Une technique de couplage DSMC–DSMC est développée pour simuler le panache lointain, en approximant les fonctions de distribution de vitesses par des

sommes de lois de Maxwell. Cela permet de simuler jusqu'à 500 km en aval, révélant une rééquilibration lente ainsi qu'une stratification persistante des espèces.

Enfin, un modèle semi-analytique est proposé pour prédire l'intensité du backflow en amont à partir de nombres sans dimension, et validé par comparaison avec les résultats DSMC. Ces travaux confirment la pertinence des méthodes hybrides one-way et two-way pour les simulations multi-échelles de panaches, et ouvrent la voie à de futurs développements incluant la réactivité chimique, les effets radiatifs, et la dynamique de la phase dispersée.

Mots clés

Panache, Moteur fusée, Simulation numérique, CFD, DSMC, Couplage

