

Développement d'un schéma unifié pour simuler les écoulements multi-espèces réactifs pour la rentrée atmosphérique

Tom CHAUVEAU, ONERA - Toulouse
Hugues DENIAU, ONERA - Toulouse
Julien MATHIAUD, Université de Rennes - Rennes
Yann DAUVOIS, ONERA - Toulouse

Lors d'une rentrée atmosphérique depuis la très haute altitude jusqu'au sol, la densité de l'atmosphère augmente progressivement tandis que la vitesse de l'objet décroît, induisant une transition progressive du régime moléculaire libre vers le régime continu. Cette évolution est classiquement caractérisée par le nombre de Knudsen Kn , défini comme le rapport entre le libre parcours moyen des molécules et une longueur caractéristique du véhicule de rentrée. La simulation numérique de ces écoulements multi-régimes constitue un défi majeur.

Dans ce contexte, les schémas cinétiques unifiés du type UGKS [1, 4] (*Unified Gas Kinetic Scheme*) sont construits pour capturer la physique multi-échelles (des échelles microscopiques aux échelles macroscopiques) par l'utilisation de la solution intégrale du modèle cinétique, qui couple les processus de transport et de collision des particules à chaque pas de temps.

L'objectif général de ce travail est de développer un solveur unifié UGKS pour simuler les écoulements hypersoniques, multi-espèces, réactifs du régime raréfié au régime continu rencontrés lors des rentrées atmosphériques. Les objectifs scientifiques se déclinent en trois axes :

- Extension multi-espèces : étendre le modèle ES-BGK [2] aux gaz multi-espèces résolu par le schéma UGKS.
- Réactions chimiques : intégrer les réactions chimiques caractéristiques des écoulements hypersoniques de rentrée atmosphérique, d'abord sous l'hypothèse d'équilibre chimique, puis en déséquilibre [3] via l'ajout de termes sources dans le modèle ES-BGK.
- Implémentation : intégrer ces développements dans un code de calcul co-développé avec le CERFACS et optimisé pour les architectures GPU.

- [1] C. Baranger, A. Coëpeau, L. Mieussens. *Adaptation of the unified gas-kinetic scheme to ES-BGK models*, 2026.
- [2] J. Mathiaud, L. Mieussens, M. Pfeiffer. *An ES-BGK model for diatomic gases with correct relaxation rates for internal energies*. European Journal of Mechanics - B/Fluids, **96**, 65–77, 2022. doi :<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2022.07.003>.
- [3] Y. Wei, J. Cao, K. Xu. *Unified gas-kinetic scheme for reactive flow with multi-scale transport and chemical non-equilibrium*. Journal of Computational Physics, **546**, 114514, 2026. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2025.114514>.
- [4] K. Xu, J.-C. Huang. *A unified gas-kinetic scheme for continuum and rarefied flows*. Journal of Computational Physics, **229(20)**, 7747–7764, 2010. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.06.032>.