

Méthodes numériques pour les écoulements raréfiés multi-échelles

Pierre BERNIGAUD, ONERA, DMPE, Université Paris Saclay - Palaiseau

Marc MASSOT, CMAP, CNRS, École Polytechnique - Palaiseau

Les écoulements raréfiés apparaissent dans de nombreuses applications dès lors que le libre parcours moyen n'est plus négligeable devant les échelles caractéristiques du problème. Dans ces régimes, les modèles de type Euler ou Navier–Stokes cessent d'être valides, ce qui impose de considérer des descriptions cinétiques plus fines. Lorsque le niveau de raréfaction varie fortement dans l'espace, l'enjeu n'est alors pas seulement de disposer d'un modèle adapté à chaque régime, mais de construire des méthodes capables de relier descriptions fluides et cinétiques. Les écoulements raréfiés constituent ainsi un cadre privilégié pour l'étude de méthodes numériques multi-échelles.

Les approches purement cinétiques, qu'elles soient déterministes ou particulières, permettent en principe de décrire correctement les régimes raréfiés, mais leur coût devient prohibitif lorsque l'écoulement se rapproche du régime continu. Cette limitation a motivé plusieurs directions de recherche. Une première consiste à construire des méthodes hybrides cinétique/fluide, ou des stratégies de décomposition de domaine, afin d'utiliser localement le niveau de description le plus adapté. Ces approches ont montré leur intérêt pratique, mais posent encore des questions en termes de méthode de couplage, de cohérence entre modèles, ou de robustesse dans les zones de transition.

Une autre direction est celle des méthodes à moments, qui fournissent une hiérarchie de modèles intermédiaires entre descriptions fluides et cinétiques. Elles permettent de réduire le coût de calcul, mais soulèvent des questions mathématiques classiques et toujours actives : choix de fermetures pertinentes, hyperbolicité des systèmes obtenus, réalisabilité des moments et qualité de la description hors équilibre.

Dans ce contexte, les schémas préservant l'asymptotique occupent aujourd'hui une place importante dans l'analyse numérique des équations cinétiques. Ils visent précisément à éviter, lorsque le problème devient raide, le coût associé à la résolution explicite des plus petites échelles cinétiques, tout en restant compatibles avec les limites macroscopiques. Ils permettent ainsi de conserver une discrétisation stable et cohérente lorsque l'on passe du régime raréfié au régime continu.

Ainsi, l'état de l'art du domaine repose aujourd'hui sur la combinaison de plusieurs approches complémentaires : méthodes cinétiques de référence, couplages fluide/cinétique, modèles à moments et schémas asymptotic-preserving. Les enjeux actuels concernent autant l'analyse que le calcul scientifique : garantir la compatibilité entre niveaux de modélisation, et construire des méthodes à la fois robustes, efficaces et conservant les structures mathématiques du problème.

Les orateurs présents sont :

- D. Biasone (ONERA), P. Bernigaud (ONERA), M. Massot (CMAP) : *A Comparative Assessment of Moment-Based Closures for Flows at Various Levels of Rarefaction*
- A. Coëpeau (Univ. Bordeaux), C. Baranger (CEA), L. Mieussens (Univ. Bordeaux) : *Construction d'une méthode hybride déterministe-stochastique qui préserve le comportement asymptotique des modèles cinétiques ES-BGK*
- N. Crouseilles (Univ. de Rennes), J. Mathiaud (Univ. Rennes), L. Mieussens (Univ. Bordeaux) : *Generalized UGK scheme in the diffusive limit*
- T. Rey (Univ. Nice) : *Sur une hiérarchie de méthodes numériques hybrides cinétiques/fluides pour des équations cinétiques collisionnelles multi-espèces*