

Développement de méthodes et modèles numériques pour la simulation haute-fidélité d'écoulements liquides et transcritiques

Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec

Contexte

L'évolution du jet liquide formé durant l'injection dépend fortement des conditions d'injection et du mélange local. Lorsque la pression et la température sont suffisamment basses par rapport aux conditions critiques, les interfaces peuvent être modélisées comme des discontinuités entre les phases. L'équilibre entre les forces d'inertie et la tension superficielle contrôle la formation de gouttelettes pendant le processus d'atomisation (fig. 1a). Au fur et à mesure que la pression augmente jusqu'à des conditions supercritiques, la tension superficielle disparaît et l'interface nette entre les phases n'est plus présente. Le jet évolue en présence d'une interface diffuse entre le fluide dense et les gaz environnants (fig. 1b). Dans de telles conditions, le régime d'injection de fluide est souvent appelé transcritique et le mélange du jet est contrôlé par la turbulence et est analogue à celui d'un jet à masse volumique variable. De manière générale, ces deux régimes peuvent être rencontrés en fonction des conditions thermodynamiques et de mélange multi-espèce locales. Ils peuvent par exemple se retrouver dans les moteurs-fusées à ergols liquides ou les moteurs aéronautiques, qui sont des applications du présent projet de recherche.

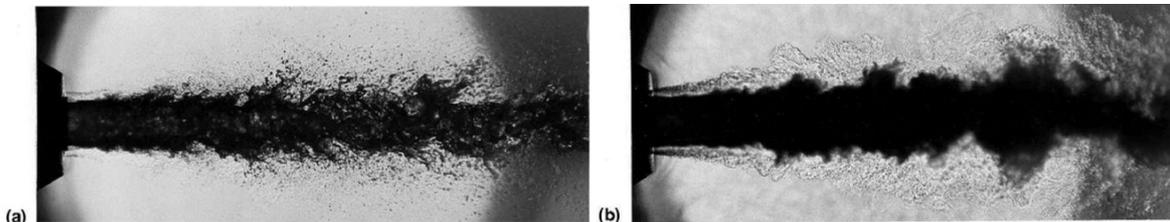


Figure 1 : Injection coaxiale d'azote liquide et d'hélium gazeux à (a) 10 bar et (b) 60 bar [1].

L'approche numérique généralement retenue pour simuler ces écoulements s'appuie sur une modélisation de type multifluide [2] couplée à une thermodynamique non-idéale, basée sur une équation d'état cubique par exemple [3]. Ces modèles considèrent une coexistence liquide / vapeur. Sous hypothèse d'équilibre mécanique et thermodynamique entre les phases (même vitesse, même température, même pression, ...), des modèles simples peuvent être dérivés. Ces derniers ont permis d'obtenir des résultats très encourageants, mais doivent encore être améliorés, notamment pour mieux représenter les écoulements fortement cisailés en région proche injecteur ou la phase dispersée [4]. C'est dans ce contexte que des travaux ont été entrepris sur le développement de modèles permettant de considérer des déséquilibres (vitesse, température, ...) entre les phases [5]. Ces modèles multifluides présentent cependant des difficultés numériques pour leur résolution [6], notamment pour être précis (ordre élevé), robuste et efficace.

Objectif

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer au développement de méthodes et modèles numériques pour la simulation d'écoulements liquide ou en régime transcritique, tels que ceux rencontrés dans les moteurs-fusées à ergols liquides ou les moteurs aéronautiques. On

s'intéressera en particulier au développement de méthodes numériques précises et efficaces permettant la simulation de configurations réalistes. Le développement de modèles physiques (modèle d'atomisation, interaction avec la turbulence, ...) pourra également être envisagé. Ce travail poursuivra les recherches réalisées ces dernières années au laboratoire EM2C en modélisation diphasique / transcritique (Fig. 2) [3,4,5].

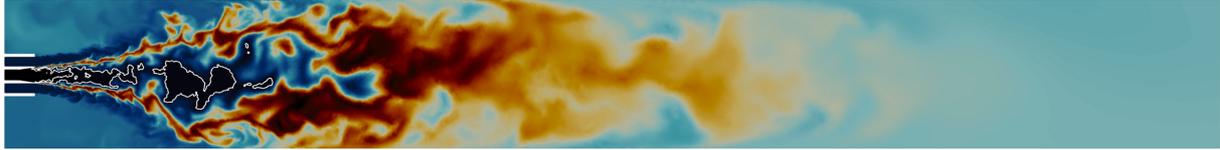


Figure 2 : Champ de température (bleu : 80 K ; rouge : 3400 K) d'une simulation 3D d'un jet coaxial cryotechnique LO_x/H₂ à 10 bar utilisant un modèle à interface diffuse sous équilibre homogène [4]. L'iso-contour blanc représente la région de coexistence liquide / vapeur où le mélange est thermodynamiquement instable.

Équipe d'encadrement

Le travail sera encadré par :

- Thomas Schmitt, Chargé de Recherche CNRS (thomas.schmitt@centralesupelec.fr)
- Christian Tenaud, Directeur de Recherche CNRS (christian.tenaud@centralesupelec.fr)

Financement

Une bourse de thèse doctorale de l'ED SMEMAG de l'Université Paris Saclay, accessible sur concours, est prévue pour cette recherche. Date limite de candidature : 28 avril 2025 (https://adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=adumR&matricule_prop=62267).

Références

- [1] W.O.H. Mayer and R. Branam. Atomization characteristics on the surface of a round liquid jet. *Experiments in Fluids*, 36:528–539, 2004.
- [2] R. Saurel, C. Pantano. Diffuse-interface capturing methods for compressible two-phase flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50(1), 105-130, 2018.
- [3] M. Pelletier. Étude des modèles d'interface diffuse et des schémas numériques adaptés pour la simulation d'écoulements sous-critiques à supercritiques. Thèse de l'université Paris-Saclay, 2019 (<https://theses.fr/2019SACL059>).
- [4] T. Schmitt, S. Ducruix. Evaluation of Large-Eddy Simulation Coupled with A Homogeneous Equilibrium Model for the Prediction of Coaxial Cryogenic Flames under Subcritical Conditions. *Aerospace*. 10(2): 98, 2023 (<https://hal.science/hal-04170314>)
- [5] J. Paris. On the simulation of two-phase flows using multifluid models for cryogenic rocket propulsion. Thèse de l'université Paris-Saclay, 2025.
- [6] D. Furfaro, R. Saurel. A simple HLLC-type Riemann solver for compressible non-equilibrium two-phase flows. *Computers & Fluids*, 111, 159-178, 2015.