

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Développement et validation de schémas numériques pour les modèles multifluides à interface diffuse**

Référence : **SNA-DMPE-2025-51**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : 2025**

**Date limite de candidature :**

### Mots clés

Méthodes numériques, Écoulements multiphasiques, Modèles multifluides à interface diffuse, Schémas volumes finis en maillages non structurés

### Profil et compétences recherchées

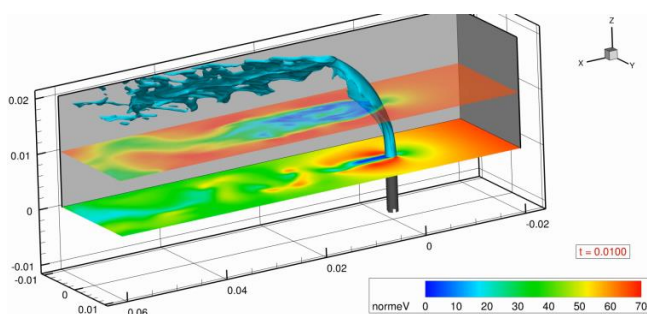
Ingénieur, Master 2 Recherche.

Mécanique des fluides numérique, mathématiques appliquées, programmation dans des codes de calcul volumes finis

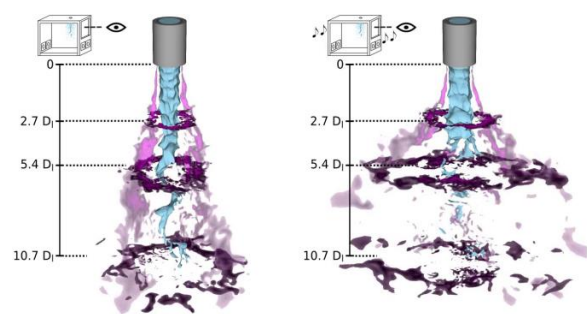
### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le Département Multi-Physique pour l'Énergétique de l'ONERA développe le code CEDRE, utilisé par les industriels des secteurs aéronautique, spatial et défense pour simuler des écoulements compressibles, turbulents, multiphasiques et réactifs au sein des systèmes propulsifs [1]. Ce code traite une large gamme d'écoulements multiphasiques rencontrés en énergétique, tels que l'atomisation de jets liquides en combustion, l'interaction de jets gazeux chauds et supersoniques avec une phase liquide, ou encore les phénomènes de changement de phase. Ces situations engendrent une grande diversité de configurations d'écoulements, d'échelles spatiales et temporelles, ainsi que de forts gradients des grandeurs physiques (vitesse, température, densité). Le développement de méthodes numériques précises, robustes et efficaces pour la discrétisation spatiale et l'intégration temporelle de ces systèmes constitue un défi majeur que cette thèse propose de relever.

Dans CEDRE, la stratégie de simulation des écoulements multiphasiques repose principalement sur des modèles multifluides à interface diffuse pour les écoulements « à phases séparées », éventuellement couplés à des modèles spécifiques pour les phases dispersées (sprays) issues de l'atomisation [2-3]. Parmi la hiérarchie de modèles à interface diffuse existants dans la littérature, deux ont été implémentés : un modèle homogène à 4 équations et un modèle relaxé à 6 équations [4-7]. Ce dernier s'affranchit de l'hypothèse d'équilibre thermique local instantané entre les fluides, offrant ainsi une modélisation plus avancée de l'écoulement. Il corrige également certaines instabilités numériques inhérentes au modèle à 4 équations.



**Jet liquide dans un écoulement transverse à haute vitesse.**



**Interaction entre un jet liquide et une onde acoustique (thèse de N. Rutard).**

L'objectif de cette thèse est de développer et améliorer les méthodes numériques utilisées pour discrétiser ces modèles à interface diffuse, dans le but d'obtenir un compromis optimal entre précision, robustesse et performance pour les simulations multifluides menées sur des configurations complexes. Ce travail implique l'utilisation de méthodes classiques en mécanique des fluides numériques (schémas volumes finis, reconstruction MUSCL, intégration temporelle...), tout en adressant les défis spécifiques liés à la nature diphasique des écoulements. Un premier axe portera ainsi sur les méthodes d'intégration temporelle, avec des travaux envisagés sur l'implicitation du système complet (termes de flux et termes sources, en particulier

ceux liés au changement de phase qui posent des problèmes de raideur), mais également sur des méthodes à pas fractionnaires avec implication de certaines étapes uniquement. Dans cet axe, on envisagera également d'adapter une approche à pas de temps zonal aux spécificités des modèles multifluides (termes non conservatifs), afin d'accélérer les calculs. Dans un second axe de travail, on se concentrera sur les méthodes de discrétisation spatiale des équations. Notamment sur l'étude des reconstructions MUSCL, et l'impact du choix des variables reconstruites sur la précision et la robustesse [8-9]. On étudiera plus précisément les méthodes de limitation compressive de l'interface [4], qui permettent de réduire significativement la diffusion numérique de l'interface diphasique, mais parfois au détriment de la stabilité du schéma.

Cette thèse vise ainsi à apporter une contribution significative à l'avancement scientifique dans le domaine des méthodes numériques appliquées aux écoulements multiphasiques. Parallèlement, une attention particulière sera portée à leur validation sur des configurations représentatives des défis rencontrés dans les simulations menées avec les grands codes de calcul utilisés par les secteurs aéronautique, spatial et défense. L'objectif est d'assurer un équilibre entre les avancées théoriques et le développement d'outils robustes et opérationnels répondant aux besoins des industriels.

Le/la doctorant.e développera ainsi des compétences en mathématiques appliquées tout en approfondissant sa compréhension physique des écoulements multiphasiques et en maîtrisant des outils de simulation avancés.

### Références bibliographiques

[1] Site web CEDRE, accessible au lien suivant : <https://cedre.onera.fr/>

[2] C. Le Touze, L.H. Dorey, N. Rutard and A. Murrone, "A compressible two-phase flow framework for Large Eddy Simulations of liquid-propellant rocket engines." Applied Mathematical Modelling, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.03.028>

[3] F. Granger, J.-C. Hoarau, L.-H. Dorey, D. Zuzio and J.-L. Estivalèzes, "Interface area density model for Large-Eddy Simulation of assisted atomization in fiber regime." International Journal of Multiphase Flows, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104927>

[4] C. Le Touze and N. Rutard, "Numerical methods for diffuse interface multifluid models." ECCOMAS Congress 2022. [https://www.scipedia.com/public/Le\\_Touze\\_Rutard\\_2022a](https://www.scipedia.com/public/Le_Touze_Rutard_2022a)

[5] P. Cordesse, « Contribution à l'étude des instabilités de combustion dans les moteurs-fusées cryotechniques : couplage entre modèles à interfaces diffuses et modèles cinétiques pour la simulation de l'atomisation primaire. » Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay. <http://www.theses.fr/2020UPASC016/document>

[6] W. Haegeman, C. Le Touze, J. Dupays and M. Massot, "Numerical simulation of the impact of a gas jet on a free water surface." Multiphase Science and Technology, 2024. <https://www.doi.org/10.1615/MultScienTechn.2023047916>

[7] W. Haegeman, J. Dupays, C. Le Touze and M. Massot, "Numerical Methods and Relaxation Techniques for Diffuse Interface Models in High-Velocity Two-Phase Flow Simulations." ECCOMAS Congress, 2024. [https://www.scipedia.com/public/Haegeman\\_et\\_al\\_2024a](https://www.scipedia.com/public/Haegeman_et_al_2024a)

[8] C. Le Touze, A. Murrone, H. Guillard, "Multislope MUSCL method for general unstructured meshes." Journal of Computational Physics, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2014.12.032>

[9] A. Tételin and C. Le Touze. "A multislope MUSCL method for vectorial reconstructions." Journal of Computational Physics, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113185>

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

**Contact** : Clément Le Touze

Tél. : 0146734304

Email :

[clement.le\\_touze@onera.fr](mailto:clement.le_touze@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : Philippe Villedieu

Laboratoire : ONERA

Tél. : 0562252863

Email : [philippe.villedieu@onera.fr](mailto:philippe.villedieu@onera.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>