

## Avis de soutenance

Monsieur Victor Boniou

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

### ***On the numerical simulation of evaporating two-phase flows using sharp interface capturing methods***

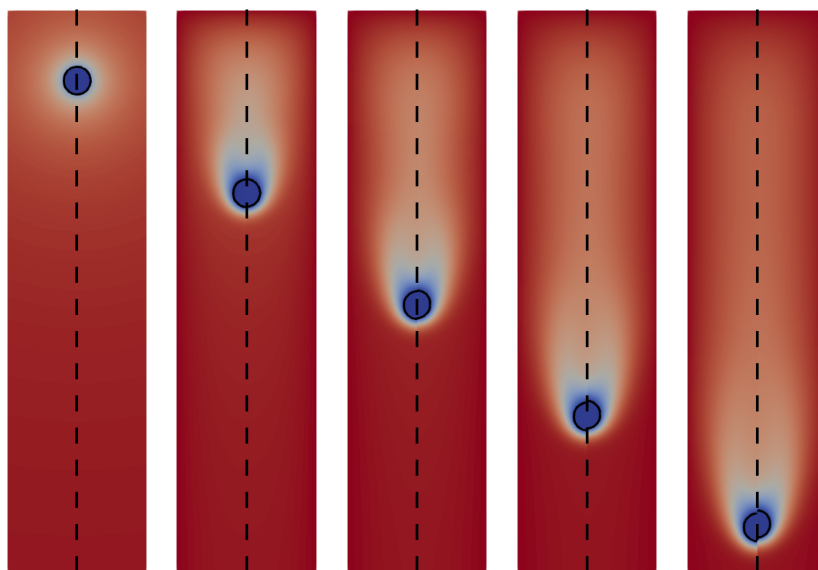
*Simulation numérique d'écoulements diphasiques évaporants par des méthodes de capture d'interface raides*

dirigés par Docteur Sébastien Ducruix et co-encadrés par Docteur Aymeric Vié et Docteur Thomas Schmitt

effectués au laboratoire EM2C

Le **Judi 9 Décembre 2021 à 14h**

à Centralesupélec, 3 rue Joliot-Curie 91192 Gif-sur-Yvette Cedex  
Amphithéâtre Peugeot (Bâtiment Bouygues)



Convected droplet using VOF and Level-Set (left and right of the dashed line respectively) at different times

### Composition du jury:

Prof. Olivier Desjardins	Université Cornell	Rapporteur
Dr. Stéphane Popinet	UPMC-CNRS	Rapporteur
Dr. Christian Tenaud	EM2C-CNRS	Examineur
Dr. Sébastien Tanguy	Université de Toulouse	Examineur
Dr. Vincent Moureau	CORIA-CNRS	Examineur
Dr. Sébastien Ducruix	EM2C-CNRS	Directeur de thèse
Dr. Thomas Schmitt	EM2C-CNRS	Coencadrant
Dr. Aymeric Vié	CentraleSupélec-EM2C	Coencadrant

**Titre:** Simulation numérique d'écoulements diphasiques évaporants par des méthodes de capture d'interface raides

**Mots clés:** Écoulements diphasiques, Interface raide, Évaporation, Méthodes numérique

**Résumé:** La simulation des écoulements diphasiques évaporant est un sujet en plein essor avec l'émergence de multiples solveurs et méthodes numériques associés.

C'est un sujet difficile en raison des discontinuités de l'écoulement à l'interface qui nécessitent des méthodes numériques adaptées. Parmi les méthodes Eulériennes « sharp », plusieurs stratégies ont montré leur capacité à reproduire la physique sans changement de phase, que ce soit en Volume-of-Fluid (VOF) ou en Level-Set (LS).

Avec le changement de phase, les sauts d'interface doivent tenir compte des transferts de masse et de chaleur. Peu de contributions existent, et des études spécifiques sont nécessaires pour atteindre le même niveau de compréhension que pour les écoulements sans évaporation.

L'objectif de ce travail est de comparer les solutions possibles pour simuler de tels écoulements. Toutes les méthodes sont implémentées dans le même solveur et partagent le même cadre unifié Low-Mach pour permettre des comparaisons équitables.

La simulation d'une interface est d'abord étudiée pour quatre méthodes : le VOF, la standard LS (SLS), l'accurate conservative LS (ACLS), et le coupled LS-VOF (CLSVOF). La comparaison est effectuée sur des cas avec champ de vitesse imposé.

Dans ce cadre, même si toutes les méthodes présentent des résultats cohérents et convergents en maillage, le CLSVOF semble être la méthode la plus précise, et sa polyvalence pourrait être un atout important pour des cas plus complexes.

Ensuite, les méthodes sont intégrées dans le même cadre unifié, sans changement de phase. Ce cadre comprend un transport précis de l'interface, une discrétisation équilibrée de la tension de surface et un transport masse-quantité de mouvement cohérent qui permet des simulations avec un rapport de densité élevé et des effets capillaires.

Une attention particulière est accordée aux cas avec tension superficielle. Puis, des cas tests complexes de collision de gouttes ou de rupture induite par cisaillement sont étudiés.

Les méthodes donnent des résultats comparables pour les cas simples, si la résolution numérique est suffisamment élevée. Pour les cas complexes, en particulier pour la rupture induite par cisaillement, les méthodes donnent des résultats différents, ce qui nécessite des études sur la capacité des méthodes à saisir le début des instabilités.

Enfin, le cadre unifié est étendu au changement de phase en utilisant une approche à deux scalaires pour les équations d'énergie et d'espèces, pour les méthodes VOF et SLS. Les nouveaux défis associés sont étudiés numériquement afin de justifier les choix effectués.

Une attention particulière est consacrée aux erreurs numériques dans la reconstruction des quantités d'interface, montrant l'importance des méthodes d'extrapolation et de l'évaluation des quantités à la position de l'interface.

Une analyse quantitative est donnée sur les problèmes d'évaporation canoniques avec solutions analytiques. Les méthodes VOF et SLS montrent une convergence en maillage, mais avec des tendances opposées pour le cas d'évaporation statique : alors que la SLS surestime la régression de l'interface, le VOF la sous-estime.

Le dernier cas test est une goutte convectée dans un écoulement au repos, qui implique une convection, une déformation de l'interface et une vaporisation non-homogène. L'importance de la cohérence entre l'équation de quantité de mouvement et de continuité est mise en évidence en considérant différentes techniques de la littérature pour l'équation de continuité. Il est montré que les formulations incohérentes conduisent à une augmentation de la vitesse de la goutte. Les résultats pour la SLS suggèrent que le cadre unifié est trop contraignant, et qu'un cadre dédié doit être utilisé. Enfin, comme les équations VOF peuvent être rigoureusement dérivées des équations de conservation, il n'y a aucune ambiguïté dans l'équation de continuité discrète, et nous considérons que les résultats sont représentatifs de la physique.

**Title:** On the numerical simulation of evaporating two-phase flows using sharp interface capturing methods

**Keywords:** Two-phase flows, Sharp interface, Evaporation, Numerical methods

**Abstract:** High fidelity simulation of evaporating two-phase flows is a growing subject of interest with the emergence of multiple solvers and various associated numerical methods.

This is a challenging subject because of the strong discontinuities of flow quantities at the interface that require attention in numerical methods design. For sharp Eulerian methods, several strategies have shown their capability to reproduce the physics without phase change using Volume-of-fluid (VOF) or Level-set (LS).

With phase change, the interface jumps must account for the mass and heat transfers, which requires far more attention numerical methods design. Few contributions can be found, and dedicated studies are necessary to reach the same level of understanding as for non-evaporating flows. The objective of this work is to compare possible solutions for simulating such flows with sharp Eulerian methods. To this end, they are all implemented in the same cartesian-grid solver and share the same unified Low-Mach framework to allow fair comparisons.

First, the numerical representation of an interface is investigated for four popular interface capturing methods with up-to-date numerics: the Volume-of-fluid (VOF), the standard Level-Set (SLS), the accurate conservative Level-Set (ACLS), and the coupled Level-Set and Volume-of-fluid (CLSVOF). The comparison is made on canonical cases with imposed velocity fields.

In this configuration, even if all methods show consistent results with mesh refinement, CLSVOF appears to be the most accurate method, and its versatility could be a strong asset for more complex configurations.

Then, all methods are embedded into the unified low-Mach framework without phase change. This framework includes a sharp transport of the interface, a well-balanced surface tension discretization, and a consistent mass-momentum transport, which allows capillary-driven simulations with high-density ratios.

Specific attention is given to surface-tension-driven cases. Then, complex test cases such as droplet collision or shear-induced breakup are investigated.

All methods give comparable results for simple test cases if the numerical resolution is sufficiently high. For the complex configurations, especially for the shear-induced breakup, all methods give very different results, which call for new investigation for their ability to capture the onset of instabilities.

Finally, the unified framework is extended to phase change using a two-scalar approach for energy and species equations for VOF and SLS methods. The associated challenges are investigated through numerical experiments to justify the numerical choices made in the unified framework. Specific attention is devoted to analyzing of numerical errors in the reconstruction of interface quantities, showing the importance of extrapolation methods and evaluating quantities at the interface location.

A quantitative analysis is given on canonical evaporation problems for which analytical solutions are available. Both VOF and SLS methods show mesh convergence, but with opposite trends for the static evaporation case: while SLS overestimates the interface regression, VOF underestimates it.

The last test case is a convected droplet in a quiescent flow, which implies convection, interface deformation, and non-homogeneous vaporization. In this case, the importance of the consistency between momentum and continuity is highlighted by considering different literature techniques for the continuity equation. It is shown that non-consistent formulations lead to an increase in the droplet velocity. The results for SLS suggest that the shared framework is too constraining, and a dedicated framework must be used. Finally, as VOF equations can be rigorously derived from the conservation equations, there is no ambiguity in the discrete continuity equation. We then consider the results to be representative of the physics.