

Soutenance de thèse

Bastien DELACROIX soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA EDyF et intitulée «*Développement d'un modèle intégral avec transport d'une fonction couleur pour la simulation d'écoulements de films minces partiellement mouillants*»

Le 22 janvier 2024 à 14h00, Amphithéâtre ONERA Toulouse

devant le jury composé de

M. Philippe VILLEDIEU	ONERA	Directeur de thèse
Mme Claire LAURENT	ONERA	Co-directrice de thèse
M. Christian RUYER-QUIL	Université Savoie Mont Blanc	Rapporteur
M. Arnaud ANTKOWIAK	Sorbonne Université	Rapporteur
M. Raphaël LOUBÈRE	CNRS	Examineur
Mme Anne GOSSET	Université de la Corogne	Examinatrice
M. Maxime BOUYGES	ONERA	Examineur
M. Ghislain BLANCHARD	ONERA	Examineur

Résumé : Pourquoi une goutte d'eau a tendance à prendre la forme d'une sphère ? Pourquoi reste-t-elle accrochée sur sa feuille lors de la rosée du matin ? Pourquoi, au contraire, ruisselle-t-elle jusque sur le sol ? Toutes ces questions en apparence simplistes font appel à des phénomènes microscopiques très complexes dont la nature physique est encore aujourd'hui sujet à débat. Leur compréhension est cependant un enjeu majeur dans de nombreux cas d'application industrielle. C'est notamment le cas en aéronautique où après le passage d'un aéronef au travers d'un nuage ou après une opération de dégivrage, un film mince se forme sur l'aile. L'évolution de la surface mouillée par ce film, comme lors de sa transition en ruisselets sous l'effet du cisaillement de l'air, ainsi que son éventuel regel un peu plus loin en dehors des zones de protection, n'est pas prise en compte dans les outils de simulations des dégivreurs thermiques ; ou alors de manière rudimentaire via des corrélations empiriques. Cependant, cette accréation de givre se doit d'être contrôlée pour des raisons de sécurité et de performances aérodynamiques. C'est pourquoi, il est nécessaire d'améliorer les outils existant en développant de nouveaux modèles capables de prendre en compte l'influence des forces capillaires à l'échelle macroscopique, notamment au niveau de la ligne triple, pour pouvoir prédire la dynamique d'un film cisailé. L'objectif général de cette étude est donc le développement d'un modèle adapté à la simulation à grande échelle d'écoulement de film mince partiellement mouillant. Dans cette optique, une approche basée sur un système d'équations de type Saint-Venant a été adoptée. Cependant, ce système sous sa forme classique ne permet pas la simulation de films minces avec effet de mouillage partiel. Une solution pour prendre en compte ces effets est d'ajouter une force macroscopique concentrée à la ligne de contact. Cette force singulière permet ainsi de vérifier localement la loi macroscopique de Young-Dupré. La difficulté de cette approche est alors de localiser la force uniquement à la ligne triple. Contrairement aux modèles rencontrés dans la littérature qui se basent tous sur l'utilisation d'un paramètre ajustable, permettant de faire la distinction entre zone sèche et zone mouillée, nous proposons ici une approche avec transport d'une fonction couleur. Cette fonction, définie comme égale à un dans les zones mouillées et nulle dans les zones sèches, présente l'intérêt d'avoir un gradient identiquement nul, sauf à la ligne triple, permettant de localiser la force de ligne de contact. L'introduction de cette fonction couleur oblige à reformuler en partie le système d'équations de Saint-Venant afin de tenir compte de cette nouvelle

fonction dans l'expression des différents termes de forces agissant sur le film. Pour justifier le choix de cette nouvelle formulation, une méthode basée sur une formulation eulérienne du principe de Hamilton a été utilisée. Cette méthode permet d'obtenir une équation de quantité de mouvement compatible avec la conservation de l'énergie du système étudié avec comme unique point de départ une expression de la densité d'énergie du système en fonction des variables utilisées. Ce nouveau système d'équations, en plus d'être complètement affranchi d'un paramètre de calibration, présente l'avantage d'être complètement hyperbolique dans le cas où les effets de courbure ne sont pas pris en compte. Cela a permis le développement d'un solveur de Riemann de type HLLC pour résoudre numériquement ce système d'équations. Afin de tester la robustesse des modèles physiques et numériques, un ensemble de cas de vérification et de validation a été mis en place. Enfin, les termes de courbure ont été pris en compte dans le schéma numérique final permettant d'étendre considérablement le champ d'application de ce nouveau modèle avec fonction couleur. Ainsi des problèmes où les effets capillaires sont prédominants ont pu être simulés.

Mots-clés : mécanique des fluides, Mouillage partiel, modélisation numérique, Principe de Hamilton, Solveur HLLC, Ruissellement

Summary: ONERA has been developing numerical tools dealing with turbojet particle ingestion (water, hail, ice crystals) for many years now. Ingested particles impact the engine FAN and can sometimes constitute a liquid film that gets reemitted as droplets downstream. FILM solver, included in the CEDRE platform, uses the Saint Venant equations to model thin films spreading. The current implemented model does not take into account capillarity effects : only a continuous film can be obtained, without rivulet. But depending on the simulated configuration, the fingering instability leading to rivulets can have an important influence. That is why ONERA is willing to improve the available models and to be able to take into account the transition between the continuous state and the so called rivulet state. Phd thesis have already been conducted on this thematic at ONERA : J. Lallement for the capillarity modelling in the Saint Venant equations and B. Thoraval for academic experimentations (film on inclined plate and rotating disk) to validate these models. The presented thesis objective is to improve the modelisation of thin films on rotating surfaces, with an emphasis on spinning disk. This simplified configuration allows to study numerically and experimentally the continuous – rivulet transition with a precise control of the boundary conditions such as the forces acting on the liquid. After a literature review, the candidate will apply and adapt Lallement's model to reproduce the observed phenomena on the configuration. Multiple modelling and numerical challenges await the candidate : contact angle force modelisation, spatial curvature terms discretization on unstructured mesh, temporal integration etc. Starting from available papers, a linear stability analysis will also be applied to this configuration : the results will be compared to the Saint Venant model ones and an improvement of the phenomena comprehension is expected. Finally, the developed models will be applied to simulate more complex geometries such as a FAN to analyze the capacity of the code to deal with industrial configuration.

Keywords: fluid mechanics, partial wetting, numerical modelling, Hamilton's principle, HLLC solver, thin films

