

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modélisation de l'accrétion de givre en vol basée sur des méthodes de frontières et de surfaces immersées

Référence : **MFE-DMPE-2026- 32**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 1^{er} octobre 2026

Date limite de candidature : 31 mai 2026

Mots clés

Méthodes Embedded Surfaces, Couche limite, transfert de chaleur convectif, couplage, méthodes numériques, simulations, givrage, méthodes de frontières immersées (Immersed Boundary Methods)

Profil et compétences recherchées

Université ou grandes écoles, niveau M2

Mécanique des fluides, mathématiques appliquées

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'accrétion de givre en vol sur les aéronefs est une problématique importante pour la sécurité dans le transport aérien. L'ONERA développe des modèles et des logiciels permettant aux industriels du secteur aéronautique français de simuler ce phénomène pour le design et la certification de leurs appareils. La méthode consiste à coupler plusieurs codes séquentiellement pour modéliser l'aérodynamique et les transferts de chaleur convectifs autour de l'obstacle givré, l'impact des gouttelettes d'eau sur ce dernier puis la formation du givre. Le couplage devant être réitéré de multiples fois pour faire croître le givre progressivement, le coût de calcul de chacun des solveurs couplés doit être réduit, et leur robustesse doit être assurée.

Dans cette optique, les calculs aérodynamiques peuvent être effectués par un couplage d'une simulation fluide parfait avec une méthode intégrale de couche limite. Des travaux ont été menés à l'ONERA ces dernières années sur ce sujet (thèses de C. Bayeux (2017) et de R. Harry (2022)) pour mettre en place une méthode intégrale innovante pour le calcul de la couche limite, résolue comme un système hyperbolique d'équations aux dérivées partielles. Cette méthode s'intègre dans un cadre plus général pour lequel les simulations de fluide parfait peuvent être conduites par une méthode de frontières immersées (Immersed Boundary Method, IBM, thèses en co-tutelle entre l'ONERA et Polytechnique Montréal de P. Lavoie (2021), et de P. Elices Paz (2025)). Cette dernière approche a pour but d'éviter l'étape coûteuse et parfois difficile à automatiser du remaillage, à chaque étape de la croissance du givre (Figure 1).

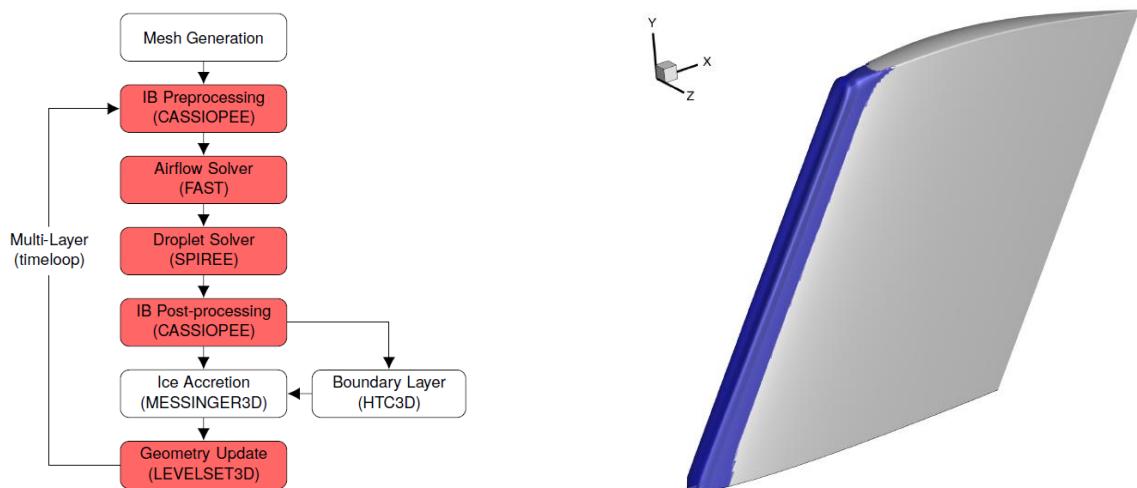


Figure 1: Chaine de calcul d'accrétion en approche IBM (à gauche), et forme de givre générée sur une aile en flèche (à droite). Extrait de Elices Paz et al., AIAA Aviation Forum 2024. Le calcul fluide parfait est ici effectué avec FAST et le calcul de couche limite avec le solveur intégral simplifié de couche limite HTC3D.

Le calcul des trajectoires des gouttes repose aussi sur une méthode de frontières immergées. Les solutions de couche limite et de formation de givre sont cependant encore issues de calculs par des solveurs surfaciques sur un maillage de surface qu'il faut générer à chaque étape de la croissance du givre. La thèse que nous proposons ici en co-tutelle avec Polytechnique Montréal s'intéresse à la méthode des *embedded surfaces* (Dziuk et Elliott 2013). Avec cette méthode, les équations surfaciques ne sont pas résolues sur un maillage de peau de la surface considérée, mais dans un volume englobant la surface. En procédant ainsi, on s'affranchit de la génération du maillage surfacique et on dispose d'une méthode globale (Euler, couche limite et particules) dépourvue de toute mise à jour de maillage tout au long de la simulation.

Par ailleurs, une difficulté connue des solveurs de couche limite est celle du calcul du décollement de la couche limite. Pour traiter ce problème, C. Bayeux (2017) a développé une méthode approchée compatible avec un couplage *Direct 1-Way* où un unique calcul fluide parfait alimente un calcul de couche limite. Dans la littérature, des couplages plus sophistiqués ont été proposés pour obtenir une solution plus précise, en particulier dans les zones décollées, quoique moins robuste. On peut ainsi citer les exemples des méthodes inverse de Catherall et Mangler (1966), semi-inverse de Le Balleur (1978), simultanée de Drela et Giles (1987) et quasi-simultanée de Veldman (2009). Dans cette thèse, une méthode de couplage sera aussi mise en œuvre en suivant des recommandations consécutives à des travaux récents effectués à Polytechnique Montréal, par Gorant (2025), qui identifient la méthode semi-inverse comme plus probante.

Les travaux envisagés incluront par conséquent aussi bien du développement de modèles (méthode intégrale de couche limite) que des méthodes numériques (couplage) et de l'implémentation des différentes méthodes dans des codes de calcul en faisant appel aux techniques de calcul hautement parallèle.

La méthode sera mise en œuvre sur des cas de complexité croissante : bi-dimensionnels, tri-dimensionnels, sans ou avec hyper-sustentation, avec des formes de givre plus ou moins développées. Enfin, bien que la thèse vise principalement la problématique du givrage en vol, elle pourra aussi déboucher sur des applications en aéroélasticité ou en optimisation aérodynamique.

Références :

- C. Bayeux, *Méthode intégrale pour la couche limite tridimensionnelle. Applications au givrage*, Thèse de l'Université de Toulouse, 2017.
- R. Harry, *Modélisation des transferts thermiques sur paroi givrée par méthode intégrale 3D*, Thèse de l'Université de Toulouse, 2022.
- P. Lavoie, *Méthode de frontières immergées pour la modélisation du givrage en vol des aéronefs*, Thèse en co-tutelle entre l'Université de Toulouse et Polytechnique Montréal, 2021.
- G. Dziuk et CM. Elliott, *Finite element methods for surface PDEs*. Acta Numerica. 2013
- D. Catherall et K. W. Mangler, *The integration of the two-dimensional laminar boundary-layer equations past the point of vanishing skin friction*, Journal of Fluid Mechanics, 26(1):163-182, 1966.
- J.C. Le Balleur, *Couplage visqueux-non visqueux : méthode numérique et applications aux écoulements bidimensionnels transsoniques*, La Recherche Aérospatiale, 183:65–76, 1978.
- M. Drela et M. Giles, *Ises : a two-dimensional viscous aerodynamic design and analysis code*, AIAA paper 87-1118, 1987.
- A. Veldman, *A simple interaction law for viscous-inviscid interaction*, Journal of Engineering Mathematics, 65:367–383, 2009.
- C. Gorant, *Development of methods to solve boundary layer equations for aero-icing applications*, Final Report, ARPE, École Normale Supérieure Paris Saclay, 61 pages, Sept. 2025.

Collaborations envisagées

Double diplôme en co-tutelle avec Polytechnique Montréal

| Laboratoire d'accueil à l'ONERA | Directeurs de thèse |
|--|--|
| Département : Multi-Physique pour l'Energétique | Nom : Emmanuel Radenac, Eric Laurendeau |
| Lieu (centre ONERA) : Toulouse | Laboratoire : ONERA DMPE, Polytechnique Montréal |
| Contacts : Emmanuel Radenac, Ghislain Blanchard, Maxime Bouyges, Philippe Villedieu | Tél. : 05 62 25 26 67 |
| Tél. : 05 62 25 26 67 Email : emmanuel.radenac@onera.fr | Email : emmanuel.radenac@onera.fr |

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