

# Simulations d'accrétion de glace sur un modèle d'étages de turboréacteur avec modélisation du ruissellement dû au dégivrage

Emmanuel RADENAC<sup>1\*</sup>, Garazi GÓMEZ DE SEGURA SOLAY<sup>1</sup>, Rémi CHAUVIN<sup>1</sup>,  
Claire LAURENT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ONERA

BP 4025, 2 avenue Ed. Belin, Toulouse

\*(auteur correspondant : emmanuel.radenac@onera.fr)

**Résumé** - La modélisation du givrage dans les turboréacteurs est un problème critique pour la sécurité aérienne, impliquant de nombreux phénomènes thermiques et multiphasiques. Cet article présente la chaîne de calcul de l'ONERA permettant de modéliser des systèmes d'antigivrage. Un cas expérimental est étudié en 2D plan, avec un paramétrage conséquent pour évaluer l'influence de nombreuses données physiques ou numériques sur la forme de glace. La vitesse de l'écoulement et la puissance du système de dégivrage sont les principaux paramètres physiques modifiés, permettant de voir l'impact de la convection, de l'apport de chaleur latente des gouttes surfondues et du chauffage sur l'accrétion de glace.

## Nomenclature

$c$	corde de l'élément A	$We$	nombre de Weber
$C_f$	coefficient de frottement	$u_g, u_p$	vitesse du gaz, des particules, m/s
$D_p$	diamètre des gouttes, m	$x, y$	coordonnées, m
$h_e$	épaisseur de culot, m	<i>Symboles grecs</i>	
$h_f$	hauteur de film, m	$\beta$	coefficient de captation
LWC	<i>Liquid Water Content</i> , kg/m <sup>3</sup>	$\delta$	épaisseur de couche limite, m
MVD	diamètre volumique médian, m	$\mu$	viscosité dynamique, Pa.s
$P$	pression, Pa	$\rho$	masse volumique, kg/m <sup>3</sup>
Re	nombre de Reynolds	$\sigma$	tension de surface, N/m
$s$	abscisse curviligne, m	<i>Indices et exposants</i>	
$T$	température, K	$w$	eau

## 1. Introduction

Le givrage est un problème critique pour la sécurité aérienne. Quand un avion traverse un nuage de gouttes en surfusion, du givre peut en effet se former sur différentes zones dont les moteurs. Les conséquences peuvent être dramatiques : la dégradation des performances aérodynamiques ou du fonctionnement des systèmes et les risques liés aux détachements de glace. L'étude présentée ici s'inscrit plus particulièrement dans le cadre du givrage des turboréacteurs, munis de systèmes de dégivrage ou d'antigivrage.

De nombreux phénomènes thermiques et multiphasiques sont alors rencontrés :

- l'impact des gouttelettes d'eau surfondues sur les aubes,
- le ruissellement éventuel de films d'eau sur l'aube,
- la fragmentation éventuelle de ce film et la ré-émission de gouttes au bord de fuite,
- les changements de phase (de l'eau surfondues et de celle accumulée sur les aubes),
- la convection forcée exercée par l'écoulement de l'air,
- la conduction dans les aubes à l'intérieur desquelles des systèmes d'antigivrage sont activés.

L'ONERA a donc développé des chaînes de calcul capables de modéliser l'ensemble de ces phénomènes. La chaîne 2D, IGLOO2D, utilisée ici, sera présentée en section 2.

Dans un but de validation, une expérience est menée par SNECMA et l'Université de Cranfield dans le cadre du projet européen STORM. Cette expérience, qui sera présentée brièvement en section 3, permettra de mesurer l'accrétion de glace sur deux rangées d'aubes successives, la première étant dégivrée (représentant des bras moteurs), et de caractériser les phénomènes de ruissellement. L'expérience n'a pas encore fourni ses résultats et sera ici surtout utilisée comme cas-test visant à démontrer la capacité de l'outil à traiter de tels problèmes et identifier les points difficiles (section 4).

## 2. Chaîne de calcul pour l'antigivrage

### 2.1. Chaîne 2D de calcul de l'accrétion

IGLOO2D est le code ONERA utilisé pour la simulation de l'accrétion en 2D. Il est composé de plusieurs modules qui sont appelés de façon séquentielle (dans la suite, les outils utilisés dans le cadre de cette étude sont en caractères gras).

La première étape est la simulation de la géométrie "propre", c'est-à-dire en l'absence de glace. Il s'agit d'abord de calculer l'écoulement gaz fluide parfait autour du profil (solveur Volumes Finis des équations d'Euler d'IGLOO2D, AERO2D, ou du code CEDRE, **CHARME**) puis la trajectoire des gouttes (solveur Lagrangien de la chaîne **TRAJ2D**, basé sur une traînée de Schiller-Naumann pour les gouttes liquides étudiées ici). On obtient ainsi le gradient de pression tangentiel à la paroi qui va agir sur le mouvement du film liquide en cas de ruissellement et le taux de captation des gouttes sur le profil. Ensuite, il faut également calculer le frottement du gaz à la paroi, l'autre force exercée par le gaz sur le film, et le flux de chaleur pour les échanges thermiques avec le gaz. Pour obtenir ces grandeurs, un code de couche limite est utilisé, soit basé sur une méthode intégrale (**MIS2D**, reposant sur les principes exposés dans [1, 2]), soit sur les équations de Prandtl (**CLICET** [3]). Finalement, toutes les données aérodynamiques obtenues et celles du code de trajectographie de gouttes sont fournies au solveur d'accrétion.

Une première forme de glace, dite prédite, est alors obtenue sur le profil. Une nouvelle séquence de simulation (Euler, trajectographie et couche limite) peut être réalisée avec cette nouvelle géométrie (profil avec la forme de glace). Pour converger sur la forme de glace finale, deux méthodes peuvent être exploitées, soit une méthode prédicteur/correcteur, soit du multi-pas. La première est la moins coûteuse : l'aérodynamique et la trajectographie utilisées pour obtenir la forme de glace finale sont une interpolation entre celles obtenues avec la géométrie propre et celles de la géométrie givrée prédite. L'approche multi-pas est plus coûteuse mais plus précise : le temps total d'accrétion est discrétisé en plusieurs pas de temps et une séquence de simulation est réalisée pour chaque pas de temps.

Enfin, concernant le code d'accrétion au cœur de la chaîne IGLOO2D, deux modules existent :

- **ACCRET2D**, basé sur l'approche classique de Messinger [4] qui permet de modéliser le phénomène d'accrétion dans les cas stationnaires avec des bilans thermodynamiques globaux [2],
- **SLUSH2D** basé sur une approche multi-couche [2, 5] pour les applications d'anti-givrage ou de dégivrage (plus particulièrement instationnaires bien qu'utilisé ici en état permanent). Ce modèle multi-couche permet de simuler les différents types de givre, ainsi que le ruissellement (figure 1). En effet, le givre blanc qui se forme à très basse température est modélisé par une couche de glace seule. Le givre transparent qui se forme à 0°C est

traité comme une couche de glace surmontée d'un film d'eau qui ruisselle (calculé par un modèle de lubrification). Enfin, le dégivrage d'un bloc de glace peut être modélisé par la prise en compte d'un film d'eau liquide qui se forme entre la glace et la paroi. Concernant la modélisation des effets thermiques, les gradients dans la glace sont pris en compte dans la direction normale par une méthode de Galerkin et **SLUSH2D** est couplé avec un module qui résout la thermique dans la paroi [6] (et modélise le système de protection) par une méthode de Schwarz optimisée [7].

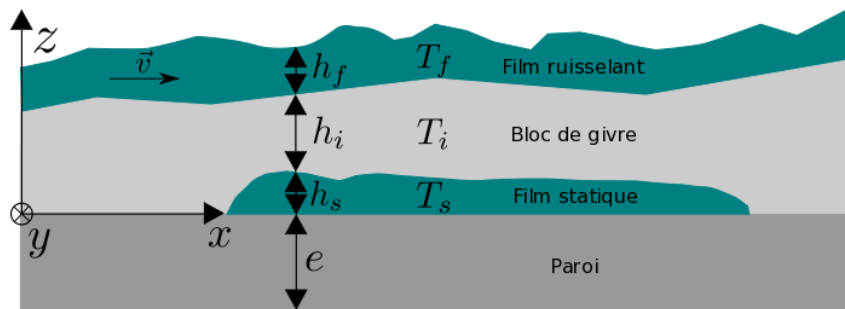


Figure 1: Modèle à trois couches

## 2.2. Modèle de fragmentation de film au bord de fuite

Le modèle de fragmentation s'active lorsqu'un film ruisselle jusqu'au bord de fuite de l'aube : le modèle donne les caractéristiques des gouttes atomisées (diamètre, vitesse, température) le long d'une ligne débitante. Ces données sont ensuite utilisées pour simuler la trajectoire de ces gouttes avec le code **TRAJ2D**. La distribution de taille de goutte est supposée être de type Langmuir "D" [8]. Celle de la vitesse (plus précisément l'orientation du vecteur vitesse) est uniforme ou suit une distribution normale. Une gamme d'angles d'injection est alors précisée par l'utilisateur (elle ne correspond pas à l'enveloppe finale dont la forme est réglée par les effets aérodynamiques, voir figure 2).

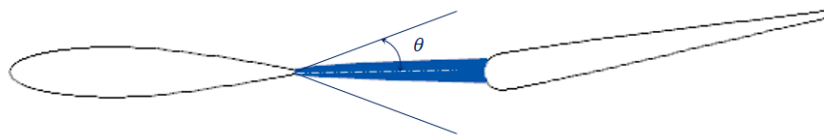


Figure 2: Angle d'injection

Concernant la valeur de la vitesse d'injection, différents modèles ont été testés avec une vitesse comprise entre celle du film et celle du gaz (hors couche limite). Cependant, il est important de noter que pour capturer correctement la trajectoire des gouttes, il faudrait pouvoir simuler leur accélération dans la couche limite et le sillage, ce qui n'est possible qu'avec un maillage suffisamment fin. Ensuite, les phénomènes qui se passent au moment de l'atomisation sont complexes (désintégration de nappe, etc.) et la formation des gouttes est progressive, avec d'abord l'atomisation primaire puis secondaire. La définition de la zone d'injection est donc délicate et différentes possibilités ont ainsi été testées, soit directement au bord de fuite, soit le long d'une ligne d'injection placée dans le sillage en aval du bord de fuite.

Concernant la modélisation du diamètre moyen des gouttes ré-émises, la littérature utilisée ici est celle des injecteurs avec pré-filming. Dans ces études, différents régimes de fragmentation

sont décrits selon le débit du film liquide [9]. Dans le cas des applications givrage où les débits sont très faibles, c'est le mécanisme dit "du réservoir" qui est observé. Ce régime a été décrit par plusieurs auteurs comme Sattelmayer et al. [10], Inamura et al [11] et Gepperth et al. [12]. D'après ce dernier, un réservoir de liquide se forme au niveau du bord de fuite et est continuellement alimenté par le film. Des ligaments en forme de bulles se créent et la fragmentation de ces bulles et des bourrelets conduit à la formation de petites et grosses gouttes respectivement. Ainsi, pour ce régime, les paramètres les plus influents sur l'atomisation sont la vitesse moyenne de l'air, l'épaisseur du culot au bord de fuite  $h_e$  et la tension de surface  $\sigma_w$ . De plus, Gepperth et Sattelmayer font remarquer que l'épaisseur du film  $h_f$  a très peu d'effet sur la taille des gouttes  $D_p$  qui est mesurée. Finalement, les corrélations retenues pour cette étude sont :

**Gepperth** [12]

$$\frac{D_p}{\delta} = 4.96 Re_\delta^{-0.17} We_\delta^{-0.36} \left( \frac{\rho_w}{\rho} \right)^{-0.013} \left( \frac{h_e}{\delta} \right)^{0.46} \quad \text{où } We_\delta = \frac{\rho u_g^2 \delta}{\sigma_w} \text{ et } Re_\delta = \frac{\rho u_g \delta}{\mu} \quad (1)$$

où  $\delta$  est l'épaisseur de couche limite au bord de fuite,  $u_g$  est la vitesse moyenne du gaz,  $\rho$  la masse volumique du gaz,  $\rho_w$  celle de l'eau et  $\mu$  est la viscosité dynamique du gaz.

**Sattelmayer** [10]

$$D_p = 0.67 \frac{\sigma_w^{0.75}}{u_g^{1.57}} \quad (2)$$

### 3. Expérience exploitée

IGLOO2D est testé sur un cas représentatif des phénomènes rencontrés en turbomachine avec actionnement d'un dégivreur thermique. L'expérience nommée "cascade rig" du projet européen STORM a été utilisée. Elle consiste à modéliser (en 2D plan et sans rotation) la succession de deux rangées d'aubes, A et B (figure 3), la première rangée A étant dégivrée par un réchauffeur électrique.

Les conditions, représentatives de celles attendues pour les essais, sont montrées sur la figure 3. Trois niveaux de débit soufflerie ont été utilisés (cas ① : 5,30 kg/s ; cas ② : 8,52 kg/s ; cas ③ : 13,75 kg/s). Une température de  $-20^\circ\text{C}$  a été retenue, permettant l'obtention d'un givre blanc pour les vitesses les plus basses et transparent pour des vitesses plus élevées. De plus, le brouillard incident est modélisé par une distribution uniforme de taille, de diamètre  $20 \mu\text{m}$  et la concentration est  $LWC=1 \text{ g/m}^3$  (*Liquid Water Content*). Le système de protection est composé des quatre réchauffeurs montrés sur la figure 3. Trois répartitions de puissance croissante sont employées pour les calculs (de nouveau représentatives des gammes de puissance envisagées pour les essais). Enfin, la durée d'accrétion est de 150 s.

Cas	H1	H2	H3	H4
Basse Puissance ( $W$ )	200	371	365	187
Puissance Moyenne ( $W$ )	200	495	487	187
Puissance Élevée ( $W$ )	500	817	805	467

Tableau 1: Puissance des dégivreurs électriques H1, H2, H3 et H4

Pour cet article, les calculs ont été faits sur le maillage de la figure 3, contenant 67110 cellules et concentré autour d'une série d'aubes A et B. Des conditions de périodicité sont utilisées en

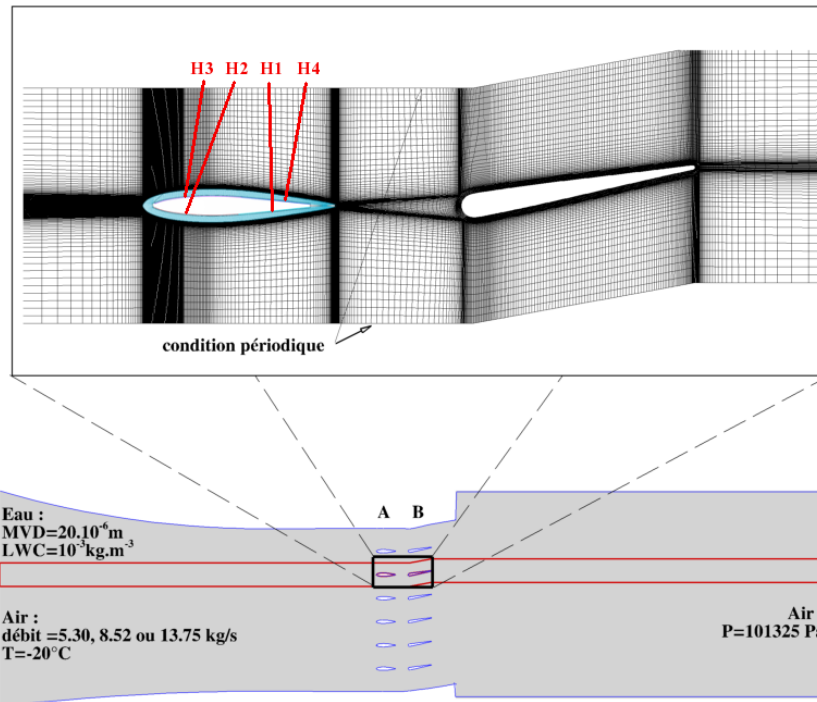


Figure 3: Configuration étudiée

bas et en haut. Le maillage, peu raffiné aux parois, est adapté pour des calculs fluide parfait, couplés avec une résolution de couche limite. Le maillage interne est généré par le code, par extrusion normale à la surface (20 cellules dans l'épaisseur et 280 cellules le long de la surface).

## 4. Calculs préliminaires

### 4.1. Calculs avec réchauffeurs éteints

Tout d'abord, avec les réchauffeurs éteints, du givre se forme sur l'élément A. L'approche prédicteur-correcteur est retenue. L'efficacité de captation (rapport entre les débits d'eau capté localement et injecté en amont) est peu affectée par la vitesse de soufflerie (figure 4a, où l'abscisse curviligne  $s$  s'annule au point le plus à gauche de l'élément, est négative à l'intrados et positive à l'extrados). Quand cette vitesse augmente, le débit d'eau injecté augmente et celui qui impacte croît donc aussi. La forme de glace s'épaissit alors (figure 4b).

Par ailleurs, pour les deux vitesses les plus faibles, du givre blanc est obtenu. Le bilan d'énergie montre en effet que l'énergie apportée par les gouttes surfondues (principalement leur chaleur latente) est compensée par les refroidissements convectif et évaporatif pour s'établir à une température négative ne permettant pas le ruissellement (figure 5a, pour le cas ②).

Pour la vitesse la plus élevée, le givre est transparent. De l'eau ruisselle à proximité du point d'arrêt où la forte énergie apportée par les gouttes n'est pas compensée par la convection et l'évaporation (figure 5b). Signalons que pour ce cas, la forme marquée de la glace et la forte restriction de la section de passage, induisant l'obtention de très fortes vitesses localement, ont compliqué le calcul de l'écoulement gazeux en phase correcteur. Nous avons donc eu recours à une réduction de l'ordre de discrétisation (ordre 1) et à l'utilisation de conditions d'entrée à pression et température génératrices imposées au lieu d'une condition de vitesse imposée.

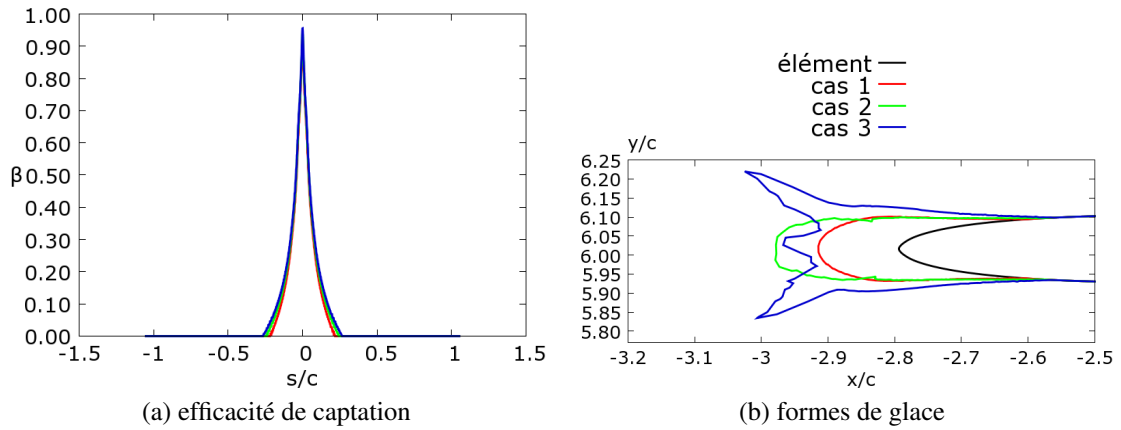


Figure 4: Efficacité de captation pour les trois vitesses soufflerie (avant accumulation de glace, étape prédicteur) et formes de glace associées

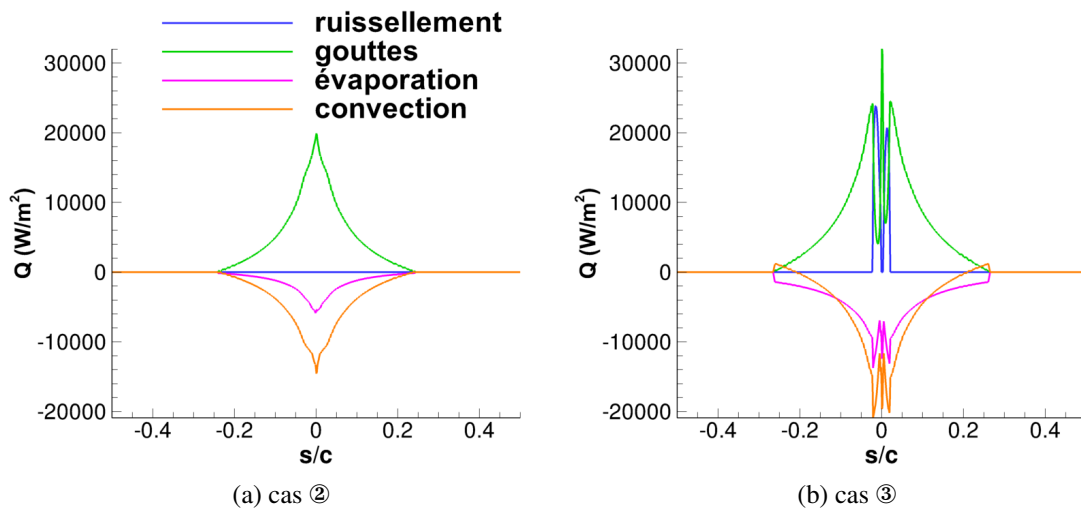


Figure 5: Bilan d'énergie sur les givres blanc et transparent

#### 4.2. Calculs avec réchauffeurs allumés

Dès que les réchauffeurs sont allumés, toute la glace fond et un film d'eau se forme sur l'élément A. La figure 6 montre l'épaisseur du film d'eau obtenue avec le code SLUSH2D pour la plus basse vitesse de soufflerie.

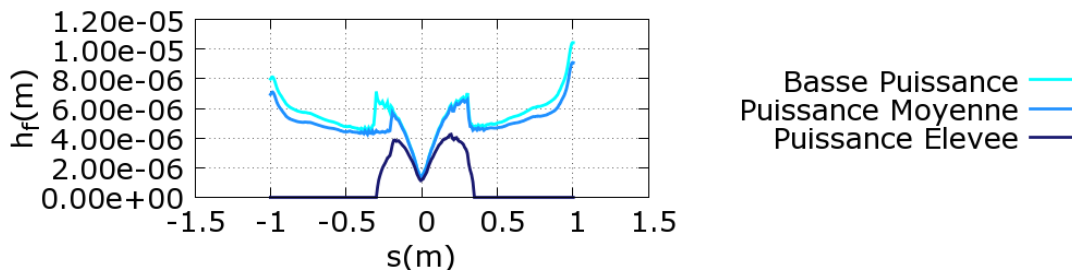


Figure 6: Épaisseurs de film pour les différentes puissance d'anti-givrage, cas ①

Pour les deux puissances d’anti-givrage les plus faibles, le film ruisselle jusqu’au bord de fuite, où son épaisseur est maximale (car le cisaillement exercé par le gaz s’atténue, comme le montre la figure 7b). Il est possible de localiser la transition laminaire turbulent (calculée avec le critère d’Arnal, Habiballah et Delcourt [13] compressible) au niveau du brutal amincissement du film (en raison d’un accroissement du frottement de l’air). Avec la puissance la plus élevée, l’évaporation du film est très forte et on rencontre un fonctionnement dit “*full-evaporative*” pour lequel toute l’eau est évaporée.

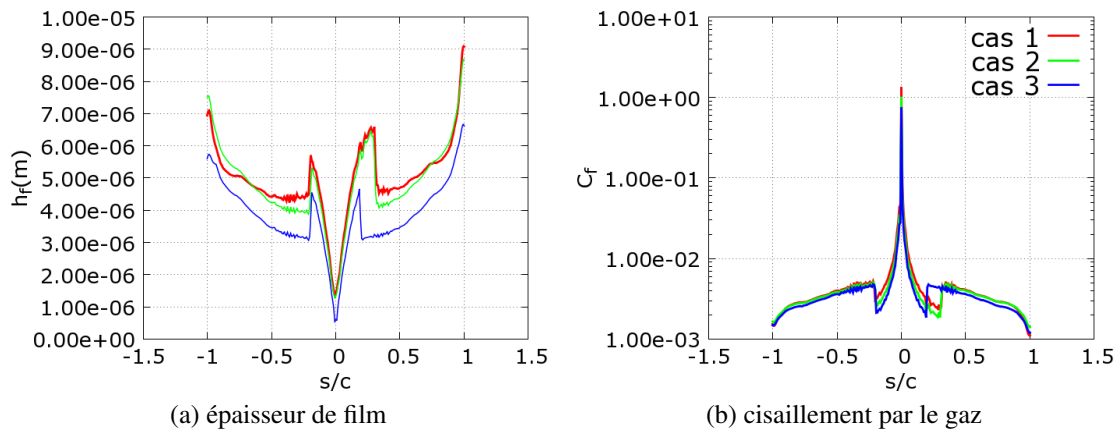


Figure 7: Comportement du film pour les trois vitesses de soufflerie, puissance intermédiaire

Il faut relever que les films sont très minces. Il est très possible qu’en réalité, ils ne couvrent pas toute la surface de l’élément (ce qui est supposé actuellement dans SLUSH2D) mais se fractionnent en ruisselets. Cela aurait pour conséquence de changer la surface d’échange entre l’eau et l’air, et *in fine* les échanges de chaleur. Un des objectifs des expériences sera donc d’étudier cela, évaluer l’impact de la modélisation actuelle et aider à apporter des solutions.

Le deuxième grand enjeu des expériences sera de caractériser la ré-émission d’eau au bord de fuite de l’élément A et les conséquences en termes de givrage sur l’élément B, non dégivré. Les calculs effectués ici, pour lesquels l’injection de gouttes est faite dans le sillage immédiat du bord de fuite, sur toute la hauteur de ce dernier, ont montré une faible influence de nombreux paramètres du modèle. Le diamètre des gouttes fourni par les approches de Gepperth et de Sattelmayer, bien que variant de  $106 \mu\text{m}$  à  $218 \mu\text{m}$  pour le cas ① (76 à 104 pour le cas ② et 49 à 54 pour le cas ③) n’a eu qu’une influence mineure sur la forme de glace obtenue sur l’élément B. De même, l’angle initial de dispersion des gouttes (paramétré entre 20 et 40°) ou la loi de distribution de vitesse (uniforme ou lognormale) n’ont pas eu d’impact notable.

En revanche, cette série de calculs illustre une difficulté de la modélisation : la vitesse d’injection des gouttes a une importance capitale (figure 8). Il apparaît qu’injectées à la vitesse du gaz, de l’ordre de la dizaine de m/s, les gouttes ont un comportement inertiel et que toutes celles qui ne sont pas initialement dirigées vers le profil ne l’impactent pas. En conséquence, peu d’eau est accumulée sur l’élément et la convection permet de la refroidir immédiatement pour avoir une faible épaisseur de givre blanc. Il paraît cependant plus réaliste de penser que les gouttes sont émises avec une vitesse faible. Elles sont alors nettement moins inertielles et le gaz les conduit en plus grand nombre sur le profil impacté. Une forme de givre transparent plus épaisse est alors obtenue. Les expériences permettront de vérifier cela et d’aider à améliorer la modélisation. Par ailleurs, en parallèle, l’entraînement des gouttes sera calculé sur un maillage plus fin.

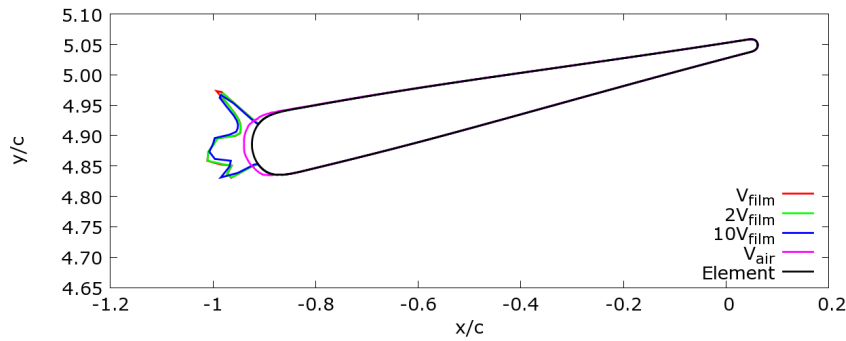


Figure 8: Givre obtenu sur l'élément B en fonction de la vitesse d'injection, cas ①

## 5. Conclusion

La chaîne de calcul 2D de l'ONERA est testée sur un cas expérimental d'anti-givrage dans des rangées d'aubes de turbomachine. Des comparaisons seront faites par la suite avec les expériences, en tenant compte des principales leçons des calculs exposés ici (notamment les effets du ruissellement, incluant la modélisation de la ré-émission de gouttes en bout d'aube). Des fonctionnalités similaires seront par ailleurs intégrées dans le code 3D FILM de la plateforme CEDRE, solveur pouvant faire partie des modules de la chaîne 3D de givrage, IGLOO3D.

## Références

- [1] R. Gent, N.P. Dart et J.T. Cansdale, Aircraft Icing, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 358 (2000)
- [2] R. Chauvin, Un modèle unifié pour les phénomènes de givrage en aéronautique et les systèmes de protection thermiques, *Thèse de l'Université de Toulouse*, (2015)
- [3] B. Aupoix, Couches Limites Bidimensionnelles Compressibles. Descriptif et Mode d'Emploi du code CLICET - version 2010, *Rapport Technique*, 1/117015 DMAE (2010)
- [4] B. L. Messinger, Equilibrium temperature on an unheated icing surface as a function of airspeed, *J. Aeronautical Sci.* 20 (1953), 29-41
- [5] R. Chauvin, P. Villedieu, P. Trontin et L. Bennani, A robust coupling algorithm applied to thermal ice protection system unsteady modeling, *6th AIAA Atm. and Space Env. Conf.* (Atlanta, 2014)
- [6] L. Bennani, P. Villedieu et M. Salaün, Two Dimensional Model of an Electro-Thermal Ice Protection System, *5th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference* (San Diego, 2013)
- [7] M. J. Gander, Optimized Schwarz Methods, *SIAM J. Numer. Anal.*, 44(2) (2006), 699-731
- [8] I. Langmuir et K.B. Blodgett, A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories, *Army Air Forces Technical Report*, 5418 (1946)
- [9] B. Déjean, P. Berthoumieu et P. Gajan, Experimental study on the influence of liquid and air boundary conditions on a planar air-blasted liquid sheet, Part II, *Int. J. Multiphas. Flow*, 79 (2016)
- [10] T. Sattelmayer et S. Wittig, Internal flow effects in prefilming airblast atomizers : Mechanisms of atomization and droplet spectra, *J. Eng. Gas Turbines Power* 108 (1986), 465-472.
- [11] T. Inamura, M. Shirota, M. Tsushima et M. Kato, Spray Characteristics of prefilming type of airblast atomizer, *ICLASS* (Heidelberg, 2012).
- [12] S. Gepperth, R. Koch et H.-J. Bauer, Analysis and comparison of primary droplet characteristics in the near field of a prefilming airblast atomizer, *ASME Turbo Expo* (San Antonio, 2013).
- [13] D. Arnal, E. Coustols et J.-C. Juillen, Étude expérimentale et théorique de la transition sur une aile en flèche infinie, *La Recherche Aérospatiale*, 4 (1984).

## Remerciements

La recherche menant à ces résultats a reçu des fonds du programme-cadre de l'Union Européenne FP7/2007-2013 sous la convention de subvention n°605180. Les auteurs remercient également SNECMA pour les nombreux échanges autour des calculs présentés.