

Simulations numériques de changement de phase appliquées au givrage en aéronautique

Kevin **IGNATOWICZ**^{1,*}, François **MORENCY**¹, Héroïse **BEAUGENDRE**²

¹ École de technologie supérieure, Montréal, Canada

² INRIA- Bordeaux INP, Bordeaux, France

RÉSUMÉ

Anticiper les phénomènes de givrage sur un avion est capital pour assurer la sécurité des vols. L'étude du givrage par le biais de simulations numériques est devenue un outil majeur et complémentaire des essais expérimentaux. Pouvoir modéliser les changements de phase de l'eau est l'un des défis de ces simulations en vue de mieux comprendre l'accrétion de glace et dimensionner les systèmes thermiques de dégivrage. Le modèle 2D présenté ici permet de simuler une accrétion de glace sur un profil d'aile à partir d'un bilan de masse et d'énergie. La comparaison sera effectuée avec différentes valeurs du coefficient d'échanges convectifs pour mettre en avant son impact sur la forme finale d'une accrétion de glace sur une aile givrée.

Mots Clés: *Aéronautique, givrage, dégivrage, changement de phase, modèle de Messinger.*

NOMENCLATURE

Symboles

c : Corde du profil, m
 $C_{p,air}$: Capacité calorifique de l'air, 1006 J/kg/K
 $C_{p,w}$: Capacité calorifique de l'eau liquide, 4180 J/kg/K
 e_0 : Constante de pression de vapeur saturante, 27.03
 f_{ice} : Fraction de glace
 h_c : Coefficient d'échanges convectifs, W/m²/K
 L_e : Nombre de Lewis, 1.39 en régime laminaire
 L_E : Chaleur latente d'évaporation, $2.50 \cdot 10^6$ J/kg
 L_F : Chaleur latente de solidification, $3.344 \cdot 10^5$ J/kg
 L_S : Chaleur latente de sublimation, $2.8344 \cdot 10^6$ J/kg
 LWC : Densité d'eau liquide dans l'air, kg/m³
 M : Nombre de Mach
 Pr : Nombre de Prandtl, 0.72 en régime laminaire
 P_t : Pression totale de l'écoulement, Pa
 \dot{Q} : Taux de variation d'énergie, W/m²
 s : Abscisse curviligne, m

T_a : Température de l'air, K
 T_{rec} : Température de récupération (K)
 T_s : Température de paroi, K
 V : Vitesse d'écoulement, m/s
 \dot{m} : Débit de masse, kg/m²/s

Lettres grecques

β : Efficacité de captation
 ε : Émissivité radiative de la glace, 0.8
 σ_r : Constante de Boltzmann, $5.6704 \cdot 10^{-8}$

Indices / Exposants :

a : Aérodynamique
conv : Convectif
es : Évaporation/sublimation
ice : Croissance de la glace
imp : Impact des gouttelettes
in : ruissellement entrant
kin : énergie cinétique
out : ruissellement sortant

* auteur correspondant
Adresse électronique : kevin.ignatowicz.1@ens.etsmtl.ca

INTRODUCTION

Le givrage des avions peut menacer la sécurité des vols, notamment en dégradant les performances aérodynamiques, en augmentant la masse de l'appareil ou encore en obstruant des capteurs. Un des systèmes employés pour contrer les effets du givrage est de chauffer les bords d'attaque des ailes en vue de provoquer une fonte partielle de l'accrétion, menant à son détachement. Ces systèmes étant très énergivores, leur mise en action se fait uniquement lorsque les conditions givrantes sont avérées. La formation de la glace étant difficile à anticiper, ces systèmes doivent avoir une double fonction préventive et curative. Pouvoir anticiper et lutter efficacement contre ce phénomène d'accrétion de glace est ainsi un enjeu majeur de l'industrie aéronautique. En complément des vols d'essais de givrage, obligatoires pour obtenir la certification d'un appareil [1], les études via des simulations numériques sont devenues des outils incontournables. Un des enjeux d'une simulation de givrage- ou de dégivrage- est de correctement modéliser les changements de phase intervenant, dans un sens ou dans l'autre, entre l'eau liquide et la glace solide. D'autres points à prendre en considération sont la modélisation fine du coefficient d'échanges thermiques convectifs ainsi que la croissance de la glace. Depuis le modèle Messinger apparu dans les années 1950 [2] et servant de référence dans le domaine, plusieurs modèles ont vu le jour pour modéliser efficacement une accrétion et/ou fonte de glace [3]. Le présent article dépeint un modèle de simulation de givrage en 2D permettant de déterminer la fraction de l'eau captée qui gèle au contact d'un profil d'aile, dans des conditions givrantes données, et la forme de l'accrétion de glace. L'objectif de l'article est de proposer une méthode numérique de simulation de givrage 2D, de la vérifier vis-à-vis de la littérature puis de la mettre en application dans un cas test autour d'un profil NACA0012. L'étude réalisée va permettre de quantifier la prédominance du terme convectif dans la balance énergétique et une étude paramétrique permettra de déterminer l'impact d'une variation du coefficient convectif sur l'épaisseur de glace accrétée. Cette analyse sera menée en vue d'orienter les futurs développements du code vers une méthode toujours plus fine dans le choix des coefficients thermiques à employer.

La partie méthodologie suivante va donner le détail des modèles mathématiques en jeu ainsi que leur implémentation dans MATLAB en vue d'effectuer les simulations. Par la suite, les résultats obtenus vont être exposés et comparés avec la littérature existante. L'étude

de sensibilité de l'épaisseur de l'accrétion vis-à-vis du coefficient d'échanges convectifs complètera l'analyse.

MÉTHODOLOGIE

Modèle mathématique

La simulation numérique du givrage fait intervenir des notions de changements de phase et transferts de chaleur. Les modèles mis au point pour étudier le givrage aéronautique sont notamment dérivés du modèle de Messinger [2]. Ce modèle proposé en 1953 est basé sur l'étude d'un volume de contrôle composé d'une paroi solide sur laquelle repose une épaisseur de glace, elle-même surmontée d'un film d'eau liquide en mouvement. Un bilan de masse et d'énergie au sein d'un volume de contrôle en régime permanent permet d'estimer la fraction d'eau captée qui va geler ainsi que le taux de croissance de la glace. Le paramétrage du problème est illustré à la Figure 1.

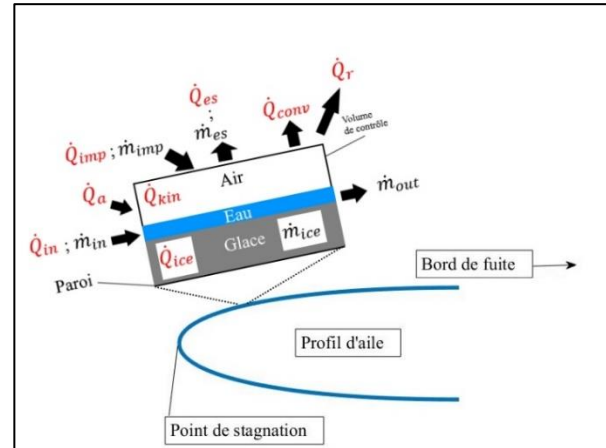


Figure 1 : Schématisation du volume de contrôle à la surface de l'aile et des flux de masse et d'énergie.

Les bilans de masse et d'énergie sont donnés par les équations suivantes et s'appliquent pour chaque volume de contrôle.

$$\dot{m}_{in} + \dot{m}_{imp} - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{es} - \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{es} + \dot{Q}_{imp} - \dot{Q}_{kin} - \dot{Q}_{ice} - \dot{Q}_{in} = 0 \quad (2)$$

Il est à noter que ce modèle néglige la conduction thermique dans la glace. D'autres modèles basés sur ce

modèle Messinger, développés dans les années 2000, comblent cette lacune du modèle originel [3]. Dans chacune des équations précédentes, les termes d'indice *in* correspondent au ruissellement d'eau liquide entrant, *out* au ruissellement sortant, *imp* à l'apport par impact des gouttelettes d'eau présentes dans l'air, *ice* à la croissance de la glace, *es* à l'évaporation/sublimation. Pour l'équation d'énergie, la quantité indiquée *kin* correspond à un apport énergétique par énergie cinétique des gouttelettes, *conv* traduit les échanges convectifs avec l'air ambiant, *r* la perte de chaleur par radiation et enfin *a* le gain d'énergie par l'écoulement. Les travaux issus de la littérature, qui serviront à vérifier l'implémentation d'une variante du modèle de Messinger, sont les simulations autour du profil NACA0012 effectuées par Lavoie et al [3]. Les paramètres du cas test seront donnés dans la section des résultats. La formulation des différents termes d'énergie intervenant dans l'équation (2) a été donnée par Özgen et Canibek [4]. Tous ne vont pas être détaillés ici par souci de concision, mais les termes de l'équation d'énergie sont donnés ci-après. Les valeurs numériques des constantes intervenant sont données au début de l'article dans la nomenclature.

$$\dot{Q}_{conv} = h_c(T_s - T_{rec}) \quad (3)$$

Dans cette expression, T_s est la température de surface et T_{rec} la température de récupération, calculée avec la formule (4) :

$$T_{rec} = T(1 + Pr^{1/3} \cdot 0.2M^2) \quad (4)$$

Le coefficient d'échanges convectifs h_c , pour qu'il soit représentatif des caractéristiques thermiques du profil NACA0012, est issu des résultats expérimentaux de la NASA [5] et des travaux de Lavoie et al. [3]. Ces valeurs de coefficient d'échange ne sont pas les mêmes suivant les études considérées, une comparaison sera donc effectuée dans la section résultats. La suite des termes de la balance énergétique sont :

$$\dot{Q}_{es} = \frac{0.622h_c e_o (T_s - T_a)}{C_{p,air} P_t L_e^{\frac{2}{3}}} (L_S + L_E) \quad (5)$$

Cette expression du flux énergétique d'évaporation-sublimation peut également être exprimée en fonction du débit massique s'évaporant ou se sublimant [4] :

$$\dot{Q}_{es} = \dot{m}_{es}(L_S + L_E) \quad (6)$$

$$\dot{m}_{es} = \frac{0.7h_c (p_{vs} - p_{vinf})}{C_{p,air} P_{inf}} \quad (7)$$

Dans l'équation (5), e_o est le coefficient de pression de vapeur saturante, dont la valeur de 27.03 issue de Özgen et Canibek [4] est obtenue en égalisant les équations (5) et (6) pour une différence de température de 6.7 K entre la surface et l'air. Cette valeur constante a été retenue par Özgen et Canibek même pour des différences de températures différentes. L_S et L_E respectivement les chaleurs latentes de sublimation et d'évaporation, $C_{p,air}$ la capacité thermique de l'air, P_t la pression totale de l'écoulement, L_e le nombre de Lewis, p_{vs} et p_{vinf} les pressions de vapeur saturantes en surface et à l'infini, et enfin p_{inf} la pression statique à l'infini.

$$\dot{Q}_{imp} = LWC \cdot \beta \cdot V \cdot C_{pw}(T_s - T_a) \quad (8)$$

Où LWC est la densité massique d'eau liquide dans l'air, β l'efficacité de captation de la géométrie, V la vitesse de l'écoulement et C_{pw} la capacité thermique de l'eau liquide.

$$\dot{Q}_{kin} = LWC \cdot \beta \cdot \frac{V^3}{2} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{ice} = \dot{m}_{ice} \cdot L_F \quad (10)$$

L_F étant la chaleur latente de solidification.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{in} \cdot C_{pw}(T_s - T_a) \quad (11)$$

De façon à rendre plus aisée la résolution numérique du modèle, un paramètre caractéristique est créé à partir des termes du bilan de masse : la fraction de glace. Ce paramètre adimensionnel correspond à la proportion d'eau qui gèle une fois dans le volume de contrôle pour un volume d'eau liquide entrant donné. Son expression est donnée ci-après.

$$f_{ice} = \frac{\dot{m}_{ice}}{\dot{m}_{in} + \dot{m}_{imp}} = \frac{\dot{m}_{ice}}{\dot{m}_{in} + LWC \cdot \beta \cdot V} \quad (12)$$

Cette fraction de glace permet de reformuler le bilan de masse de façon à calculer de façon explicite le débit massique d'eau ruisselante sortante :

$$\dot{m}_{out} = (1 - f_{ice})(\dot{m}_{in} + LWC \cdot \beta \cdot V) \quad (13)$$

Parmi les paramètres dépendant grandement de la géométrie figurent l'efficacité de captation β et le coefficient d'échanges h_c . L'efficacité de captation a été extraite de la littérature pour le profil NACA0012 à 4° d'angle d'incidence, configuration qui servira de référence pour la section des résultats qui va suivre [4]. De par la forme d'un profil d'aile, chaque position sur la surface

n'aura pas la même efficacité de captation : le bord d'attaque et notamment le point extrémal, appelé point d'arrêt, aura une captation plus importante que le reste de l'aile. Cela se traduira par une plus grande quantité d'eau accumulée dans cette zone. Özgen et Canibek [4] donnent la variation de β en fonction de la position sur le profil d'aile adimensionnée par la longueur de corde. La position 0 est au point d'arrêt, les valeurs positives de s/c sont sur l'extrados. Le présent modèle interpole la valeur de β à partir du graphe de la Figure 2.

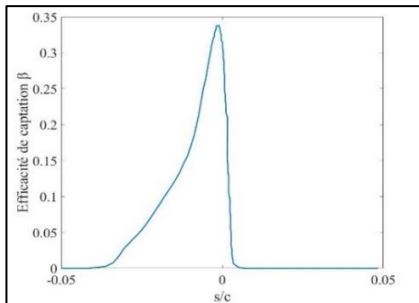


Figure 2 : Efficacité de captation en fonction de la position sur un profil NACA0012 à 4° d'incidence.

Le coefficient h_c a été extrait de deux sources différentes pour effectuer une comparaison : des résultats expérimentaux de la NASA et de la corrélation donnée par Lavoie et al. [3]. Les deux corrélations telles que présentées ici incluent la contribution de l'échauffement cinétique. La Figure 3 donne la variation du coefficient h_c en fonction de l'abscisse curviligne adimensionnelle autour du profil NACA0012 à proximité du bord d'attaque. Les deux formulations diffèrent de par leur nature : expérimentale pour la NASA et issue de la CFD, donc numérique, pour Lavoie et al. Lors de l'expérience, la couche limite est initialement laminaire alors que les résultats numériques supposent l'écoulement complètement turbulent. Par ailleurs, les études de la NASA utilisent des jauges placées dans la zone proche du bord d'attaque, ce qui explique la différence de plages de valeurs en abscisse curviligne entre les deux corrélations.

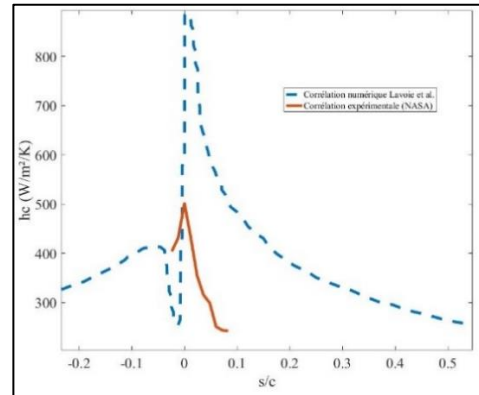


Figure 3 : Coefficient d'échange convectif autour du NACA0012 selon les deux corrélations retenues.

Le modèle tel qu'utilisé dans la présente étude est monocouche, c'est-à-dire que l'accrétion est calculée en une seule fois. Cela ne nécessite donc pas une mise à jour de l'écoulement et des paramètres tels que le coefficient d'échanges convectifs au cours de la simulation.

Implémentation numérique

Dans le cadre du présent travail, les équations mathématiques précédentes ont été implémentées dans MATLAB. L'algorithme général de ce code de calcul est donné par la figure suivante, où les « conditions ambiantes » incluent les paramètres de l'écoulement, ainsi que la corrélation choisie pour le calcul de β et h_c .

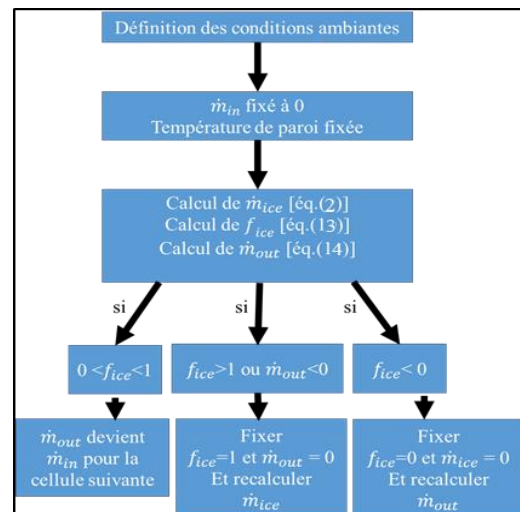


Figure 4 : Algorithme de calcul du modèle.

RÉSULTATS

La mise en application du modèle précédemment décrit va se faire sur un cas test dont la configuration et les paramètres sont détaillés dans l'article de Lavoie et al. [3] :

Tableau 1 : Conditions pour le cas test.

Grandeur	Valeur
Corde	0.53 m
Angle d'attaque	4°
Vitesse d'écoulement V	58.1 m/s
Température de l'air T_a	269.1 K
Température de paroi T_s	273.15 K
Pression ambiante	95610 Pa
LWC	1.3 g/m ³
Durée de simulation	480s
Densité de l'air	1.238 kg/m ³

La vitesse de l'ordre de 200 km/h est représentative d'une phase d'atterrissage ou de décollage, qui sont les moments les plus propices pour la formation de glace sur un avion.

Les simulations vont être menées en mettant en avant l'importance de la valeur du coefficient d'échanges convectifs h_c . Pour ce faire, dans un premier temps les simulations vont être effectuées avec les valeurs de h_c issues des résultats expérimentaux de la NASA [5] puis avec la corrélation donnée par Lavoie et al.

Avant cela, le code est dans un premier temps vérifié vis-à-vis de la littérature de référence. Les profils de glace dans les prochaines sections serviront également de vérification pour s'assurer que les formes d'accrétions obtenues ne sont pas trop éloignées des références. Les profils de référence ont été obtenus par Lavoie et al. à partir du modèle Messinger. Dans la simulation du cas test présenté dans le Tableau 1, Lavoie et al. [3] donnent la valeur de la fraction de glace au niveau du point d'arrêt dans le cas de plusieurs modèles différents de simulation : le modèle Messinger stationnaire (sur lequel le présent modèle est basé), le modèle stationnaire Messinger Itératif [6] et les modèles instationnaires Messinger Étendu [7] et SWIM [8]. La comparaison est donnée dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Comparaison de la fraction de glace au point d'arrêt.

Présent modèle	Messinger	Messinger Itératif	Messinger Étendu	SWIM
0.153	0.140	0.119	0.310	0.119
Erreur :	9%	28%	51%	28%

Étant donné que le présent modèle est basé sur le modèle Messinger, il n'y a qu'un faible écart avec le modèle Messinger tel que testé par Lavoie et al. L'écart provient probablement de certains paramètres non précisés par Lavoie et al., tels que la corrélation pour β retenue. La

comparaison avec les autres modèles est moins immédiate dans la mesure où les deux derniers sont instationnaires et n'utilisent pas les mêmes modèles mathématiques, ce qui peut faire changer les résultats.

Influence du coefficient h_c

La figure suivante présente la comparaison entre les profils de glace obtenus pour chacune des corrélations retenues pour h_c . Les valeurs de référence issues de la littérature sont également tracées : les résultats numériques obtenus par Lavoie et al. ainsi que les résultats expérimentaux également présentés par Lavoie et al. A noter la distribution d'épaisseur qui varie en accord avec l'efficacité de captation de la figure 3.

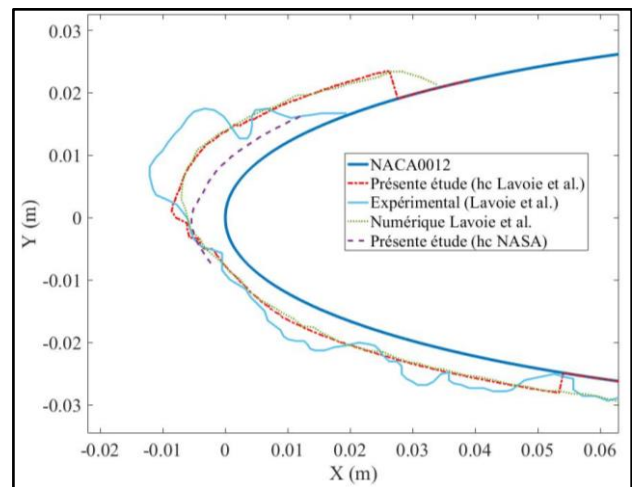


Figure 5 : Comparaison des profils de glace obtenus suivant le h_c retenu et comparaison avec la littérature.

Le choix de la corrélation pour h_c a un fort impact sur la forme finale de l'accrétion. En effet, les profils de glace obtenus dans la présente étude pour les deux corrélations de h_c , sont relativement différents. Cela est dû au fait que les deux principaux termes dans la balance énergétique (2) sont le terme convectif et le terme d'accrétion. Cette prépondérance des termes convectifs et d'accrétion est montrée dans le Tableau 3 suivant, où les valeurs de ces termes sont comparées avec la densité de puissance surfacique d'impact des gouttelettes et de ruissellement entrant, en fonction de l'abscisse curviligne à proximité du bord d'attaque. Les deux valeurs dans chaque case correspondent aux deux modèles de coefficient h_c utilisés, la valeur en bleu correspondant au modèle de la NASA.

Tableau 3 : Valeurs de certains termes d'énergie le long de l'abscisse curviligne, pour les deux corrélations de h_c .

$mm \backslash W/m^2$	-9	2.25	13.5	24.75	36
\dot{Q}_{conv}	623 1066	2311 1275	2427 1190	2166 983	1778 872
\dot{Q}_{ice}	1996 2992	5418 3203	4984 2443	4468 2028	3687 1809
\dot{Q}_{imp}	660	532	0.14	0	0
\dot{Q}_{in}	0 0	554 500	795 860	526 729	285 620

Valeurs en noir : corrélation h_c de Lavoie et al.; Valeurs en bleu : NASA.

Il est ainsi possible d'observer une forte variation des termes énergétiques – et pas seulement du terme convectif – lorsque le coefficient h_c varie. Ainsi le coefficient d'échanges convectifs pilote toute la balance énergétique et influe donc grandement sur le résultat de l'accrétion. Cette sensibilité de la taille de l'accrétion par rapport à la valeur du coefficient h_c est exposée dans le tableau suivant, dont les valeurs ont été prises au point d'abscisse curviligne 2.25 mm. Pour ce faire, la valeur du coefficient h_c a été modifiée de 10, 5 ou 2% par rapport à la valeur référence de Lavoie et al. pour effectuer un test de sensibilité.

Tableau 4 : Sensibilité de la hauteur de glace par rapport à la valeur du coefficient d'échanges h_c .

h_c (W/m ² /K)	885.3 Réf.	973.8 (+10%)	841 (-5%)	903 (+2%)
Épaisseur de glace (mm)	8.5 Réf.	9.3 (+9.4%)	8.1 (-4.7%)	8.7 (+2.4%)

Il est ainsi possible d'observer la dépendance de l'épaisseur de glace par rapport à la valeur du coefficient h_c : la variation relative d'épaisseur de glace est du même ordre de grandeur que la variation relative de la valeur h_c . Ainsi, il est capital de choisir une corrélation très fine concernant la valeur du coefficient d'échanges pour obtenir des résultats fidèles à la réalité. Les travaux futurs s'orienteront ainsi dans cette direction en se concentrant sur des coefficients en adéquation avec la géométrie employée, comme le NACA0012 dans le présent article.

CONCLUSION

Ce développement d'un modèle académique de simulation d'accrétion de glace sur un profil d'aile d'avion a permis, après vérification avec la littérature, de mettre en avant l'importance dans une telle simulation de prendre une corrélation adéquate en ce qui concerne la valeur du

coefficient h_c . La forme finale de l'accrétion présente une grande dépendance vis-à-vis du coefficient d'échanges thermiques. Les tests de sensibilité montrent que la variation relative de l'épaisseur de glace est environ 4 fois plus importante que la variation relative de la valeur de h_c . Les futures perspectives seront d'améliorer la fidélité du code en passant à un régime instationnaire avant un passage en 3D.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Décanat des Études de l'École de technologie supérieure et l'association Le Tomato de l'Aéroclub de France pour le soutien.

RÉFÉRENCES

- [1] VUKITS, T., *Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components*, in *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. 2002, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [2] MESSINGER, B.L., (1953), Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Air Speed. *Journal of the Aeronautical Sciences*. (20): p. 29-42.
- [3] LAVOIE, P., et al., (2018), Comparison of thermodynamic models for ice accretion on airfoils. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. (28): p. 1004-1030.
- [4] ÖZGEN, S. and CANİBEK, M., (2008), Ice accretion simulation on multi-element airfoils using extended Messinger model. *Heat and Mass Transfer*. (45): p. 305.
- [5] E. NEWTON, J., et al., (1988) Measurement of local convective heat transfer coefficients from a smooth and roughened NACA-0012 airfoil: Flight test data, in *26th Aerospace Sciences Meeting*. NASA: Reno, Nevada.
- [6] ZHU, C., et al., (2012), 3D Ice Accretion Simulation For Complex Configuration Basing On Improved Messinger Model. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. (19): p. 341-350.
- [7] MYERS, T.G., (2001), Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing. *AIAA Journal*. (39): p. 211-218.
- [8] BOURGAULT, BEAUGENDRE, and HABASHI, (2000), Development of a Shallow-Water Icing Model in FENSAP-ICE. *Journal of Aircraft*. (37): p. 640-646.