

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA -1-

Institut d'aéronautique et des études spatiales
Département de construction aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme de master en aéronautique

Option : structures aéronautiques

Thème :

ETUDE NUMERIQUE D'ACCRETION DE GLACE SUR UN PROFIL D'AILE

Réalisé par :

ADROUCHE Lotfi

BOUDAUD Sofia

Encadré par :

M. DRIOUCHE

M. REZZOUG

Année de soutenance : 2019-2020

Dédicaces :

Je dédie ce travail en premier lieu à ma petite sœur Souad qui m'a toujours soutenue et cru en moi, je le dédie également à :

- Mes chers parents : Ourida et Kamel ;
- Ma très chère grand-mère : Ouardia ;
- Mes deux grandes sœurs (Dihya et Fatima) et mes deux petits frères (Lounes et Arezki) ;
- Mes magnifiques neveux (Raveh et Arezki) et ma petite princesse Dacine ;
- Sans oublier mon binôme et toute sa famille ;
- Et mon amie Mounia SI QUESMI ;
- Et une pensée à mes défunts grands-parents : Arezki ; Ahcen et Zahra.

BOUDAOU D Sofia

Dédicace :

Je dédie ce mémoire à :

- Mes très chers parents à qui je ne saurais comment exprimer ma gratitude et mes remerciements pour tout ce qu'ils ont fait pour moi ;
- Mon frère Bachir et mes sœurs Wafa et Meriem ;
- Toute ma famille et mon cher ami Dussama ;
- Je termine avec la personne avec qui j'ai partagé tout le travail, qui a supporté mes humeurs aux moments de stress, mon binôme Sofia et sa famille.

ADROUCHE Lotfi

Remerciements :

Ils s'adressent tout d'abord à Allah le tout puissant pour nous avoir donné la vie et toutes les belles choses, expériences et personnes qu'Il nous y a envoyé.

Ensuite bien-sûr, ils vont à nos parents et familles pour leur soutien et leur aide aussi minime soit-elle.

Ils vont également à notre promoteur et co-promoteur : messieurs Tahar REZZOUG et Mouloud DRIOUCHE. Et à monsieur Dan KETELAAR pour son aide précieuse.

Aussi, nous remercions les professeurs qui nous ont accompagnés, chacun de son côté ou ensemble, le long de notre cursus scolaire et universitaire.

Et enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document.

Résumé : Le givrage est un risque majeur pour la sécurité aérienne. Il se produit généralement lorsqu'un aéronef traverse un nuage de gouttelettes surfondues pendant le vol. Les gouttelettes peuvent geler sur les surfaces exposées et entraîner l'accumulation de glace sur les ailes, les nacelles, l'empennage, les antennes, etc. Le givre peut dégrader les performances aérodynamiques de l'aéronef, bloquer les entrées du moteur, endommager des composants structurels en cas de départ de morceaux de glace. Le but de l'étude est de réaliser une simulation numérique d'accrétion de glace sur un profil d'aile, en utilisant le logiciel Ansys FENSAP-ICE. Ainsi que la comparaison de l'influence des différents paramètres sur le niveau d'accrétion de glace, notamment : la pression, la température, la vitesse, l'angle d'incidence, la rugosité, le diamètre des particules et leur distribution, la teneur en eau liquide et la température extérieure de l'air ou température de givrage.

Mots-clés : givrage, FENSAP-ICE, NACA0012, simulation.

Abstract: Icing is a major risk for the aerial security. It generally happens when an aircraft passes through a cloud of supercooled droplets during the flight. The droplets can freeze on the exposed areas and cause an accumulation of ice on the wings, the nacelles, the tail, the antennas, etc. the frost can deteriorate the aerodynamic performances of the craft, obstruct the engine entries, damage the structural components if pieces of ice take off. The aim of the study is to realize a numerical simulation of ice accretion on a wing profile, using Ansys FENSAP-ICE. And also the comparison of the influence of the different parameters on the level of ice accreted, especially: pressure, temperature, speed, angle of attack, roughness, particles' diameter and distribution, liquid water content and icing temperature.

Keywords: icing, FENSAP-ICE, NACA0012, simulation.

ملخص: الجليد هو خطر كبير على الأمن الجوي. يحدث هذا بشكل عام عندما تمر طائرة عبر سحابة من القطرات فائقة التبريد أثناء الرحلة. يمكن أن تتجمد القطرات على المناطق المكشوفة وتتسبب في تراكم الجليد على الأجنحة، والحنفيات، والذيل، والهوائيات، وما إلى ذلك، يمكن أن يؤدي الصقيع إلى تدهور الأداء الديناميكي الهوائي للمركبة، وعرقلة مداخل المحرك، وإتلاف المكونات الهيكلية إذا قطع الجليد تقلع. الهدف من الدراسة هو تحقيق محاكاة عددية لتراكم الجليد على شكل جانبي باستخدام FENSAP-ICE.

وكذلك مقارنة تأثير العوامل المختلفة على مستوى الجليد المتراكم، خاصة: الضغط، درجة الحرارة، السرعة، زاوية الهجوم، الخشونة، قطر الجزيئات وتوزيعها، محتوى الماء السائل ودرجة حرارة الجليد.

الكلمات الرئيسية: تثلج، محاكاة، NACA0012، FENSAP-ICE.

Introduction :	8
I. Chapitre I : Généralités sur le givrage	9
Introduction au chapitre :	9
I.1 Définitions importantes :	9
I.2 Accidents causés par le givre :	9
I.3 Givrage en aéronautique :	12
I.4 Formation de givre :	12
I.5 Types de givre sur les avions :	13
I.6 Conditions de formation du givre :	15
I.7 Conséquences du givrage sur le déroulement du vol :.....	15
I.8 Classification des risques de givrage :.....	16
I.9 Détection de givre :	18
I.10 Les systèmes de protection contre le givre :	20
II. Chapitre II : Mise en équation	27
Introduction au chapitre :	27
II.1 Mise en équation :	27
III. Chapitre III : Simulation numérique sur FENSAP-ICE	33
III.1 Introduction du chapitre :	33
III.2 Présentation du logiciel ANSYS :	33
III.3 Présentation du logiciel FENSAP-ICE :	34
III.4 Calculs :	36
III.5 La convergence :.....	57
III.6 Conclusion du chapitre :.....	61
IV. Chapitre IV : Résultats et interprétations	62
IV.1 Introduction au chapitre :	62
IV.2 Interprétations :	62
Conclusion du chapitre :.....	84
Conclusion générale :	85
Références	86

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure I.1 : accident de Genève [2].....	10
Figure I.2 : accident de Birmingham [4]	10
Figure I.3 : accident de Pyrénées-Atlantiques [6].....	11
Figure I.4 : formation de givre [9]	12
Figure I.5 : givre blanc [10].....	13
Figure I.6 : givre transparent [10].....	14
Figure I.7 : givre mélangé [10].....	15
Figure I.8 : risque léger de givrage [12]	16
Figure I.9 : risque modéré de givrage [12].....	17
Figure I.10 : risque fort de givrage [12]	17
Figure I.11 : détecteur visuel de givre	18
Figure I.12 : tube de Pitot pour la détection manométrique de givre.....	19
Figure I.13 : détection de givre par ultrasons [14]	20
Figure I.14 : système antigivrage d'un avion [15]	21
Figure I.15 : dégivrage d'un avion [16].....	21
Figure III.1 : préface de workbench	34
Figure III.2 : préface de FENSAP-ICE.....	35
Figure III.3 : préface d'un projet sur FENSAP-ICE	36
Figure III.4 : Fenêtre des conditions où $P1=101,325$ Pa.....	39
Figure III.5 : Fenêtre des conditions où $P2=78,190$ Pa	39
Figure III.6 : Fenêtre des conditions où $P3=18,820$ Pa	40
Figure III.7 : Fenêtre des conditions où $T1=-57^{\circ}\text{C}$	41
Figure III.8 : Fenêtre des conditions où $T2=1^{\circ}\text{C}$	42
Figure III.9 : Fenêtre des conditions où $T3=15^{\circ}\text{C}$	42
Figure III.10 : Fenêtre des conditions où $V1=100$ m/s.....	43
Figure III.11 : Fenêtre des conditions où $V2=200$ m/s.....	44
Figure III.12 : Fenêtre des conditions où $V3=300$ m/s.....	44
Figure III.13 : Calcul en balayage sur l'angle d'incidence tel que : $0<\alpha<18$	45
Figure III.14 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 « propre ».....	46
Figure III.15 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 de rugosité $ks=0.5\text{mm}$	47
Figure III.16 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 de rugosité $ks=1\text{mm}$	47
Figure III.17 : Fenêtre des conditions où $MVD1=5$ μm	48
Figure III.18 : Fenêtre des conditions où $MVD2=30$ μm	49
Figure III.19 : Fenêtre des conditions où $MVD3=55$ μm	49
Figure III.20 : Calcul avec des gouttelettes uniformes.....	50
Figure III.21 : Calcul avec le modèle Langmuir B.....	51
Figure III.22 : Calcul avec le modèle Langmuir C.....	51
Figure III.23 : Calcul avec le modèle Langmuir D.....	52
Figure III.24 : Calcul avec le modèle Langmuir E.....	52
Figure III.25 : Fenêtre des conditions où $LWC1=0.1$ g/m ³	53
Figure III.26 : Fenêtre des conditions où $LWC2=0.55$ g/m ³	54
Figure III.27 : Fenêtre des conditions où $LWC3=1$ g/m ³	54
Figure III.28 : Fenêtre des conditions où $T1= -18^{\circ}\text{C}$	55
Figure III.29 : Fenêtre des conditions où $T1= -13^{\circ}\text{C}$	56
Figure III.30 : Fenêtre des conditions où $T1= -3^{\circ}\text{C}$	57
Figure III.31 : Fenêtre montrant les critères de convergence de FENSAP	59

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure III.32 : Fenêtre montrant les critères de convergence de DROP3D.....	60
Tableau IV.1 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la pression.....	63
Graphe IV.1 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la pression.....	63
Graphe IV.2 : Efficacité de capture en fonction de la pression.....	63
Tableau IV.2 : Masse de glace en fonction de la pression.....	64
Graphe IV.3 : Masse de glace en fonction de la pression.....	64
Graphe IV.4 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la pression.....	65
Tableau IV.3 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la température.....	66
Graphe IV.5 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la température.....	66
Graphe IV.6 : Efficacité de capture en fonction de la température (3 températures).....	67
Graphe IV.7 : Efficacité de capture en fonction de la température (2 températures).....	67
Tableau IV.4 : Masse de glace en fonction de la température.....	68
Graphe IV.8 : Masse de glace en fonction de la température.....	68
Graphe IV.9 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la température.....	68
Tableau IV.5 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la vitesse.....	69
Graphe IV.10 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la vitesse.....	69
Graphe IV.11 : Efficacité de capture en fonction de la vitesse.....	70
Tableau IV.6 : Masse de glace en fonction de la vitesse.....	70
Graphe IV.12 : Masse de glace en fonction de la vitesse.....	70
Graphe IV.13 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la vitesse.....	71
Tableau IV.7 : Coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque.....	72
Graphe IV.14 : Coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque.....	72
Tableau IV.8 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la rugosité.....	73
Graphe IV.15 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la rugosité.....	73
Graphe IV.16 : Efficacité de capture en fonction de la rugosité.....	74
Tableau IV.9 : Masse de glace en fonction de la rugosité.....	74
Graphe IV.17 : Masse de glace en fonction de la rugosité.....	75
Graphe IV.18 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la rugosité.....	75
Graphe IV.19 : Efficacité de capture en fonction du diamètre des particules d'eau.....	76
Tableau IV.10 : Masse de glace en fonction du diamètre des particules d'eau.....	76
Graphe IV.20 : Masse de glace en fonction du diamètre des particules d'eau.....	77
Graphe IV.21 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction du diamètre des particules d'eau.....	77
Graphe IV.22 : Efficacité de capture en fonction de la distribution des particules d'eau.....	79
Graphe IV.23 : Efficacité de capture en fonction de LWC.....	80
Tableau IV.11 : Masse de glace en fonction de LWC.....	80
Graphe IV.24 : Masse de glace en fonction de LWC.....	81
Graphe IV.25 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de LWC.....	81
Tableau IV.12 : Masse de glace en fonction de la température de givrage.....	82
Graphe IV.26 : Masse de glace en fonction de la température de givrage.....	82
Graphe IV.27 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la température de givrage.....	82

Introduction :

Toute recherche théorique est sous-tendue par deux motivations : la compréhension et la prévision, c'est-à-dire : la compréhension de ce qui a déjà été fait et la prévision de ce qui est éventuellement réalisable.

Le givrage est un phénomène qui cause beaucoup de problèmes dans différents domaines, c'est pour cela que les chercheurs se sont intéressés à l'étude de ses effets.

La simulation numérique est un outil très important dans l'étude du phénomène de givrage car il est moins compliqué et moins onéreux que les essais en soufflerie.

En aéronautique, le givrage est un danger car il a un effet néfaste sur les performances aérodynamiques, une augmentation du poids et d'autres problèmes dans le moteur et autres systèmes de l'aéronef.

Il existe plusieurs logiciels pour la simulation de givre en aéronautique parmi eux on a ANSYS FENSAP-ICE.

Objectifs du travail :

- Apprendre les notions de base du logiciel FENSAP-ICE et son utilisation ;
- La simulation de givre sur le profil aérodynamique NACA0012 avec le logiciel FENSAP-ICE en variant les paramètres qui influencent sur la formation de glace et voir les modifications sur les performances aérodynamiques, la masse du profil et son efficacité de capture.

Plan de travail :

- 1- Dans le 1^{er} chapitre, on a fait une définition générale du givrage en aéronautique : 'formation, conditions de formation, détection, organes touchés, systèmes de protection ainsi que les risques encourus' ;
- 2- Dans le 2^e chapitre, on a fait une présentation et explication des équations qu'utilise FENSAP-ICE pour la simulation de givre ;
- 3- Dans le 3^e chapitre on a expliqué le fonctionnement du logiciel FENSAP-ICE et l'étude qu'on a faite ;
- 4- Dans le 4^e chapitre on a fait des interprétations sur les différents résultats qu'on a trouvés ;
- 5- Enfin, une conclusion générale de notre projet.

I. Chapitre I : Généralités sur le givrage

Introduction au chapitre :

Le givre est un phénomène très important dans la recherche aéronautique, et ce dans le but de connaître les conditions de sa formation et les risques qu'il cause, et le plus important de protéger les aéronefs de ces risques.

I.1 Définitions importantes :

Givrage : contamination d'un aéronef par de la glace. Cette contamination peut intervenir en vol ou au sol. [1]

Surfusion : C'est un état d'équilibre métastable dans lequel des gouttelettes d'eau liquide se forment à des températures négatives allant jusqu'à -40°C . Ceci arrive dans des conditions météorologiques spécifiques qui sont : une température inférieure au point de solidification de l'eau et la présence de nuages denses à forte teneur en gouttelettes d'eau. [1]

Contamination, contaminant : terme générique utilisé en exploitation aéronautique pour désigner un dépôt étranger à une surface. [1]

Accrétion (de glace) : accumulation (de glace) sur une partie désignée de l'aéronef. [1]

Conditions givrantes : état de l'atmosphère favorable à une accrétion de givre sur un aéronef. [1]

Potentiel givrant : information sur l'état de l'atmosphère précisant (graduant) le risque de givrage. [1]

I.2 Accidents causés par le givre :

I.2.1 L'accident de Genève :

Le pilote et deux passagers arrivent à l'aérodrome d'Annemasse vers 7 h 00 pour un vol privé d'environ cinq minutes vers l'aéroport de Genève. La température est de -2°C et le taux d'humidité est de 98 % avec des nuages bas. L'avion est stationné sur le parking de l'aérodrome depuis la veille au soir. Le roulage et la course au décollage se déroulent nominalement. Dès que les roues du train principal quittent le sol, l'avion décroche en raison de la présence de givre sur la surface des ailes. La faible hauteur atteinte par l'avion ne permet pas au pilote de sortir de la situation de décrochage et d'éviter la collision avec le sol. Le pilote et le passager assis à sa droite décèdent. La passagère assise à l'arrière est grièvement blessée. [2]



Figure I.1 : accident de Genève [2]

I.2.2 Un Challenger 604 décolle sans dégivrage de Birmingham :

Un accident partageant plusieurs points communs avec celui d'Annemasse s'est produit quelques années plus tôt sur l'aéroport anglais de Birmingham, pourtant doté de moyens de dégivrage. Un jet d'affaires Challenger 604, arrivé la veille de Floride (Etats-Unis), décolle vers midi de la plate-forme britannique après avoir passé la nuit sur le tarmac. Il fait alors -2°C ; durant la nuit, la température était restée négative, avec un minimum de -9°C . Tout se passe normalement jusqu'au moment où les roues du train principal quittent le sol. C'est alors que l'avion bascule soudainement vers la gauche. La réaction rapide de l'équipage, qui tentera jusqu'au dernier moment de contrer le basculement, n'y fera rien et l'appareil finira par s'écraser sur le côté de la piste. Les cinq occupants trouvent la mort tandis que le biréacteur prend feu. L'enquête de l'AAIB conclura à un décrochage aérodynamique de l'aile gauche à la rotation, en raison d'une contamination de la voilure par du givre (le givre avait fondu sur l'aile droite, qui était soumise aux gaz chauds issus de l'échappement de l'APU). [3]



Figure I.2 : accident de Birmingham [4]

I.2.3 Accident de Pau : des oiseaux et des ailes contaminées :

Parmi les autres accidents mortels liés au givrage au sol, on ne peut éluder celui survenu à Pau (Pyrénées-Atlantiques), en janvier 2007. Tout se passe bien jusqu'à la rotation au décollage. A ce moment-là, le commandant de bord aperçoit une nuée d'oiseaux, ce qui l'amène, par réflexe, à tirer vivement sur le manche. A la surprise de l'équipage, le biréacteur part alors en virage engagé vers la gauche. Les actions du commandant de bord pour tenter de reprendre le contrôle de l'appareil le font basculer vers la droite, puis à nouveau vers la gauche. L'appareil, qui a atteint une hauteur d'environ 100ft., retombe en position quasiment horizontale au sol, sur lequel il est plaqué par le pilote, après un rebond. La puissance de ses moteurs réduite par l'équipage, l'avion continue sa course au sol, franchit le grillage d'enceinte de l'aéroport, percute la cabine d'un camion qui passe à ce moment-là et finit par s'arrêter, train principal arraché, dans un champ. Selon le rapport du BEA, la perte de contrôle de l'avion résulte de la présence de contaminants givrés sur la surface des ailes et de la rotation rapide en tangage, réaction réflexe à l'envol des oiseaux. Le commandant de bord n'avait pas demandé le dégivrage de l'avion alors que les conditions météorologiques du moment étaient propices à la formation d'un dépôt contaminant et qu'un épisode neigeux en cours s'était intensifié au moment. [5]



Figure I.3 : accident de Pyrénées-Atlantiques [6]

I.3 Givrage en aéronautique :

La formation de givre en aéronautique est un phénomène souvent lié à la météorologie. Dans le monde de l'aviation, les mots conditions météorologiques ne désignent pas seulement « ce qui est en train de se produire » mais aussi « ce qui va se produire durant le vol » donc le givre ne se produit pas seulement au sol mais se forme également en vol. [7]

I.4 Formation de givre :

La glace se forme sur les différentes surfaces de l'avion telles que les ailes, les entrées d'air moteur et les surfaces de contrôle lorsque l'avion vole dans des conditions météorologiques particulières. Ces conditions sont une température inférieure au point de solidification de l'eau et la présence de nuages denses à forte teneur en gouttelettes d'eau. En impactant l'aéronef, les gouttelettes gèlent ou s'écoulent à la surface sous forme d'un film. En fonction de la température de la surface, toute, ou seulement une partie de la gouttelette impactant peut geler au point d'impact ; le reste s'écoulant sur la surface et gelant en aval. La plage de température des phénomènes de givrage des aéronefs est comprise entre 0°C et -40°C et la plage d'altitude varie de 300 à 30.000 pieds. **Source spécifiée non valide.**



Figure I.4 : formation de givre [8]

I.5 Types de givre sur les avions :

Il existe trois (3) types de givre :

I.5.1 Givre blanc (rime) :

Le givre blanc est produit par de petites gouttelettes quand chaque gouttelette a le temps de geler complètement avant qu'une autre gouttelette ne frappe le même endroit. La glace qui se forme est opaque et cassante à cause de l'air emprisonné entre les gouttelettes. Le givre blanc a tendance à se former sur les bords d'attaque des surfaces portantes, s'accumule vers l'avant dans l'écoulement d'air et possède de faibles propriétés adhérentes.

C'est donc du givre sec qui se forme lorsque toute la goutte se solidifie au point d'impact. Les conditions d'apparition de ce type de givre sont :

- Une très basse température ($< -15^{\circ}\text{C}$) ;
- Une faible vitesse ;
- Une faible teneur en eau (LWC : Liquid Water Content).

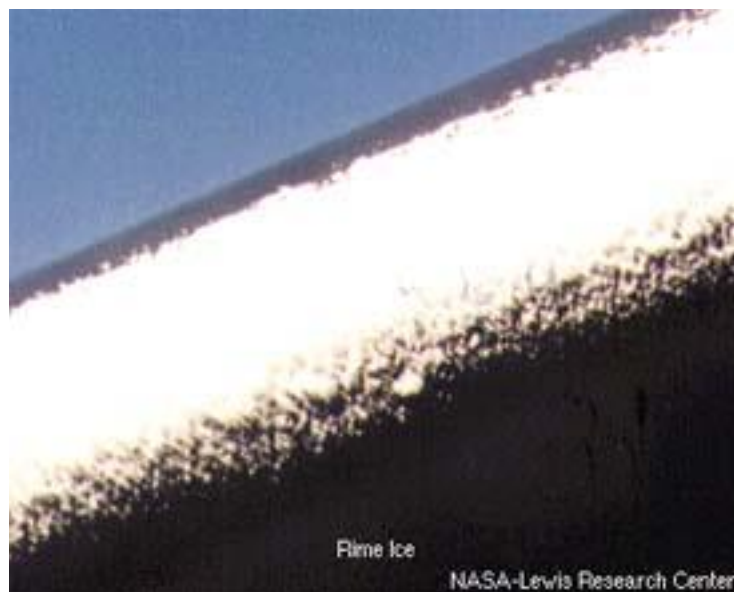


Figure I.5 : givre blanc [9]

I.5.2 Verglas (glaze) :

Dans le cas où chaque grosse gouttelette n'a pas le temps de geler complètement avant que d'autres gouttelettes se déposent sur les premières, l'eau surfondue de chaque goutte fusionne et s'étend vers l'arrière sur les surfaces de l'avion avant de geler complètement pour former une glace ayant de fortes propriétés adhérentes. Le givre transparent peut, comme son nom le dit, être transparent mais peut aussi se présenter comme une couche opaque très dure.

Il s'accumule vers l'arrière sur les surfaces de l'avion de même que vers l'avant dans l'écoulement d'air.

Là, le givre se forme lorsqu'uniquement une fraction de la goutte se fige au point d'impact, le reste s'écoule alors à la surface comme un reflux et gèle en aval du point d'impact. Contrairement au premier type, celui-ci se manifeste aux conditions suivantes :

- Une température proche du point de solidification (de -10 à 0°C) ;
- Une haute vitesse ;
- Une forte concentration en eau liquide.

Le givrage de type verglas a une forme plus complexe que celui de type givre blanc avec notamment la formation de cornes de glace. Et généralement, il génère également beaucoup plus de perturbation et de dégradation des performances aérodynamiques.



Figure I.6 : givre transparent [9]

I.5.3 Mélangé (mixed) :

Quand la température (de -10 à -15°C) et la taille des gouttelettes varie beaucoup, la glace qui se forme est un mélange de givre blanc et de givre transparent. Ce type de glace est habituellement plus adhérent que le givre blanc ; il est opaque et rude et s'accumule plus rapidement vers l'avant dans l'écoulement d'air que vers l'arrière sur les surfaces de l'avion.



Figure I.7 : givre mélangé [9]

I.6 Conditions de formation du givre :

L'accrétion du givre est influencée par les paramètres suivants :

- La température (comprise entre 0 °C et -40 °C) ;
- L'altitude de vol (variant de 300 à 30.000 pieds) ;
- La teneur en eau liquide de l'environnement [kg/m^3] ;
- La taille des gouttelettes ;
- La vitesse de l'air ;
- La rugosité des surfaces des avions.

Il se forme de manière plus importante lorsque les conditions favorisant la formation de très grosses gouttelettes d'eau (SLD : Super Large Droplets) sont réunies.

I.7 Conséquences du givrage sur le déroulement du vol :

- rupture de l'écoulement laminaire autour des ailes, produisant une diminution de la portance et une augmentation de la vitesse de décrochage. Ce dernier effet est particulièrement dangereux. Un avion « givré » est, en fait, un avion expérimental dont la vitesse de décrochage est inconnue ; [10]

- augmentation du poids et de la traînée, et donc augmentation de la consommation de carburant ; [10]

- blocage partiel ou total des tubes de Pitot et des prises statiques, produisant des indications erronées des instruments ; [10]

- réduction de la visibilité. [10]

I.8 Classification des risques de givrage :

Il existe quatre (4) stades de risque de givrage qui sont les suivants :

- **Risque de trace :** lorsque le givre devient perceptible mais que le risque est suffisamment faible pour que le pilote n'ait pas à activer un système de protection.

- **Risque léger (light) :**

Lorsque la couche de givre peut créer un problème si l'avion traverse des conditions givrantes de façon prolongée (plus d'une heure). Dans ce cas, un système de protection est utilisé de façon occasionnelle.

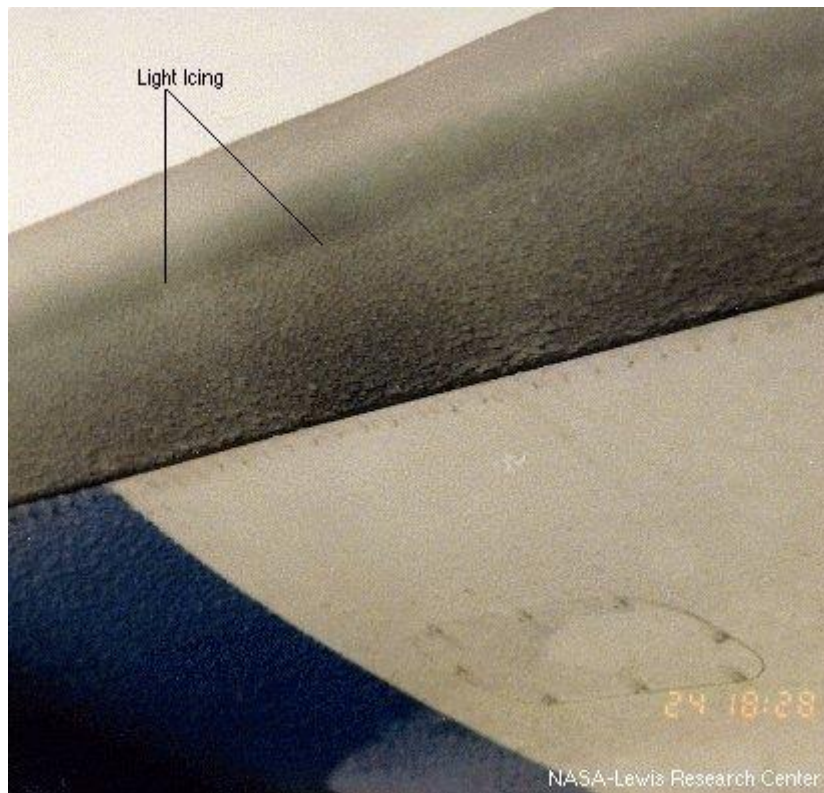


Figure I.8 : risque léger de givrage [11]

- **Risque modéré (moderate) :**

Lorsque les conditions givrantes sont telles que même des temps courts d'exposition sont dangereux. Un système de protection est alors activé en permanence.

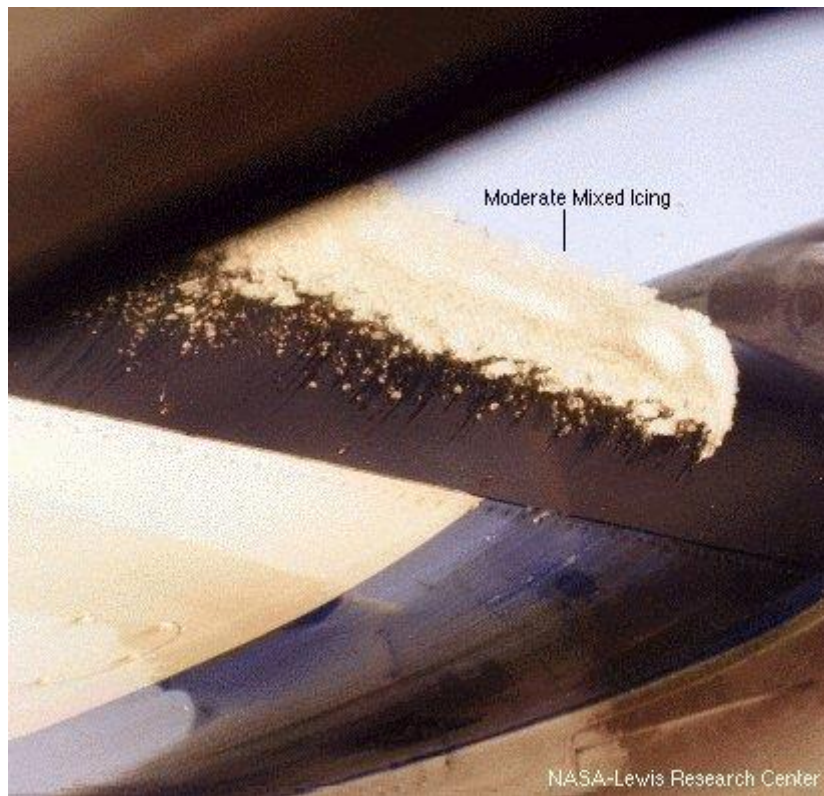


Figure I.9 : risque modéré de givrage [11]

- **Risque sévère (severe) :**

Lorsque le système de protection ne suffit pas à protéger l'avion. Dans ce cas, l'appareil est immédiatement détourné.



Figure I.10 : risque fort de givrage [11]

I.9 Détection de givre :

Le meilleur détecteur est encore la surveillance visuelle assurée par les pilotes et, liée aux conditions météorologiques rencontrées en vol : précipitation TAT, altitude, etc. Néanmoins, il existe plusieurs systèmes de détection :

I.9.1 Détection visuelle :

- Lame tronquée de 8 cm installée à la partie supérieure du radôme en vue de l'équipage ; [12]
- Un support d'essuie-glace, constitué également un excellent détecteur de givrage très utilisé par les équipages. [12]



Figure I.11 : détecteur visuel de givre

I.9.2 Détection manométrique :

Lorsqu'il y a formation de givre, les trous de l'avant du détecteur (tube de pitot) s'obturent entraînant une baisse de la pression mesurée.

Cette information traitée électroniquement est envoyée à deux temporisateurs :

- Le premier active les alarmes sonores et lumineuses :
 - un voyant bleu qui reste allumé tant que l'avion est dans une atmosphère givrante ;
 - un voyant rouge qui s'éteindra dès que l'équipage aura mis en service les protections appropriées ;
- Le second commande le réchauffage de la sonde pendant 30s.



Figure I.12 : tube de Pitot pour la détection manométrique de givre

I.9.3 Détection par ultrasons :

On utilise le principe de la mesure d'épaisseur en déterminant le temps de parcours d'une onde acoustique.

L'exploitation de cette information permet de réaliser deux types de détecteurs :

- un capteur de détection de givre associé aux systèmes antigivrage ;
- un capteur de mesure, en temps réel, de l'épaisseur de givre à utiliser avec les systèmes de dégivrage.

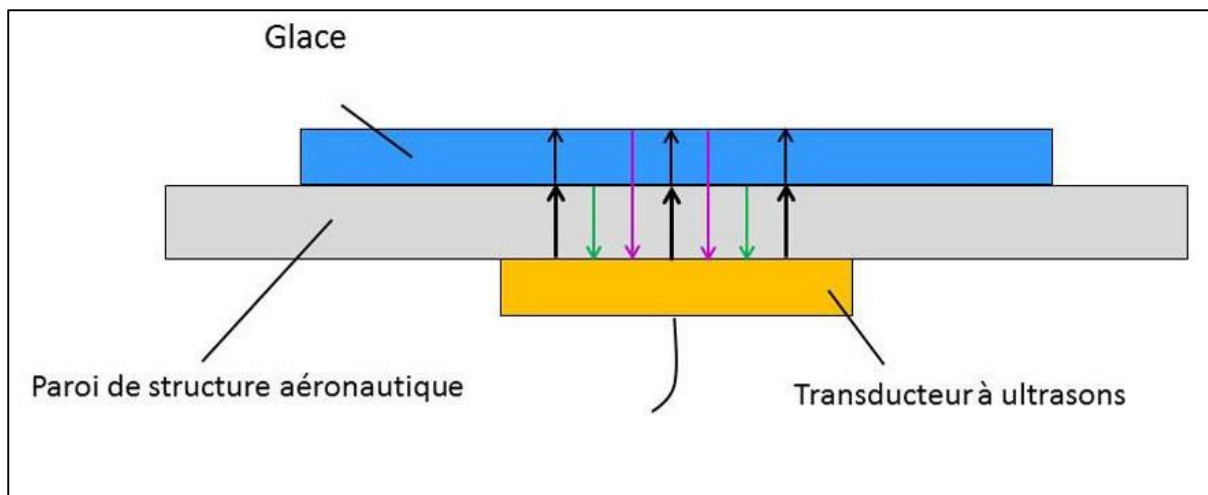


Figure I.13 : détection de givre par ultrasons [13]

Avantages :

- ✓ Détection du givre en temps réel (15s à partir de quelques dixièmes de mm d'épaisseur) ;
- ✓ Utilisation dans une large plage de conditions givrantes (épaisseur mesurables de 1/10 de mm à plusieurs cm) ;
- ✓ Intégration totale des capteurs dans le profil d'aile ;
- ✓ Le système détecte la formation de givre selon un processus cyclique : toutes les 60s, les détecteurs sont réchauffés pour éliminer l'accumulation de givre et permettre ainsi une nouvelle détection ;
- ✓ Le système fonctionne automatiquement dès la mise sous tension de l'avion.

I.10 Les systèmes de protection contre le givre :

Il existe deux régimes d'utilisation de ces systèmes :

- **Mode antigivrage :**

Dont le principe est de se protéger contre toute formation de givre. Ces modes d'activation sont les plus fiables mais également les plus consommateurs d'énergie, puisqu'ils requièrent une activation permanente. [12]

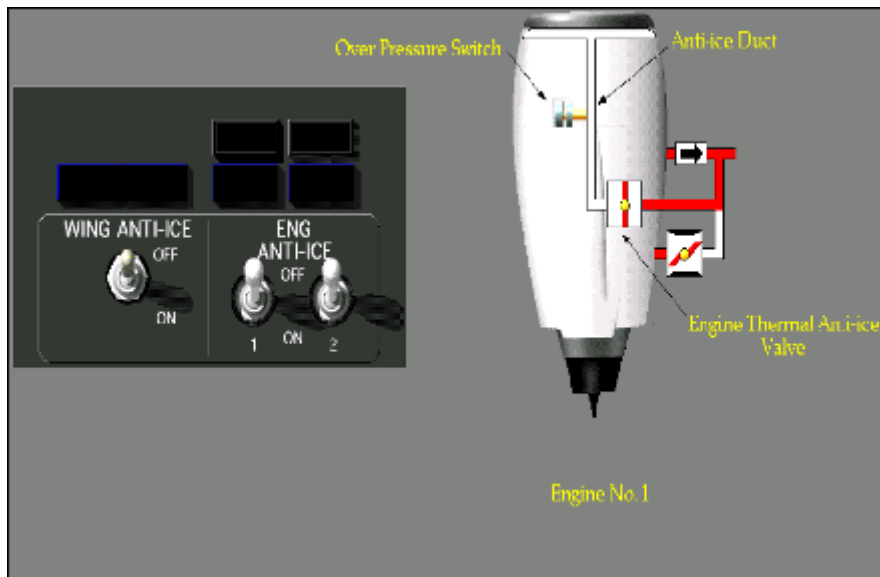


Figure I.14 : système antigivrage d'un avion [14]

- **Mode dégivrage :**

Dans lequel la formation d'une fine couche de glace est tolérée, puis enlevée de façon cyclique. L'avantage de ces systèmes est qu'ils fonctionnent par intermittence et permettent une réduction de la consommation. [12]



Figure I.15 : dégivrage d'un avion [15]

On distingue quatre (4) types de systèmes :

I.10.1 La génération pneumatique thermique :

L'air chaud est prélevé sur le compresseur HP et acheminé vers :

- les bords d'attaque voilure (avions transsonique) ;

CHAPITRE I _____ GENERALITES SUR LE GIVRAGE

- les entrées d'air moteur et premier étage compresseur BP ;
- le réchauffeur carburant (si installé).

Il existe plusieurs systèmes pour la génération pneumatique thermique :

Antigivrage nacelle et moteur :

Chaque réacteur assure son propre antigivrage à l'aide d'un circuit spécifique indépendant des autres systèmes pneumatiques.

L'air chaud est directement prélevé sur un ou plusieurs étages du compresseur HP. Une seule commande par moteur assure la mise en fonctionnement (ouverture-fermeture) d'une ou plusieurs électrovannes pneumatiques.

Des voyants ou plaquettes lumineuses assurent contrôle et alarmes et s'allument en cas de pression ou de température excessive dans le conduit, entre la distribution entrée d'air réacteur et l'électrovanne qui se ferme automatiquement.

L'utilisation est possible sans restriction au sol et dans tous les domaines de vol.

En cas de perte d'alimentation électrique, l'électrovanne pneumatique reste ouverte.

Antigivrage voilure :

L'air chaud qui assure cette fonction est prélevé sur le collecteur pneumatique normalement alimenté par les réacteurs ou l'APU.

La partie bord d'attaque située entre les moteurs et le fuselage n'est pas dégivrée, les conduits de prélèvements d'air chaud du GTR au collecteur assurent cette fonction. La commande par voilure ou demi-voilure s'effectue à l'aide d'interrupteurs qui peuvent activer une ou plusieurs électrovannes en ouverture ou fermeture.

Des voyants ou plaquettes lumineuses assurent contrôle et alarmes et s'allument en cas de sur ou sous-pression ou température excessive dans le conduit entre la rampe distributrice et l'électrovanne qui se ferme automatiquement.

Les électrovannes d'antigivrage voilure sont fermées lorsque l'avion est au sol (condition d'amortisseur) pour éviter une déformation des profils et garantir la poussée maximum au décollage

CHAPITRE I _____ GENERALITES SUR LE GIVRAGE

Au sol, la position momentanée « GRND CHECK » permet, pendant une durée limitée (30s), d'effectuer la vérification du circuit. La sonde de détection assure la protection surchauffe et ferme l'électrovanne si la température est excessive (90 à 120°C).

La distribution s'effectue à l'aide d'une gaine située dans le bord d'attaque de l'aile, de tubes télescopiques (un par bec) et d'une rampe percée (piccolo) interne au bec. Si l'avion possède des volets de bord d'attaque, on remplace les tubes télescopiques par des conduits pivotants.

Les empennages des avions transsoniques ne comportent pas de dispositifs d'antigivrage à cause de la flèche importante, du faible rayon de courbure des bords d'attaque et de l'élévation de température liée au nombre de Mach.

En cas de perte d'alimentation électrique, les électrovannes pneumatiques se ferment.

Réchauffage carburant :

Lorsque la température de carburant devient trop basse, l'eau qui y est contenue se fige et colmate le filtre principal.

L'air chaud prélevé sur un étage du compresseur HP est acheminé vers le réchauffeur (échangeur d'air liquide) via une vanne, pour s'évacuer vers l'extérieur.

En cas de colmatage important du filtre, un clapet by-pass s'ouvre pour assurer la protection du circuit.

Le réchauffeur carburant est situé soit avant la pompe HP, soit entre les deux étages de celle-ci.

Applications diverses :

Désembuage pare-brise :

L'air est prélevé sur le circuit de conditionnement et acheminé dans le poste de pilotage via des vannes sélectrices, un ventilateur et une pompe de distribution.

Désembuage des hublots :

Comme pour les pare-brise, les hublots sont généralement désembués par circulation d'air chaud provenant du conditionnement d'air.

I.10.2 La génération pneumatique mécanique :

L'air est prélevé sur le compresseur GTR et GTP et utilisé séquentiellement en pression et dépression sur :

- les bords d'attaque de la voilure et de l'empennage ;
- les entrées d'air GTP (exemple ATR).

Il existe plusieurs systèmes pneumatiques mécaniques :

Dégivrage voilure et empennages :

Ce dispositif curatif consiste à déformer les profils du bord d'attaque et des empennages pour casser la couche de glace, par des mouvements alternatifs de gonflage et dégonflage de cellules tubulaires disposées dans le sens du vol.

Ces systèmes sont utilisés sur des avions équipés de GTP ou GMP de faible puissance ne pouvant pas fournir de grands débits d'air.

Ils sont inter-communicants pour permettre le dégivrage par un seul moteur. Afin que ce système soit efficace, il est indispensable d'attendre que la couche de givre atteigne une certaine épaisseur (8 à 12 mm). Les empennages non visibles sont couplés aux ailes.

L'utilisation de ce dégivrage est interdite au décollage et à l'atterrissage à cause des déformations aérodynamique des profils (risque de décrochage).

Non utilisés, les dégivreurs sont plaqués sur les bords d'attaque par le circuit de dépressurisation.

En général, deux modes de dégivrage sont disponibles : Lent et rapide.

I.10.3 La génération électrique :

Elle permet d'alimenter des résistances chauffantes qui protègent :

- le pare-brise ;
- les tubes de Pitot et les prises statiques ;
- les panneaux de service des eaux et les mats d'évacuation ;
- les hélices, entrées d'air GTP et les cônes.

Il existe plusieurs systèmes pour la génération électrique (non pneumatique) :

CHAPITRE I _____ GENERALITES SUR LE GIVRAGE

Application aux entrées d'air :

Systèmes préventifs qui équipent généralement les turbopropulseurs constitués par des résistances chauffantes protégées par une enveloppe de caoutchouc. Fixés sur le bord d'attaque et à l'intérieur des entrées d'air moteurs.

Le fonctionnement peut être permanent, intermittent ou les deux. Il est commandé depuis le poste de pilotage et le contrôle est assuré par des lampes ou des indicateurs.

Application aux hélices/ rotors :

La protection des pales et dômes d'hélices sont assurés de façon identique aux entrées d'air.

Dès la mise en fonctionnement des systèmes antigivrants d'entrée d'air et pales-cônes d'hélice, un programme automatique s'applique sous forme de cycles assurés par une minuterie électronique.

Application aux sondes, Pitot, mats d'évacuation, panneau de service eau portable et toilettes... :

Systèmes constitués de résistances chauffantes situées à l'intérieur ou à la périphérie de l'élément à protéger. Commandés depuis le poste de pilotage en cas de mauvais fonctionnement des voyants ou plaquettes lumineuses l'alarme.

Ces dispositifs disposent souvent de deux puissances de chauffe (relais sol/vol).

Application aux pare-brise :

L'antigivrage de pare-brise assure :

- la visibilité complète durant tout le vol (absence de givre et de buée) ;
- une bonne résistance mécanique des composants(verre-vinyle) au ΔP (pressurisation) et aux chocs.

L'élément conducteur des pare-brise frontaux est généralement constitué d'un film ou de bandes d'or, de chlorure d'étain ou de platine pris entre deux couches de verre ou de vinyles (extérieur).

Pour les pare-brise latéraux on utilise plus fréquemment des résistances très fines.

CHAPITRE I _____ GENERALITES SUR LE GIVRAGE

Les alimentations électriques sont croisées, ce qu'assure en cas de perte d'une source, la visibilité avant et latérale presque totale.

Les systèmes de régulation assurent des températures de 35°C à 45°C.

Les glaces sont réchauffées :

- automatiquement si au moins un réacteur est en fonctionnement ou lorsque l'avion est en vol ;

- manuellement en plaçant le poussoir « WINDOWS HEAT » sur ON.

Le réchauffage des glaces frontales fonctionne à puissance réduite au sol et à forte puissance en vol. La commutation est automatique.

I.10.4 Systèmes par liquides :

Application par suintement :

Ce dispositif d'antigivrage consiste à faire suinter un liquide au travers d'un revêtement poreux qui enveloppe ou entoure les éléments à protéger.

Le liquide utilisé a le pouvoir d'abaisser le point de congélation de l'eau à laquelle il est mélangé dès qu'il suinte du profil.

Application par écoulement :

Dispositif pouvant être utilisé en dégivrage ou antigivrage particulièrement sur les pales d'hélices.

II. Chapitre II : Mise en équation

Introduction au chapitre :

On se propose dans ce chapitre de présenter les différentes formules utilisées par FENSAP-ICE pour calculer les grandeurs dont on aura besoin dans les chapitres suivants, à savoir : les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée, l'efficacité de capture et la masse de glace déposée.

II.1 Mise en équation :

Dans le domaine de la simulation du givrage, l'objectif principal est la compréhension et la modélisation de la physique de formation de glace afin d'essayer de prédire les formes des couches de glace en se basant sur les conditions de vol et les conditions environnementales pour cela il faut prévoir la trajectoire des gouttelettes et déterminer l'efficacité de capture (Collection Efficiency) sur le corps considéré. [16]

II.1.1 Calculs de la formation de givre :

Les calculs de l'accrétion de glace doivent suivre des itérations dans le temps sur la durée de l'événement de givrage. A chaque itération il y a quatre étapes de calcul pour déterminer l'accumulation de glace :

1. La solution des équations de Navier-Stokes dans le champ de l'écoulement et dans la couche limite pour déterminer les vitesses et pressions de l'air dans le voisinage du corps étudié ;
2. La détermination du coefficient de l'efficacité de collection sur la structure ;
3. Les calculs thermodynamiques et de transfert de chaleur de l'accumulation de glace basés sur la conservation de masse et de chaleur pour déterminer la masse de glace accumulée sur la structure ;
4. La détermination de la nouvelle forme de la géométrie due au givrage.

Les calculs de la collection en utilisant l'équation proposée par (Lozowski, Stallabrass, & Hearty, 1983) peuvent être utilisés comme première approximation d'accrétion de glace sur des différents objets, dans la mesure où l'étude du givrage est fondamentale en plusieurs domaines de recherche du givrage. [17]

Afin de déterminer le coefficient d'efficacité de collection, il existe deux approches de calcul : l'approche Lagrangienne et l'approche Eulérienne.

Dans une méthode Lagrangienne, on résout individuellement la trajectoire de chaque gouttelette à l'aide d'une équation de mouvement formulée par la seconde loi de Newton.

La méthode Eulérienne considère quant à elle une fraction volumique d'eau et un champ de vitesse des gouttelettes. Les équations Eulériennes sont obtenues via l'application des principes généraux que sont la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

En utilisant des modèles multiphasiques disponibles dans le logiciel ANSYS CFX avec une routine d'utilisateur : Cette étude se concentre sur ces deux approches de calcul pour vérifier l'influence des différents paramètres et pour mieux comprendre le comportement des gouttelettes d'eau dans l'air et le processus de captation. [17]

II.1.2 Calculs de la formation de givre avec la méthode utilisée en FENSAP-

ICE :

Avec FENSAP-ICE, W.G. Habashi a proposé un nouveau concept de simulation de givrage basé sur l'utilisation de la CFD couplée à la méthodologie ALE [Beaugendre et al., 2006]. Le code FENSAP-ICE comprend quatre modules principaux [18]:

- Un solveur Navier-Stokes en éléments finies (FENSAP) ;
- Une approche eulérienne pour le calcul de l'efficacité du dépôt de gouttelettes (DROP3D) ;
- Un module 3D d'accrétion de glace (ICE3D) ;
- Un module de calcul de transfert de chaleur en présence de transfert de chaleur d'antigivrage dans le revêtement de l'aile (CHT3D).

Pour calculer l'efficacité de capture FENSAP-ICE utilise l'approche Eulérienne.

II.1.2.1 Approche Eulérienne pour le suivi de gouttelettes :

L'idée d'une méthode Eulérienne est de définir, dans l'ensemble du domaine de calcul, une fraction volumique de gouttelettes. Cette fraction volumique est transportée par une équation de transport aux dérivées partielles sur le même maillage utilisé pour le calcul du fluide.

L'approche Eulérienne pour le suivi de gouttelettes dans le contexte du givrage a été introduite par [Scott et al., 1988] et [Bourgault et al., 1999].

II.1.2.2 Équations Eulériennes des gouttelettes :

La formulation Eulérienne est basée sur la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du champ de gouttelettes. Le modèle Eulérien résout un champ de vitesses des gouttelettes et une distribution de fraction volumique dans l'ensemble du domaine de calcul.

* Les hypothèses posées pour l'approche Eulérienne :

- Les gouttelettes sont supposées sphériques de volume constant et non déformables ;
- Les vitesses initiales des gouttelettes sont égales à celle du fluide au champ lointain ;
- La température des gouttelettes est constante et égale à la température du fluide au champ lointain ;
- Les gouttelettes n'affectent pas le fluide ;
- Les effets de la turbulence sur les gouttelettes sont négligés ;
- L'intégralité de la gouttelette impactant l'engin est capturée par la surface (Pas de rebond ou de "Splashing") ;
- Une gouttelette ne se subdivise pas en de plus petites gouttelettes.

Les deux seules forces appliquées au champ de gouttelettes sont d'une part une force de traînée et d'autre part une force de gravité et de flottabilité. Les équations de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement s'écrivent [Bourgault et al., 1999] :

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \\ \frac{\partial \alpha u}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u \otimes u) = \alpha \frac{C_D Re_d}{14K} (u_a - u) + \alpha \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \frac{1}{Fr^2} g \end{cases} \quad (II.1)$$

- α : est la fraction volumique d'eau ;
- u : la vitesse adimensionnelle des gouttelettes ;
- u_a : la vitesse adimensionnelle de l'air ;
- g : le vecteur gravitationnel ;
- ρ : la densité de l'eau ;

- ρ_a : la densité de l'air ;
- $Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{Lg}}$: est le nombre de Froude ;
- U_∞ : la vitesse de l'air à l'infini ;
- L : la longueur caractéristique ;
- $K = \frac{\rho d U_\infty}{18L\mu}$: un paramètre d'inertie ;
- μ : la viscosité dynamique de l'air ;
- C_D : le coefficient de traînée des gouttelettes ;
- d : le diamètre de la gouttelette.

Le nombre de Reynolds des gouttelettes s'écrit :

$$Re_d = \frac{\rho d |u_a - u| U_\infty}{\mu} \quad (II.2)$$

Une relation empirique permet de calculer le coefficient de traînée des gouttelettes : C_D . Cette relation est déterminée sur la base de résultats expérimentaux d'écoulements autour de sphères à faible nombre de Reynolds. Différentes relations sont disponibles dans la littérature on présente ici la formulation de [Schiller and Naumann, 1935] :

$$\begin{cases} C_d = \frac{0.44}{Re_d}, \text{ if } Re_d > 1000 \\ C_d = \frac{24}{Re_d}, \text{ if } Re_d < 0.1 \\ C_d = \frac{24 \times (1 + 0.15 \times Re_d^{0.657})}{Re_d} \end{cases} \quad (II.3)$$

Afin de modéliser la capture des gouttelettes sur les surfaces solides, les conditions limites évoluent durant le processus itératif de résolution. Ainsi, des conditions aux limites de type Neumann sont appliquées lorsque le flux de gouttelettes impacte la surface. À contrario, des conditions aux limites de Dirichlet sont appliquées :

$$\begin{cases} u \cdot n < 0, \text{ Impact, Extrapolation: } \frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0 \\ u \cdot n > 0, \text{ Pas d'impact, Dirichlet : } u = 0, \alpha = 0 \end{cases} \quad (II.4)$$

- n : la normale à la surface

Ces équations ont été résolues en éléments finis [Bourgault et al., 1999] et volumes finis [Jung and Myong, 2013, Cao et al., 2012, Montreuil et al., 2009] avec des schémas QUICK [Cao et al., 2012] ou HLLC [Jung and Myong, 2013]. La plupart des codes Eulériens sont développés autour de schémas temporels explicites Runge-Kutta. Dans FENSAP-ICE, ces équations sont résolues implicitement à l'aide de GMRES [Beaugendre et al., 2003].

II.1.2.3 Calcul de l'efficacité de capture :

L'approche Eulérienne donne accès de manière directe au flux net d'eau sur la surface solide. L'efficacité de capture sur une surface solide d'une approche Eulérienne sous forme adimensionnelle est donnée par :

$$\beta = \alpha u \cdot n \quad (\text{II.5})$$

- α : la fraction volumique d'eau à la surface,

- u : les vitesses des gouttelettes à la surface.

II.1.2.4 Calculs des coefficients aérodynamiques :

II.1.2.4.1 Diminution de la portance :

La portance est (idéalement) la force ascendante exercée sur l'aéronef par son mouvement dans l'air.

La façon dont une voilure génère de la portance peut être expliquée avec le principe de Bernoulli (et aussi avec les lois de Newton). Selon le principe de Bernoulli, nous savons qu'il existe une relation directe entre la pression et la vitesse. Un profil aérodynamique génère alors un déséquilibre de pression car l'air circulant sur l'extrados s'écoule à une vitesse différente de celle de l'air au niveau de l'intrados (car il doit parcourir un trajet de longueur différente). Cette différence de pression est la force de portance. La portance est fonction de la densité de l'air, du carré de la vitesse de l'avion, de la surface de l'aile ainsi que de la forme du profil aérodynamique et de l'angle d'attaque. [19]

Ce sont la forme et l'angle d'attaque (exprimés en tant que coefficient de portance) les facteurs qui feront varier la portance des profils. Le givrage affecte grandement la forme du profil aérodynamique, diminuant ainsi le coefficient de portance et la force de portance. Nous considérerons la portance comme le coefficient de portance car c'est la valeur que FENSAP produira. Ce coefficient est sans dimension et sera parfait pour comparer entre les cas avec lesquels nous travaillerons. [19]

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho V^2 S} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

- F_L est la portance ;
- ρ est la masse volumique du fluide ;
- V la vitesse de l'écoulement ;
- S la surface portante.

II.1.2.4.2 Augmentation de la traînée :

La traînée est la résistance de l'air, la force qui agit à l'opposé du mouvement relatif d'un objet ou, dans ce cas (traînée aérodynamique), à l'opposé de la direction de l'écoulement. La traînée est une force de friction visqueuse, cependant, nous travaillerons avec le coefficient de traînée qui est également sans dimension. Tout comme le coefficient de portance, il dépend de la densité du fluide (ρ) et du carré de la vitesse de l'écoulement (V). Ce coefficient dépend cependant de la section transversale (A) au lieu de S . [19]

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 A} \quad (\text{II.7})$$

Le changement du centre de gravité est également très important. Comme les gouttelettes d'eau heurtent généralement près du bord d'attaque, la majorité de la glace s'accumule dans la partie avant du profil aérodynamique. Cela modifie la répartition des masses et le centre de masse du corps. Les avions ont une gamme de positions où le centre de masse peut être, si le centre de masse n'est pas dans ces positions, l'avion cale. Pour cette raison, une variation de la position du centre de masse causée par l'accrétion de glace pourrait être très nuisible. [19]

II.1.2.5 Augmentation du poids :

Le givre qui s'amasse sur la surface de l'avion a un certain poids. En faible quantité, il ne pose pas de problèmes. Mais plus la surface exposée est importante (notamment les ailes et le fuselage avant), plus la quantité de givre augmentera et donc plus la masse du givre accumulé augmentera. Cette masse en plus entraîne une plus grande consommation de carburant, et (pour les petits avions) elle peut même présenter un risque d'accident si le moteur de l'appareil n'est plus assez puissant. [20]

La masse du givre qui recouvre l'avion peut être évalué à une masse minimale de 20 Kg (1mm de glace sur une surface totale de $20m^2$). Une hauteur de $1mm/m^2$ fait $1L/m^2$ donc $1kg/m^2$ pour une couche de givre de $1mm/m^2$. [20]

III. Chapitre III : Simulation numérique sur FENSAP-ICE

III.1 Introduction du chapitre :

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement le logiciel Ansys dans son ensemble puis parler du logiciel que l'on va utiliser i.e. FENSAP-ICE ainsi que des calculs qui ont été effectués dans le but de mener à bien ce projet.

III.2 Présentation du logiciel ANSYS :

ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. ANSYS développe, promeut et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. [21]

Donc ANSYS est une plateforme numérique qui relie plusieurs logiciels nous permettant de faire diverses simulations, tous domaines physiques confondus, afin de connaître le comportement d'un élément dans le milieu dans lequel il travaille sans perdre des sommes conséquentes dans des essais expérimentaux.

Pour les domaines des structures et fluides, la plateforme permet de créer une géométrie sur les logiciels DesignModeler ou SpaceClaim, mais il est également possible d'importer une géométrie à partir d'un logiciel externe en utilisant la fonctionnalité « import ... ».

La préface WorkBench du logiciel ANSYS se présente comme ceci :

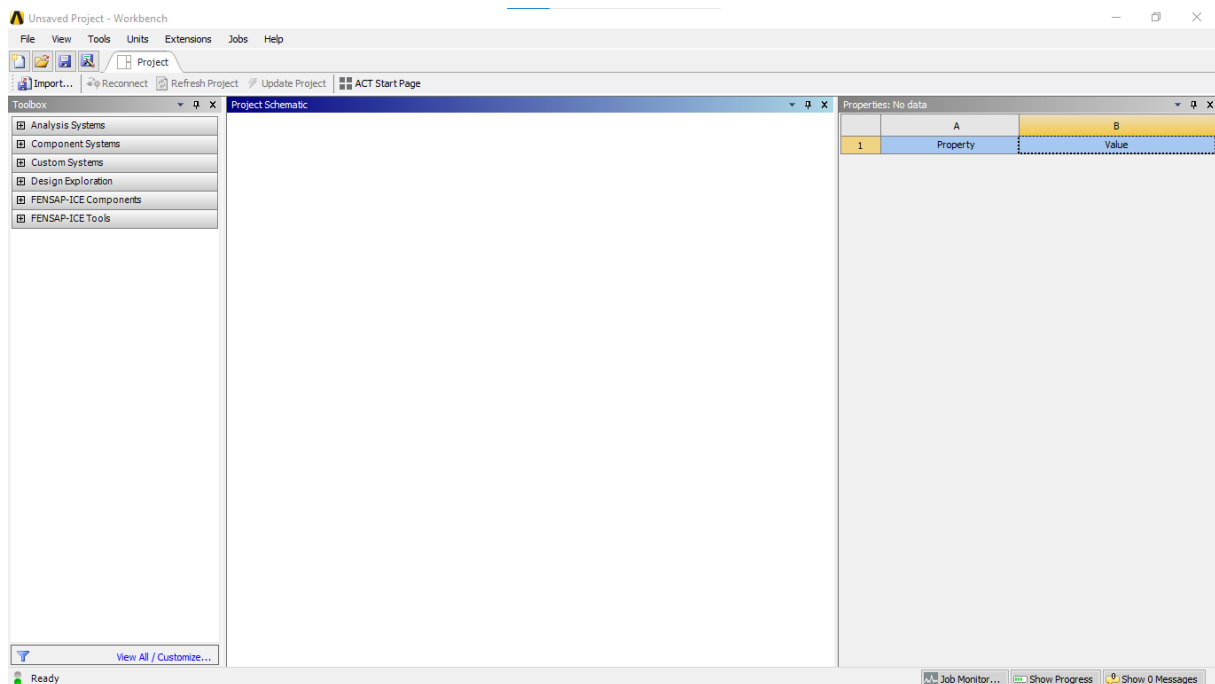


Figure III.1 : préface de workbench

Comme on peut le constater sur cette image, il est possible pour notre étude d'utiliser WorkBench mais on se consacrera uniquement à l'étude de l'accumulation de givre en utilisant le logiciel FENSAP-ICE.

III.3 Présentation du logiciel FENSAP-ICE :

ANSYS, Inc. est le fournisseur international de travaux scientifiques de CFD. ANSYS, Inc. a acheté les actions de Newmerical Technologies International (NTI) en février 2015 avec l'intention de promouvoir des services simplifiés et compréhensibles pour la conception et ingénierie de systèmes de protection contre le givre sur différents avions et éoliennes mais également sur des voitures, camions et trains à grande vitesse. [22]

FENSAP-ICE est considérée comme la référence mondiale de logiciels de simulation d'accumulation de givre de par sa rigueur scientifique et sa méthodologie, contrairement aux logiciels se basant sur des calculs empiriques et heuristiques. C'est pour cela qu'il est utilisé par plusieurs constructeurs comme aide pour la certification de leurs avions (par exemple : le RC26B [23], le EADS/CASA C-295, le Augusta-Bell AB139, le Bell-Augusta BA609, le Bombardier/De Havilland Dash 8Q400 et l'ATR42 [24]).

CHAPITRE III _____ SIMULATION SUR FENSAP-ICE

FENSAP-ICE aborde cinq (5) aspects majeurs de givrage en vol : dynamique des fluides (CFD), limite d'impact des gouttelettes et zones d'ombre, formes de glace, dégradation aérodynamique et charges thermiques anti- et dégivrantes [25].

FENSAP-ICE possède 6 modules principaux : FENSAP, OptiGrid, DROP3D, ICE3D, CHT3D, FENSAP-TURBO, DROP3D-TURBO, ICE3D-TURBO ; mais étant donné que dans le projet en cours nous avons uniquement utilisé FENSAP, DROP3D et ICE3D, nous ne parlerons dans ce présent document que de ces trois modules.

FENSAP : il permet de résoudre les équations de Navier-Stokes pour un écoulement compressible permanent ou instationnaire, laminaire ou turbulent (turbulence modélisée par une ou deux équations) d'un fluide visqueux ou non.

DROP3D : il fonctionne grâce aux résultats obtenus par FENSAP, Fluent, CFX ou toute autre solution provenant d'un code CFD équivalent. Il permet de résoudre les équations différentielles partielles de la vitesse des particules et de la concentration d'eau.

ICE3D : il fonctionne également grâce aux résultats obtenus auparavant (fournis par DROP3D) et permet de résoudre des équations différentielles partielles de la thermodynamique de formation de givre. Il donne la forme du givre, l'épaisseur du film d'eau et la température de n'importe quel nombre de surfaces 3D complexes.

La préface FENSAP-ICE se présente comme suit :

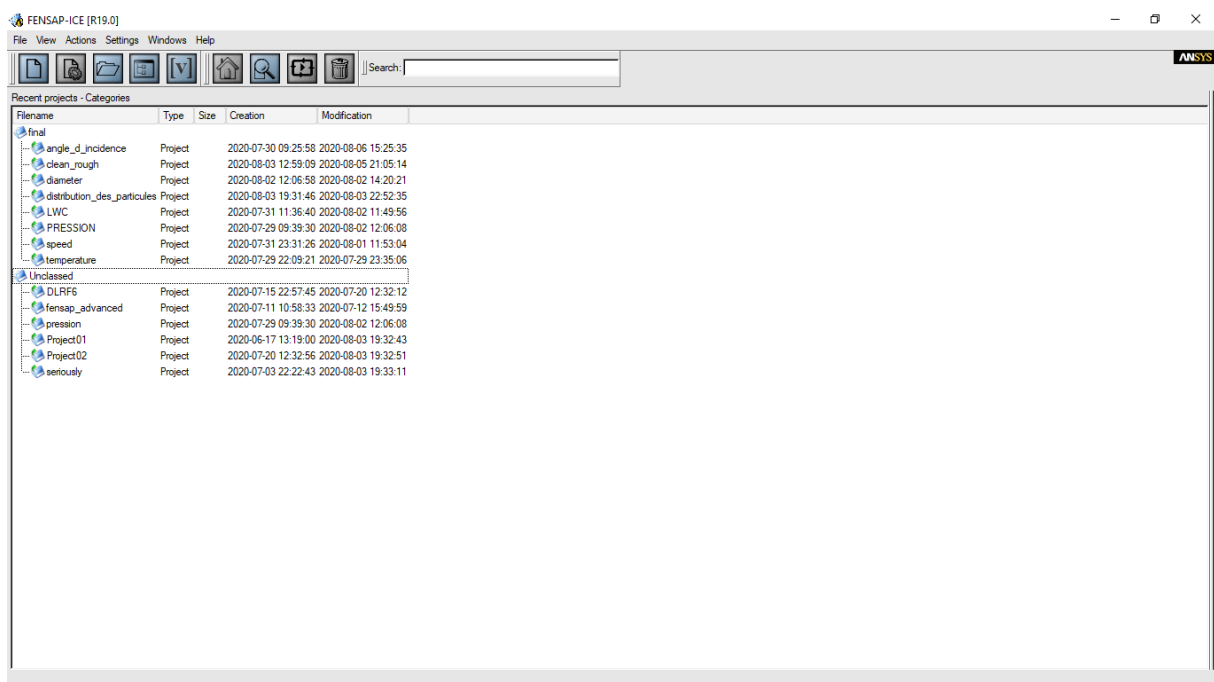


Figure III.2 : préface de FENSAP-ICE

CHAPITRE III _____ SIMULATION SUR FENSAP-ICE

En créant un nouveau projet et en lançant les modules FENSAP, DROP3D et ICE3D, on obtient la fenêtre suivante :



Figure III.3 : préface d'un projet sur FENSAP-ICE

Pour lancer un nouveau calcul, on introduit d'abord le fichier «.grid » qui contient la géométrie que l'on veut étudier ainsi que son maillage. Nous avons utilisé un fichier déjà prêt que nous avons téléchargé sur le site d'aide de Ansys FENSAP-ICE [26]. Nous l'avons introduit dans le module FENSAP puis entré les paramètres et lancé le calcul. Une fois terminé, nous avons importé ces données ainsi que la solution obtenue sur FENSAP vers DROP3D, puis nous avons rajouté des données supplémentaires et lancé encore une fois les calculs. Vient ensuite le module ICE3D où nous avons répété la même opération pour clore ce projet.

III.4 Calculs :

Dans la présente étude, nous avons décidé d'analyser l'influence de différents paramètres sur l'accumulation du givre et donc sur l'altération des performances de l'avion (profil d'aile NACA0012 dans notre cas).

Les paramètres en question sont :

- La pression statique et température de l'air ;
- La vitesse relative de l'avion ;
- L'incidence du profil NACA0012 ;
- La rugosité de la surface à étudier ;

- Le diamètre et la distribution des particules d'eau ;
- La teneur en eau liquide (LWC : Liquid Water Content) ;
- La température de givrage (température extérieure de l'air)

Pour chaque étude, on choisit 3 valeurs différentes pour chaque paramètre dont on veut montrer l'influence et on garde tous les autres paramètres constants à une valeur moyenne choisie auparavant. Les valeurs moyennes en question sont les suivantes :

- Une pression : $P=78190\text{Pa}$;
- Une température : $T=1^\circ\text{C}$;
- Une vitesse : $V=200\text{m/s}$;
- Un angle d'attaque : $\alpha=4^\circ$;
- Une rugosité : $k_s=0\text{mm}$;
- Une distribution des particules : monodispersed ;
- Un diamètre des particules : $D=30\mu\text{m}$;
- Une teneur en eau liquide : $\text{LWC}=0.55\text{g/m}^3$;
- Une température de givrage : $T=-13^\circ\text{C}$.

III.4.1 La pression statique de l'air :

La pression statique est la pression exercée par un fluide au repos, elle résulte du poids de celui-ci ou en d'autres termes, de la force gravitationnelle appliquée aux particules du fluide en question. La pression statique de l'air varie donc avec l'altitude selon la fonction suivante :

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}z} \quad (\text{III.1})$$

Tel que :

- $p(z)$: pression atmosphérique en pascals à l'altitude z ;
- p_0 : pression atmosphérique au niveau de la mer en pascals ;
- M : masse molaire de l'air $M=28.966 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$;
- g : force gravitationnelle de la terre $g=9.805 \text{ m s}^{-2}$;
- R : constante universelle des gaz parfaits $R=8.314510 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
- T : température standard de l'air en Kelvin $T=(15+273.15) \text{ K}$;
- Z : altitude en mètres.

On peut utiliser ces données pour effectuer des calculs sur FENSAP-ICE en choisissant directement « altitude » au lieu de « air static pressure » dans les conditions, ce n'est pas ce qui a été fait dans ce projet ; nous avons préféré choisir des pressions arbitraires dans la marge de pression où vole un avion civil généralement. Pour cela, on a sélectionné les trois (3) pressions suivantes : $P_1=101325 \text{ kPa}$; $P_2=78190 \text{ Pa}$; $P_3=18820 \text{ Pa}$.

Comme le montrent les figures suivantes :

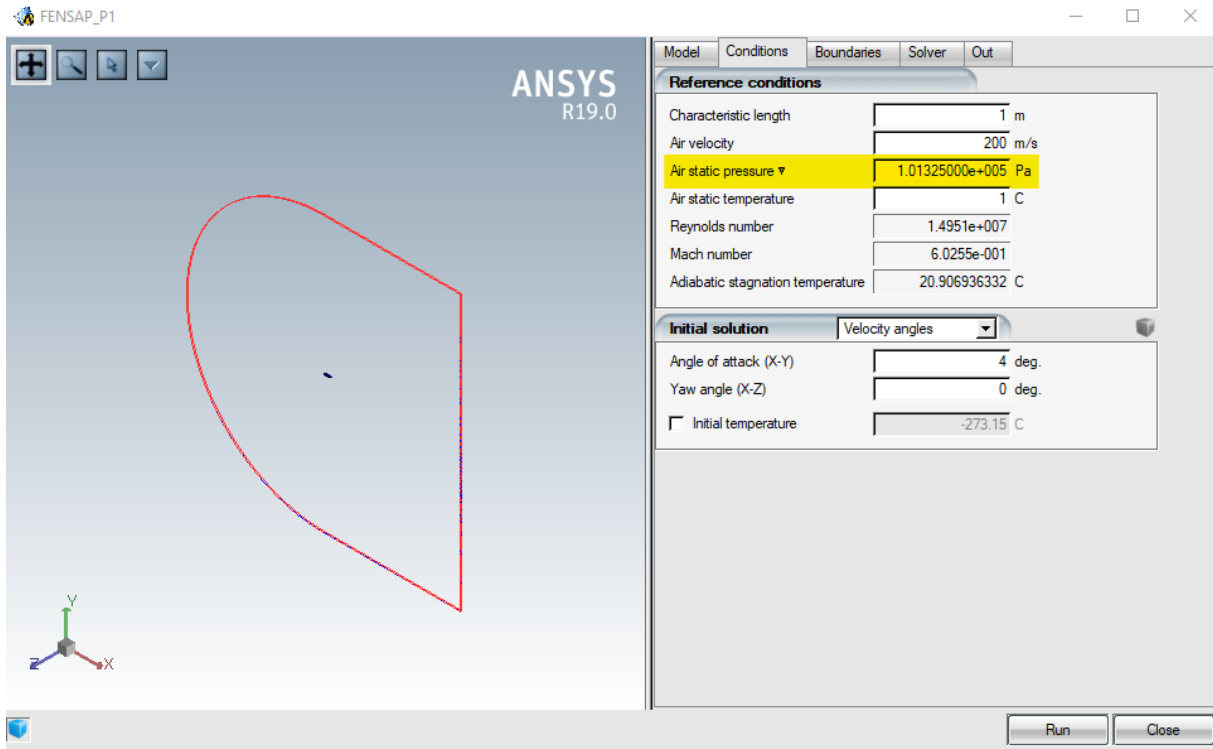


Figure III.4 : Fenêtre des conditions où $P1=101,325 \text{ Pa}$

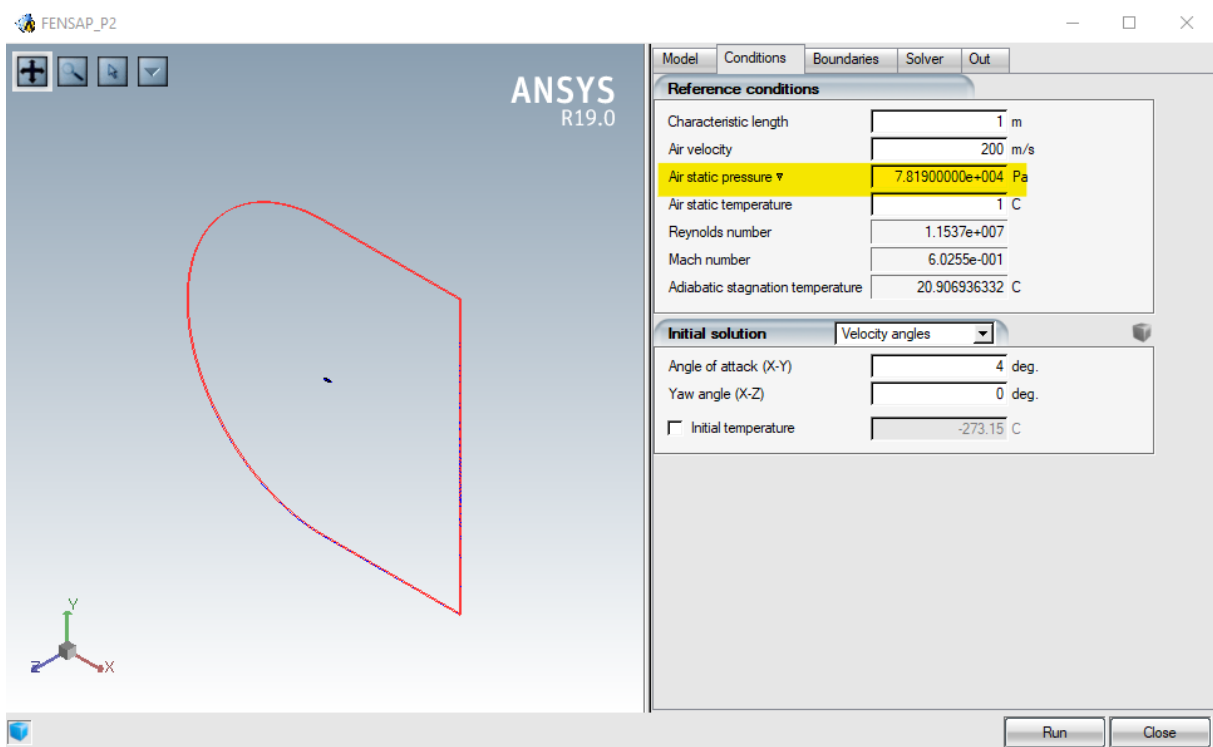


Figure III.5 : Fenêtre des conditions où $P2=78,190 \text{ Pa}$

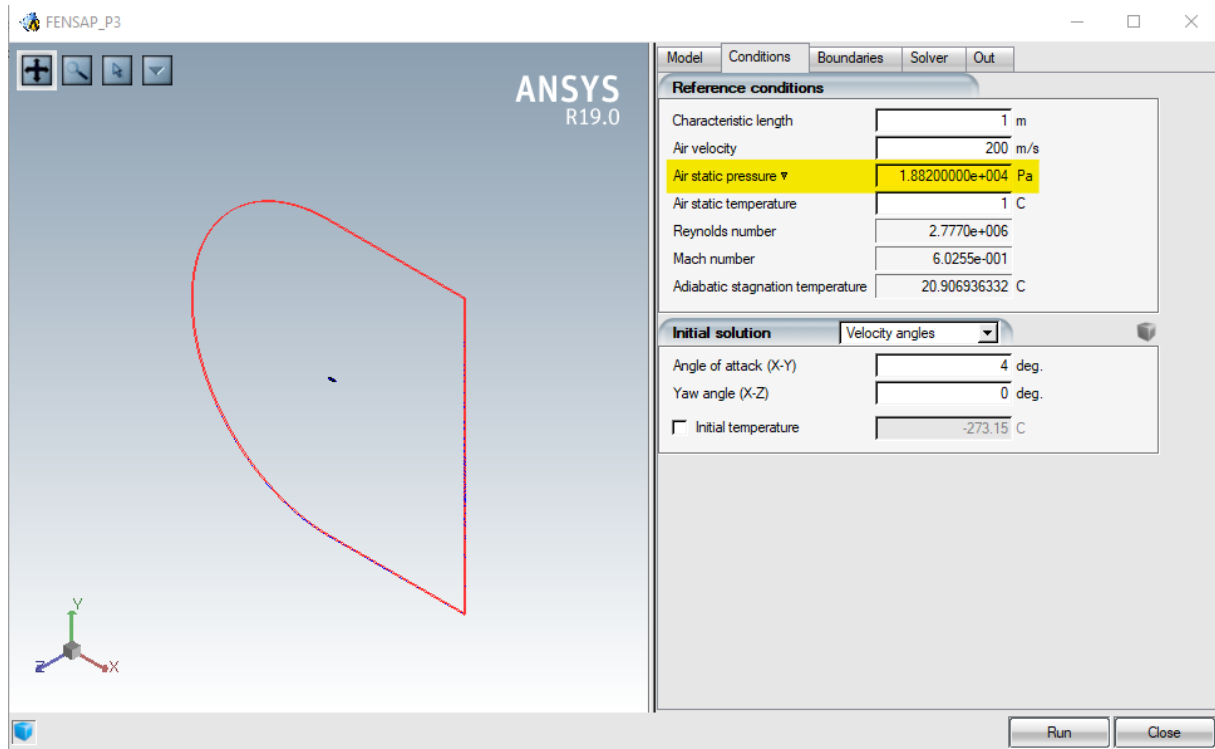


Figure III.6 : Fenêtre des conditions où $P_3=18,820 \text{ Pa}$

III.4.2 La température de l'air :

Tout comme la pression, la température de l'air varie en fonction de l'altitude mais aussi selon les saisons. Il est donc primordial de tenir compte de l'influence de cette variation, si influence il y a, pour l'étude, la prévention et l'élimination du givre. La température de l'air varie selon la fonction suivante :

$$T(z) = T_0 - az \quad (III.2)$$

Tel que :

- $T(z)$: température en Kelvin ;
- T_0 : température standard $T_0=(15+273.15)K$;
- $a=6.5 \cdot 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$;
- z : altitude en mètres.

Pour ce calcul, nous avons choisi des températures dans la plage de vol d'un avion civil comme suit : $T_1=-57^\circ\text{C}$; $T_2=1^\circ\text{C}$; $T_3=15^\circ\text{C}$.

Comme on peut le voir sur les figures suivantes :

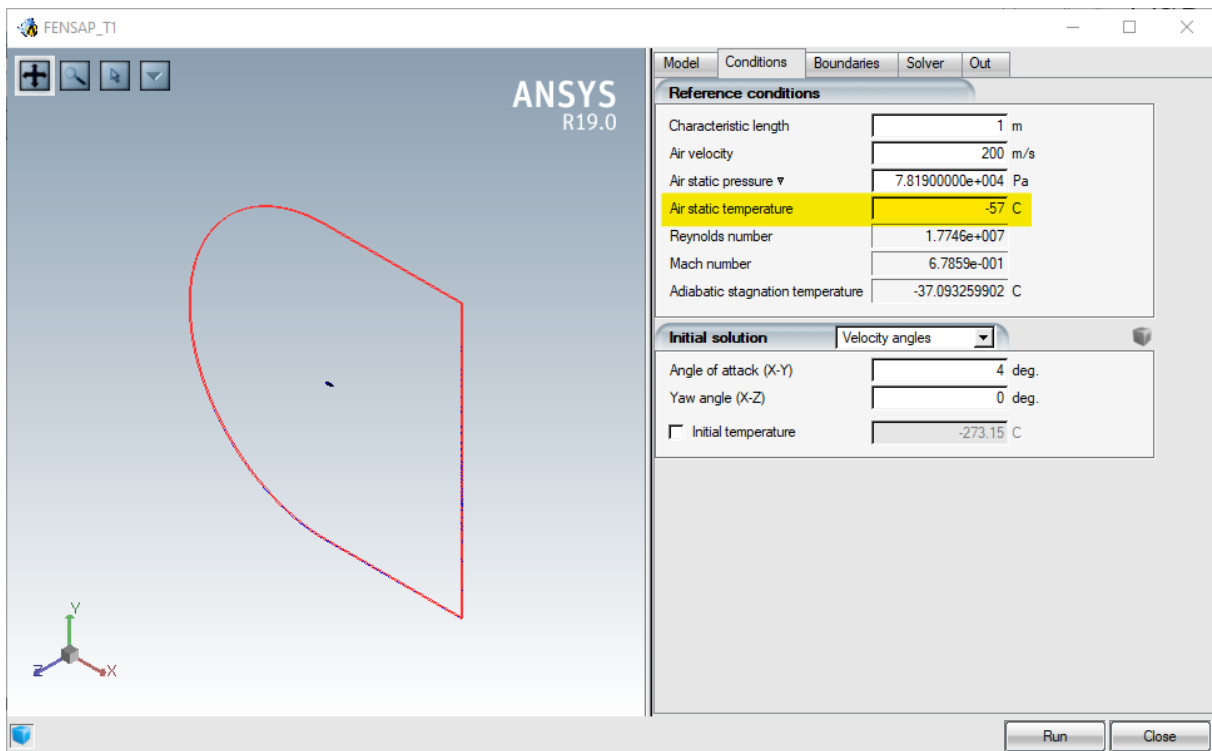


Figure III.7 : Fenêtre des conditions où $T_1=-57^\circ\text{C}$

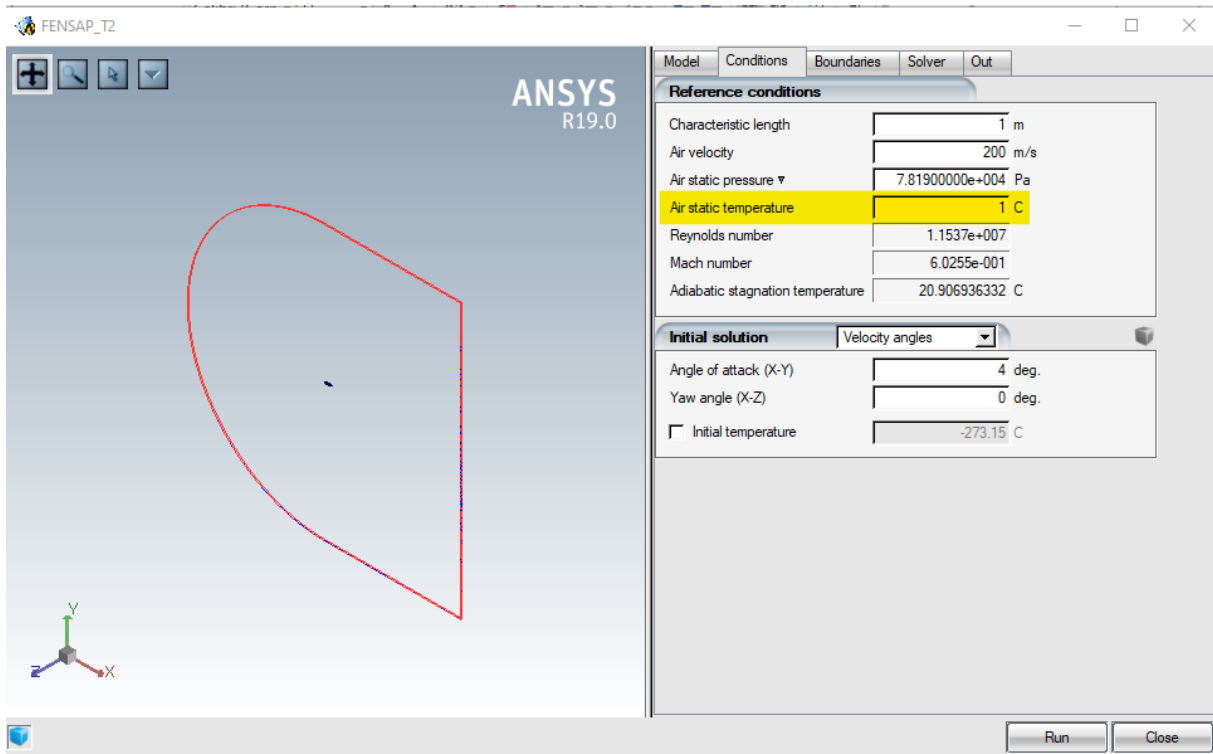


Figure III.8 : Fenêtre des conditions où $T_2=1^{\circ}\text{C}$

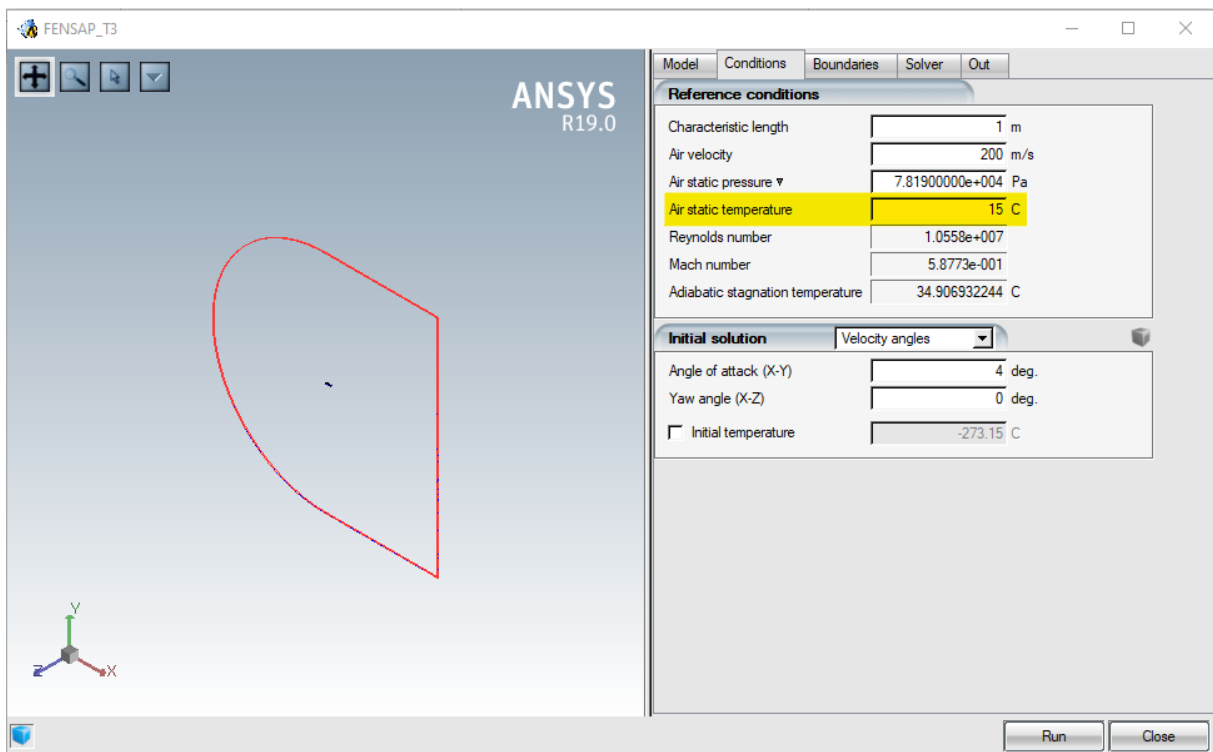


Figure III.9 : Fenêtre des conditions où $T_3=15^{\circ}\text{C}$

III.4.3 La vitesse de l’avion :

La vitesse en question est la vitesse vraie de l’avion. C’est la vitesse relative de l’avion par rapport à l’air dans lequel il se déplace (ou dans le cas d’une soufflerie, la vitesse de l’air par rapport à la maquette d’avion). Elle est égale à la vitesse par rapport au sol lorsqu’il n’y a pas de vent. Elle est reliée au nombre de Mach par la relation : $V = M \cdot a$ (III.3)

Tel que :

- V : vitesse vraie de l’avion ;
- M : nombre de Mach ;
- a : vitesse du son en $m\ s^{-1}$. $a = \sqrt{\gamma RT}$ (III.4) (γ : rapport des chaleurs spécifiques $\gamma=1.4$ pour l’air ; r : constante des gaz pour l’air $r=287.035\ J/kg\ K$; T : température extérieure de l’air en Kelvin).

Nous avons choisi les vitesses : $V_1=100m/s$; $V_2=200m/s$; $V_3=300m/s$.

Comme le montrent les figures suivantes :

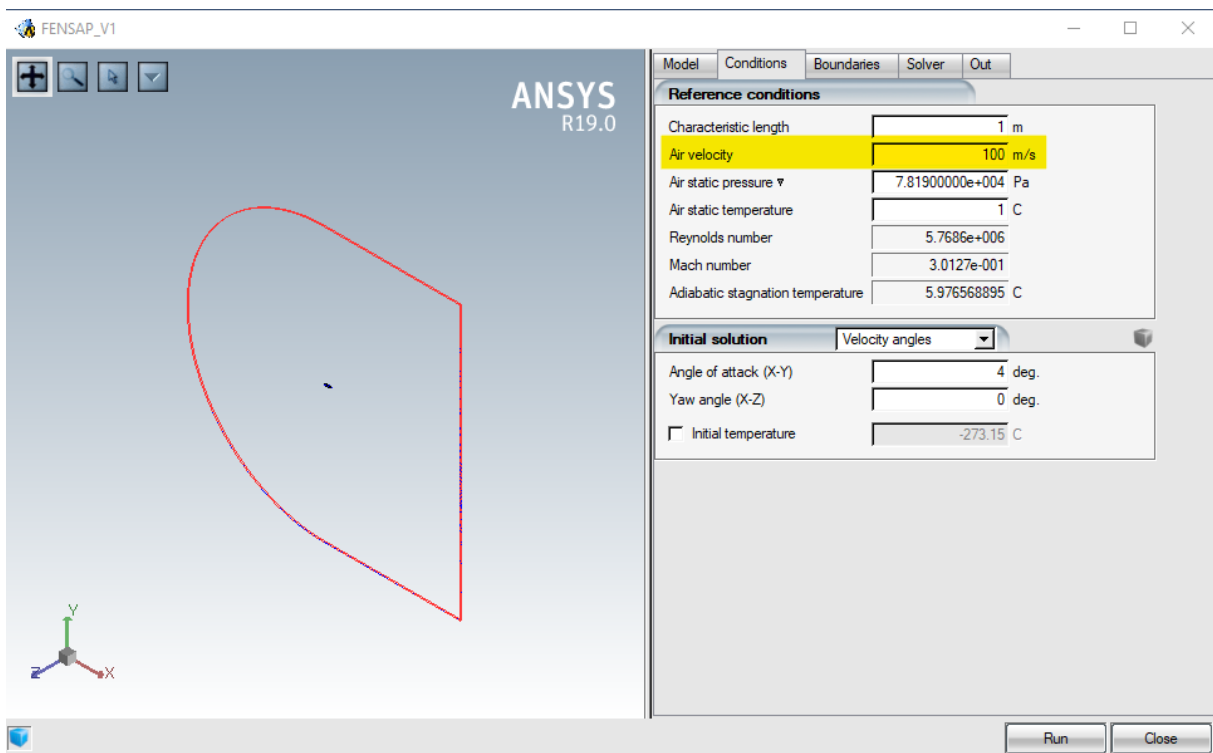


Figure III.10 : Fenêtre des conditions où $V_1=100\ m/s$

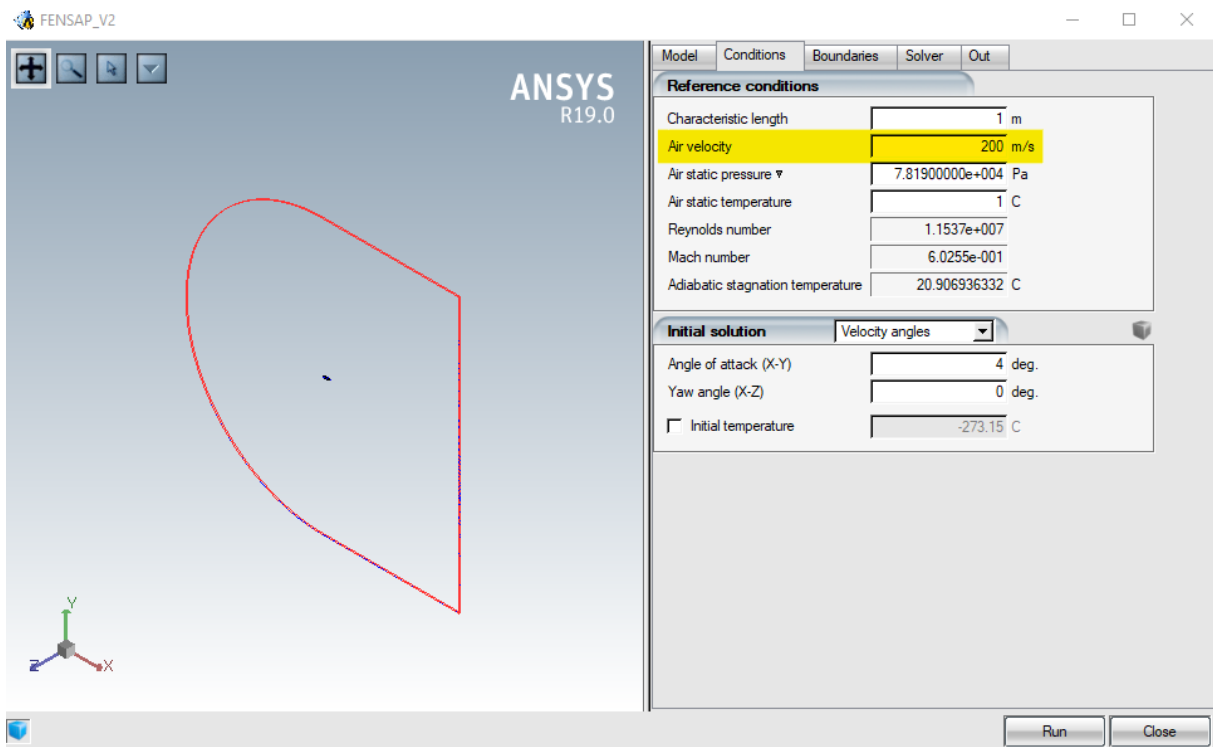


Figure III.11 : Fenêtre des conditions où $V_2=200$ m/s

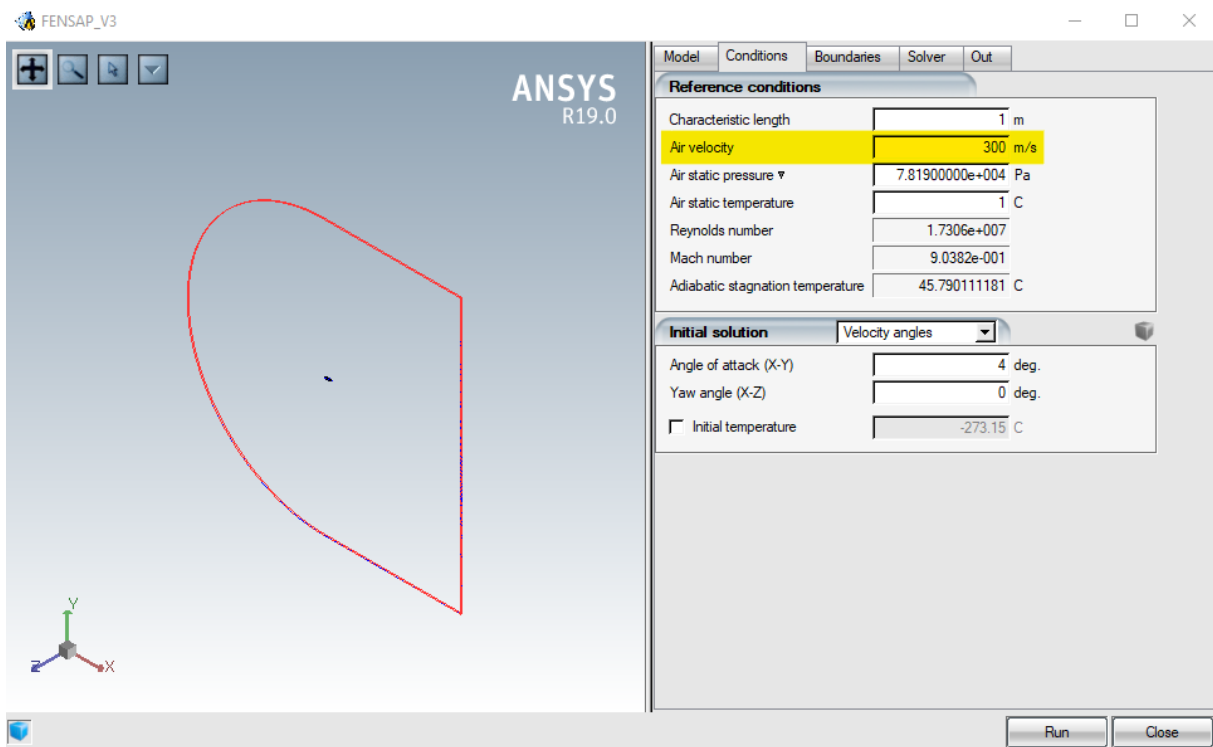


Figure III.12 : Fenêtre des conditions où $V_3=300$ m/s

III.4.4 L'incidence du profil NACA0012 :

L'angle d'incidence (ou angle d'attaque) est l'angle formé entre la corde du profil NACA0012 et le vecteur vitesse correspondant au vent relatif. Il est très important en aéronautique vu qu'il a un impact direct sur la portance et la traînée de l'avion. A une certaine valeur d'angle d'attaque, il y a décollement de la couche limite ce qui cause le décrochage de l'avion ; dans le domaine militaire, le décrochage peut être bénéfique, il est même souvent utilisé par les pilotes ; mais dans le domaine civil, ce phénomène est très dangereux, c'est pour cela qu'on évite d'atteindre l'angle de décrochage de l'avion en volant à une certaine marge d'angles d'incidence.

C'est pourquoi nous avons choisi de faire une étude « sweep » (en balayage) dans la marge $0 < \alpha < 18^\circ$ avec un pas de 2° en procédant de la manière suivante :

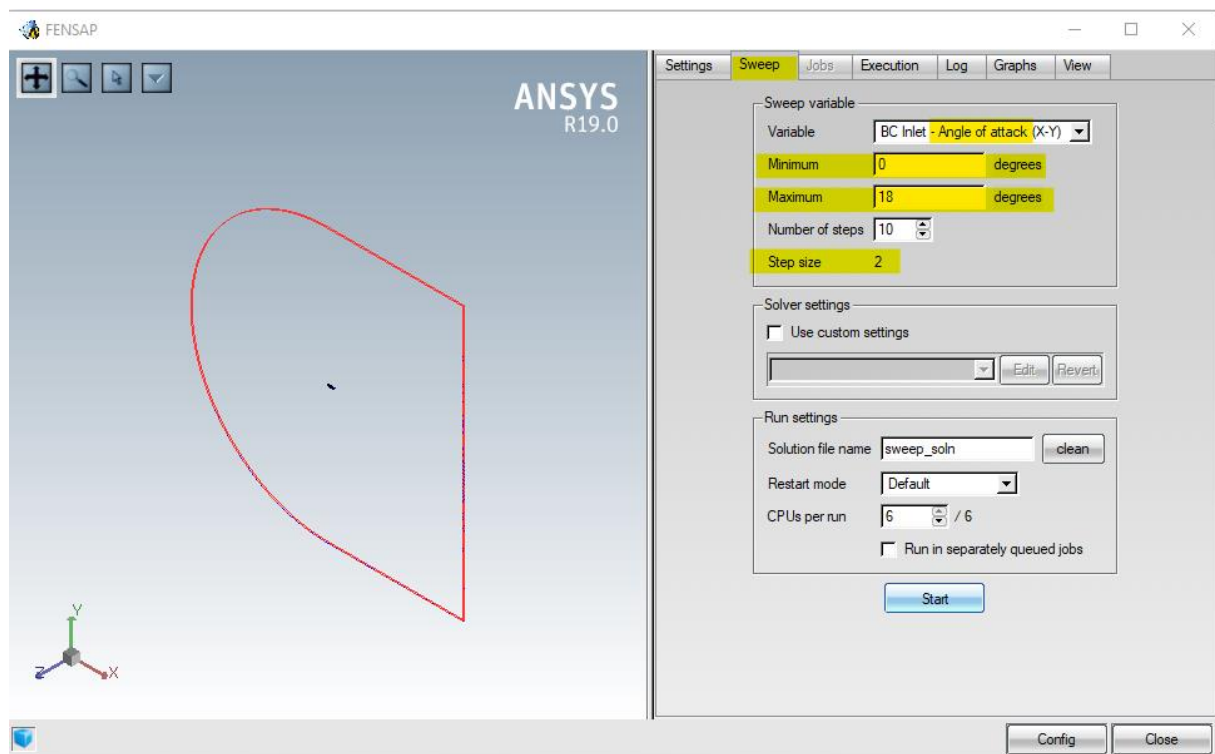


Figure III.13 : Calcul en balayage sur l'angle d'incidence tel que : $0 < \alpha < 18$

III.4.5 La rugosité de la surface du profil NACA0012 :

Pour montrer l'influence de la rugosité de la surface sur la façon et le degré d'accumulation du givre sur cette dernière, nous avons effectué trois (3) calculs : dans le premier, la surface est 100% propre (No Surface Roughness), ce qui est très rare dans la vraie vie ; le deuxième et le troisième quant à eux possèdent une rugosité déterminée par nous-même dans la configuration du module FENSAP dans l'onglet model. Afin d'entrer le coefficient $k_s(m)$ choisi, on sélectionne l'option « Specified sand-grain roughness ». k_s étant l'équivalent du coefficient de Nikuradse. Dans le modèle de turbulence, sa valeur par défaut est de 0.5mm mais on peut la choisir arbitrairement sauf qu'une fois qu'une certaine limite est excédée (5-10mm), il vaut mieux simuler la rugosité au niveau de la géométrie de la surface et du maillage plutôt que dans le modèle de turbulence pour ne pas déclencher des effets de séparation d'écoulement macroscopiques [27].

Dans cette étude, on a choisi pour les deux (2) calculs avec une rugosité non nulle : $k_s=0.5mm$ et $k_s=1mm$.

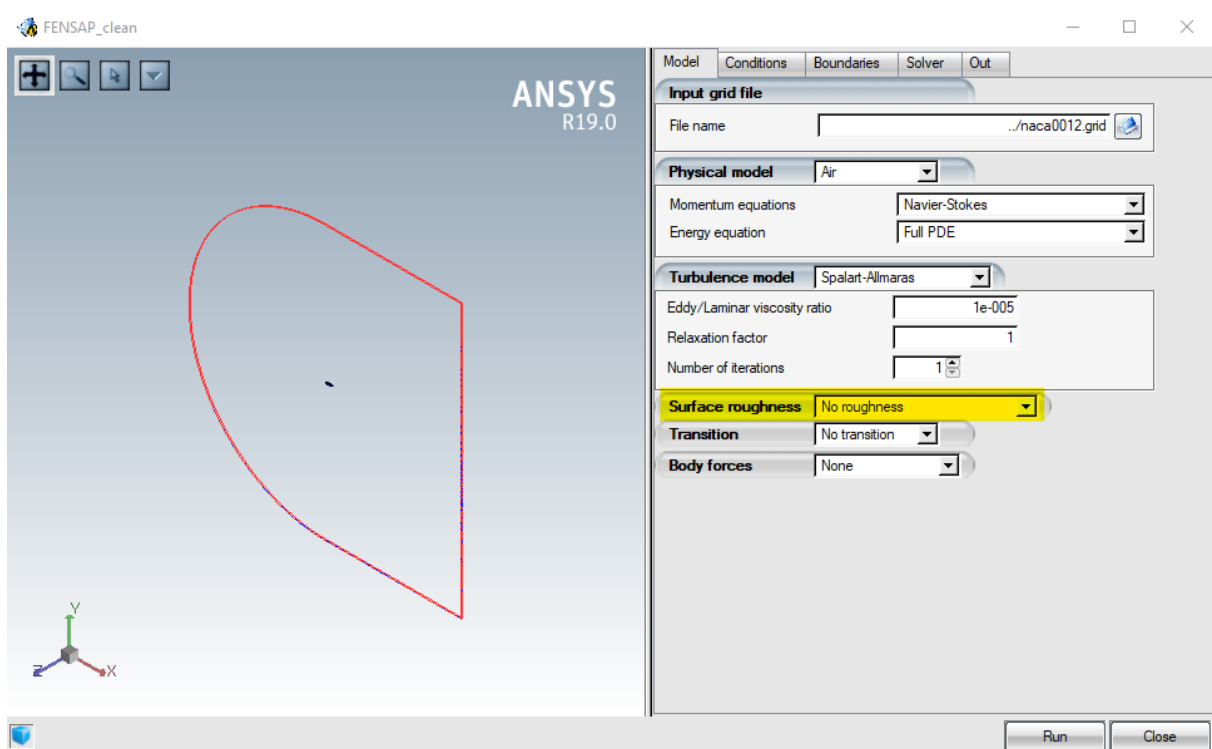


Figure III.14 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 « propre »

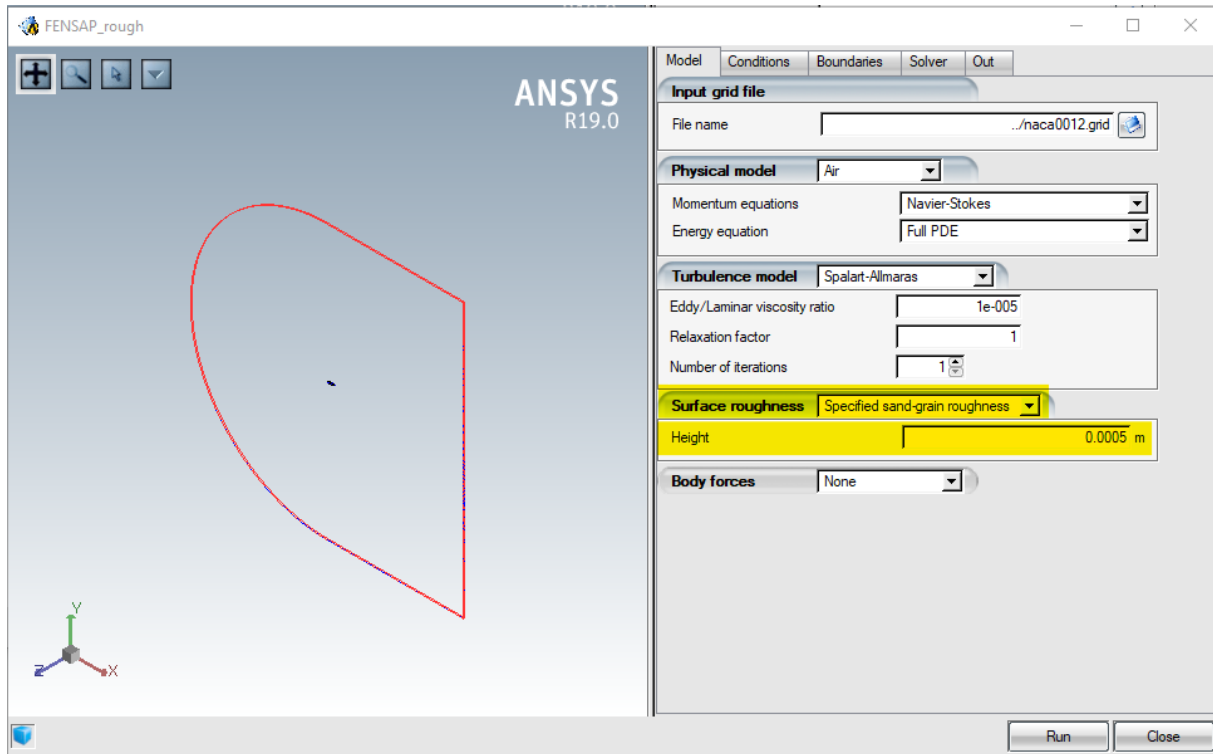


Figure III.15 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 de rugosité $ks=0.5mm$

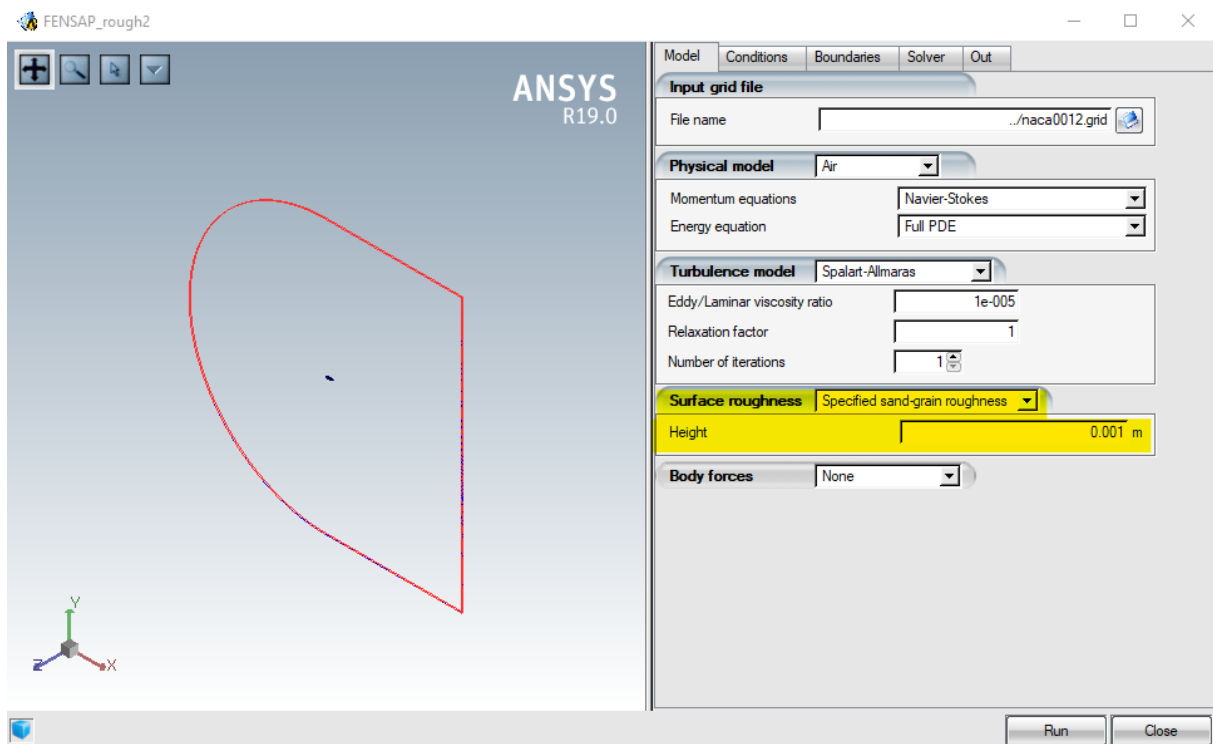


Figure III.16 : Modèle de turbulence pour le calcul du profil NACA0012 de rugosité $ks=1mm$

III.4.6 Le diamètre des particules d'eau :

On suppose que les particules d'eau sont des sphères de taille unique et uniforme, généralement égales au diamètre volumique moyen (MVD : Median Volume Diameter) de la distribution de la taille de l'échantillon. L'unité de MVD est le micron (μm). La taille des gouttelettes varie dans l'intervalle 0 à 60 μm environs ; nous avons donc choisi de faire des calculs avec les valeurs : $\text{MVD}_1=5\mu\text{m}$; $\text{MVD}_2=30\mu\text{m}$; $\text{MVD}_3=55\mu\text{m}$.

Ce qu'on peut voir sur les images suivantes :

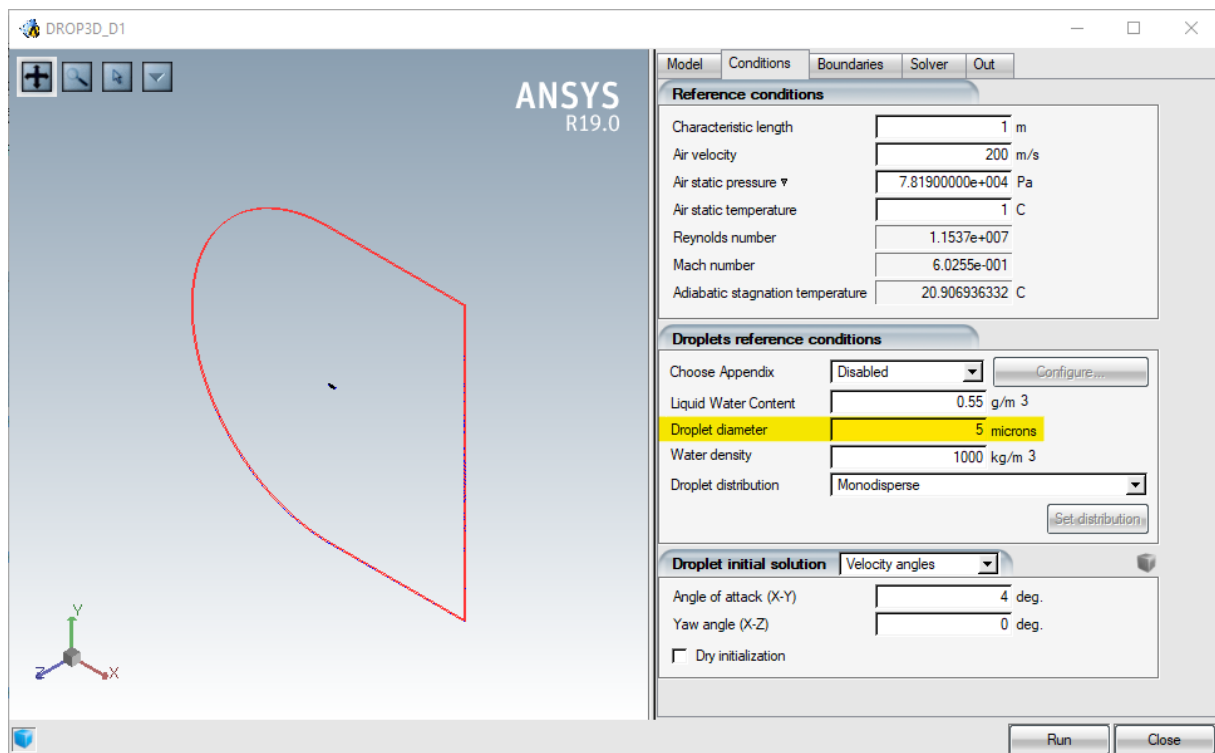


Figure III.17 : Fenêtre des conditions où $\text{MVD}_1=5\mu\text{m}$

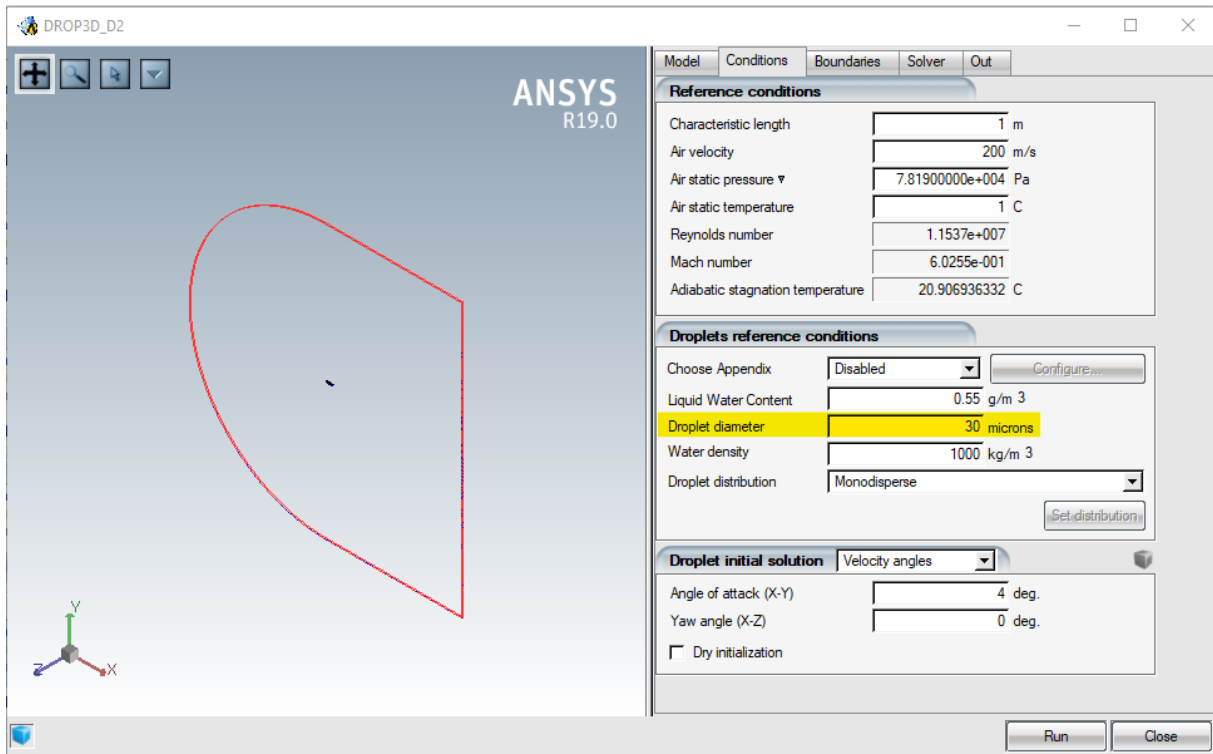


Figure III.18 : Fenêtre des conditions où MVD2=30 μm

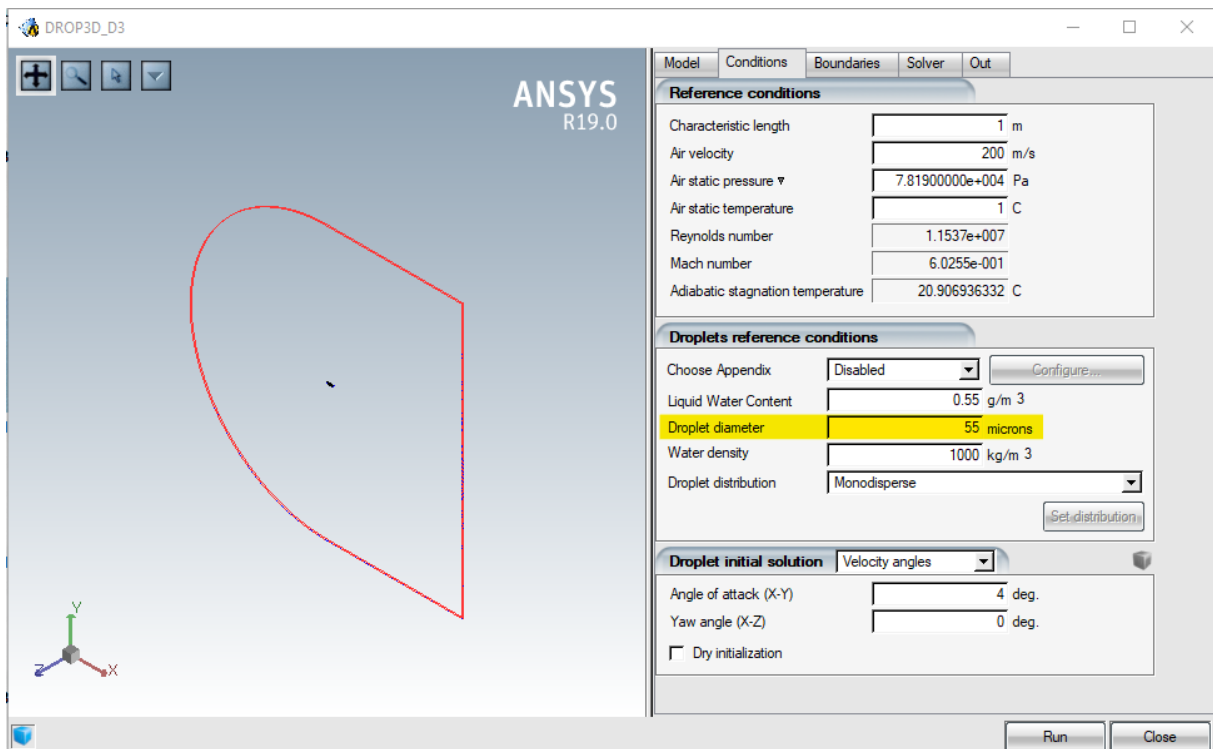


Figure III.19 : Fenêtre des conditions où MVD3=55 μm

III.4.7 La distribution des particules d'eau :

Dans l'étude précédent celle-ci, nous avons supposé que toutes les particules d'eau dans l'air ont le même diamètre (monodisperse) ; sauf que dans la réalité, les gouttelettes ont des tailles différentes. Cette situation peut être représentée par les modèles Langmuir B, C, D et E qui sont des distributions des particules incluant plusieurs tailles possibles avec leurs concentrations sous forme de pourcentages ainsi que leurs vitesses. C'est ce qui a été fait et introduit dans le logiciel FENSAP-ICE dans le module DROP3D.

Pour ce calcul nous allons comparer les différents modèles de distribution « Langmuir » avec le modèle « monodisperse » comme on peut le voir dans les figures suivantes :

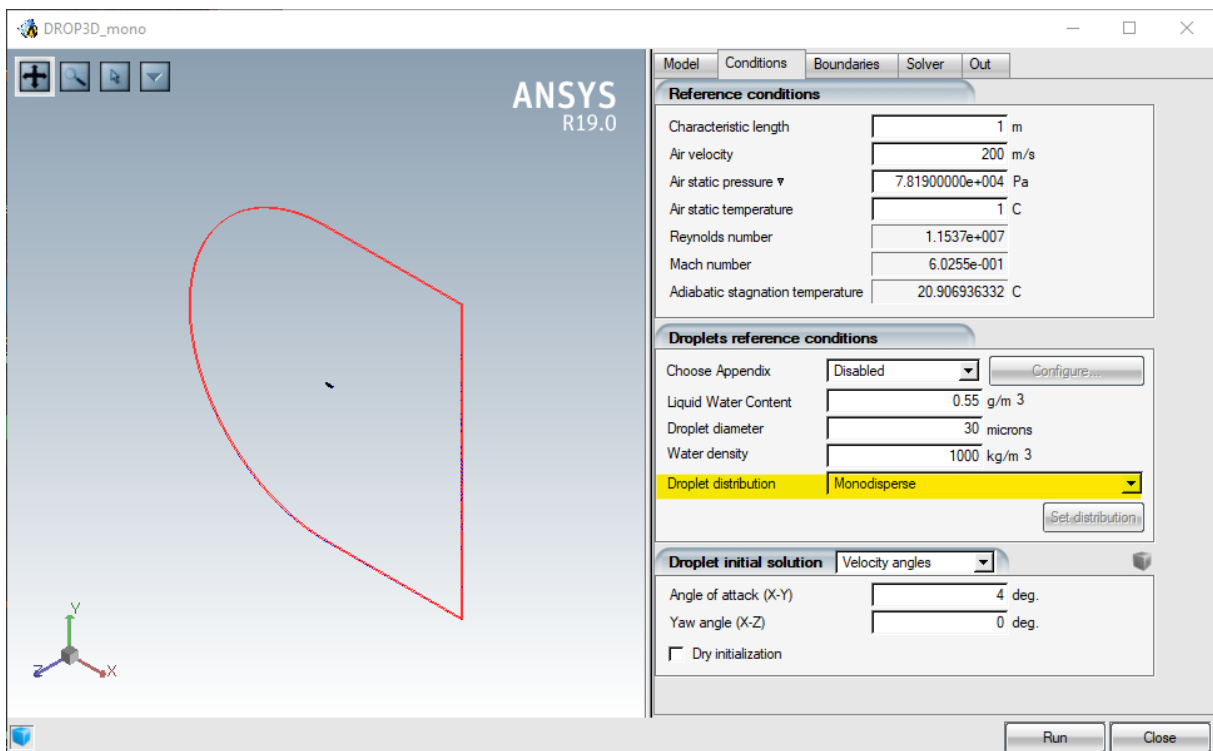


Figure III.20 : Calcul avec des gouttelettes uniformes

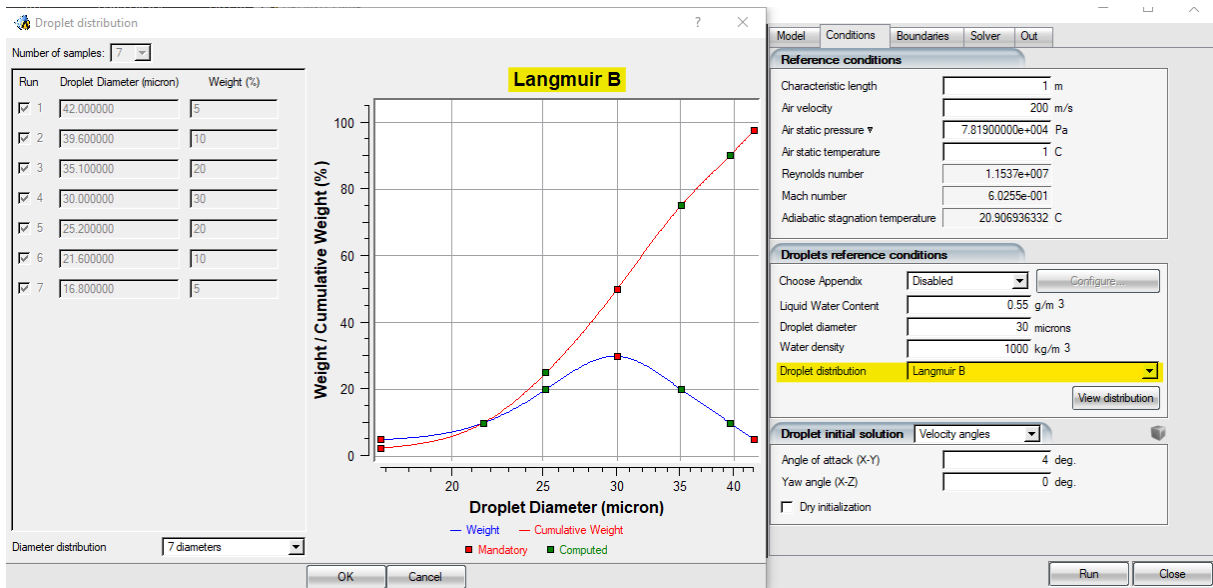


Figure III.21 : Calcul avec le modèle Langmuir B

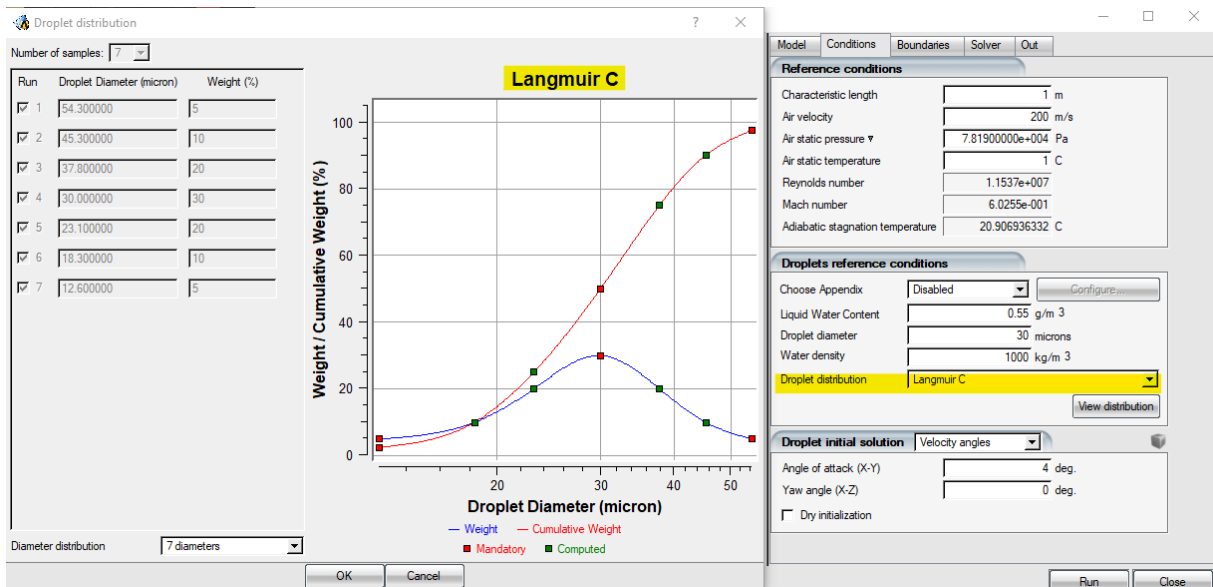


Figure III.22 : Calcul avec le modèle Langmuir C

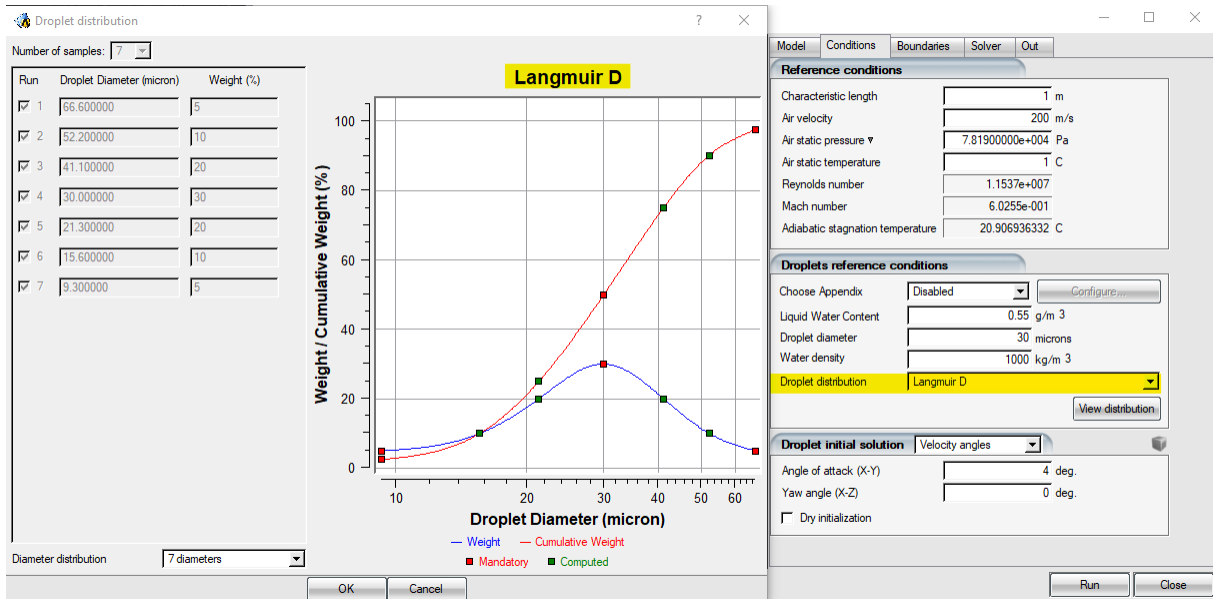


Figure III.23 : Calcul avec le modèle Langmuir D

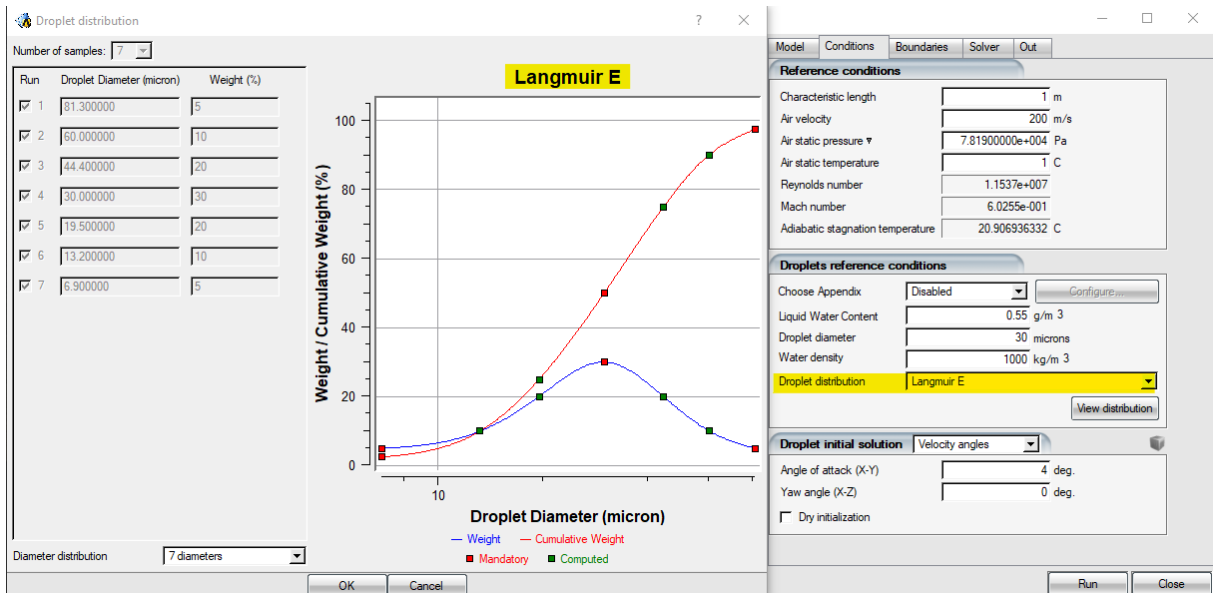


Figure III.24 : Calcul avec le modèle Langmuir E

III.4.8 La teneur en eau liquide LWC :

Elle représente la densité des particules d'eau dans l'air. Selon les données théoriques, cette entité détermine le type de givre qui se dépose sur l'aéronef tel que si LWC est faible, on a accumulation de givre blanc (rime), par contre si LWC est élevé, le givre qui se forme est transparent (glaze). Dans cette étude, on a choisi de faire trois (3) calculs avec les valeurs de LWC suivantes : $LWC_1=0.1 \text{ g/m}^3$; $LWC_2=0.55 \text{ g/m}^3$; $LWC_3=1 \text{ g/m}^3$.

On peut le voir ci-dessous :

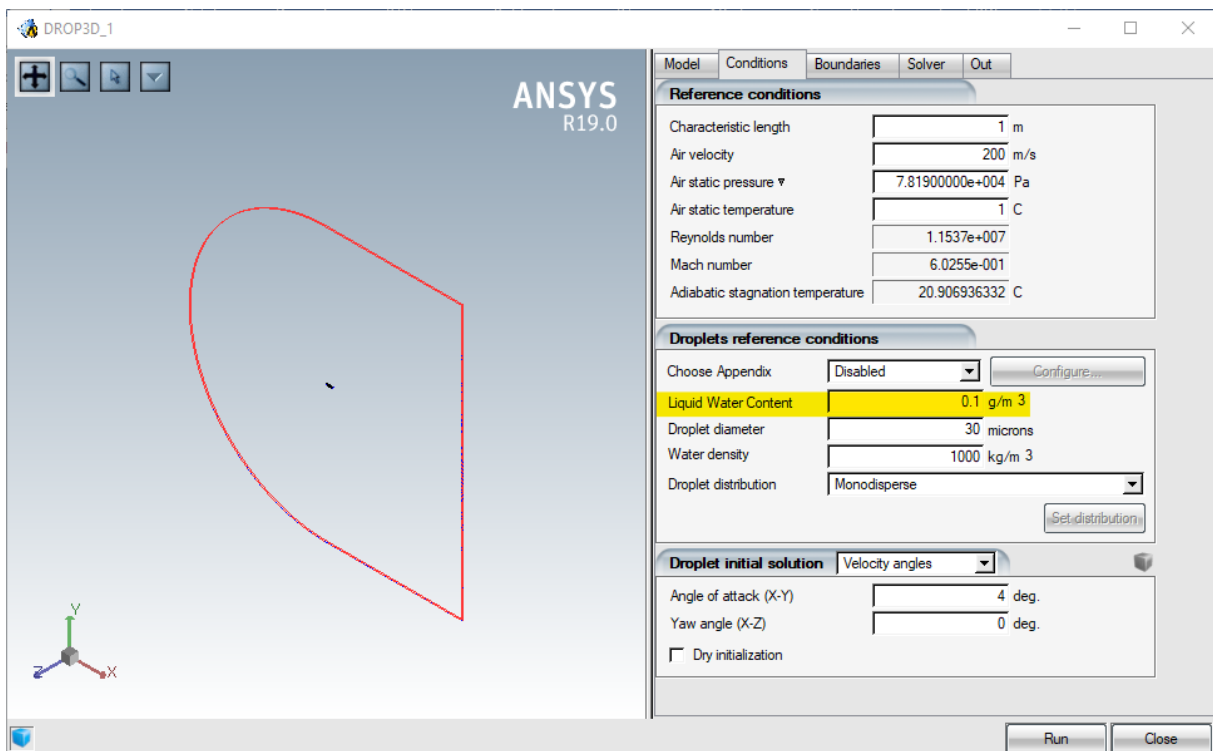


Figure III.25 : Fenêtre des conditions où $LWC_1=0.1 \text{ g/m}^3$

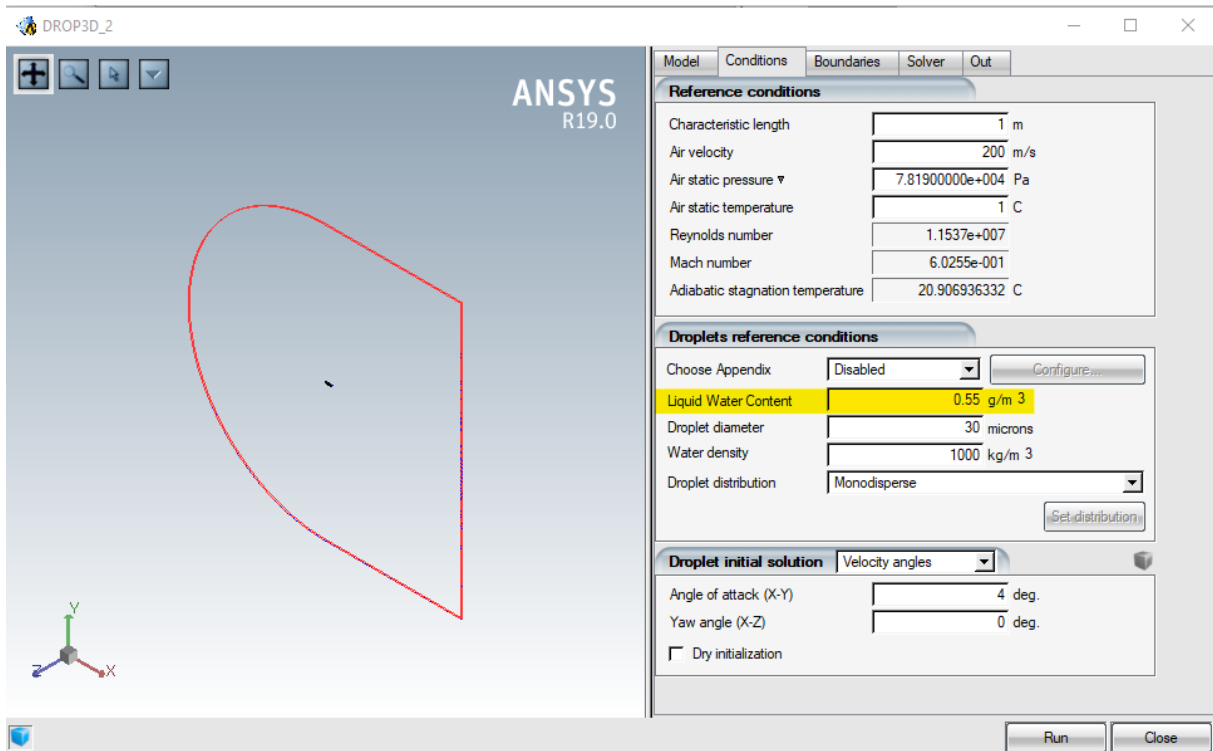


Figure III.26 : Fenêtre des conditions où LWC2=0.55 g/m³

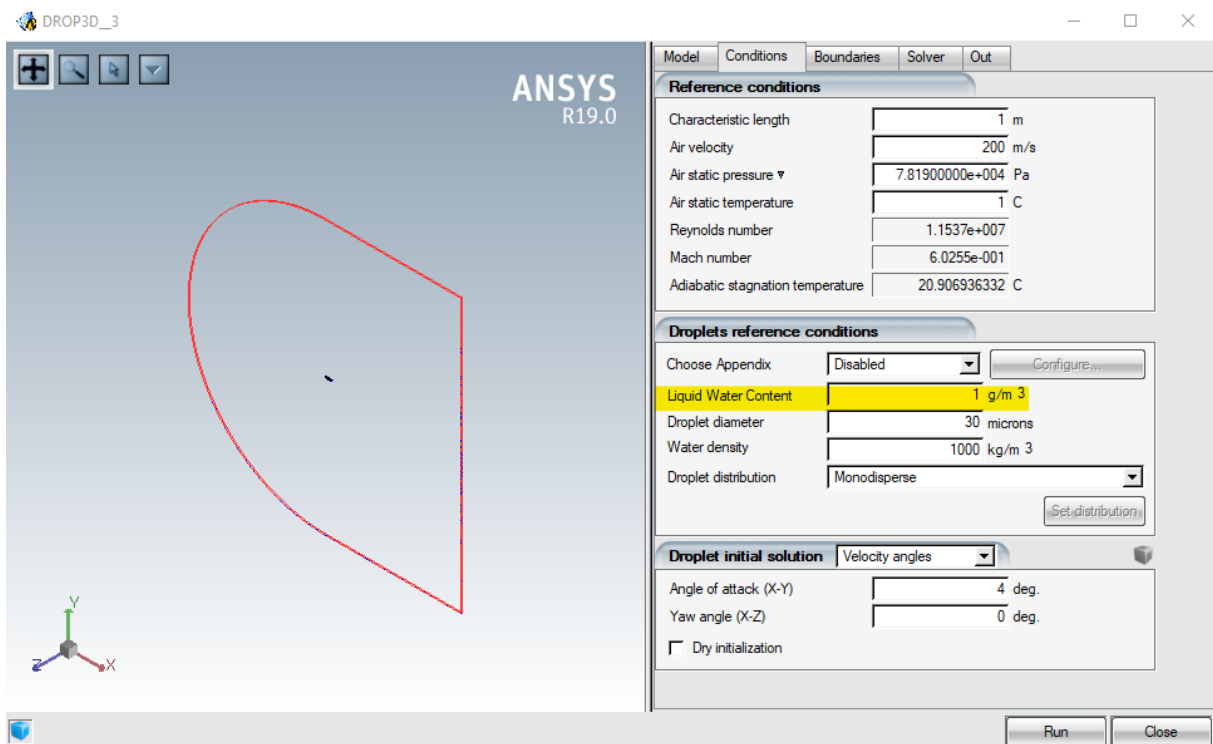


Figure III.27 : Fenêtre des conditions où LWC3=1 g/m³

III.4.9 La température de givrage :

C'est la température statique à laquelle la simulation d'accrétion de glace est effectuée. Elle est en général représentative de la température des gouttelettes impactant le profil NACA0012. Elle est généralement égale à la température de l'air mais peut être changée pour étudier l'effet de la température sur l'accumulation de givre sans modifier les données de l'écoulement. On a choisi les températures : $T1 = -18^{\circ}\text{C}$; $T2 = -13^{\circ}\text{C}$; $T3 = -3^{\circ}\text{C}$.

On peut voir ces entrées dans les figures suivantes :

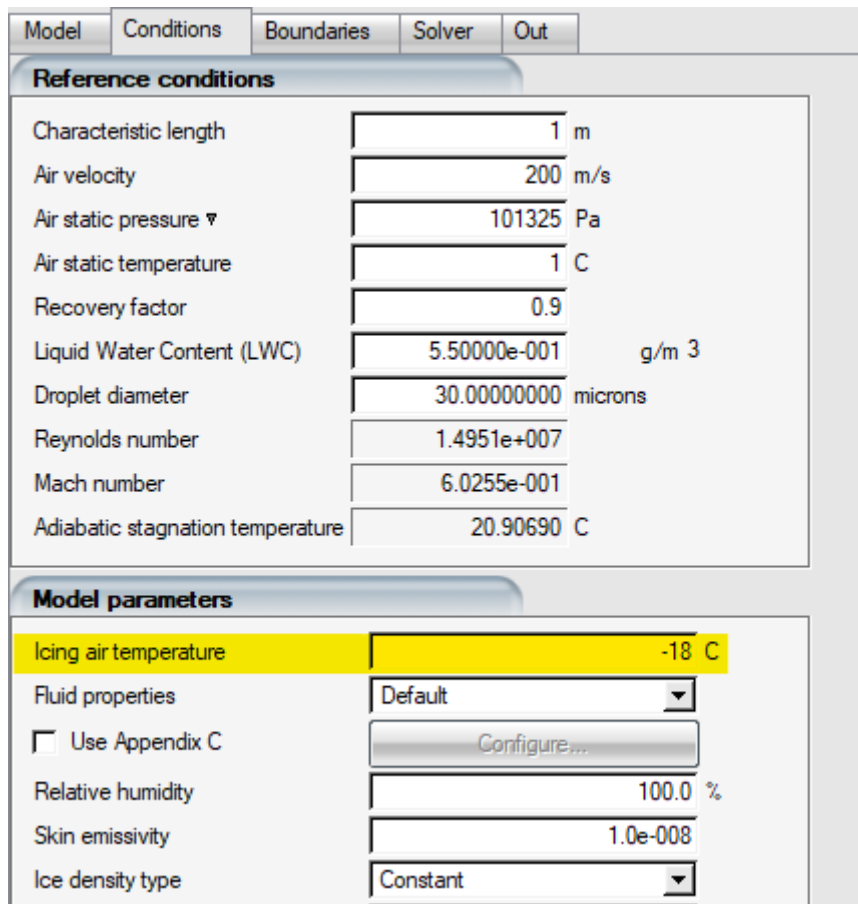


Figure III.28 : Fenêtre des conditions où $T1 = -18^{\circ}\text{C}$

Model	Conditions	Boundaries	Solver	Out
Reference conditions				
Characteristic length		1	m	
Air velocity		200	m/s	
Air static pressure ∇		101325	Pa	
Air static temperature		1	C	
Recovery factor		0.9		
Liquid Water Content (LWC)		5.50000e-001	g/m ³	
Droplet diameter		30.00000000	microns	
Reynolds number		1.4951e+007		
Mach number		6.0255e-001		
Adiabatic stagnation temperature		20.90690	C	
Model parameters				
Icing air temperature		-13	C	
Fluid properties		Default		
<input type="checkbox"/> Use Appendix C		Configure...		
Relative humidity		100.0	%	
Skin emissivity		1.0e-008		
Ice density type		Constant		

Figure III.29 : Fenêtre des conditions où $T_1 = -13^\circ\text{C}$

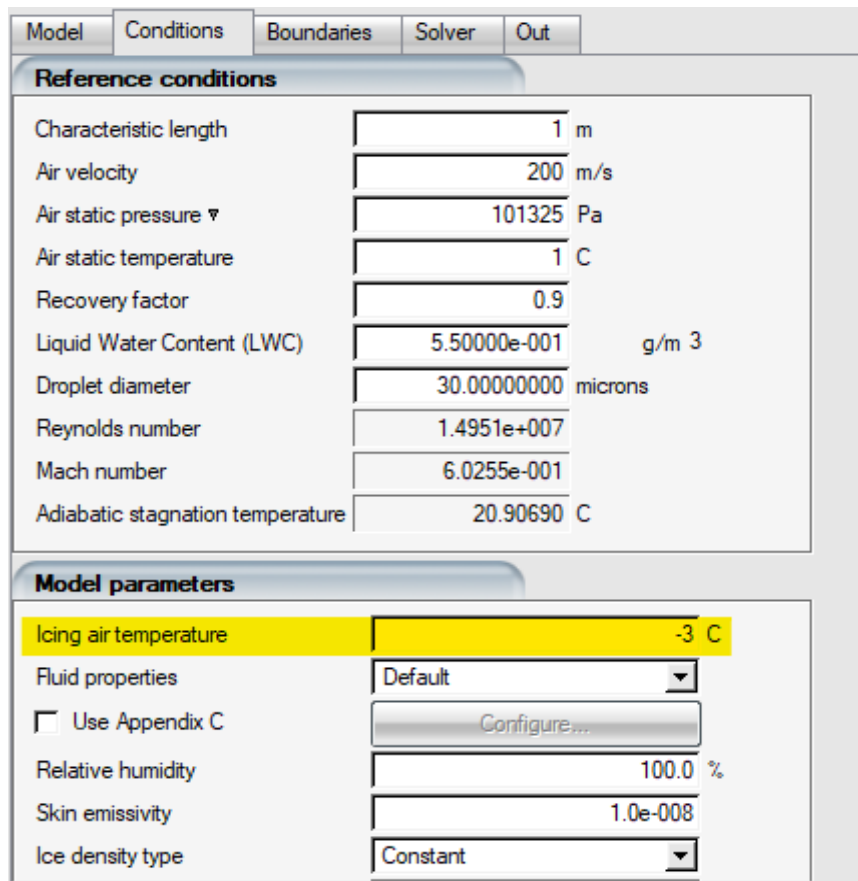


Figure III.30 : Fenêtre des conditions où $T_1 = -3^{\circ}\text{C}$

P.S. : pour ce qui est des paramètres I.4.1 jusqu'à I.4.5, on les introduit dans le module FENSAP du logiciel ; contrairement aux paramètres I.4.6 à I.4.8 qui n'interviennent qu'à partir module DROP3D et enfin le dernier paramètre I.4.9 n'entre en compte que pour le module ICE3D.

III.5 La convergence :

La convergence des calculs est un paramètre crucial dans la programmation et la simulation car il détermine le degré de fiabilité de celles-ci. Un calcul qui diverge est un calcul dont le résultat est insignifiant !

Le critère de convergence peut être représenté par les deux grandeurs : une erreur maximum ε donnée ou un nombre maximal d'itération N .

Généralement sur FENSAP-ICE, le nombre maximal d'itérations est choisi arbitrairement par l'utilisateur mais l'erreur est souvent prédéfinie (nous l'avons à chaque fois laissée à sa valeur par défaut) mais elle peut être modifiée comme cela va être montré prochainement.

CHAPITRE III _____ SIMULATION SUR FENSAP-ICE

L'exécution de FENSAP s'arrête lorsque la norme des résidus atteint le niveau de convergence donné initialement ($1e-10$ par défaut).

III.5.1 Convergence de FENSAP :

Idéalement pour que le système d'équations converge, le solveur GMRES (Generalized Minimal Residual) doit converger au moins d'un ordre de grandeur à chaque itération de Newton. Si ce n'est pas le cas, il y a deux (2) solutions possibles : augmenter le nombre d'itérations maximal (au prix de temps de calcul supplémentaire) ou augmenter le « krylov space » (chose non-recommandée du fait qu'elle augmente considérablement la mémoire numérique requise) [28].

The screenshot displays the 'Solver' tab of the FENSAP-ICE software interface. It is divided into several sections:

- Time integration:** Set to 'Steady'. CFL number is 50. Maximum number of time steps is 300. 'Use variable relaxation' is unchecked.
- Artificial viscosity:** Set to 'Streamline upwind'. Cross-wind dissipation is 1e-007. Robustness is set to 'First order' and Accuracy to 'Second order' (100%).
- Advanced solver settings:**
 - Convergence criteria:** Convergence level is 1e-010.
 - Matrix solver options:**
 - Momentum equations:** Number of iterations is 10, Krylov space is 20, Convergence criterion is 1e-024.
 - Turbulence equations:** Number of iterations is 8, Krylov space is 20, Convergence criterion is 1e-024.
 - Energy equations:** Number of iterations is 1, Krylov space is 30, Convergence criterion is 1e-024.
 - Energy sub-iterations is 1.
 - 'Real gas properties' is unchecked.
 - A 'Revert to defaults' button is present.

Figure III.31 : Fenêtre montrant les critères de convergence de FENSAP

III.5.2 Convergence de DROP3D :

Deux paramètres contrôlent les critères de convergence de DROP3D : le résidu global des équations gouvernantes et le changement de bêta total (capture d'eau cumulée) sur toutes les surfaces des murs. Le bêta total est une quantité dérivée et peut donc nécessiter plus d'itérations pour converger complètement. Le changement de bêta total ne présente généralement pas de comportement monotone, par conséquent l'activation de ce critère d'arrêt est retardée jusqu'à ce que le résidu moyen des 20 dernières itérations soit inférieur au critère spécifié [29].

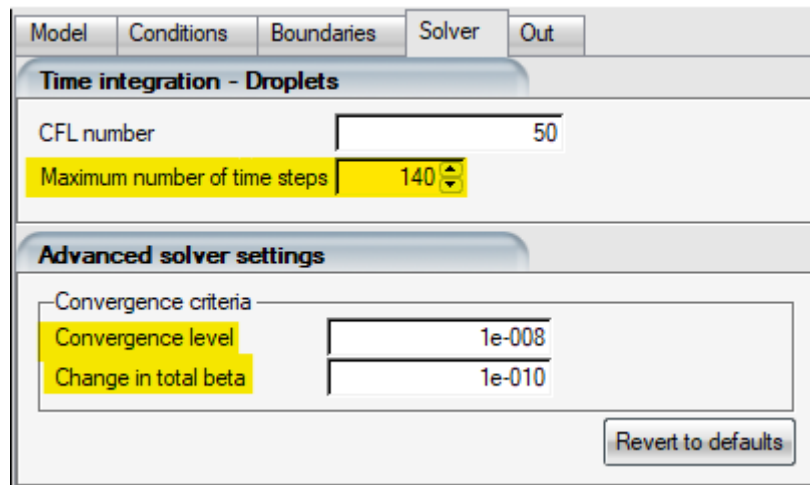


Figure III.32 : Fenêtre montrant les critères de convergence de DROP3D

III.6 Conclusion du chapitre :

Ce chapitre nous a permis de voir certaines performances que possède le logiciel FENSAP-ICE dans le domaine de simulation de l'accumulation du givre sur une géométrie 2D. Il peut également être utilisé dans le cas 3D. Grâce aux calculs effectués au cours de ce chapitre, on pourra discuter de l'influence de chacun des paramètres étudiés sur la façon dont le givrage aéronautique se produit.

IV. Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction au chapitre :

On se propose pour ce chapitre de présenter les différents résultats obtenus grâce au chapitre précédent, puis de les analyser et interpréter les solutions obtenues pour chaque paramètre afin de constater le degré d'influence de chacune des grandeurs physiques sur l'écoulement autour d'un profil d'aile NACA0012. Les grandeurs en question vont se traduire sous forme de graphes, tableaux et géométries, ce qui va nous permettre de les commenter et de les expliquer au mieux possible.

IV.2 Interprétations :

Les paramètres que l'on va analyser sont :

- Les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée : C_L et C_D respectivement ;

- L'efficacité de capture : collection efficiency ;
- La masse totale de glace : total mass of ice.

Et ça en fonction de :

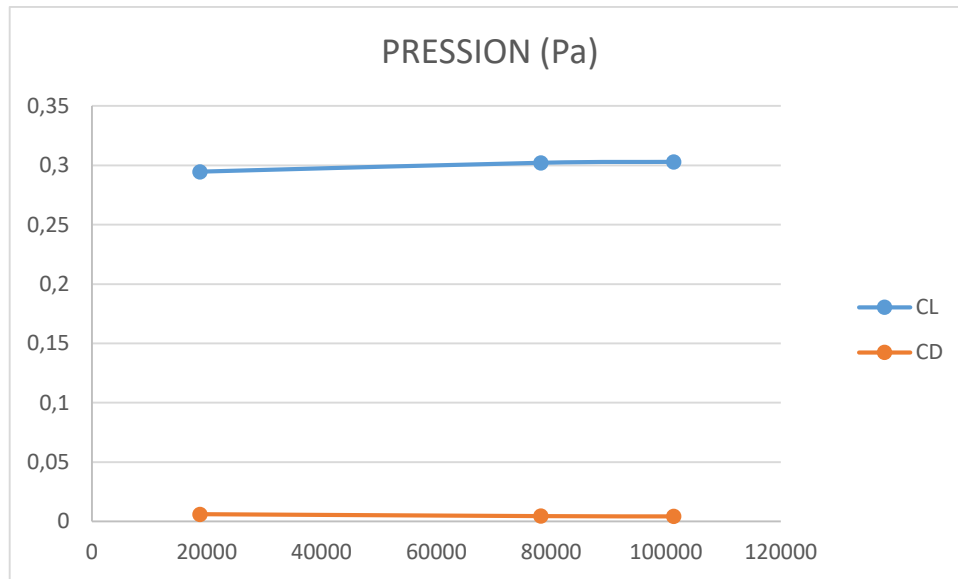
- La pression ;
- La température ;
- La vitesse ;
- L'angle d'attaque ;
- La rugosité ;
- Le diamètre et la distribution des particules d'eau ;
- La teneur en eau liquide LWC ;
- La température de givrage.

IV.2.1 La pression :

IV.2.1.1 Les coefficients C_L et C_D :

pression (Pa)	C_L	C_D
101325	0,30290156	0,004304769
78190	0,30211878	0,004534727
18820	0,2945824	0,006074726

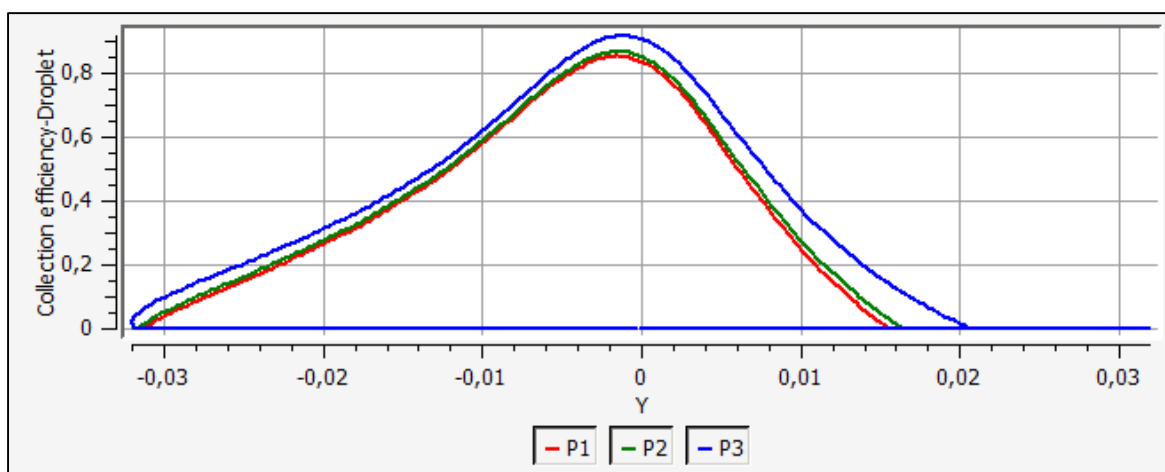
Tableau IV.1 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la pression



Graphe IV.1 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la pression

On remarque dans le tableau IV.1 que la pression a une influence minime sur les coefficients aérodynamiques. Ceci peut se voir clairement dans le graphe IV.1 : c'est quasiment une droite parallèle à l'axe horizontale (axe des pressions).

IV.2.1.2 L'efficacité de capture :



Graphe IV.2 : Efficacité de capture en fonction de la pression

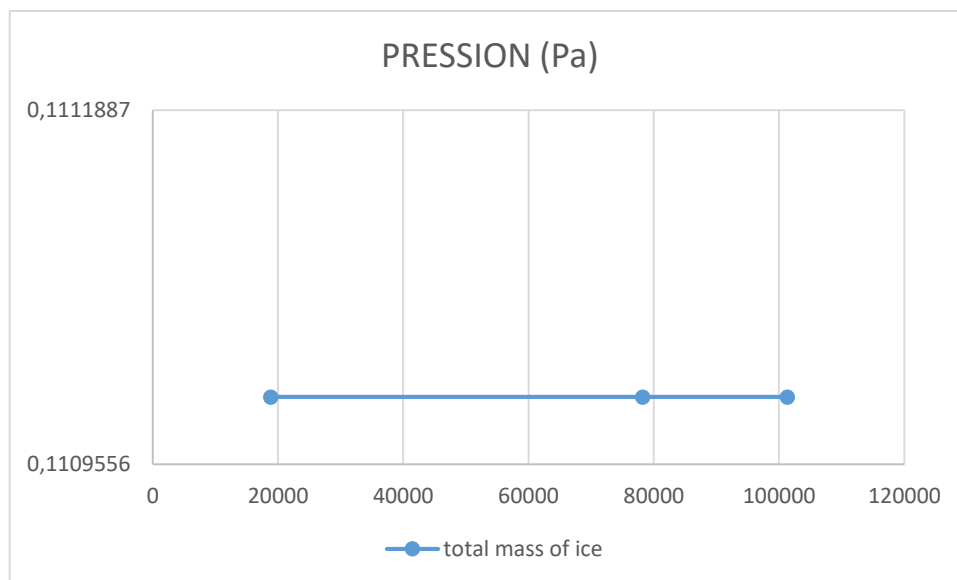
CHAPITRE IV _____ RESULTATS ET INTERPRETATIONS

On remarque dans le graphe IV.2 que la capacité de capture est influencée par la pression. On remarque aussi que les pressions P_1 et P_2 bien qu'elles soient éloignées l'une de l'autre, ont des capacités de capture assez proches ; contrairement aux pressions P_2 et P_3 qui, elles, sont plus proches mais leurs capacités de capture plus éloignées.

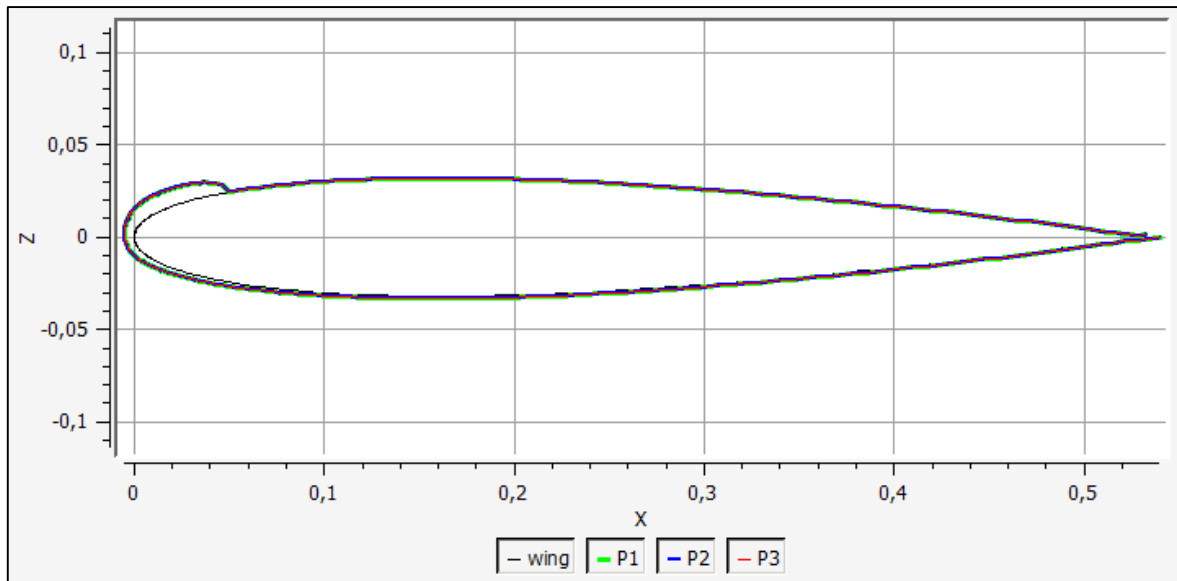
IV.2.1.3 La masse totale de glace :

pression (Pa)	total mass of ice (Kg)
101325	0,111
78190	0,111
18820	0,111

Tableau IV.2 : Masse de glace en fonction de la pression



Graphe IV.3 : Masse de glace en fonction de la pression



Grphe IV.4 : Géométrie du profil NACA0012 NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la pression

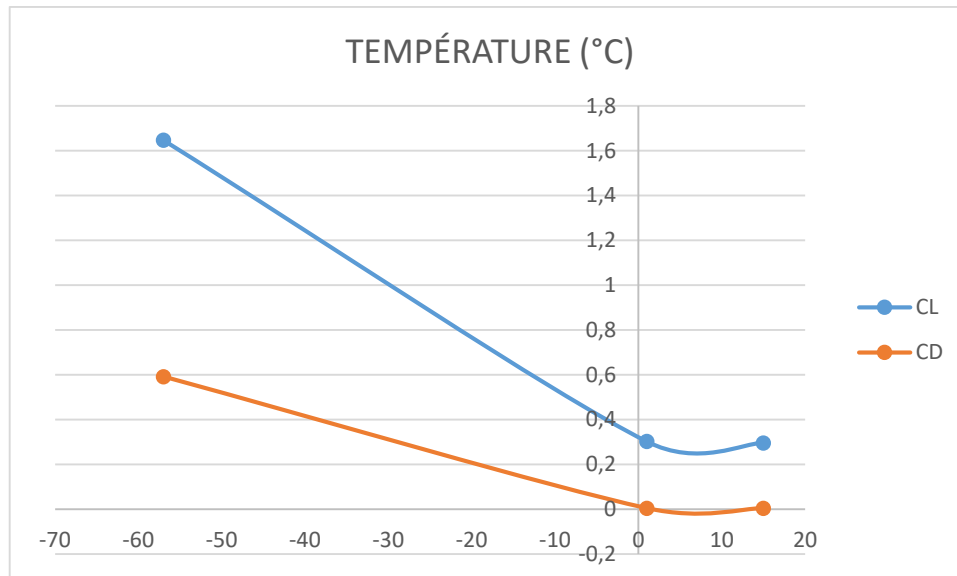
On remarque dans le tableau IV.2 ainsi que les graphes IV.3 et IV.4 que la pression n'a pas d'effet ni sur la masse de glace accumulée ni sur sa distribution au long du profil NACA0012 : le graphe IV.3 est une droite parallèle à l'axe des pressions et dans le graphe IV.4, toutes les géométries sont confondues.

IV.2.2 La température :

IV.2.2.1 Les coefficients C_L et C_D :

température (°C)	C_L	C_D
-57	1,6471427	0,59148341
1	0,30207992	0,004537159
15	0,29602266	0,004515445

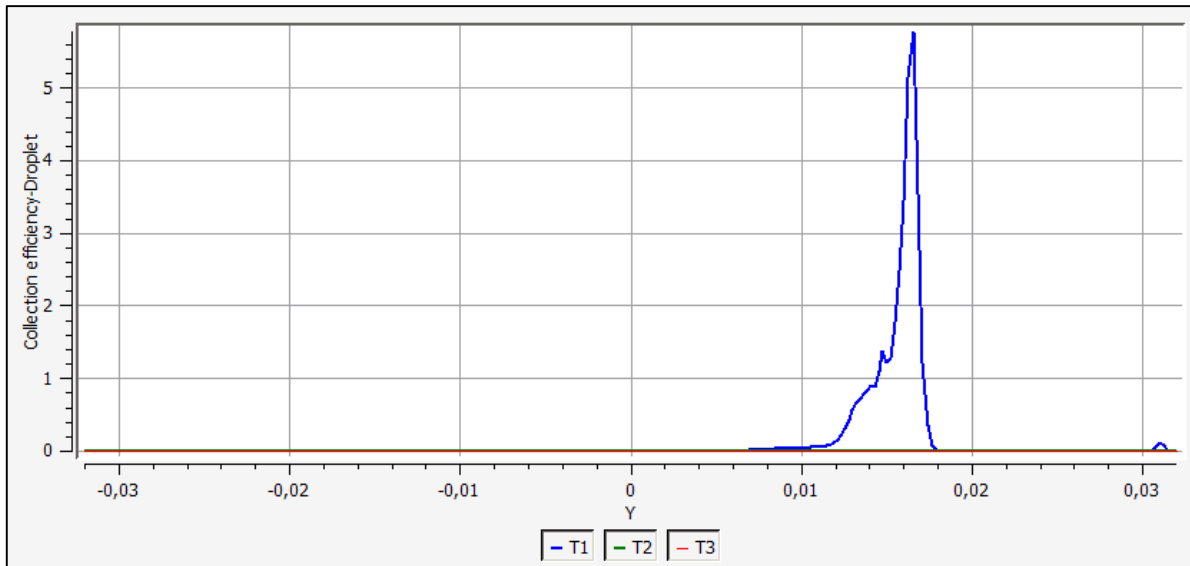
Tableau IV.3 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la température



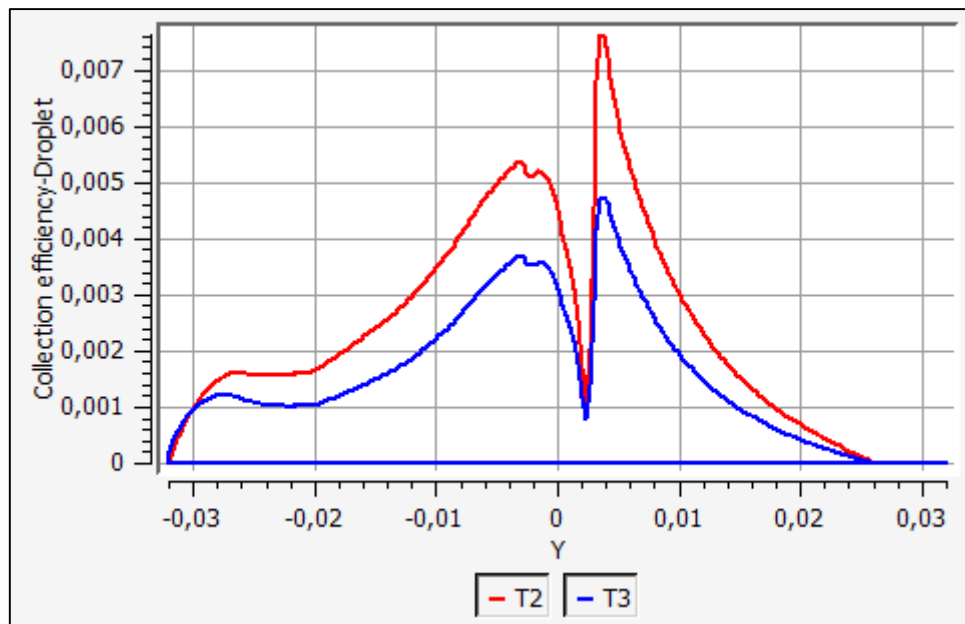
Graphe IV.5 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la température

On constate clairement par le tableau IV.3 et le graphe IV.5 que la température a une grande influence sur les coefficients aérodynamiques surtout pour T_1 qui est loin des deux autres températures et où on remarque une grande différence des coefficients. On remarque également qu'il n'y a pas une grande différence entre les coefficients aérodynamiques pour les températures T_2 et T_3 où le coefficient de trainée est pratiquement nul.

IV.2.2.2 L'efficacité de capture :



Graphe IV.6 : Efficacité de capture en fonction de la température (3 températures)



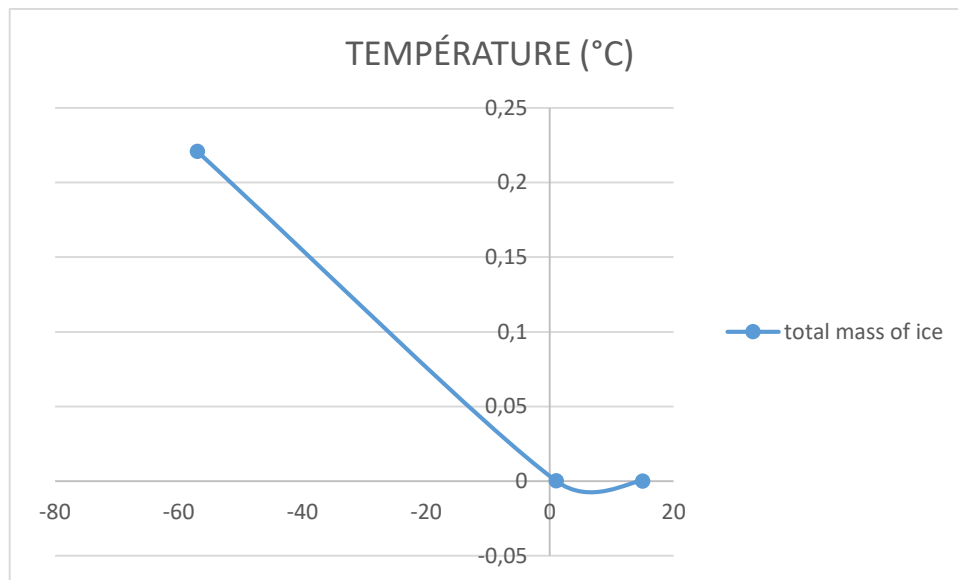
Graphe IV.7 : Efficacité de capture en fonction de la température (2 températures)

En premier lieu, nous avons représenté dans le graphe IV.6 les trois (3) efficacités de capture pour les 3 températures : on remarque un pic dans le graphe T₁ et que les graphes T₂ et T₃ sont pratiquement confondus et égaux à zéro. Pour confirmer ou dénier ceci, nous avons tracé le graphe IV.7 en éliminant la température T₁ et on peut observer que les graphes T₂ et T₃ ont la même forme mais ne sont pas totalement confondus ni nuls. En définitive, on peut dire que plus la température augmente, l'efficacité de capture diminue.

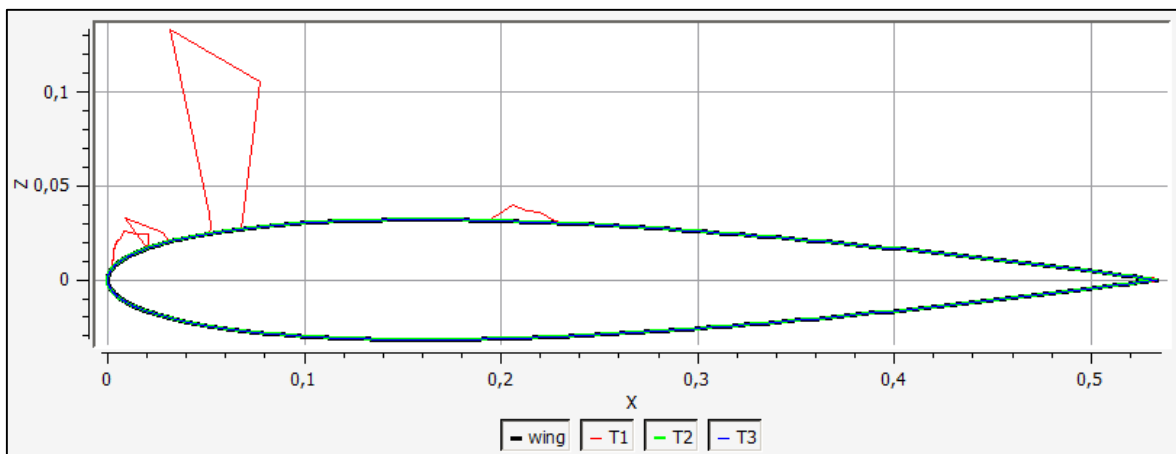
IV.2.2.3 La masse totale de glace :

température (°C)	total mass of ice (Kg)
-57	0,2209
1	9,78E-05
15	7,98E-05

Tableau IV.4 : Masse de glace en fonction de la température



Graphe IV.8 : Masse de glace en fonction de la température



Graphe IV.9 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la température

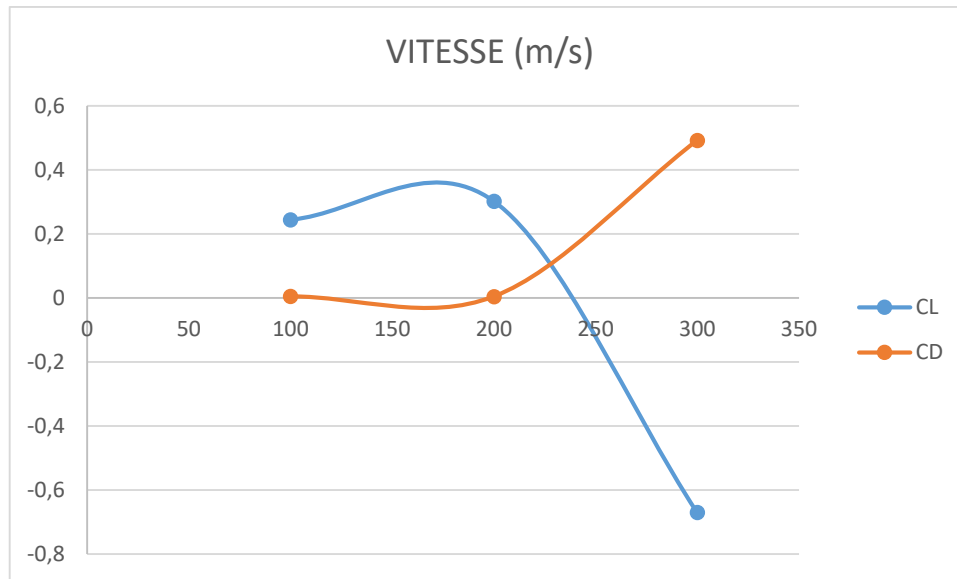
Pour ce qui est de la masse de glace, on remarque clairement dans le tableau IV.4 et surtout le graphe IV.8 que le graphe T₁ a une très grande différence avec les deux autres graphes où la masse de glace est quasi-nulle. On remarque également dans le graphe IV.9 que la forme aérodynamique du profil NACA0012 est complètement altérée à la température T₁ d'où la nécessité d'une procédure d'antigivrage (qui fonctionne pendant le vol).

IV.2.3 La vitesse :

IV.2.3.1 Les coefficients C_L et C_D :

vitesse (m/s)	C_L	C_D
100	0,24429355	0,004803272
200	0,30207992	0,004537159
300	-0,67073539	0,49246475

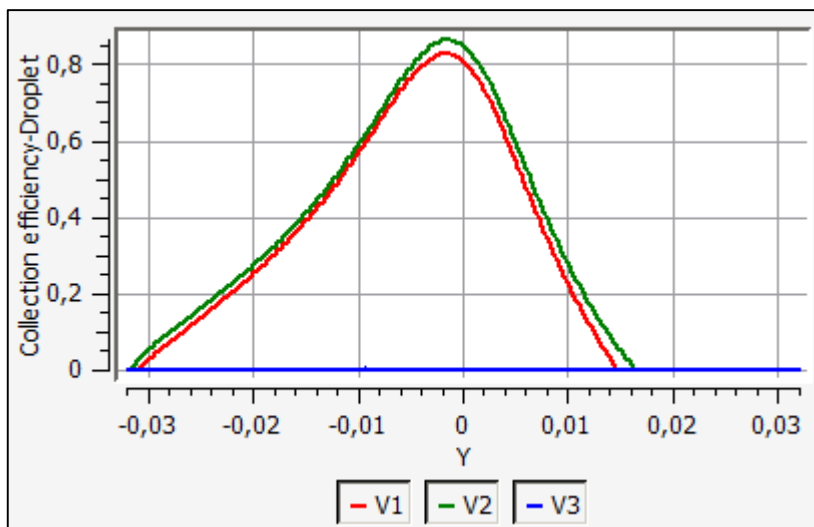
Tableau IV.5 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la vitesse



Graphe IV.10 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la vitesse

On remarque dans le tableau IV.5 et le graphe IV.10 que les coefficients aérodynamiques de V_1 et V_2 sont quasi-égaux mais que pour V_3 C_D augmente considérablement après avoir été presque nul pendant que C_L atteint une valeur négative ce qui signifie une déportance.

IV.2.3.2 L'efficacité de capture :



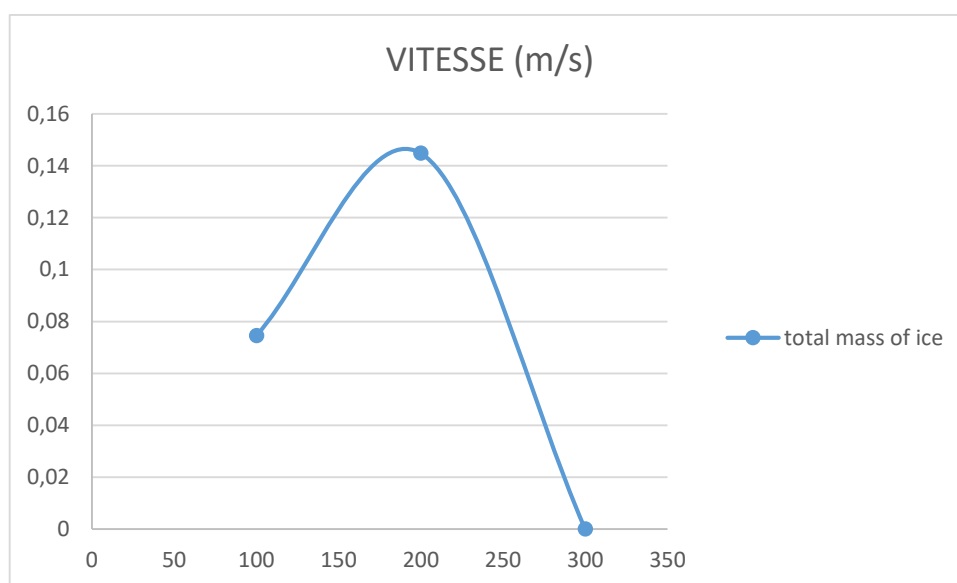
Graphe IV.11 : Efficacité de capture en fonction de la vitesse

On remarque dans le graphe IV.11 que l'efficacité de capture est nulle (ou presque) pour la vitesse V_3 et qu'elle augmente avec la diminution de la vitesse jusqu'à V_2 puis diminue en diminuant encore la vitesse jusqu'à V_1 .

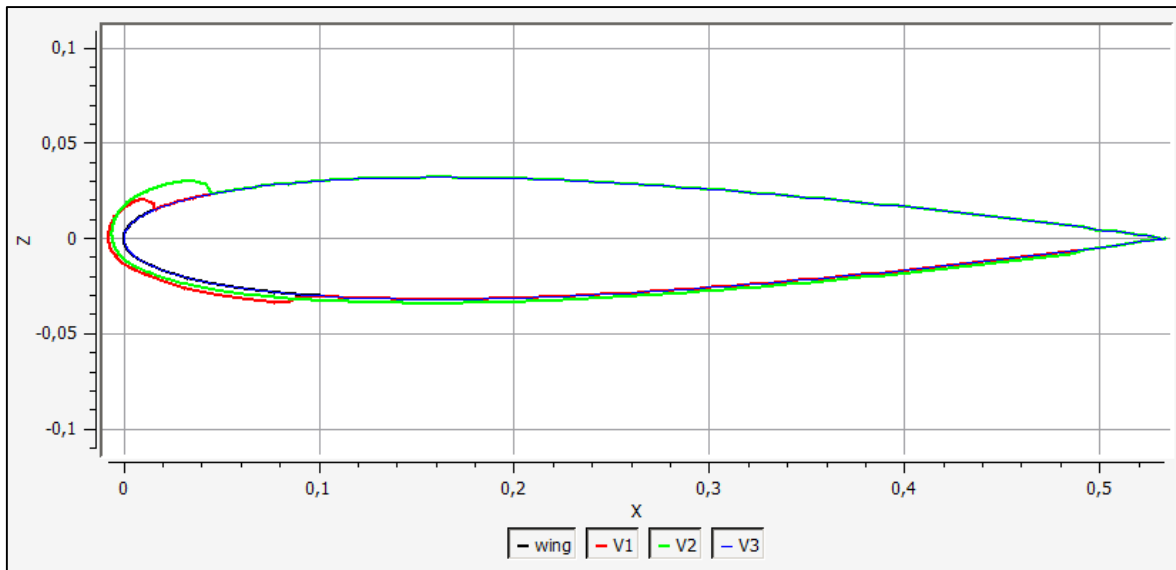
IV.2.3.3 La masse totale de glace :

vitesse (m/s)	total mass of ice (Kg)
100	0,07453
200	0,1448
300	4,12E-05

Tableau IV.6 : Masse de glace en fonction de la vitesse



Graphe IV.12 : Masse de glace en fonction de la vitesse



Graph IV.13 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la vitesse

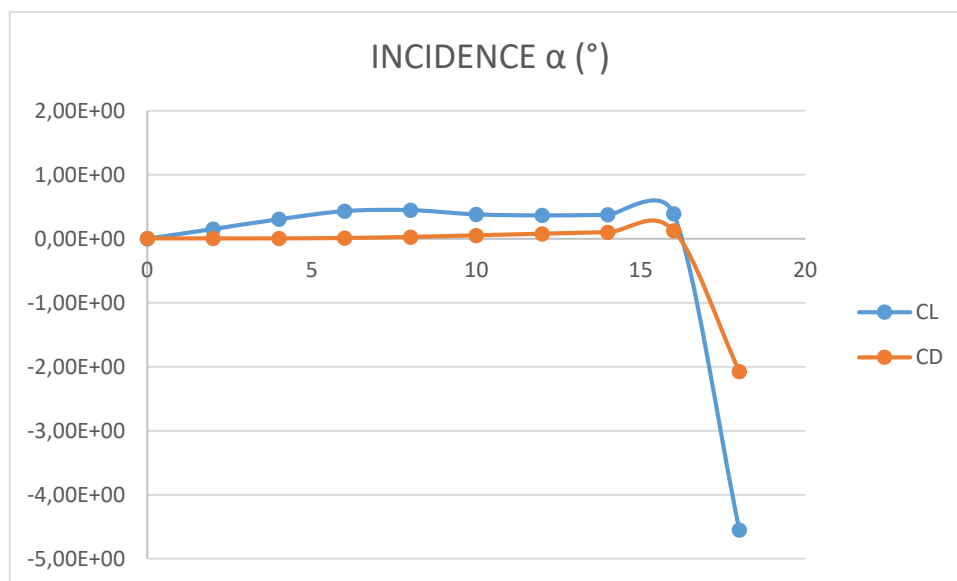
Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, pour la vitesse V_3 l'efficacité de capture est presque nulle, la masse de glace qui se forme en est évidemment affectée et est, elle aussi quasi-nulle. On peut également constater par le tableau IV.6 et le graphe IV.12 que même pour les vitesses V_2 et V_3 , la masse totale de glace varie de la même manière que l'efficacité de capture en fonction de la vitesse. On remarque dans le graphe IV.13 que pour la vitesse V_1 , la glace est concentrée sur le bord d'attaque contrairement au cas de la vitesse V_2 où elle se prolonge dans l'intrados du profil NACA0012.

IV.2.4 L'angle d'attaque :

IV.2.4.1 Les coefficients C_L et C_D :

incidence α (°)	C_L	C_D
0	-6,02E-06	0,003582518
2	0,15080448	0,00378676
4	0,30345671	0,004464573
6	0,43133475	0,010504518
8	0,44683252	0,027152677
10	0,38022533	0,05196928
12	0,3647058	0,077142861
14	0,37385007	0,10218978
16	0,39240247	0,12741298
18	-4,5511237	-2,07613

Tableau IV.7 : Coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque



Graphe IV.14 : Coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque

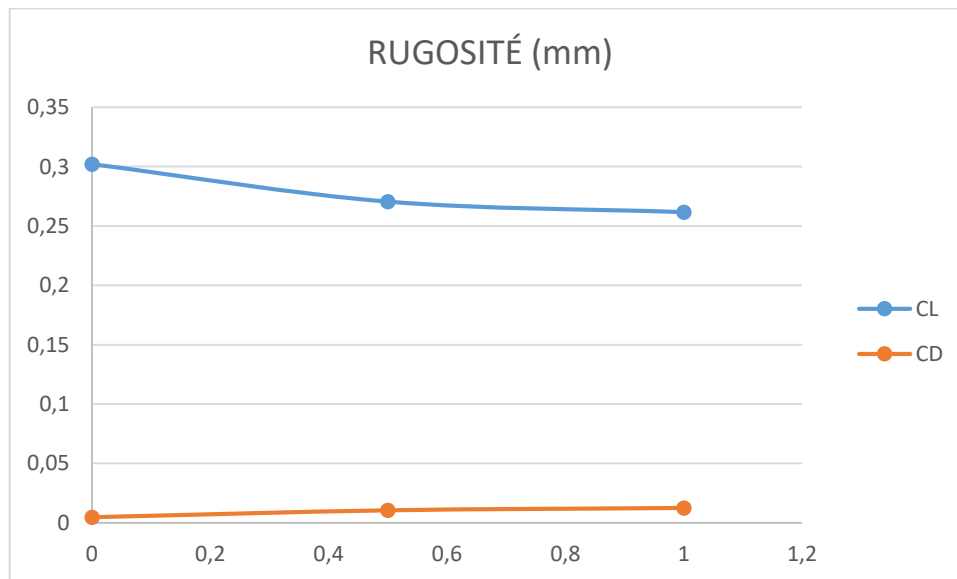
On remarque dans le tableau IV.7 et le graphe IV.14 que le coefficient de portance augmente de 0 à 6° puis stagne à une valeur presque constante jusqu'à 16° pour devenir négatif à 18°. Pour ce qui est du coefficient de trainée, il est presque constant et nul de 0 à 8° puis augmente progressivement jusqu'à 16° et il devient, lui aussi, négatif à 18°. Cela veut dire qu'il y a déportance de l'appareil à 18°.

IV.2.5 La rugosité :

IV.2.5.1 Les coefficients C_L et C_D :

rugosité (mm)	C_L	C_D
0	0,30207992	0,004537159
0,5	0,27046839	0,010363739
1	0,26159402	0,012366811

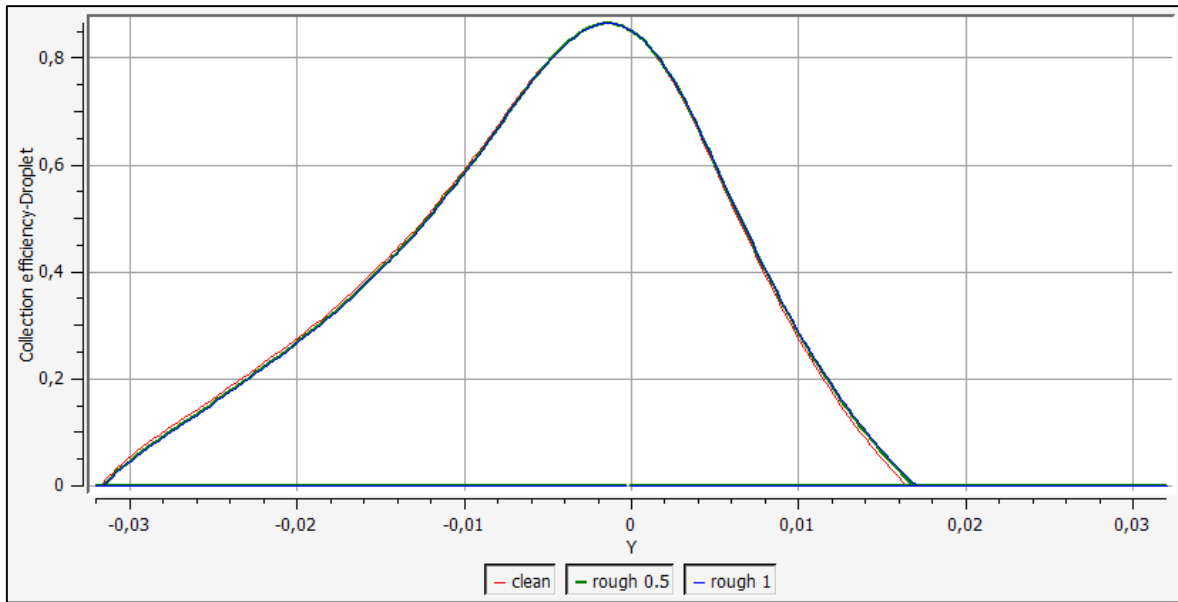
Tableau IV.8 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la rugosité



Graphe IV.15 : Coefficients aérodynamiques en fonction de la rugosité

On remarque dans le tableau IV.8 et le graphe IV.15 qu'il y a une concordance presque parfaite entre les graphes des surfaces rugueuses mais qu'ils sont différents de celui de la surface lisse : C_D augmente pendant que C_L diminue. Ceci signifie qu'on a tout intérêt à diminuer au maximum la rugosité de la surface du profil NACA0012 d'aile (causée soit par des impuretés ou un dépôt de givre) pour avoir des performances aérodynamiques optimales : augmentation de portance et diminution de traînée et par conséquent diminution de la consommation de kérosène.

IV.2.5.2 L'efficacité de capture :



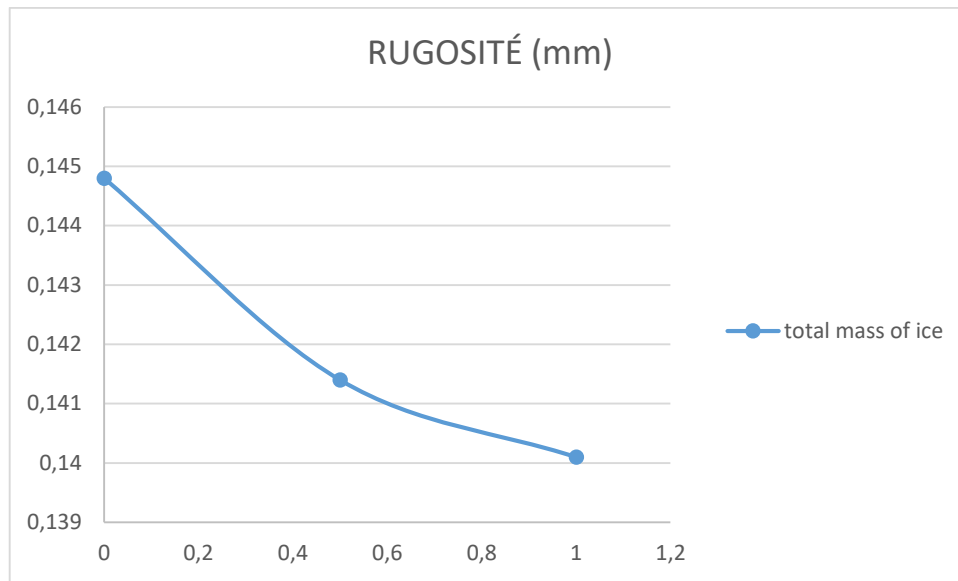
Grphe IV.16 : Efficacité de capture en fonction de la rugosité

Le graphe IV.16 montre que l'efficacité de capture est la même pour les surfaces rugueuses de rugosités respectives 0.5 et 1 mm (leurs graphes respectifs sont confondus) mais elle diffère légèrement pour la surface lisse où elle est supérieure pour l'intrados et inférieure pour l'extrados que celle des surfaces rugueuses.

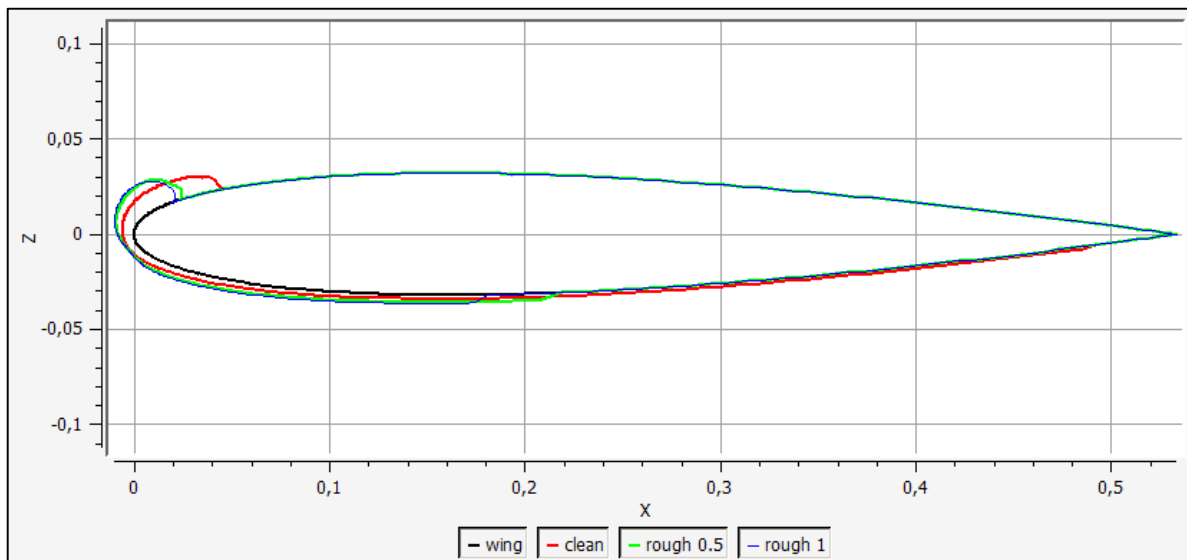
IV.2.5.3 La masse totale de glace :

rugosité (mm)	total mass of ice (Kg)
0	0,1448
0,5	0,1414
1	0,1401

Tableau IV.9 : Masse de glace en fonction de la rugosité



Grphe IV.17 : Masse de glace en fonction de la rugosité

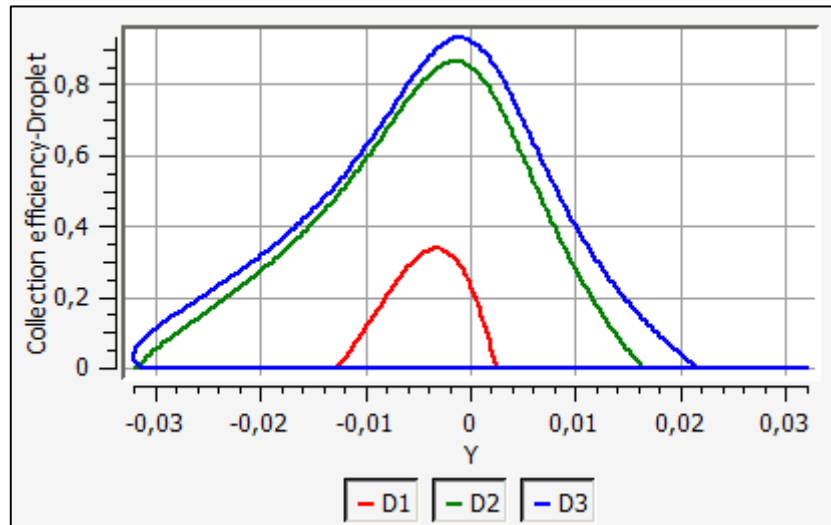


Grphe IV.18 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la rugosité

On remarque dans le tableau IV.9 et le graphe IV.17 que la masse de glace diminue avec l'augmentation de la rugosité. On peut également constater à partir du graphe IV.18 qu'il y a une légère différence entre les deux surfaces rugueuses et que la disposition de la glace accumulée change avec la rugosité : plus la surface est rugueuse, plus la glace se concentre sur le bord d'attaque et change grandement la forme aérodynamique du profil NACA0012 d'aile. Donc même si pour un profil NACA0012 lisse, il y a un dépôt plus important, la manière dont le givre se dépose est « moins dangereuse ».

IV.2.6 Le diamètre des particules :

IV.2.6.1 L'efficacité de capture :



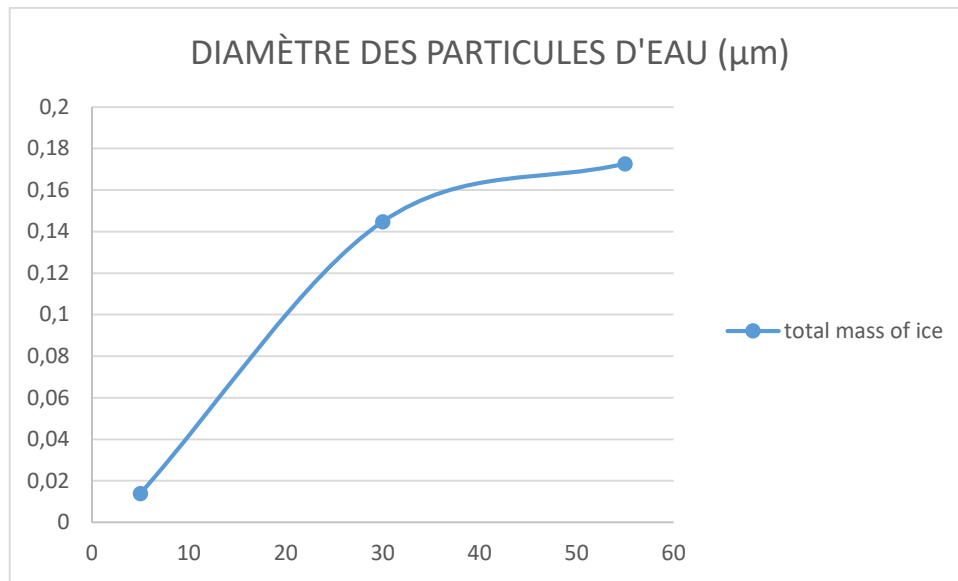
Graph IV.19 : Efficacité de capture en fonction du diamètre des particules d'eau

On remarque à partir du graphe IV.19 que le diamètre des particules a une influence capitale sur l'efficacité de capture du profil NACA0012 : la croissance du diamètre entraîne une croissance de l'efficacité de capture dont la variation diminue à un certain diamètre (on remarque que les graphes des diamètres D₂ et D₃ sont plus rapprochés que ceux des diamètres D₁ et D₂ même si ΔD est le même dans les deux cas).

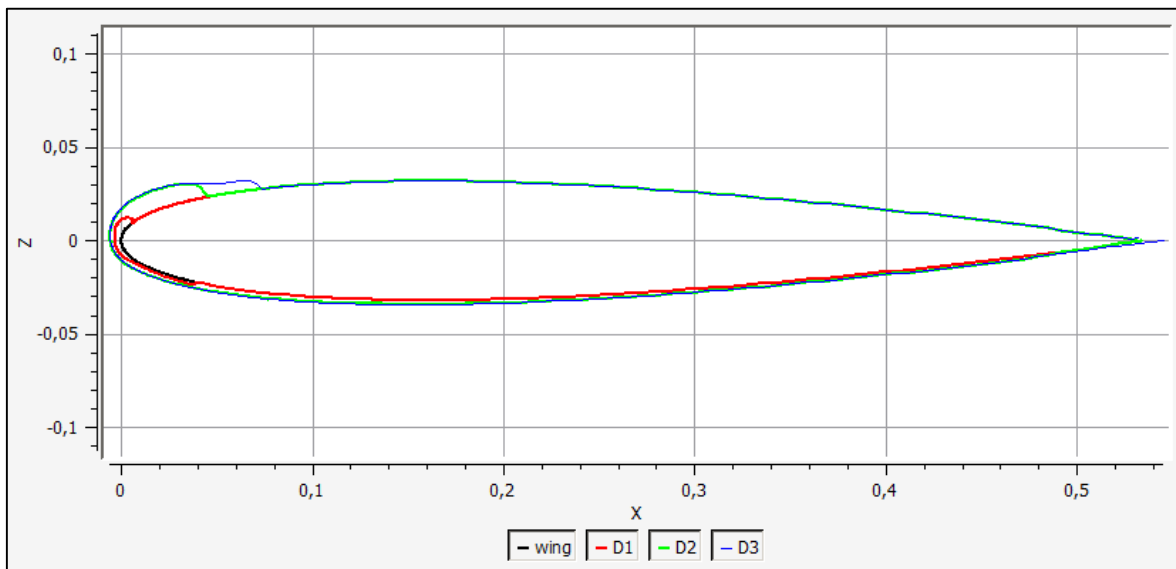
IV.2.6.2 La masse totale de glace :

diamètre (μm)	total mass of ice (Kg)
5	0,01396
30	0,1448
55	0,1727

Tableau IV.10 : Masse de glace en fonction du diamètre des particules d'eau



Graphe IV.20 : Masse de glace en fonction du diamètre des particules d'eau

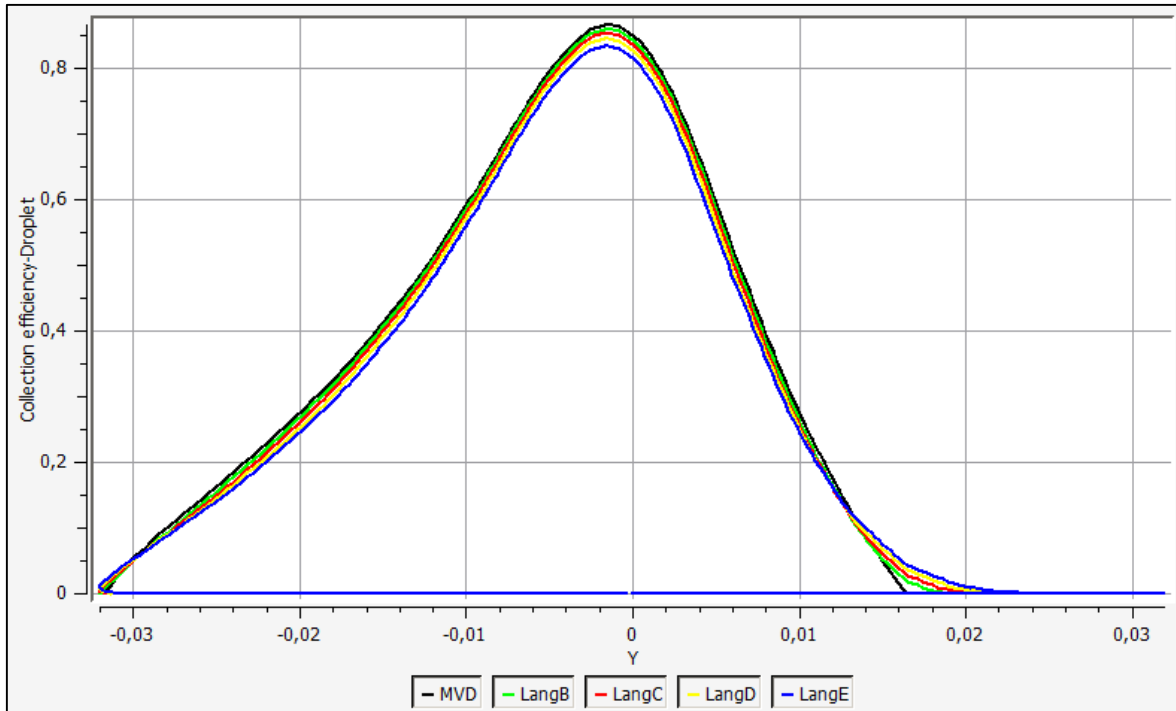


Graphe IV.21 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction du diamètre des particules d'eau

Comme pour l'efficacité de capture, la masse de glace accrétée accroit beaucoup quand le diamètre des particules d'eau accroit. Dans le tableau IV.10 et le graphe IV.20 on voit clairement aussi que la différence entre les représentations de D₂ et D₃ est inférieure à la différence entre celles de D₁ et D₂. On remarque également au niveau du graphe IV.21 que plus le diamètre des particules est grand, plus la forme aérodynamique du profil NACA0012 d'aile est altérée. Pour les plus petits diamètres, le givre qui se forme est du givre blanc qui se concentre sur le bord d'attaque et pour les grands diamètres, c'est du verglas qui se forme et qui s'étend sur la longueur du profil NACA0012 et spécifiquement sur l'intrados.

IV.2.7 La distribution des particules :

IV.2.7.1 L'efficacité de capture :

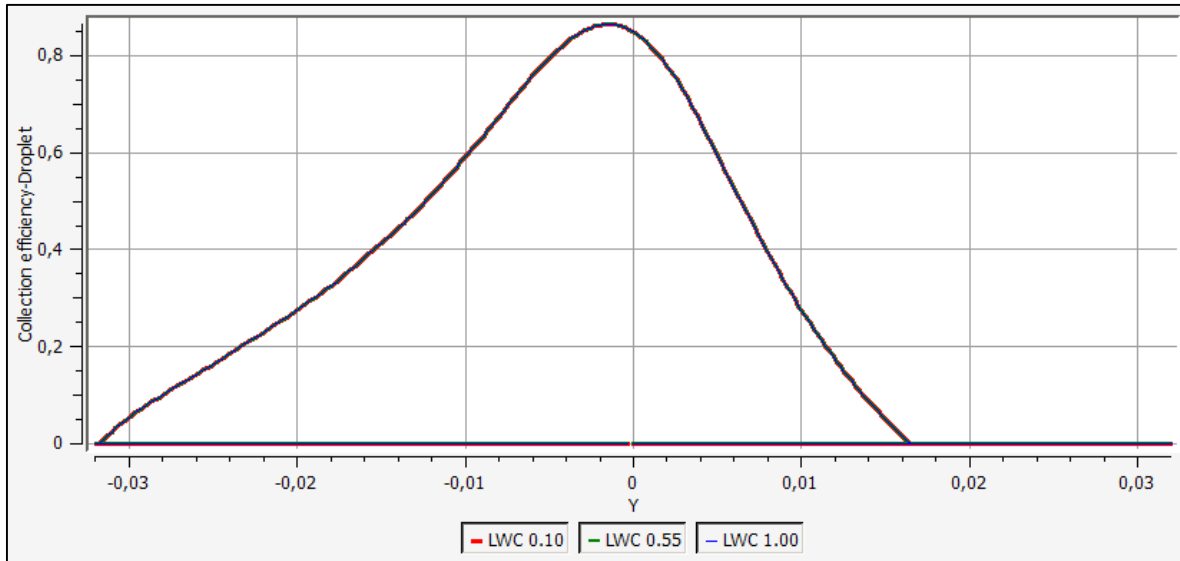


Grappe IV.22 : Efficacité de capture en fonction de la distribution des particules d'eau

On constate à partir du graphe IV.22 que l'efficacité de capture n'est pas énormément affectée par la distribution des particules d'eau et que même si on choisit un même diamètre pour toutes les gouttelettes (MVD : Monodispersed Volume Diameter) on est assez proche de toutes les distributions Langmuir (B, C, D et E) définies par les scientifiques experts en ce domaine. On peut donc utiliser la distribution MVD pour simplifier les calculs et ainsi diminuer le temps de simulation sans grandement affecter les résultats obtenus.

IV.2.8 La teneur en eau liquide LWC :

IV.2.8.1 L'efficacité de capture :



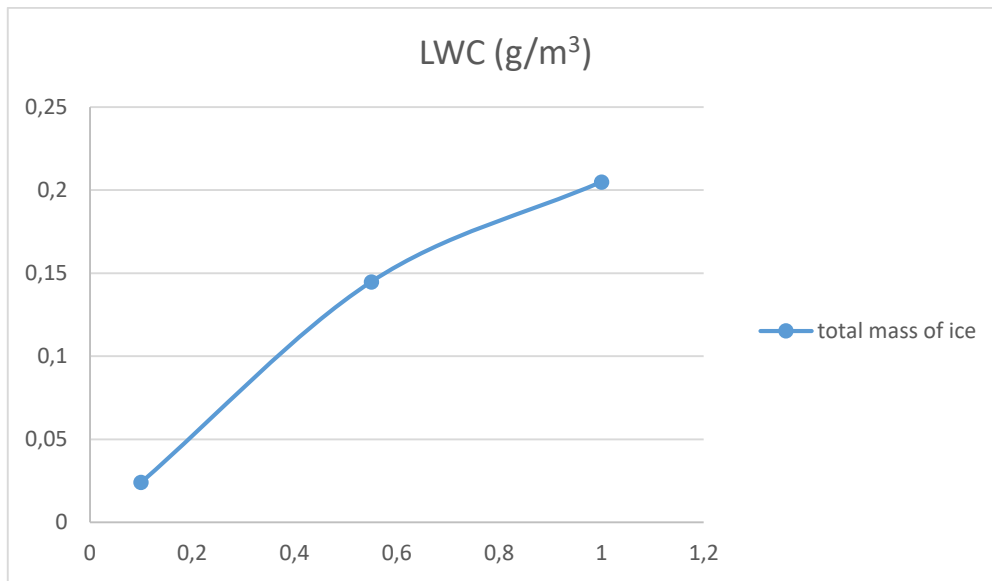
Graph IV.23 : Efficacité de capture en fonction de LWC

On remarque dans le graphe IV.23 que les trois (3) LWC donnent exactement les mêmes valeurs, les trois graphes sont donc confondus ce qui signifie que l'efficacité de capture n'est que peu affectée par la teneur en eau liquide.

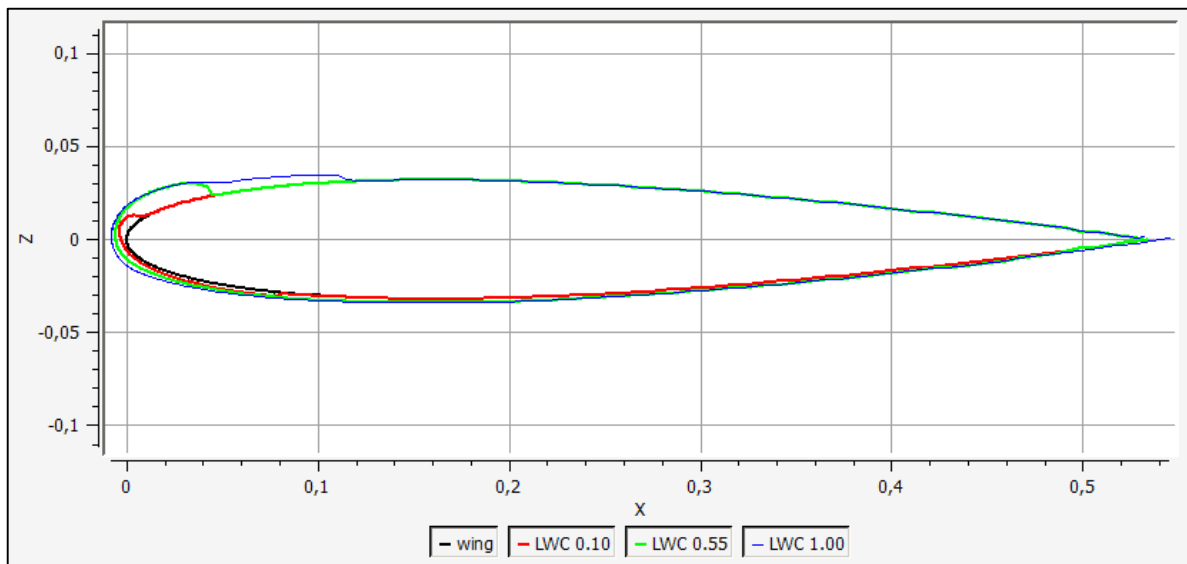
IV.2.8.2 La masse totale de glace :

LWC (g/m ³)	total mass of ice (Kg)
0,1	0,02406
0,55	0,1448
1	0,2049

Tableau IV.11 : Masse de glace en fonction de LWC



Grphe IV.24 : Masse de glace en fonction de LWC



Grphe IV.25 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de LWC

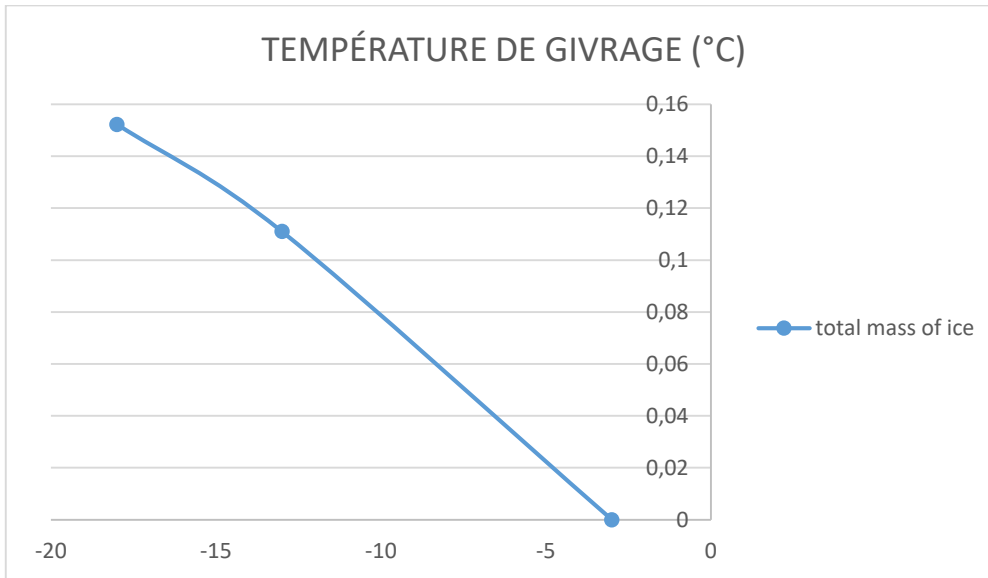
On constate du tableau IV.11 et des graphes IV.24 et IV.25 que la masse de glace accumulée augmente avec l'augmentation de la teneur en eau liquide. Pour les faibles LWC, le givre est blanc et concentré sur le bord d'attaque à l'opposé, pour les LWC élevés, il y a formation de verglas tout au long du profil NACA0012 d'aile surtout au niveau de l'intrados.

IV.2.9 La température de givrage :

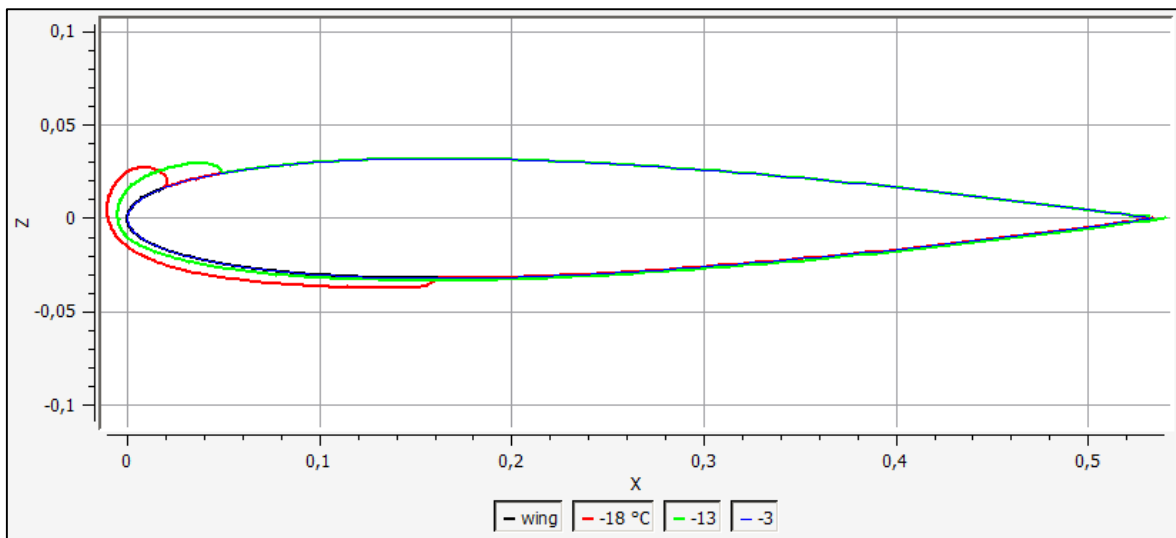
IV.2.9.1 La masse totale de glace :

icing temperature (°C)	total mass of ice (Kg)
-18	0,1523
-13	0,111
-3	8,47E-20

Tableau IV.12 : Masse de glace en fonction de la température de givrage



Graphe IV.26 : Masse de glace en fonction de la température de givrage



Graphe IV.27 : Géométrie du profil NACA0012 avec un dépôt de glace en fonction de la température de givrage

Pour ce calcul, on choisit des températures de givrage de telle manière à avoir les trois types de givre : rime, glaze et mixed. On remarque dans le tableau IV.12 et le graphe IV.26 que la masse de glace accumulée diminue avec l’augmentation de la température et qu’elle se

CHAPITRE IV _____ RESULTATS ET INTERPRETATIONS

rapproche de zéro (0) pour T_3 . On constate également dans le graphe IV.27 que pour la température (-18°C), la glace formée est concentrée sur le bord d'attaque : c'est du givre blanc ; pour la température (-13°C), le givre se prolonge dans la continuité du profil NACA0012 : c'est du givre mélangé ; et enfin pour la température (-3°C) il est difficile de distinguer la glace du profil NACA0012 initial de l'aile, ceci peut entraîner beaucoup de dégâts car le givre en devient plus difficile à voir donc à retirer : c'est du givre transparent.

Conclusion du chapitre :

En définitive, on déduit de ce chapitre que les coefficients aérodynamiques qui n'entrent en compte que pour : la pression, la température, la vitesse, la rugosité et l'angle d'incidence sont les moins affectés par la pression puis la rugosité. Pour ce qui est des températures, elles n'ont un grand effet que lorsqu'elles sont négatives contrairement aux vitesses qui plus elles augmentent, plus leur action est visible. Ce qui est aussi le cas pour l'incidence qui, à une certaine valeur, donne naissance à des coefficients aérodynamiques négatifs.

On retient également que la grandeur ayant le plus d'effet sur l'efficacité de capture est le diamètre des particules ainsi que la température de l'air particulièrement quand elle est négative et les paramètres avec l'impact le plus minime sont la teneur en eau liquide et la rugosité suivis des autres grandeurs qui ont un effet moyen sur l'efficacité de capture.

Enfin, on conclut que pour ce qui est de la masse de glace, la grandeur dominante est la température notamment si elle est négative et la grandeur que l'on peut négliger est clairement la pression. Et on a une influence « moyenne » de tous les autres paramètres.

Conclusion générale :

En premier lieu, grâce au travail réalisé dans ce document, on s'est initié à utiliser FENSAP-ICE pour la simulation d'accrétion de glace sur un profil d'aile. Bien-sûr, on ne se proclame pas comme des experts dans le domaine mais nous avons appris les bases.

Deuxièmement, nous en avons appris sur le givre, sa formation, son danger en aéronautique ainsi que les équations qui régissent cette grandeur ou du moins celles utilisées sur FENSAP-ICE.

Enfin, l'objectif de ce projet était de comparer l'influence des différents paramètres sur les performances de l'aéronef et sur le déroulement du vol ce qui a été réalisé avec succès : nous avons constaté dans le dernier chapitre le degré de l'impact de chacun des paramètres étudiés sur les grandeurs physiques obtenues.

Références

- [1] «TETL aircraft icing vf,» septembre 2006. [En ligne]. Available: www.aeroclub-bourg-en-bresse.com.
- [2] «rapport de BEA,» 4 mars 2013.
- [3] «Objectif sécurité N°23,» novembre 2015.
- [4] [En ligne]. Available: https://code7700.com/case_study_cl-604_n90ag.htm.
- [5] «Objectif sécurité N°23,» novembre 2015.
- [6] «rapport de BEA,» 25 janvier 2007.
- [7] R. CHAUVIN, «Un modèle unifié pour les phénomènes de givrage en aéronautique et les systèmes de protection thermiques,» université de TOULOUSE, 17 décembre 2015.
- [8] [En ligne]. Available: core.ac.uk.
- [9] [En ligne]. Available: https://www.faasafety.gov/gslac/alc/course_content.aspx?cID=33&sID=152&preview=true.
- [10] «Nav Canada,» [En ligne]. Available: www.navcanada.ca.
- [11] [En ligne]. Available: <https://aerodidact.enm-toulouse.fr/mod/book/view.php?id=1471&chapterid=18&lang=en>.
- [12] «*020 Givrage,» [En ligne]. Available: <http://www.aero-training.fr>.
- [13] [En ligne]. Available: nrc.canada.ca/fr.
- [14] [En ligne]. Available: https://www.memoireonline.com/03/10/3213/m_Description-et-fonctionnement-du-systeme-anti-pompage-du-Boeing-73780021.html.
- [15] [En ligne]. Available: substance.etsmtl.ca.
- [16] D. PENA, «Développement d'un code de givrage tridimensionnel avec méthode LEVEL-SET,» Université de MONTREAL, 2016.
- [17] F. MARTINI, «simulations de l'accumulation de glace sur un cylindre,» Université du QUEBEC, RIMOUSKI.
- [18] D. PENA, «Développement d'un code de givrage tridimensionnel avec méthode LEVEL-SET,» Université de MONTREAL, 2016.
- [19] E. S. Dalmau, «Study of the Effects of In-Flight Icing on Fixed Wing UAV's Aerodynamic Performance,» Université de Barcelone.
- [20] [En ligne]. Available: tpe-les-avions.webnode.fr/.

- [21] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/ANSYS>.
- [22] Ansys FENSAP-ICE User Manual, p. 3.
- [23] [En ligne]. Available: https://www.researchgate.net/publication/289820142_FENSAP-ICE_in_aid_of_certification_From_CFD_to_flight_testing.
- [24] [En ligne]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/40302945/ntis-services-for-in-flight-icing-certification-newmerical->.
- [25] Ansys FENSAP-ICE User Manual, p. 8.
- [26] [En ligne]. Available:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v190/fensap_tut/section_cn5_sdn_vw.html.
- [27] Ansys FENSAP-ICE User Manual, pp. 57-58.
- [28] Ansys FENSAP-ICE User Manual, p. 97.
- [29] Ansys FENSAP-ICE User Manual, p. 145.