



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.



Investigation numérique sur l'utilisation des bio-composites pour les
pales de drones de petites dimensions : Étude Aérodynamique et
Mécanique

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
Ait Cheikh Idriss

30 mars 2023

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sentiments de gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Fouad Erchiqui de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, de m'avoir accordé sa confiance tout au long de ce projet, pour la qualité de son encadrement et ses conseils avisés, sa disponibilité et sa sympathie.

Je souhaite également remercier le professeur Fouad Slaoui Hasnaoui, pour son aide, sa disponibilité et ses conseils qui se sont avérés utiles plus d'une fois durant mon cursus à l'université.

Mes remerciements vont à tous mes amis pour tous les bons moments passés ensemble et qui par leur bonne humeur et leur soutien ont contribué à la réalisation de ce projet. Finalement, je dédie ce modeste travail à ma famille pour leur amour, leur soutien tout au long de ces années. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

Résumé

Dans les dernières décennies, différents types de matériaux tels que l'aluminium et les composites ont été utilisés dans le domaine des drones (civil et militaire). Cependant, nous soupçonnons que les composites bois-plastique auraient un niveau de performance et technique qui permettrait de concurrencer avec ces matériaux. C'est dans ce cadre que le projet s'inscrit et il concerne une étude sur le potentiel d'utilisation des bio-composites pour les secteurs des drones de petites dimensions. Pour cela, des bio-composites renforcées par des particules de sciure de bois, en trois concentrations massique différentes (20%, 30% et 40%), ont été utilisés et mécaniquement caractérisés (module d'élasticité, la résistance mécanique maximale et allongement à la rupture). L'étude a été effectuée sur l'effet du vent (en incidence et en vitesse) sur le comportement mécanique, en déformation et en contraintes, sur un drone de type FX 66-S-196. À cet effet, le Logiciel Fluent a été utilisé pour la modélisation numérique. Les résultats obtenus sont confrontés à ceux obtenus sur le profil FX 66-S-196 en aluminium. L'analyse a montré que les bio-composites possèdent un niveau de performance et technique élevé pour concurrencer l'aluminium pour la conception et la fabrication de pales de petites dimensions pour les drones. Cette nouvelle génération de pales permettrait de concurrencer avec les pales traditionnelles tout en respectant les exigences environnementales.

Abstract

In the last decades, different types of materials such as aluminum and composites have been used in the field of UAVs (civil and military). However, we suspect that wood-plastic composites would have a level of performance and technique that would compete with these materials. It is within this framework that the project is registered, and it concerns a study on the potential of use of bio-composites for the sectors of the UAV of small dimensions. For this, bio-composites reinforced with sawdust particles, in three different mass concentrations (20%, 30% and 40%), have been used and mechanically characterized (modulus of elasticity, maximum mechanical strength and elongation at break). The study was carried out on the effect of wind (in incidence and velocity) on the mechanical behavior, in deformation and stress, on a UAV type FX 66-S-196. For this purpose, the Fluent software was used for numerical modeling. The results obtained are compared with those obtained on the FX 66-S-196 aluminum profile. The analysis showed that bio-composites have a high performance and technical level to compete with aluminum for the design and manufacture of small size blades for UAVs. This new generation of blades would be able to compete with traditional blades while respecting environmental requirements.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Chapitre 1 Généralités sur les bio composites et drones	1
1.1 Introduction	2
A. Contexte et problématique.....	2
B. Objectifs (généraux et spécifiques).....	3
C. Originalité.....	4
1.2 Définition du drone.....	4
1.3 Classification selon le domaine opérationnel	5
1.3.1 Surveillance : MAV (Micro air vehicle)	5
1.3.2 Reconnaissance	6
1.3.3 Drone de combat.....	7
Chapitre 2 Matériaux et drones	10
2.1 Matériaux utilisés pour la fabrication de pales de rotors.....	11
2.2 Bio-composites thermoplastiques.....	12
2.3 Composite HDPE-Bois et caractérisation mécanique	13
2.3.1 Matériaux	13
2.3.2 Méthode.....	14
2.3.3 Propriétés mécaniques du WPC.....	14
Chapitre 3 Aérodynamique et conception	16
3.1 Profils de drones	17
3.2 Les différents types de profil	19
3.3 Choix de profils d'ailes.....	20
3.4 Calcul de la corde aérodynamique moyenne :	22
Chapitre 4	24
Modélisation	24
numérique	24
4.1 Introduction :	25
4.2 Conception de l'aile par CAO :	25
4.2.1 Maillage géométrique :	28
4.2.2 Analyse de la convergence de maillage :.....	29

4.3	Modélisation et simulation numérique :	31
4.3.1	Méthodes de résolution numérique	32
4.3.2	Modélisation des écoulements turbulents [16]	35
4.4	Modélisation structurale :	38
4.4.1	Introduction :	38
4.4.2	Analyse structurelle statique.....	38
Chapitre 5 Résultats et discussion		39
5.1	Résultats numériques dans Fluent :	40
5.2	Résultats numériques dans la structure statique :	43
Conclusion et perspectives		60
	Conclusion	61
	Perspectives.....	62
Références		63

Liste des figures :

Figure 1 Micro Drone 3.....	5
Figure 2 Micro-drone Black Widdow.....	5
Figure 3 Drone Zohal.	6
Figure 4 Drone Ghos Mohajer	6
Figure 5 Drone H-110 Sarir	6
Figure 6 Drone RQ-11 Raven.	6
Figure 7 Drone Arcturus T-20.	6
Figure 8 Drone Boeing ScanEagle.....	7
Figure 9 Drone de combat Wing Loong II.....	7
Figure 10 Predator C.....	8
Figure 11 Global Hawk RQ-4B.	9
Figure 12 Classification des drones. [4].....	9
Figure 13 Matériaux utilisés pour les pales de rotors et propriétés mécaniques, Ref. [14]	12
Figure 14 Variation de pression autour du profil d'aile.	17
Figure 15 Application des forces sur le profil d'aile.	17
Figure 16 Profil Biconvexe symétrique.....	19
Figure 17 Profil Biconvexe dissymétrique.	19
Figure 18 Profil Plan convexe.	19
Figure 19 Profil Plan creux.....	20
Figure 20 Profil Double courbure.	20
Figure 21 Profil Supercritique.....	20
Figure 22 Profil FX 66-S-196.	21
Figure 23 Caractéristiques géométriques d'une aile trapézoïdale.	22
Figure 24 profile d'aile FX 66S-S-196 Wortman.	25
Figure 25 créations de l'aile.....	26
Figure 26 modélisation grâce à la fonction de lissage.	27
Figure 27 aile finie.	27
Figure 28 Volume de control	29
Figure 29 Volume de control	30
Figure 30 maillage de l'aile.....	31
Figure 31 Courbes Cl.....	41
Figure 32 Courbes Cd.	41
Figure 33 Courbes polaires.....	42
Figure 34 Courbes finesse.	42
..... Figure 36 Contrainte équivalente (Aluminium).	
.....	43
Figure 35 déplacement total (Aluminium).	43
Figure 37 Déformation élastique équivalente (Aluminium).....	43
Figure 38 Contrainte équivalente (Bio1).	44
Figure 39 Déplacement total (Bio1).	44
Figure 40 Déformation élastique équivalente (Bio1).	44
Figure 41 déplacement total (Bio2).....	45

Figure 42 Contrainte équivalente (Bio2).	45
Figure 43 Déformation élastique équivalente (Bio2).	45
Figure 44 Déplacement total (Bio3).	46
Figure 45 Contrainte équivalente (Bio3).	46
Figure 46 Déformation élastique équivalente (Bio3).	46
Figure 47 Déplacement total (Aluminium).	48
Figure 48 Déplacement total (Bio3).	48
Figure 49 Contrainte équivalente (Bio3).	48
Figure 50 Contrainte équivalente (Aluminium).	48
Figure 51 Déformation élastique équivalente (Aluminium).	49
Figure 52 Déformation élastique équivalente (Bio3).	49
Figure 53 Déplacement total (Aluminium).	50
Figure 54 Déplacement total (Bio3).	50
Figure 55 Contrainte équivalente (Aluminium).	51
Figure 56 Contrainte équivalente (Bio3).	51
Figure 57 Déformation élastique équivalente (Bio3).	51
Figure 58 Déformation élastique équivalente (Aluminium).	51
Figure 59 Déplacement total (Bio3).	52
Figure 60 Déplacement total (Aluminium).	52
Figure 61 Contrainte équivalente (Bio3).	53
Figure 62 Contrainte équivalente (Aluminium).	53
Figure 63 Déformation élastique équivalente (Aluminium).	53
Figure 64 Déformation élastique équivalente (Bio3).	53
Figure 65 Contrainte équivalente (Aluminium).	55
Figure 66 Contrainte équivalente (Bio3).	55
Figure 67 Contrainte équivalente (Bio3).	55
Figure 68 Contrainte équivalente (Aluminium).	55
Figure 69 Déformation élastique équivalente (Bio3).	56
Figure 70 Déformation élastique équivalente (Aluminium).	56
Figure 71 Déplacement total (Bio3).	57
Figure 72 Déplacement total (Aluminium).	57
Figure 73 Contrainte équivalente (Aluminium).	57
Figure 74 Contrainte équivalente (Bio3).	57
Figure 75 Déformation élastique équivalente (Bio3).	58
Figure 76 Déformation élastique équivalente (Aluminium).	58

Liste des Tableaux :

Tableau 1 Dimensions géométriques moyennes des particules de sciure de bois [3].	13
Tableau 2 RÉSULTATS DES TESTS MÉCANIQUES (LES VALEURS ENTRE PARENTHÈSES CORRESPONDENT À L'ÉCART TYPE).....	15
Tableau 3 Condition aux limites.....	29
Tableau 4 Force de portance pour chaque maillage.....	30
Tableau 5 Equations régissant l'écoulement.....	33
Tableau 6 Déplacement total (m).....	47
Tableau 7 Contrainte équivalente (Pa).....	47
Tableau 8 Déformation élastique équivalente (m/m).....	47
Tableau 9 Tables des valeurs : 28m/s, 0°.....	49
Tableau 10 tables des valeurs : 37.5m/s, 0°.....	52
Tableau 11 Tables des valeurs : 37.5m/s, 7°.....	54
Tableau 12 Tables des valeurs : 37.5m/s, 15°.....	56
Tableau 13 Tables des valeurs : 37.5m/s, -4.75°.....	58

Notations latines

b	Envergure de l'aile	[m]
C_D	Coefficient de traînée	–
C_L	Coefficient de Portance	–
D	Force de traînée	[N]
L	Force de portance	[N]
S	Surface	[m ²]
λ_a	Allongement de l'aile	–
S_a	Surface alaire	[m ²]
CAM	Corde aérodynamique moyenne	[m]
C_e	Corde d'emplanture	[m]
C_s	Corde de saumon	[m]
D	Flèche de la CAM	[m]
f	Flèche du bord d'attaque	[m]
ρ	Masse volumique	[Kg.m ⁻³]

Abréviations

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
MAV	Micro Air Vehicle
VTOL	Vertical Take-off and Landing aircraft
LASE	Low Altitude, Short-Endurance
LALE	Low Altitude Long Endurance
MALE	Medium Altitude Long Endurance
HALE	High Altitude Long Endurance
NACA	National Advisory Council on Aeronautics, USA

Chapitre 1

Généralités sur les

bio composites et

drones

1.1 Introduction

Conditionnée par les exigences environnementales et économiques, la tendance des marchés montre que les bio-composites auront une influence marquée sur l'ensemble de l'industrie manufacturière [1]. La valorisation des ressources végétales, secondaires ou sous-utilisées serait une initiative stratégique pour la fabrication ou l'amélioration de produit. Effectivement, la fabrication des bio-composites, de type bois-plastique, bénéficiant de l'avantage des caractéristiques intrinsèques des fibres et des plastiques tout en réduisant les coûts de production. Ces renforts naturels possèdent plusieurs qualités comparées aux renforts minéraux: faible masse volumique, faible coût et moins abrasifs. Leur teneur élevée en cellulose les rend facilement biodégradables et recyclables. Les performances mécaniques que possèdent les fibres cellulosiques, ont incité les chercheurs à développer des techniques d'extraction et de modification des fibres à partir des bio-ressources [2,3]. De plus, des études ont démontré que les interactions chimiques et physico-chimiques entre la matrice polymérique et la distribution de la charge sont des facteurs déterminants quant à l'obtention de matériaux ayant de bonnes propriétés mécaniques [4] et diélectriques [5,6]. En plus, les fibres naturelles améliorent la stabilité thermique du composite, tandis que la composante plastique joue le rôle d'une barrière qui empêche l'absorption de l'eau à travers les parois des fibres, ce qui engendre une diminution du gonflement des fibres [7]. C'est dans cette perspective que le projet proposé s'inscrit et il concerne une étude sur la performance aérodynamique d'un drone à base de bio-composites.

A. Contexte et problématique.

Les avions sont des machines complexes qui nécessitent une grande efficacité en matière de conception et de fabrication. Les ailes d'avion sont l'un des éléments les plus critiques de la structure d'un avion, car elles supportent le poids de l'avion et créent la portance nécessaire pour le faire décoller et voler.

Traditionnellement, les ailes d'avion ont été fabriquées en utilisant des matériaux composites à base de carbone ou de verre. Cependant, ces matériaux sont souvent dérivés du pétrole, ce qui les rend coûteux et nuisibles à l'environnement.

C'est pourquoi de plus en plus de recherches sont menées sur les bio composites pour remplacer les matériaux traditionnels dans la fabrication des ailes d'avion. Les bio composites

sont des matériaux composites fabriqués à partir de fibres végétales ou animales et de résines biologiques ou synthétiques d'origine naturelle.

La principale problématique dans l'utilisation de bio composites pour les ailes d'avion est leur résistance et leur durabilité. Les matériaux composites traditionnels ont des propriétés mécaniques exceptionnelles, notamment une résistance et une rigidité élevées, ce qui les rend adaptés aux exigences rigoureuses des ailes d'avion. Les bio composites ont encore du mal à atteindre ces niveaux de performances et doivent être développés pour répondre à ces exigences critiques.

En outre, la durabilité des bio composites est un enjeu important car les ailes d'avion sont soumises à des conditions extrêmes en vol, notamment des variations de température et de pression, ainsi que des vibrations. Les bio composites doivent être capables de résister à ces conditions sans se dégrader prématurément.

En somme, la recherche sur les ailes d'avion en bio composites vise à trouver des matériaux durables, résistants et abordables qui peuvent remplacer les matériaux composites traditionnels et offrir des avantages environnementaux significatifs.

B. Objectifs (généraux et spécifiques).

Les objectifs généraux de la recherche sur les ailes d'avion en bio composites sont de créer des matériaux composites à partir de fibres végétales ou animales et de résines biologiques ou synthétiques d'origine naturelle pour remplacer les matériaux composites traditionnels, tout en s'assurant que ces nouveaux matériaux ont des propriétés mécaniques suffisantes et une durabilité adéquate pour répondre aux exigences des ailes d'avion.

Les objectifs spécifiques :

- ▶ Caractérisation élastique d'une famille de bio-composites : tests de soufflage de membranes circulaires (montage disponible au laboratoire de plasturgie de l'UQAT): bois, HDPE-20% bois, HDPE-30% bois et HDPE-40% bois.
- ▶ Conception du profil de drone bio-composite de petite dimension.
- ▶ Simulation numérique et modélisation du comportement de la pale de drone bio-composites sous l'action du vent (en direction et en vitesse).

- Comparaisons du comportement de la pale bio-composite vis-à-vis l'aluminium, le bois et le plastique (HDPE).

En somme, l'objectif global est de développer des matériaux plus durables, résistants et abordables, tout en réduisant l'impact environnemental de l'industrie aéronautique.

C. Originalité.

L'utilisation de bio composites pour les ailes d'avion représente une avancée significative dans le développement de matériaux plus durables et économiques pour l'industrie aéronautique. Cette approche innovante utilise des fibres végétales ou animales et des résines biologiques, offrant des avantages significatifs tels qu'une légèreté accrue, une meilleure résistance, des propriétés acoustiques améliorées et une empreinte environnementale plus faible. Cette approche répond à une tendance croissante d'utilisation de matériaux biosourcés dans l'ensemble de l'industrie pour répondre aux préoccupations environnementales et aux contraintes réglementaires. En somme, l'utilisation de bio composites pour les ailes d'avion est une approche innovante et prometteuse pour répondre aux défis environnementaux et économiques de l'industrie aéronautique, tout en offrant des avantages significatifs en termes de performance, de durabilité et de coût.

1.2 Définition du drone

Le mot Drone signifie en anglais « faux-bourdon » faisant ainsi allusion au bruit émis par certains d'entre eux. Il est aussi désigné comme étant un avion sans pilote embarqué qui emporte une charge utile destinée à réaliser une mission quelconque.

Les drones définis comme UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sont des objets pilotés à distance qui réalisent différentes opérations sans présence humaine à leur bord. Ils peuvent être de taille et d'aspect différents et se définissent d'abord par le milieu dans lequel ils opèrent : il existe des drones terrestres, maritimes et aériens. Ils s'apparentent donc selon les cas à un robot, un modèle réduit, un bateau, une torpille, un missile, un avion ou un hélicoptère.

Principalement utilisé par l'armée à des fins militaires (mission de surveillance, de renseignements, d'exploration, ou de combat), les drones font désormais partie de notre quotidien, la surveillance environnementale, la récolte de données d'intérêt météorologique, le relais d'informations, la prise de photographies aériennes

La taille et la masse du drone allant de quelques grammes à plusieurs tonnes, dépendent des capacités opérationnelles recherchées. Le pilotage automatique permet d'envisager des vols de très longue durée, de l'ordre de plusieurs dizaines d'heures. On peut les classer en

différents catégories en fonction de leurs tailles (voilure, longueur), leurs formes (furtif ou non), leurs types de propulsion ou selon l'altitude et l'endurance [8-9].

1.3 Classification selon le domaine opérationnel

1.3.1 Surveillance : MAV (Micro air vehicle)

Ils sont appelés aussi les drones tactiques, lents ou rapides, à endurance moyenne ou haute, à voilure fixe ou tournante appelés TUAV (Tactical Unmanned Air Vehicle) ou VTOL (Vertical Take-off and Landing). Ils sont classés comme suite [8] :

Les micro-drones sont des drones de taille réduite. Ils représentent la 3e génération de drones. On les nomme **MAV** (Micro air vehicle), figure (1) et (2). Les micro-drones sont souvent utilisés pour de la surveillance par des forces militaires ou des forces de maintien de l'ordre, la détection d'agents chimiques ou biologiques, ou encore pour de la recherche et l'assistance aux victimes. Cependant l'utilisation principale sera certainement la reconnaissance dans des espaces confinés.



Figure 2 Micro-drone Black Widow



Figure 1 Micro Drone 3

Le drone à décollage et atterrissage verticaux appelés **VTOL** (Vertical Take-off and Landing aircraft), figure (I-3), sont des drones à voilure tournante, conçu pour s'affranchir des pistes qui lui sont normalement nécessaires pour le décollage et l'atterrissage, utilisé pour différentes missions comme la surveillance, l'imagerie, l'agriculture, la livraison.



Figure 3 Drone Zohal.

<u>Iranian UAV Zohal</u>	
Longueur :	0.65 m
Largeur :	0.65 m
Hauteur :	0.28 m
Masse maximale:	3.2 kg
Vitesse de croisière :	30 km/h

1.3.2 Reconnaissance

Le drone est conçu pour des missions de reconnaissance tactique, capable de transmettre en temps réel des données provenant de caméras de jour ou infrarouges, ou d'un radar miniature, figure (4) et (5), On trouve 2 catégories [8]



Figure 5 Drone H-110 Sarir



Figure 4 Drone Ghos Mohajer

LASE (Low Altitude, Short-Endurance):

Les drones appelés **LASE** (Low Altitude, Short-Endurance), figure (6) et (7), sont de petits drones qu'on lance soit à la main soit à l'aide d'une catapulte. Ils peuvent atteindre une altitude de 5000 m ;



Figure 6 Drone RQ-11 Raven.



Figure 7 Drone Arcturus T-20.

LALE (Low Altitude Long Endurance):

Les drones volant à basse altitude et de grande autonomie appelés LALE (Low Altitude Long Endurance), figure (8).



Figure 8 Drone Boeing ScanEagle.

1.3.3 Drone de combat

Un drone de combat UCAV (Unmanned Combat Air Vehicle), figure (9), est un type particulier de drones. Il est équipé de matériel d'observation et/ou d'un système d'armement automatisé portant une charge utile (bombe, missile). Il est destiné à des missions de pénétration à grande vitesse afin de traiter un objectif dans la profondeur, voir un horizon plus lointain, en plus d'assurer des missions de défense aérienne.

La gestion de portée de l'armement de ces drones accroît la complexité technologique et opérationnelle, ils sont capables d'identifier et de désigner des cibles, avec la capacité d'être réorientés en vol à partir d'informations obtenues en temps réel sur l'évolution de la situation au sol.



Figure 9 Drone de combat Wing Loong II.

MALE (Medium Altitude Long Endurance)

Les drones volant à moyenne altitude et de grande autonomie appelés **MALE** (Medium Altitude Long Endurance), figure (10), d'une envergure de 10 à 20 m, ils volent entre 5 000 et 15 000 m à une vitesse variant entre 200 et 400 km/h, avec une portée de 1 000 km et des liaisons LOS et/ou satellite SatCom.



Figure 10 Predator C.

HALE (High Altitude Long Endurance)

Les drones volant à haute altitude et de grande autonomie appelés **HALE** (High Altitude Long Endurance), figure (11). On atteint dans cette catégorie, les dimensions d'un avion civil (Airbus A320 par exemple) pour des autonomies de plusieurs milliers de kilomètres (10 000 km et plus) parcourues en volant largement au-dessus des trafics aériens courants, tant civils que militaires (jusqu'à 20 000 m d'altitude). Les moteurs sont cette fois des turboréacteurs.

La masse au décollage des drones HALE, peut largement dépasser les 10 tonnes, dont quelque 10% pour la charge utile.

Les capacités de ces drones sont à rapprocher et à comparer à celles des avions pilotés, du type de l'avion espion U2 ou des avions de renseignement électronique, ainsi qu'à celles des satellites d'observation ou d'alerte.



<u>Global Hawk RQ-4B Block 20 by Northrop-Grumman.</u>	
Longueur :	14.5 m
Envergure :	39.8 m
Hauteur :	4.7 m
Masse à vide :	6781 kg
Masse maximale:	14628 kg
Vitesse de croisière :	575 km/h

Figure 11 Global Hawk RQ-4B.

L'exemple le plus connu de HALE est le Global Hawk américain, de Northrop Grumman, qui, en avril 2001, a volé depuis la Californie jusqu'en Australie. Peu après, en octobre 2003, dans le cadre de l'initiative allemande «Euro Hawk» et en coopération avec EADS, un drone du même type a effectué un vol transatlantique, depuis la Californie jusqu'au nord de l'Allemagne (vols de démonstration à partir de ce pays).

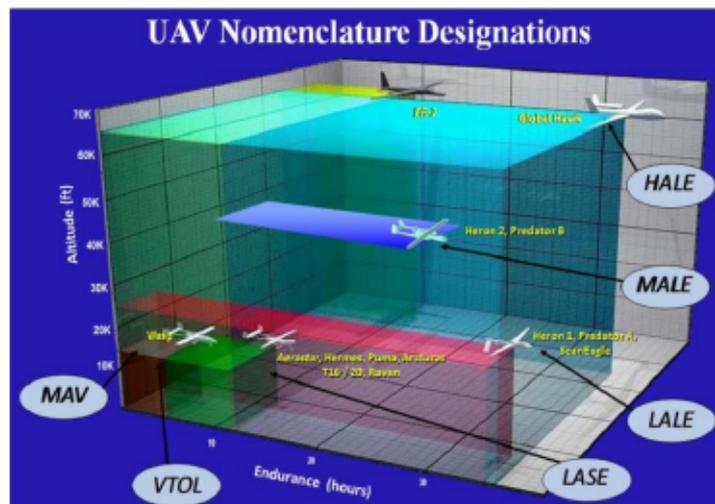


Figure 12 Classification des drones. [4]

Chapitre 2

Matériaux et drones

2.1 Matériaux utilisés pour la fabrication de pales de rotors

Dans le contexte actuel, les principaux matériaux utilisés pour la fabrication de pales du rotor sont : le bois, les lamelles de bois collées, les alliages d'aluminium et les composites [10-11]. La figure 1, ci-dessous, illustre les matériaux/caractéristiques utilisés pour les pales [11]. Le bon fonctionnement et la durée de vie d'une éolienne dépendent en général, de trois considérations [10-11]: i) l'aspect conceptuel de la pale (son profil aérodynamique, sa longueur, sa largeur), ii) les propriétés du matériau constituant la pale (pale doit être légère, non déformable, homogène et résistante à la fatigue, à la vibration, à la corrosion et à l'érosion) et iii) le procédé incluant le coût total de la fabrication (le procédé doit être simple et le coût de la réalisation rentable). Au niveau conceptuel, les caractéristiques des différents profils ont en été étudiées principalement par le secteur d'aviation (ailes ou hélices) et déterminés en soufflerie. À ce niveau, il faut souligner deux situations qui affectent la fiabilité des pales : la première concerne le problème d'usure prématuré que peut subir les pâles en mode de fonctionnement et principalement leurs frottements avec les particules en suspension dans l'environnement et trainés par le mouvement des vents (poussière, sable, glace, etc.); la durée de vie d'une éolienne, en fonctionnement, ne dépasse pas guère une quinzaine d'année. Le second concerne la longueur de la pale ; qui est limitée par la résistance du matériau (la pression exercée sur une éolienne par le vent, augmente considérablement à mesure que la taille de la pale augmente et il est proportionnel au carré de la longueur de la pale). Du point de vue matériau [11], l'utilisation du bois traité (souvent par vernissage) présente de très bonnes caractéristiques mécaniques (bonne résistance à la fatigue, flexibilité, légèreté, etc.) et permet la réalisation de pales de 3 à 4 mètres. Dans le cas de lamellé-collé [11], qui est un composite constitué d'un empilement de lamelles d'une ou de différentes espèces de bois collés ensemble, il permet la réalisation de pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur avec une bonne tenue en fatigue. Toutefois, plusieurs inconvénients sont reprochés à ces matériaux en bois : leurs manques d'homogénéité, leurs sensibilités à l'érosion, leurs faibles résistances à la déformation et [11] leur masse variable dans le temps. Ces désavantages peuvent induire des vibrations destructives. Concernant les matériaux métallique, tels l'aluminium et ses alliages, ils sont résistants à la corrosion et à la fatigue et elles permettent la réalisation de pales allant jusqu'à 20 m de longueur. Dans le cas des composites [11], qui sont considérés comme excellents matériaux et les plus utilisés, ils permettent la construction de pales de divers profils et dimensions (au-delà de 30 mètres) avec la possibilité de faire varier la quantité de la matière le long de la pale, tout en assurant des très bonnes résistances à la corrosion et une bonne tenue en fatigue. Ces composites sont généralement des époxydes et des polyesters renforcés par l'une des trois familles: i) tisses simple (en fibres de verre, en fibres de carbone

ou en fibres de Kevlar); ii) tissus composés (verre-carbone, verre-kevlar, carbone-kevlar) et iii) tissus préimprégnés de résine.

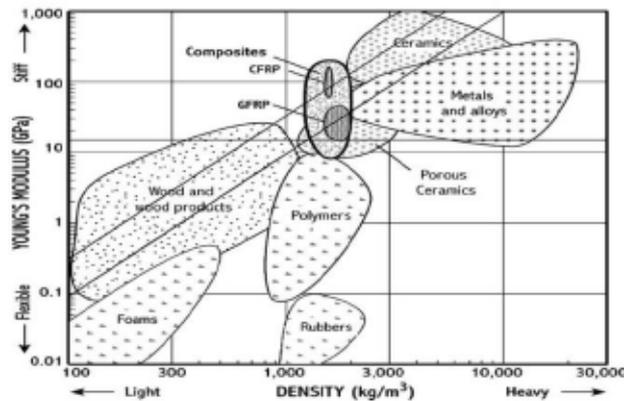


Figure 13 Matériaux utilisés pour les pales de rotors et propriétés mécaniques, Ref. [14]

2.2 Bio-composites thermoplastiques

Concernant les thermoplastiques utilisés pour la fabrication de bio-composites, on rencontre deux groupes: ceux ayant des points de fusions bas (cas de la majorité des polyoléfines tels que le polyéthylène haut densité, HDPE) et ceux ayant des points de fusions élevés (par exemple le polyéthylène téréphtalate, PET). Contrairement aux polyoléfines qui sont abondamment étudiées [4,12] et utilisées en plasturgie [13], les polyesters sont des groupes chimiques compatibles avec les fibres naturelles, via la liaison d'hydrogène. Ce type de polyester présente un bon potentiel pour le développement de matériaux avancés. La mise en œuvre de chacun de ces deux groupes nécessite une stratégie appropriée. Dans le cas de groupe hydrophile, il est possible d'exploiter l'interaction intermoléculaire de la liaison d'hydrogène autant pour la fibre naturelle que la résine, c'est le cas de Polyéthylène téréphtalate PET. Effectivement, pour les polyoléfines (non-polaires et hydrophobes), on recourt généralement à des modifications chimiques ou physiques de la surface des fibres et /ou de la matrice [10,11]. Aussi, on peut utiliser un agent de couplage qui joue le rôle de pont entre la fonction hydroxyle de la fibre et les liaisons de la résine. À titre d'exemple, l'utilisation de Polypropylène greffés anhydride maléique (PP-g-MA) comme agent couplant s'est révélée être un moyen approprié pour améliorer les propriétés mécaniques des composites à base de polypropylène et de fibres naturelles [14].

Dans le cas de bio-composite PET-Chanvre, l'amélioration de la résistance thermique des fibres et celle de l'interface PET-fibre peut être réalisée par traitement alcalin et greffage du glycidyle méthacrylate (GMA) [6]. Ce traitement permet également de réduire les fibres en

micro filaments, ce qui facilite leur dispersion à travers la matrice [6]. Également, à des fins d'applications en plasturgie, la température de fusion du PET peut être réduite en mélangeant ce dernier avec un polyester ayant un point de fusion plus bas (cas du polycaprolactone [15,16]).

2.3 Composite HDPE-Bois et caractérisation mécanique

2.3.1 Matériaux

La sciure du bois utilisée dans cette étude a été fournie par la scierie Tembec située en Béarn (QC, Canada). Elle est constituée d'un mélange de 65% d'épinette blanche (*Picea glauca*), 20% d'épinette noire (*Picea marica*) et 15% de sapin baumier (*Abies balsamea*). L'analyse granulométrique des sciures du bois est effectuée sur plus de 5000 particules à l'aide d'un Fiber Quality Analyser de Optest Equipment (Hawkesbury, Ontario). Le tableau 1 montre la géométrie moyenne des particules de sciure. Les particules de bois ont été tamisées pour obtenir un diamètre inférieur à 700 microns ($\phi < 0,7$ mm). La matrice polymère considéré est le polyéthylène haute densité PEHD (SclairA59), matériau largement utilisé en plasturgie, avec une température de fusion de 138°C, et une densité de 980 kg/m³. L'agent de couplage utilisé pour l'obtention du composite PEHD-Bois est le Fusabond 226 de DuPont, qui est un polyéthylène greffé avec de l'anhydride maléique. Il représente 3 % (w/w) de la formulation du composite, quantité bien connue pour améliorer l'homogénéité du mélange tout en assurant une meilleure distribution des fibres dans la matrice polymère [1-2]. Les particules de sciure de bois tamisées ont été préséchées pendant 24 heures à 105°C. Par conséquent, l'humidité résiduelle des particules de sciure utilisées pour la préparation des échantillons est estimée à moins de 3% (W/W).

Table 1 Dimensions géométriques moyennes des particules de sciure de bois [3].

Surface (mm ²)	Axe Long (mm)	Petit axe (mm)	Facteur de forme (L/D)
0.1154	0.574	0.302	1.97

Tableau 1 Dimensions géométriques moyennes des particules de sciure de bois [3].

2.3.2 Méthode

Les échantillons composites ont été préparés à l'aide d'un rhéomètre bi-vis à contre-mélange (Haake Rheometrix avec rotors à rouleaux) avec une vitesse angulaire de 90 rpm à la température de 170°C. En fait, cette température a été choisie pour être supérieure au point de fusion de la matrice PEHD et inférieure au début de la dégradation des fibres de bois rapportée autour de 200°C [4]. Afin d'assurer la fusion complète de PEHD avec l'agent de couplage, on a considéré un temps de mélange de 2 minutes. Ensuite, les particules de fibres ont été ajoutées et mélangées pendant 5 minutes. Quatre formulations différentes de bio-composites renforcées par des particules de sciure de bois ont été élaboré (0%, 20%, 40% et 50% (w/w)). Ensuite, des échantillons ont été préparés par moulage par compression à l'aide d'une presse à chaud chauffée à 150°C en utilisant des plaques de moule en aluminium. Cette température a été choisie au-dessus du point de fusion du polymère qui est de 138°C. Afin de s'assurer que le mélange soit correctement ramolli, une précharge a d'abord été appliquée pendant 2 minutes. Cette précharge a également permis d'éliminer l'air probablement accumulé dans le matériau. Ensuite, une charge de 8 MPa a été appliquée sur le matériau pendant 4 min pour compléter sa forme.

2.3.3 Propriétés mécaniques du WPC

Les essais de traction ont été effectués afin de déterminer les valeurs de module d'élasticité (E), la résistance mécanique maximale (R_m) et l'allongement à la rupture (ϵ) de chaque formulation bio-composite étudiée. Les résultats obtenus sont résumés dans la table 2 ci-dessous.

On peut remarquer que le module d'élasticité augmente avec la teneur en particules de sciure de bois. Ces résultats étaient prévisibles en raison de la différence marquée entre les valeurs des modules d'élasticité des particules de bois et du PEHD. Cependant, à température ambiante, le renforcement de la matrice a entraîné une diminution de la résistance mécanique des bio-composites en fonction de la teneur en particules de sciure. L'incompatibilité chimique entre les particules de bois et la matrice polymère entraîne de faibles interactions entre les deux éléments, ce qui conduit à une forte concentration de contraintes sur les bords des particules de sciure. Par conséquent, les bio-composites deviennent plus fragiles, les défaillances se produisant à des niveaux de contrainte inférieurs à ceux du vierge [5].

TABLEAU 1: RÉSULTATS DES TESTS MÉCANIQUES (LES VALEURS ENTRE PARENTHÈSES CORRESPONDENT À L'ÉCART TYPE

(%) bois	% HDPE	E (MPa)	Rm (MPa)	$\varepsilon\varepsilon$ (%)
0	100	420 (26)	23,0 (0,77)	108,3 (11,2)
20	77	1210 (33)	26,0 (0,26)	6,86 (0,26)
30	67	2200 (260)	30,9 (0,25)	5,06 (1,44)
40	57	4331 (300)	35,4 (0,24)	3,36 (0,19)

Tableau 2 RÉSULTATS DES TESTS MÉCANIQUES (LES VALEURS ENTRE PARENTHÈSES CORRESPONDENT À L'ÉCART TYPE).

Chapitre 3

Aaérodynamique et

conception

3.1 Profils de drones

Le choix du profil dépend essentiellement du type de performance que l'on attend du drone. Il faut toutefois être conscient que le profil contribue largement au vol du drone grâce à la génération de portance.

La géométrie du profil est divisée en deux parties, le dessus du profil est appelé extrados et le dessous intrados. La droite passant par le bord d'attaque et le bord de fuite se nomme ligne de référence. La corde est le segment de cette droite, allant du bord d'attaque au bord de fuite.

Lorsque de l'air s'écoule autour d'un profil, des variations de pression ont lieu tout autour de lui. Les profils d'ailes sont dessinés de façon à ce que, en vol, une dépression se crée à l'extrados, alors qu'une surpression s'établit à l'intrados (voir Figure 15). Cette différence de pression est à l'origine de la force tirant le profil à la fois vers le haut et vers l'arrière, qui est appelée résultante. Cette force s'applique en un point particulier de la ligne de référence : le centre de poussée (généralement situé au $\frac{1}{4}$ de corde).

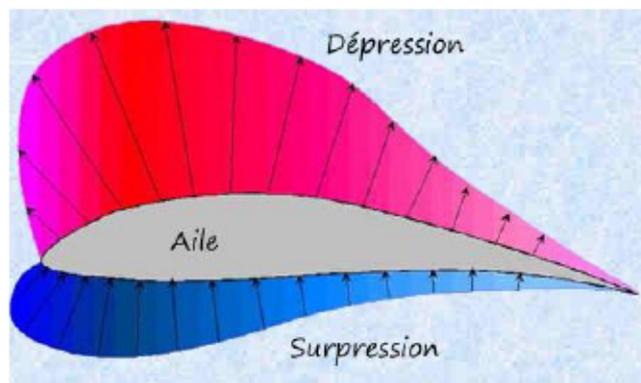


Figure 14 Variation de pression autour du profil d'aile.

La résultante est composée de deux forces différentes : la première, perpendiculaire à la direction de l'écoulement, appelée portance. La seconde, parallèle à l'écoulement, appelée trainée. La figure (15) nous résume l'application de ces forces.



Figure 15 Application des forces sur le profil d'aile.

Les valeurs de ces deux forces pour l'aile entière se calculent comme suit [17] :

$$L = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * C_l \quad (II - 1)$$

$$D = \frac{1}{2} * \rho * S * V^2 * C_d \quad (II - 2)$$

Avec :

L : portance (Newton [N])

D : trainée [N]

ρ : masse volumique de l'air (1,225 kg/m³)

S : surface portante (m²)

V : vitesse de l'écoulement (m/s)

C_l : coefficient de portance du profil (sans unité)

C_d : coefficient de trainée du profil (sans unité)

Les coefficients C_d et C_l sont fonction de l'angle d'attaque (ou angle d'incidence) du profil, c'est-à-dire l'angle que fait la ligne de référence avec la direction de l'écoulement. C'est d'ailleurs la façon dont varient ces coefficients avec l'angle d'attaque qui détermine les performances d'un profil.

L'étude aérodynamique des profils d'ailes se fait habituellement par le calcul numérique (en 2D, à allongement infini ou en 3D) et en soufflerie, avec un allongement fini.

Les caractéristiques géométriques recherchées seront déterminées en fonction d'une multitude de contraintes souvent contradictoires, par exemple :

- Une finesse élevée (pour l'aile d'un drone en régime de croisière), demande, en général, un profil de faible épaisseur relative et de faible cambrure.
- Pour maintenir une portance à faible vitesse, ou avec une faible surface alaire, il faut avoir un haut coefficient de portance, ce qui est favorisé par un bord d'attaque à grand rayon, une forte cambrure et une couche limite turbulente.
- Permettre la présence d'autres éléments à l'intérieur de l'aile (par exemple du carburant et des systèmes mécaniques pour les volets et becs mobiles dans un drone), demande une grande épaisseur.

3.2 Les différents types de profil

Les sous sections suivantes, extraite de la référence [18], fournies de l'information pertinente sur les principaux profils utilisés pour les profils de drones et d'avions :

3.2.1 Biconvexe symétrique :

L'intrados et l'extrados convexes sont symétriques par rapport à la corde. La ligne moyenne est rectiligne et confondue avec la corde. Ces profils sont utilisés pour les empennages verticaux et horizontaux.

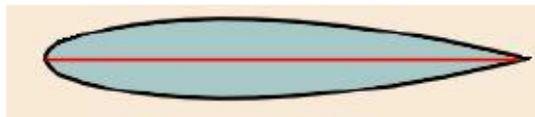


Figure 16 Profil Biconvexe symétrique.

3.2.2 Biconvexe dissymétrique :

La courbe de l'extrados est plus accentuée que celle de l'intrados. La ligne moyenne est simple courbure (intrados et extrados convexe). Ces profils sont plus employés pour les ailes d'avion de loisir.

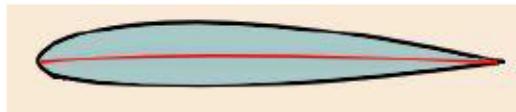


Figure 17 Profil Biconvexe dissymétrique.

3.2.3 Plan convexe :

Il s'agit d'un profil ayant un intrados relativement plat et un extrados cambé (convexe). La ligne moyenne est à simple courbure.

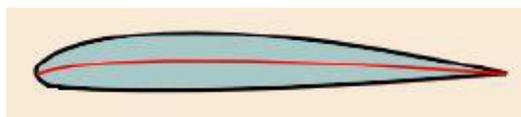


Figure 18 Profil Plan convexe.

3.2.4 Plan creux :

L'extrados est convexe et l'intrados concave. Ces profils sont très porteurs mais génèrent une trainée importante. Ce type de profil était très utilisé autrefois pour les planeurs. La ligne moyenne est à simple courbure.

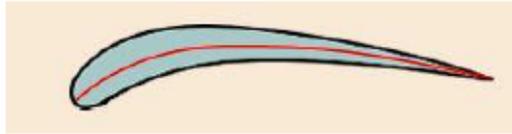


Figure 19 Profil Plan creux.

3.2.5 Double courbure :

La ligne moyenne est à double courbure, la seconde courbure de la ligne moyenne confère des qualités de stabilité d'où le qualificatif d'AUTOSTABLE. Ce profil, peu répandu, est surtout utilisé pour les ailes volantes.

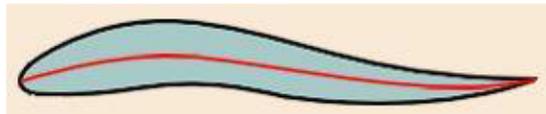


Figure 20 Profil Double courbure.

3.2.6 Supercritique :

Double courbure inversée. Extrados très tendu (grand rayon de courbure). Dans la zone du bord d'attaque de l'extrados rayon de courbure mini. Forte épaisseur relative de l'ordre de 17%.

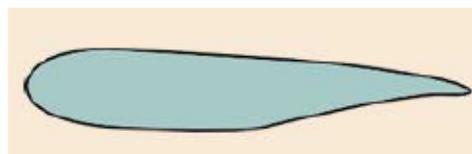


Figure 21 Profil Supercritique.

3.3 Choix de profils d'ailes

Il existe une panoplie de profils dans la littérature qui sont consacrés aux drones. Parmi les profils les plus utilisés, on rencontre la liste sommaire suivante :

- **Wortmann FX S 02-196**, bon comportement à faible vitesse.
- **Wortmann FX 66-S-196**, vitesse de chute minimale, faible trainée.
- **Clark Y**, facile à fabriquer et couvre la majeure partie des plages de portance.

- **NACA 2415**, profil biconvexe asymétrique, possibilité de faire des acrobaties avec accélération négative (vol inversé). Les profils si dessus sont adapter pour les types MALE, cette partie a été choisie à titre représentatif, qui sera bien sûr modifier lorsqu'on aura bien défini l'objectif de notre drone afin de déterminer exactement quel type nous choisirons.

Sur la figure ci-dessous, on a présenté géométriquement une coupe du profil de type *Wortmann FX 66-S-196* ainsi que ses caractéristiques (épaisseur, courbure et angle de bord de fuite) :

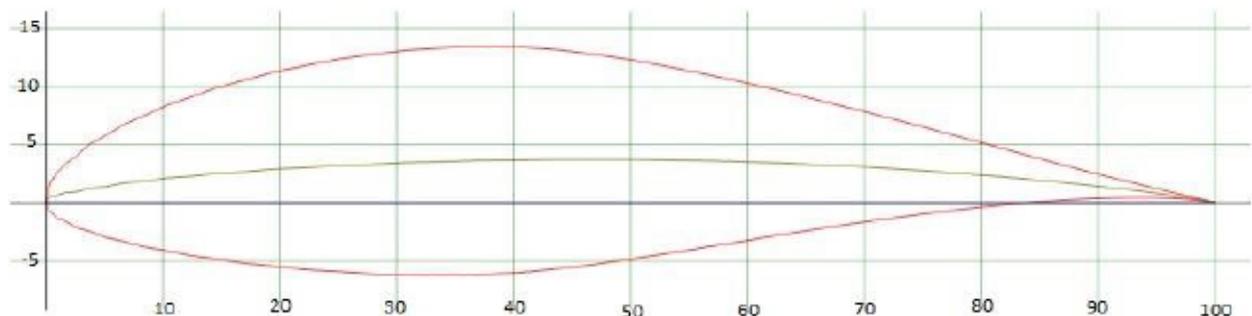


Figure 22 Profil FX 66-S-196.

Épaisseur: 19.6% à 37.1% de la corde

Courbure : 3.8% à 43.5% de la corde

Angle de bord de fuite : 11.5°

Pour ce profil, un calcul effectué sur une maquette réalisée sur SolidWorks donne :

- Surface du Trapèze centrale de l'aile avant : $S_1 = 397.69 \text{ mm}^2$
- Surface du trapèze central de l'aile arrière : $S_2 = 351.74 \text{ mm}^2$
- Surface du 1^{er} trapèze (emplanture aile avant) : $S_3 = 48.74 \text{ mm}^2$
- Surface du 2^{ème} trapèze (aile avant et arrière) : $S_4 = 1773.65 \text{ mm}^2$
- Surface du 3^{ème} trapèze (emplanture aile arrière) : $S_5 = 77.80 \text{ mm}^2$

avec une surface totale de:

$$S_a = S_1 + S_2 + (S_3 \times 2) + (S_4 \times 4) + (S_5 \times 2)$$

$$S_a = 8097.11 \text{ mm}^2$$

La surface et l'envergure permettent de calculer l'allongement de notre aile [??]:

$$\lambda_a = \frac{b^2}{S_a} \quad (II - 1)$$

Avec :

λ_a : allongement de l'aile (sans unité)

b : envergure de l'aile (mm)

S_a : surface alaire (mm²)

Application numérique :

$$\lambda_a = \frac{350^2}{8097.11} = 15.128$$

3.4 Calcul de la corde aérodynamique moyenne :

La corde aérodynamique moyenne (notée CAM), est une corde qui représente à elle seule l'aile dans sa totalité, du point de vue des forces qui s'y appliquent. Sa position sur l'aile est aussi importante que sa longueur, figure (25).

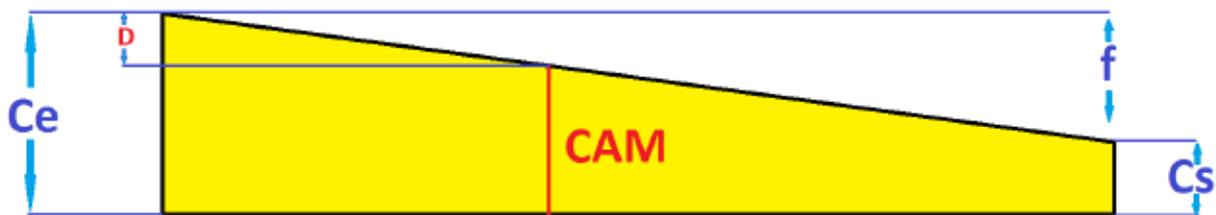


Figure 23 Caractéristiques géométriques d'une aile trapézoïdale.

Nous avons la corde d'emplanture, la corde au saumon. Pour avoir la longueur de la CAM, on utilise la relation suivante [10]:

$$CAM = \frac{2}{3} \times \frac{Ce^2 + Ce \times Cs + Cs^2}{Ce + Cs} \quad (II - 2)$$

Avec :

CAM : corde aérodynamique moyenne (mm)

Ce : corde d'emplanture (mm)

Cs : corde de saumon (mm)

Application numérique :

$$CAM_1 = \frac{2}{3} \times \frac{(19.05)^2 + 19.05 \times 5.95 + (5.95)^2}{19.05 + 5.95} = 13.644 \text{ mm}$$

$$CAM_2 = \frac{2}{3} \times \frac{(19.68)^2 + 19.68 \times 5.95 + (5.95)^2}{19.68 + 5.95} = 14.04 \text{ mm}$$

Où CAM_1 représente la corde aérodynamique moyenne de l'aile avant et CAM_2 la corde aérodynamique moyenne de l'aile arrière.

La CAM est la corde qui divise l'aile en trapèze en deux surfaces égales, et en multipliant par l'envergure, on trouve directement la surface alaire.

La distance entre le bord d'attaque de la corde d'emplanture et celui de la CAM projetée sur l'axe longitudinal s'appelle D .

Selon la figure (23), la flèche f du bord d'attaque sert au calcul de D [17]:

$$D = \frac{1}{3} \times \frac{(C_e + 2 \times C_s)}{(C_e + C_s)} \times f \quad (II - 3)$$

Avec :

D : flèche de la CAM (mm)

f : flèche du bord d'attaque (mm)

Application numérique :

$$D_1 = \frac{1}{3} \times \frac{19.05 + 2 \times 5.95}{19.05 + 5.95} * 10.35 = 4.27 \text{ mm}$$

$$D_2 = \frac{1}{3} \times \frac{19.68 + 2 \times 5.95}{19.05 + 5.95} * 10.88 = 4.468 \text{ mm}$$

Où D_1 représente la distance entre le bord d'attaque de la corde d'emplanture et celui de la CAM de l'aile avant et D_2 celle de l'aile arrière.

Chapitre 4

Modélisation numérique

4.1 Introduction :

La CAO, ou conception et dessin assistés par ordinateur (CDAO), s'appuie sur les technologies informatiques pour créer des conceptions et élaborer la documentation associée. Un logiciel de CAO remplace le dessin manuel par un processus automatique.

Les programmes de CAO disposent de différentes fonctionnalités. Le processus de conception déterminera lesquelles utiliser en fonction de vos créations : graphiques vectoriels 2D ou modélisations 3D de surfaces solides. La plupart des logiciels de CAO 3D vous permettent d'appliquer plusieurs sources d'éclairage, de faire pivoter des objets en trois dimensions et d'effectuer des rendus de conceptions à partir de n'importe quel angle.

Pour réaliser notre aile nous pouvons utiliser différents procédés comme l'impression 3D, ou la découpe du polyester par file chaud.

4.2 Conception de l'aile par CAO :

Afin de réaliser notre aile de drone nous devons commencer par la schématiser et la concevoir sur le logiciel de conception 3D SolidWorks.

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur. Il utilise le principe de conception paramétrique. SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D. Ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation.

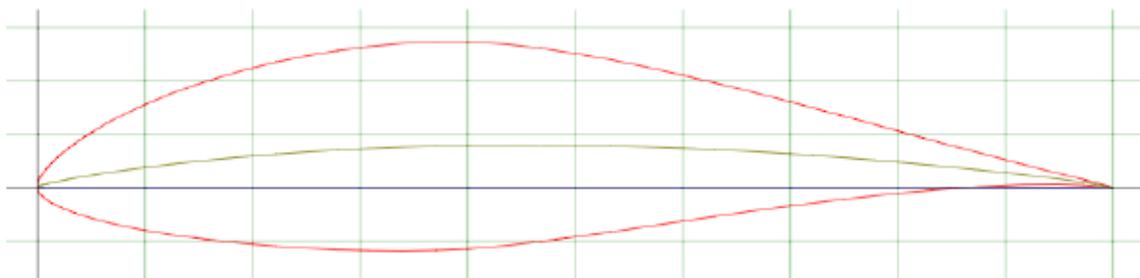


Figure 24 profil d'aile FX 66S-S-196 Wortman.

➤ Aile :

- Le profil utilisé : FX 66-S-196 Wortman
- Envergure totale de l'aile : 1500 mm, soit une échelle de [7.5/100]
- Aile avant : Aile haute
- Aile arrière : Aile médiane

Afin de générer l'aile nous créons des plans afin d'y esquisser les profils d'ailes « FX 66-S-196 », sur chaque plan selon les dimensions nécessaires pour générer la forme d'ailes adaptées au fuselage, comme le montre la figure (III-1).

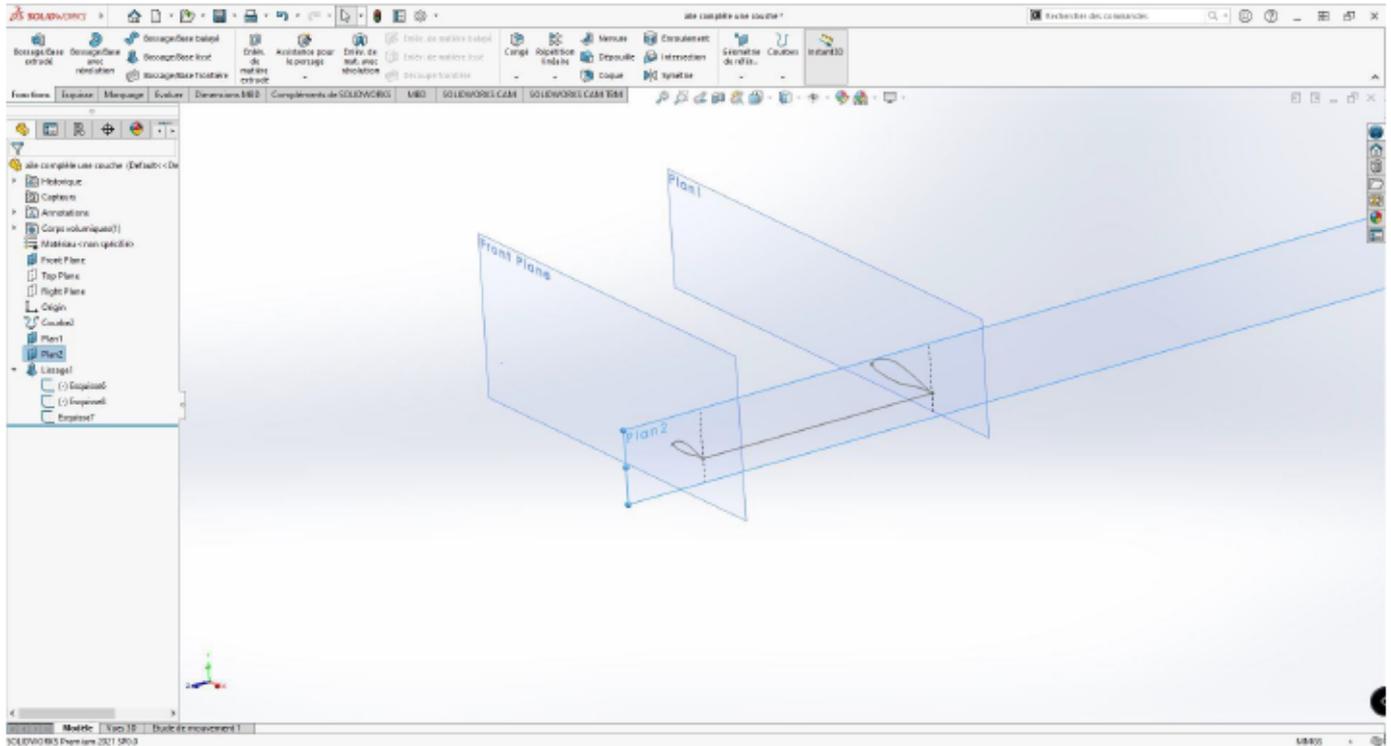


Figure 25 créations de l'aile.

Il s'agira de joindre les deux profilent à l'aide d'une droite qui grâce à la fonction de lissage permettra de générer le corps comme le montre les images si dessous.

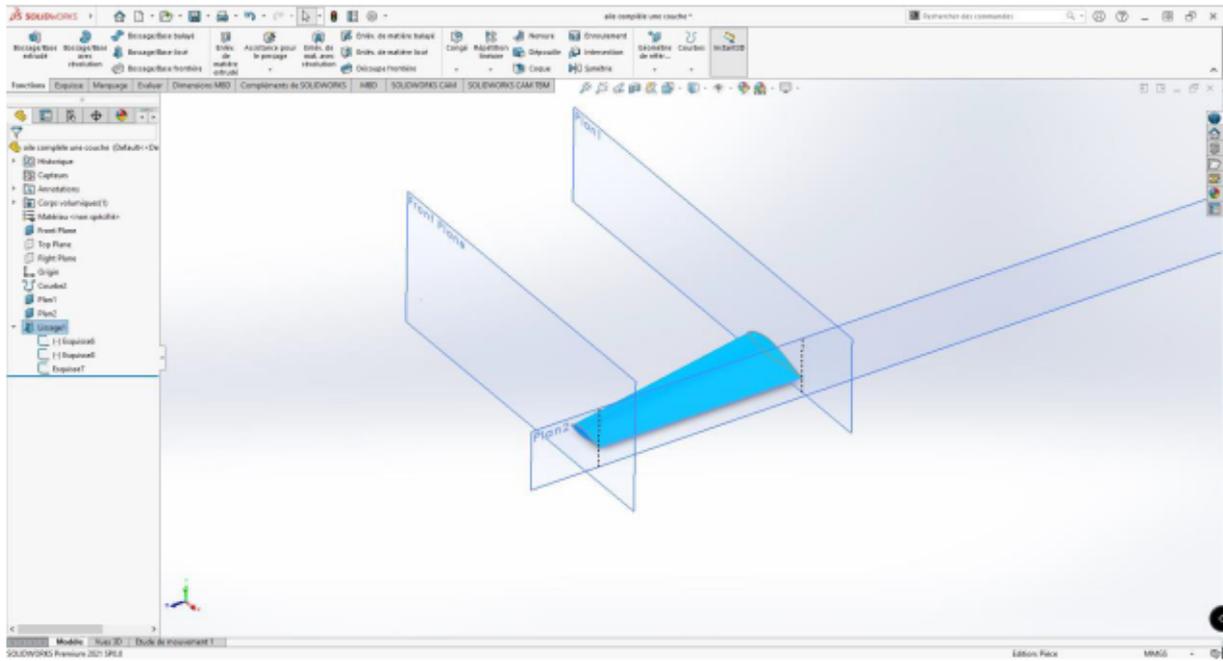


Figure 26 modélisation grâce à la fonction de lissage.

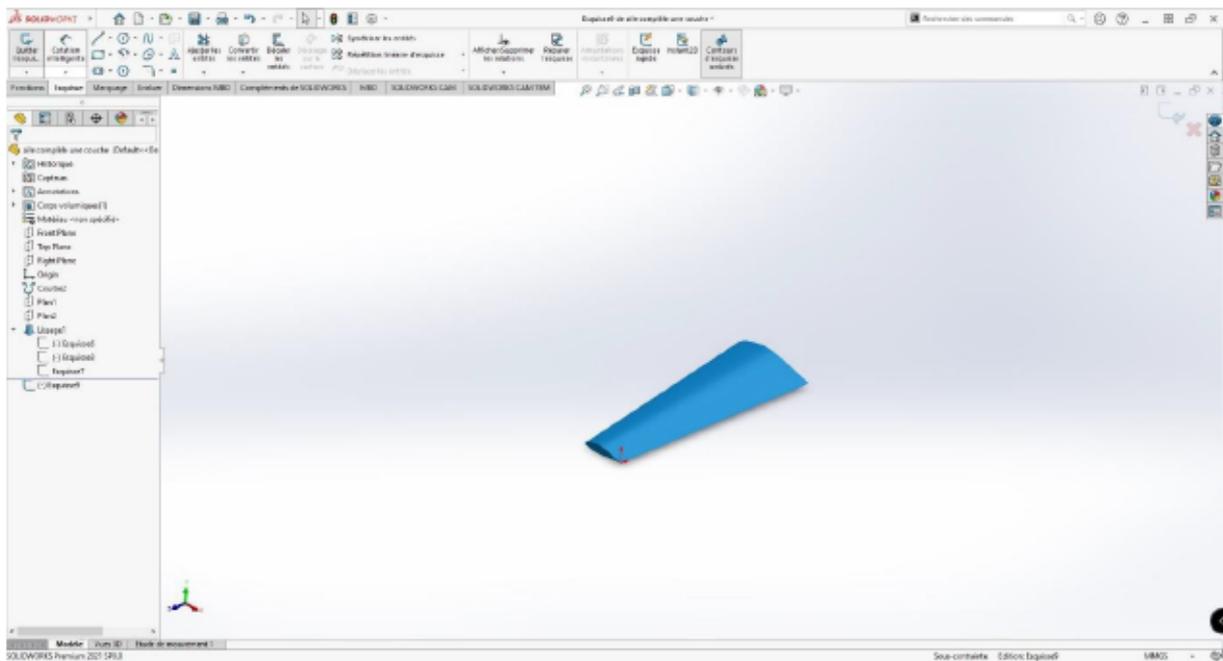


Figure 27 aile finie.

4.2.1 Maillage géométrique :

4.2.1.1 Introduction :

La simulation numérique représente l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Dans le cas de notre étude, par exemple, nous avons utilisé les différents logiciels (SOLIDWORKS, ainsi que Ansys Workbench) pour effectuer cette simulation, afin de pouvoir faire l'étude aérodynamique ainsi que statique de notre modèle.

4.2.1.2 Le maillage :

Afin de pouvoir calculer et visualiser les forces exercées sur notre aile, nous devons le diviser en plusieurs petites surface appelées maillage. Pour ce faire, nous allons utiliser le logiciel Ansys.

La partie maillage dans Ansys Workbench permet de créer des géométries et des maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Il assure également le maillage automatique des surfaces, des volumes et définit les conditions aux limites.

Pour créer un maillage, on procédera par deux étapes, l'une consiste à mailler le volume de contrôle uniquement dans Fluent, et l'autre a maillé l'aile uniquement dans la partie Structure Static grâce à la fonction « Mesh », un maillage en termes de surface et volume sera automatiquement généré.

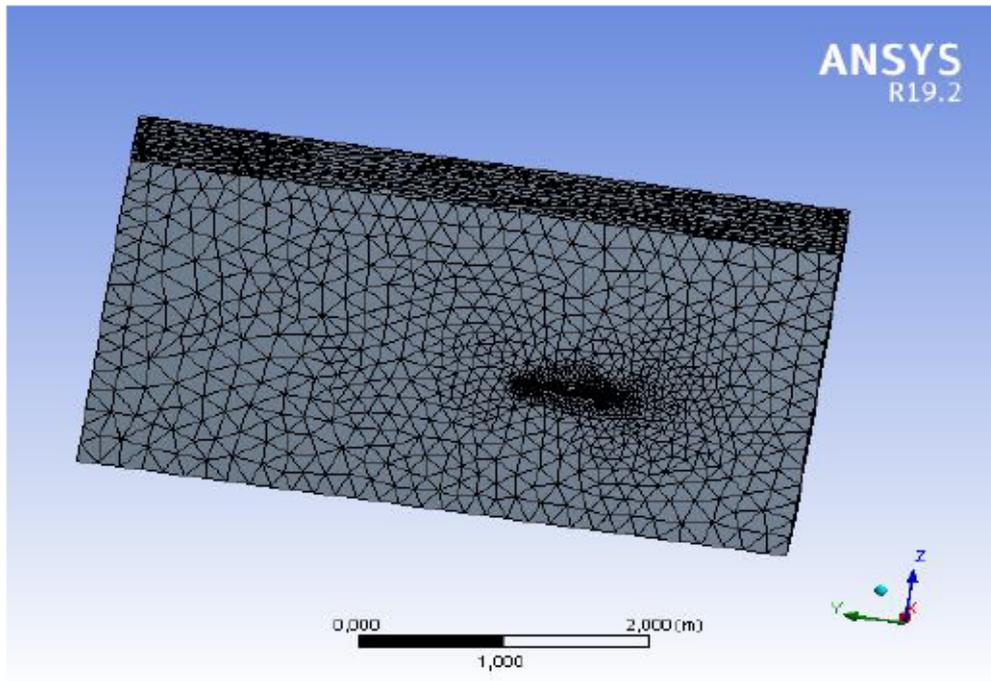


Figure 28 Volume de control

Composant du volume de contrôle	Condition au limites
Ailes	Wall
Creux ailes volume de control	Wall
3 Face latéral du rectangle	Wall/sym
1 Face du rectangle ou est situé l'emplanture de l'aile	wall
Face frontale du rectangle (volume de contrôle)	Velocity inlet
Face arrière du rectangle (volume de contrôle)	outflow

Tableau 3 Condition aux limites.

4.2.2 Analyse de la convergence de maillage :

L'étude de maillage est nécessaire afin d'aboutir à un résultat plus rapidement. Car en simulation numérique, le temps de calcul est facturé, on essaye de faire en sorte d'avoir un temps de calcul le moins long possible. C'est dans ce contexte que l'étude de maillage intervient. On crée plusieurs maillages allant du plus grossier au plus raffiné, puis on lance la

même simulation pour tous les maillages et on compare l'un des résultats obtenus. Dans notre cas, nous avons choisi la force de portance. Dès que les résultats se stabilisent, on comprend qu'il n'est pas nécessaire de raffiner encore plus le maillage car on obtiendra le même résultat.

Plus le maillage est raffiné, plus il faut de temps pour effectuer les calculs. Donc on prend le maillage le moins raffiné de ceux qui se sont stabilisés.

Le tableau (IV-2) nous donne les différents maillages avec le résultat de la force de portance obtenue pour une vitesse $V=20$ m/s et une incidence $\alpha=0^\circ$.

Numéro du maillage	Nombre de nœud	Temps de calcul	Force de portance (N)
1	290211	13 min	0.4619
2	418171	24 min	0.5668
3	706559	39 min	0.6148
4	1090039	45 min	0.6425
5	1309022	52 min	0.6413
6	1861826	1 h 03 min	0.6332
7	4128705	1 h 41 min	0.6066
8	4230666	1 h 45 min	0.5914
9	4343931	1 h 58 min	0.6060
10	4450385	2 h 05 min	0.6061

Tableau 4 Force de portance pour chaque maillage.

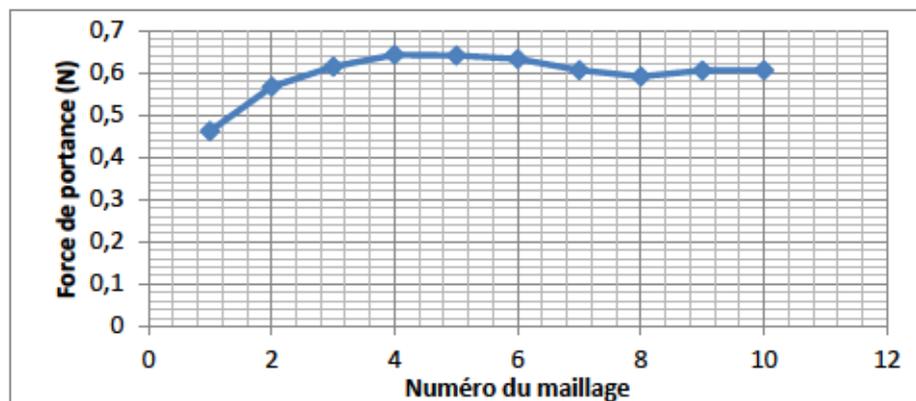


Figure 29 Volume de control

Du tableau (IV-2) et de la figure (IV-26), on observe que la force de portance se stabilise à partir du 7ème maillage, avec un temps de calcul de 1 heure 41 minutes et 4128705 mailles.

Nous allons donc poursuivre notre étude avec ce maillage.

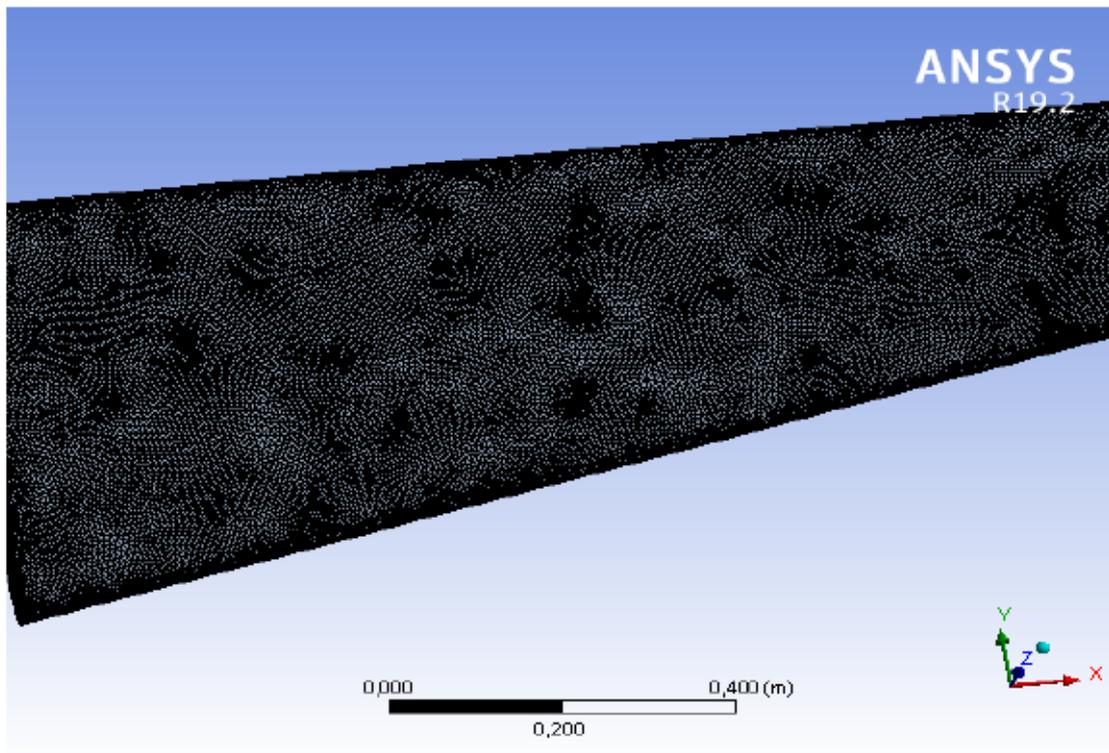


Figure 30 maillage de l'aile.

4.3 Modélisation et simulation numérique :

L'arrivée de l'ordinateur en tant qu'outil de travail dans le domaine des sciences de l'ingénieur, a conduit au développement d'une nouvelle branche appelée CFD qui, grâce à de nouvelles méthodes dites numériques, permet la résolution des équations de la MDF. En effet, ces équations sont d'une complexité telle qu'il est impossible de les résoudre analytiquement, sauf pour des applications simples faisant intervenir un certain nombre de simplifications.

La méthode CFD, se situe au carrefour de plusieurs disciplines scientifiques :

- La physique (mécanique des fluides, du solide, ...)
- Les mathématiques (analyse numérique, ...)
- L'informatique (programmation, utilisation, ...).

De ce fait, l'utilisateur de la CFD doit comprendre la façon dont ces trois disciplines interagissent entre elles, afin d'obtenir des résultats proches de la réalité.

Cette méthode est devenue un outil indispensable dans la phase de conception de tout système aéronautique ou spatial. L'avantage des méthodes numériques est que toutes les

quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement ; par contre, dans une expérimentation, l'obtention de ces quantités en tout point du champ est souvent impossible ou très difficile, par exemple, l'utilisation de la PIV (Particle Image Velocimetry) pour aboutir à de tels résultats, présente des limitations d'utilisation en particulier à l'aval immédiat d'un choc ou pour une couche de mélange.... , en revanche, la simulation numérique directe des équations de Navier-Stokes est encore limitée à des nombres de Reynolds modérés.

Un autre avantage de la CFD, est que cette méthode peut mettre en œuvre les équations générales de la mécanique des fluides, avec un minimum d'hypothèses, elle résout notamment les équations non-linéaires instationnaires et compressibles. La discrétisation des équations de Navier-Stokes et de conservation de la masse est faite sur des éléments quadrilatéraux ou triangulaires, réguliers ou non, selon la complexité de la géométrie, conduit à un système d'équations non-linéaires couplées qui est résolu de manière itérative [16].

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de calcul, nécessitent de connaître certaines notions théoriques de base, ces notions concernent la définition des principales équations régissant l'écoulement et la théorie de modélisation de la turbulence.

Dans ce chapitre, on a traité numériquement l'écoulement autour de la maquette de l'aile, par utilisation du code ANSYS FLUENT, les simulations sont effectuées pour des maillages réalisés sous DesignModler un des nombreux module d'Ansys, une comparaison entre les différentes densités de maillage a été traitée afin d'obtenir le maillage optimal, en termes de simplicité et précision adapté à notre étude.

4.3.1 Méthodes de résolution numérique

La majorité des problèmes rencontrés en mécanique des fluides sont régit par des équations différentielles de deuxième ordre. Du point de vue mathématique, ses équations peuvent être regroupé par une forme conservative en utilisant une variable dépendante Φ . En conséquence, pour chaque élément de fluide (supposé être un milieu continu), on a l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S_\Phi$$

The diagram shows the general differential equation being decomposed into four terms, each in a box:

- Taux D'augmentation de Φ dans l'élément fluide** (corresponds to $\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}$)
- Taux net de Φ en sortie de l'élément fluide** (corresponds to $\text{div}(\rho \vec{V} \Phi)$)
- Taux D'augmentation de Φ dû à la diffusion** (corresponds to $\text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi)$)
- Taux D'augmentation de Φ dû à la source** (corresponds to S_Φ)

Où Γ est le coefficient de diffusion et S_Φ est le terme source.

Les trois termes dans l'équation différentielle générale sont : le terme de convection, le terme de diffusion et le terme source [15]

Suivant les valeurs de Φ , on obtient les équations de conservations régissant un écoulement dans le tableau suivant :

Φ	Equation	
1	Conservation de la masse :	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = S_M$
	Bilan de quantité de mouvement :	
u	Selon x	$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u)) + S_{M_x}$
v	Selon y	$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}(v)) + S_{M_y}$
w	Selon z	$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}(w)) + S_{M_z}$
e	Conservation de L'énergie interne :	$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \text{div}(\rho e \vec{V}) = -p \text{div}(\vec{V}) + \text{div}(k \text{grad}(T)) + \phi + S_e$
	Equations d'état (gaz parfait) :	$p = \rho RT \quad \text{et} \quad e = C_v T$

Tableau 5 Equations régissant l'écoulement.

Avec V : vitesse de l'écoulement ($V = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$), ρ : la masse volumique, P : pression et T : température.

Concernant la modélisation numérique des écoulements, on rencontre généralement trois principales méthodes: les différences finies, les éléments finis et la méthode des volumes finis ; elles se résument comme suit :

Différences finies : Approximation des dérivées intervenant dans les équations à l'aide de développement en série de Taylor, ses principales caractéristiques sont :

- Mise en œuvre simple pour une géométrie simple ;
- Mise en œuvre difficile pour une géométrie complexe ;
- Pas toujours conservative ;
- Utilisation dans des codes de "recherche".

Éléments finis : Détermination d'un champ local à attribuer à chaque sous domaine (élément), pour que le champ global obtenu par juxtaposition de ces champs locaux, soit proche de la solution du problème (bilan global), cette méthode se caractérise par :

- Approche très "mathématique" ;
- Adaptation à une géométrie quelconque ;
- Difficultés pour résoudre les termes non-linéaires ;
- Très utilisée dans le domaine de Mécanique des Solides et pour des problèmes multi-physiques (Comsol, ex FemLab).

Volumes finis : Bilan local des flux dans un petit volume de contrôle, cette méthode présente les avantages suivants :

- Approche très "physique" : bilan des flux ;
- S'adapte à une géométrie quelconque ;
- Plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires hyperboliques ;
- Conservative (par sa formulation).

La méthode des volumes finis, représente actuellement la base de plusieurs codes de calculs performants dans le domaine de la mécanique des fluides et du transfert de chaleur, tels que *CFX*, *ANSYS-FLUENT*, *KARALIT*, *StarCCM+*, *ProStar (CD-Adapco)*, *Fire (AVL)*, *OpenFoam...*

Pour la méthode des volumes finis, plusieurs schémas de modélisation sont disponibles pour résoudre les équations précédentes : la simulation numérique directe (DNS), la simulation à grandes échelles (LES) et la simulation statistique de la turbulence (RANS). Les capacités des calculateurs, la complexité de la géométrie des modèles étudiés et le degré de précision recherché, sont des facteurs qui vont nous orienter vers l'un ou l'autre de ces schémas.

4.3.2 Modélisation des écoulements turbulents [16]

La turbulence est définie par les effets physiques qu'elle induit. On peut dire qu'un écoulement est turbulent si son mouvement est irrégulier et où les quantités transportées (masse, quantité de mouvement, espèces scalaires) fluctuent dans le temps et l'espace, c'est-à-dire que les propriétés du fluide présentent des variations aléatoires. On peut utiliser des moyennes statistiques, qui ont comme conséquence de caractériser des mécanismes de transport associés à la turbulence, cette caractéristique permet une modélisation de la turbulence. En effet, l'écoulement turbulent contient un grand nombre de tailles de vortex, la taille et la vitesse des grands tourbillons sont de l'ordre de celle de l'écoulement moyen.

Un écoulement est dit turbulent si le nombre de Reynolds Re est supérieur à 500.000 le long des surfaces et pour les écoulements autour des obstacles, si $Re > 20.000$.

Concernant les écoulements internes, ils sont turbulents lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 2300.

4.3.2.1 Simulation Numérique Directe (DNS)

La simulation numérique directe (DNS) résout directement les équations de transport, elle donne accès à toutes les informations physiques de l'écoulement, cependant elle nécessite des schémas numériques d'ordre élevé ainsi qu'une résolution très fine, donc des maillages très denses.

En aérodynamique, pour un cas d'écoulement turbulent à haut nombre de Reynolds ($Re = 3 \times 10^6$) autour d'une aile d'avion, le nombre de nœuds nécessaire pour un tel calcul est de l'ordre de 370×10^{12} et le temps de calcul CPU est proportionnel à $(Re)^3$.

Spalart [22] a démontré que pour réaliser une simulation numérique directe d'une couche limite turbulente, le maillage nécessite plus de 107 points, tandis que Moin et Kim évaluent à 1016 le nombre de points pour la simulation directe d'un avion en vol.

La méthode DNS, nécessite alors, l'utilisation de ressources informatiques qui

dépassent très largement les capacités des supercalculateurs actuels, puisqu'une multiplication du nombre de Reynolds par 10 implique à multiplier le maillage par $10^{9/4}$ (≈ 180) et le temps de calcul par 1000 ; donc c'est une méthode limitée à des écoulements à faibles nombres de Reynolds et pour le calcul des quantités inaccessibles expérimentalement.

4.3.2.2. Simulation à grandes échelles LES (Large Eddy Simulation)

Le calcul avec cette modélisation est basé sur une résolution directe des équations de Navier-Stokes par rapport à l'espace, pour les grosses structures et sur une modélisation des petites échelles dénommées alors "sous-maille".

Le filtre est ainsi mis en place et l'action de la turbulence sous-maille conduit nécessairement à l'introduction d'une viscosité turbulente ν_t . Les équations ne sont plus moyennées, mais filtrées. Cette méthode est moins coûteuse que la DNS, mais l'effort numérique reste important.

4.3.2.3. Simulation statistique de la turbulence RANS

La méthode RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) est la plus utilisée dans l'industrie, la modélisation statistique de la turbulence conduit à la détermination des valeurs moyennées des inconnues. Les grandeurs caractérisant l'écoulement sont décrites comme la somme d'une partie moyenne et d'une partie fluctuante $u = \bar{u} + u'$

Plusieurs modèles de turbulence sont disponibles, citons à titre d'exemple : le modèle de longueur de mélange de Prandtl (1925), le modèle Spalart-Allmaras, le modèle $k-\epsilon$ et le modèle $k-\omega$.

4.3.2.4. Le modèle Spalart-Allmaras

Le modèle de Spalart-Allmaras, est un modèle relativement simple qui résout l'équation de transport pour la viscosité turbulente modifiée. Ceci représente une classe relativement nouvelle, de modèles à une équation dans lesquels il n'est pas nécessaire de calculer l'échelle de longueur liée à l'épaisseur locale de la couche de cisaillement.

Le modèle de Spalart-Allmaras est principalement destiné pour les applications de l'aérodynamique. Il a été démontré qu'il donne de bons résultats pour le calcul des couches limites, soumises aux gradients de pression inverses. Il gagne également en popularité dans des applications de turbomachines.

Sous sa forme originelle, le modèle de Spalart-Allmaras est un modèle dédié aux écoulements à faible nombre de Reynolds. Dans FLUENT, le modèle de Spalart-Allmaras a été implémenté pour utiliser des lois de paroi quand le maillage n'est pas suffisamment fin. Ceci pourrait rendre ce modèle comme étant le choix le plus approprié pour les simulations basiques, utilisant un maillage grossier quand le calcul précis des écoulements turbulents n'est pas exigé. En outre, les gradients proches des parois des variables transportées dans ce modèle, sont beaucoup plus petits comparés à ceux des modèles $k-\epsilon$ et $k-\omega$. Ceci rend le modèle moins sensible aux erreurs numériques quand le maillage type couche limite n'est pas utilisé près des parois.

Cependant, le modèle de Spalart-Allmaras est relativement récent, et à nos jours, aucune contestation n'est faite concernant sa convenance à tous les types d'écoulements. Toutefois, les modèles à une équation, sont souvent critiqués pour leur incapacité à s'accommoder rapidement avec les changements de l'échelle de longueur, par exemple, quand la nature de l'écoulement change brusquement d'un état confiné à un état d'écoulement libre.

Pour poursuivre notre étude aérodynamique du drone, nous faisons appel au logiciel ANSYS Fluent.

Ce logiciel permet d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide.

Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calculs. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, $K-\epsilon$, $K-\omega$, S-A, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence.

Une fois que notre maillage prêt et enregistré, on ouvrira ce fichier dans Fluent comme le montre la figure (IV-16).

Avant de lancer la simulation on doit configurer différents réglages pour que notre simulation s'approche le plus possible de la réalité.

4.4 Modélisation structurale :

4.4.1 Introduction :

L'analyse statique est une procédure essentielle pour concevoir une structure. En utilisant l'analyse statique, la réponse de la structure aux forces externes appliquées est obtenue. De plus, l'analyse statique est effectuée lorsque la structure est soumise à des déplacements externes, tels que des tassements de support différentiels. La réponse de la structure comprend des forces/moments internes et des contraintes internes qui sont utilisés dans le processus de conception. En général, en utilisant un schéma d'analyse structurelle basé sur des éléments finis, on obtient d'abord, les déplacements inconnus à partir des équations d'équilibre d'un système actif, puis les forces et contraintes externes et internes sont calculées à partir des équations d'équilibre global de la structure. Cependant, pour une structure soumise à des déplacements externes, les déplacements prescrits présentent des incertitudes en raison d'informations limitées ou d'erreurs de mesure qui modifient la réponse de la structure.

4.4.2 Analyse structurelle statique

Principes de base de l'analyse statique linéaire

Pour une analyse structurelle statique linéaire, les déplacements $\{x\}$ sont obtenus à l'aide de l'équation matricielle suivante (déduite de la modélisation numérique) :

$$[K] \{x\} = \{F\}$$

Hypothèses :

- $[K]$ est constant :
 - Le comportement élastique linéaire du matériau est supposé.
 - La théorie de la petite déviation est utilisée.
 - Certaines conditions aux limites non linéaires peuvent être incluses.
- $\{F\}$ est appliqué statiquement :
 - Aucune force variant dans le temps n'est prise en compte.
 - Aucun effet d'inertie (masse, amortissement) n'est inclus.

La résolution de l'équation ci-dessus fournit les déplacements relatifs à une charge donnée, dans le matériau supposé être élastique. Dans notre cas, il s'agit de l'action du vent en intensité et direction. Ensuite, selon un post calcul, par l'entremise de les relations reliant les déformations aux déplacements et les contraintes aux déplacements, nous obtenons les déformations et les contraintes induites dans les pales de drones composites.

Chapitre 5

Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats numériques obtenus à l'aide de logiciel Fluent. À cet effet, on présente les principales caractéristiques aérodynamiques du drone à savoir : les coefficients de portance et de trainée ainsi que la courbe polaire et la courbe de la finesse, aussi bien calculé que mesuré.

5.1 Résultats numériques dans Fluent :

Dans cette étude, nous avons sélectionné différentes vitesses : 20, 28, 37.5 et 44 m/s. Pour ces différentes vitesses, la simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent a donné les résultats suivants :

Les figures (31), (32), (33) et (34), montrent respectivement les évolutions des coefficients de portance, de trainée ainsi que la courbe polaire et la courbe de finesse.

Les coefficients de portance C_l et de trainée C_d montrés respectivement sur les figures (31) et (32) présente dans l'ensemble une allure similaire à celle obtenue dans la littérature.

Le coefficient de portance C_l varie linéairement dans la plage des valeurs d'incidence de -5° à 10° , ce qui est conforme à ce qui est prévu par la théorie des profils et quel que soit la vitesse d'écoulement (correspondant à un nombre de Reynolds > 200000), lorsque l'incidence augmente et devient supérieur à 10° la courbe de portance commence à diminuer en passant par un maximum d'environ 1.3 pour $\alpha = 15^\circ$, à partir de cette valeur la courbe montre une tendance à la baisse qui correspond à la phase de décrochage. Par ailleurs on observe qu'à une incidence $\alpha = -5^\circ$ le coefficient de portance s'annule ce qui est conforme à la théorie des profils cambrés, on remarque aussi qu'à incidence nulle $\alpha = 0$, le coefficient de portance vaut 0.6. On observe aussi comme résultat principal l'absence d'influence du nombre de Reynolds dans la plage d'incidence de -5° à $+10^\circ$ conformément aux résultats expérimentaux trouvés dans la littérature. [17]

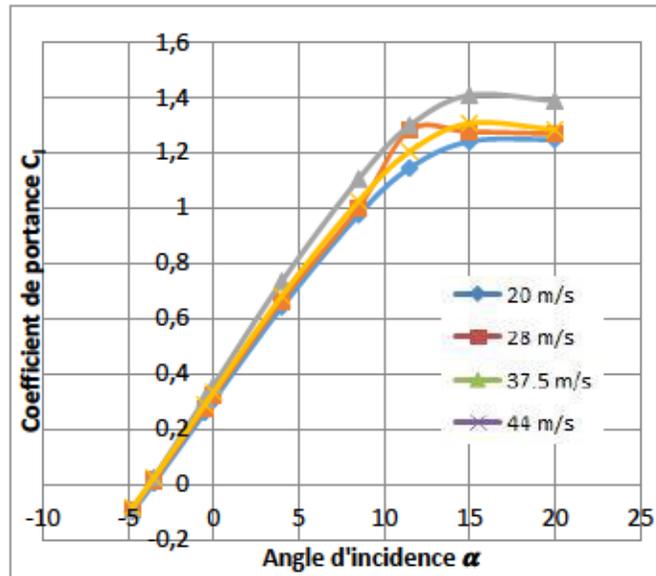


Figure 31 Courbes C_l .

Le coefficient de trainée C_d , présente dans notre cas une évolution différente de celle trouvée dans la littérature, essentiellement autour des incidences élevées ($\alpha > 10^\circ$), où la courbe expérimentale donne une augmentation subite de la trainée à partir de l'incidence de 10° . Ce résultat pourrait s'expliquer : soit par une erreur de calcul qu'on n'a pas pu détecter au milieu de l'important volume de calcul des simulations, ou à un calcul erroné de la surface allaire qui a été mal choisi.

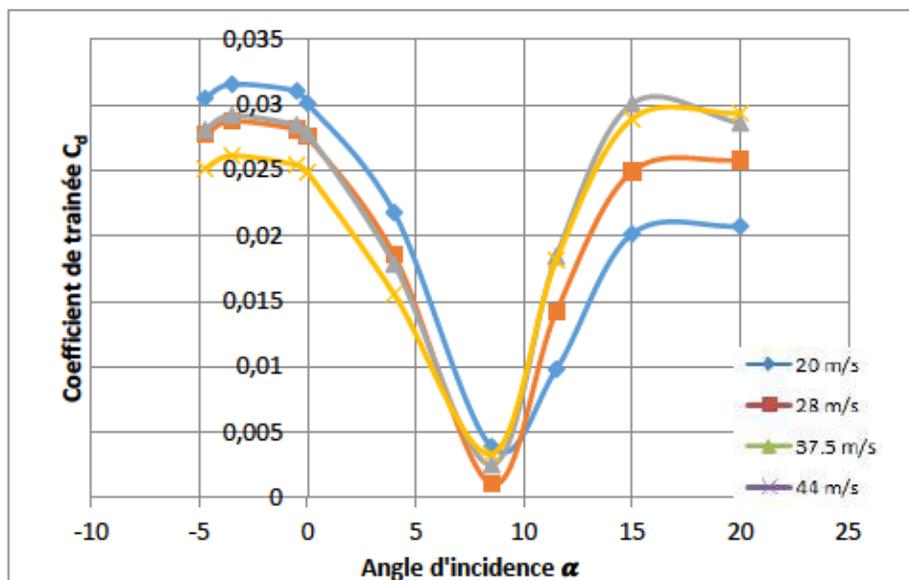


Figure 32 Courbes C_d .

On présente aussi sur les figures (V-3) et (V-4), respectivement la courbe de la polaire et la courbe de la finesse, qui représente la référence d'un vol plané, plus la valeur est élevée et plus les caractéristiques sont bonnes, elle traduit aussi l'assiette de vol et la distance parcourue par le drone. Ces deux courbes traduisent explicitement l'évolution des coefficients de portance C_l et de trainée C_d et sont entacher des mêmes erreurs que celle cité précédemment sur le coefficient de trainée C_d .

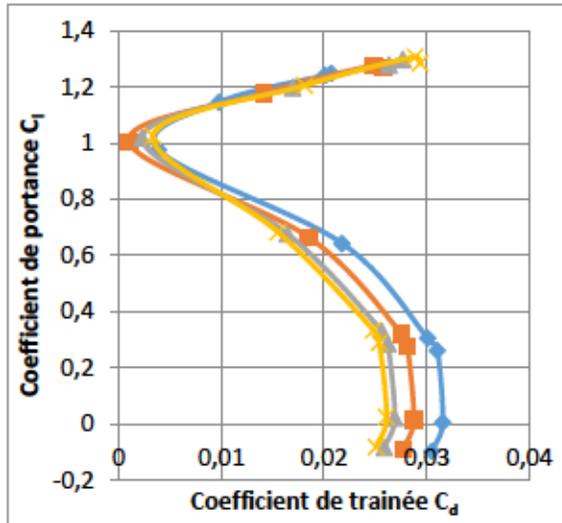


Figure 33 Courbes polaires.

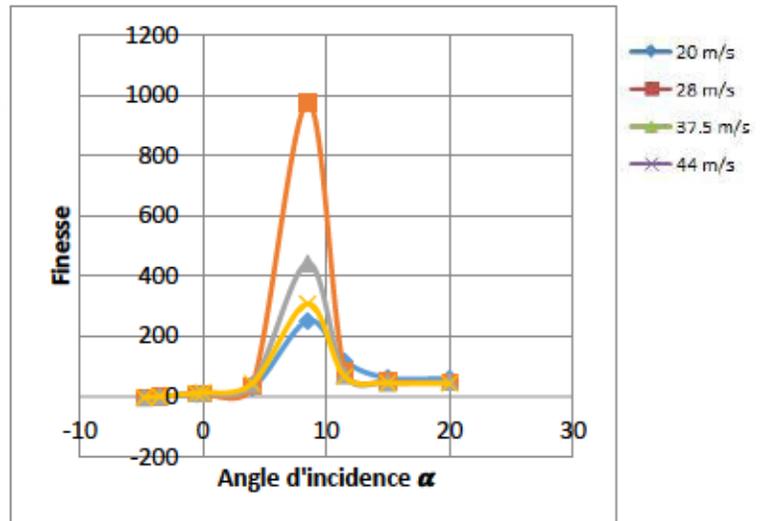


Figure 34 Courbes finesse.

Les observations faites sont résumées dans les points suivants :

- Les courbes de portance et de trainée ont presque la même allure pour les 4 vitesses, et la trainée n'est jamais nul quel que soit l'angle d'incidence ;
- La portance est positive à 0° pour toutes les vitesses ;
- La portance maximale est de : $C_l 20 = 1.248$ à 20° , $C_l 28 = 1.2812$ à 11.5° , $C_l 37.5 = 1.2955$ à 15° et $C_l 44 = 1.3066$ à 15° ;
- La trainée minimale est de : $C_d 20 = 0.0038$, $C_d 28 = 0.00102$, $C_d 37.5 = 0.002$ et $C_d 44 = 0.0033$;
- On ne perçoit pas l'angle de décrochage à 20 m/s , mais il est détecté entre $[15^\circ - 20^\circ]$ pour les 3 autres vitesses ;
- Pour ce qui est de la polaire, on remarque que les courbes ont presque la même tendance pour toutes les vitesses.

5.2 Résultats numériques dans la structure statique :

En tout il y a plusieurs calculs qui ont été effectués dans des conditions et matériaux différents. D'abord on utilisera 4 matériaux qu'on étudiera sous différente vitesse à 20m/s, 28m/s, et 37.5m/s. puis variations de l'angle d'attaque -4.75° , 0° , 7° , et 15° .

La première étude a été effectuée avec les 4 matériaux à un angle de 0° et avec une vitesse de 20m/s. (convergence fluent en ... 74 itérations).

Pour toutes les figures suivantes en représentera l'aluminium puis les bio-composites dans l'ordre suivent Bio1,2,3 en bas à $t = 1s$.

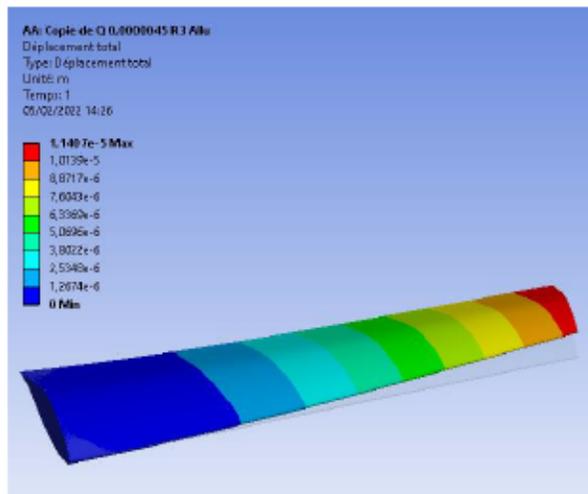


Figure 35 déplacement total (Aluminium).

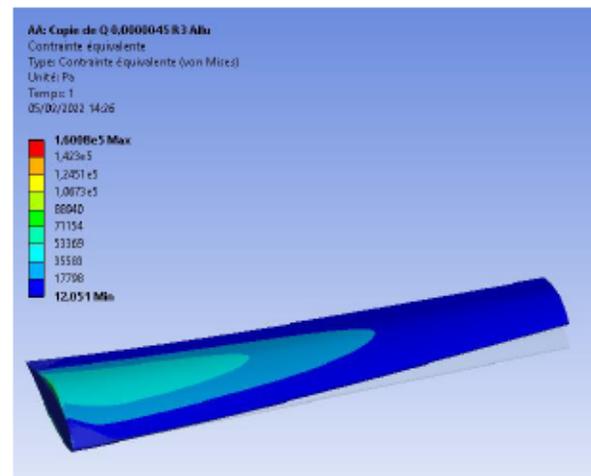


Figure 36 Contrainte équivalente (Aluminium).

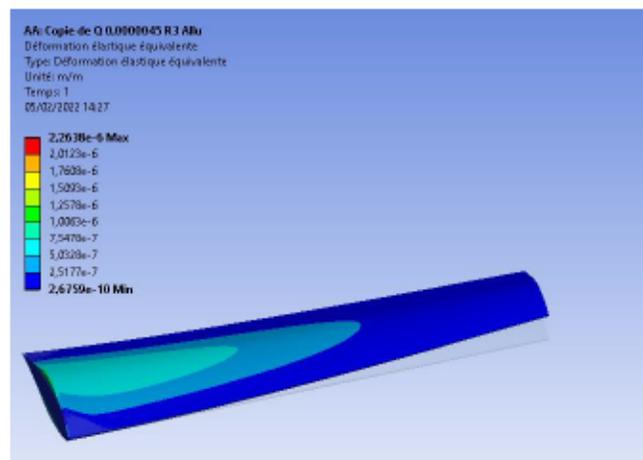


Figure 37 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

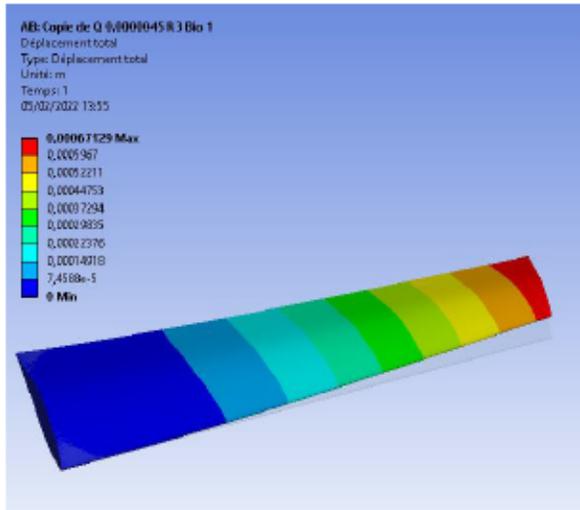


Figure 39 Déplacement total (Bio1).

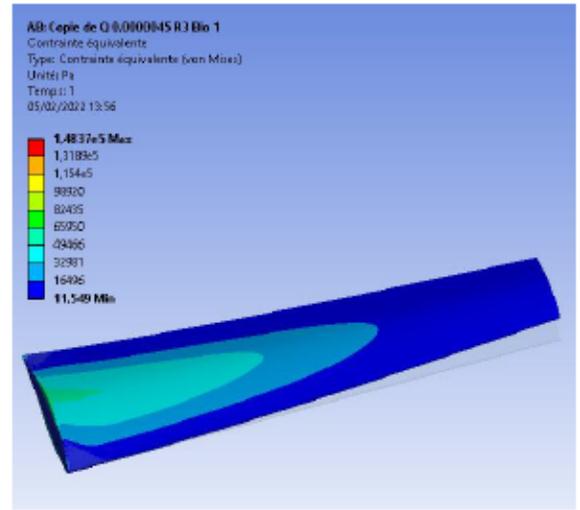


Figure 38 Contrainte équivalente (Bio1).

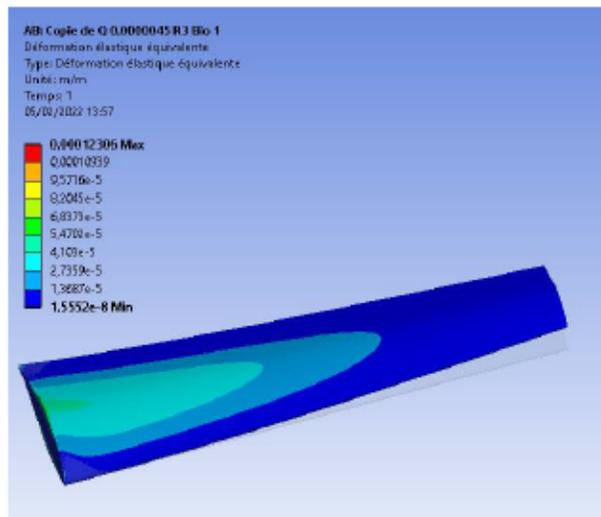


Figure 40 Déformation élastique équivalente (Bio1).

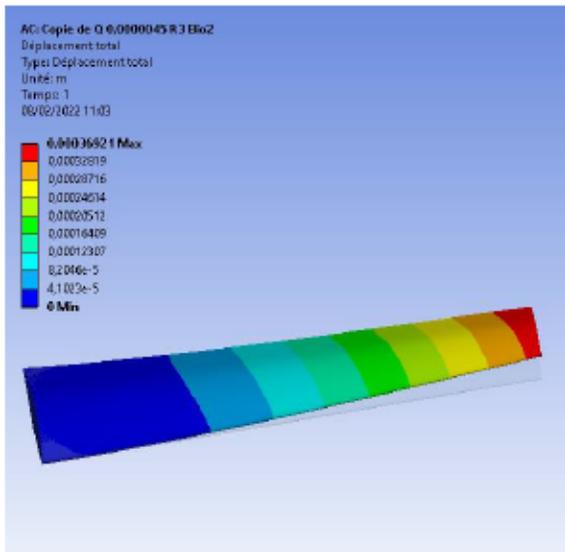


Figure 41 déplacement total (Bio2).

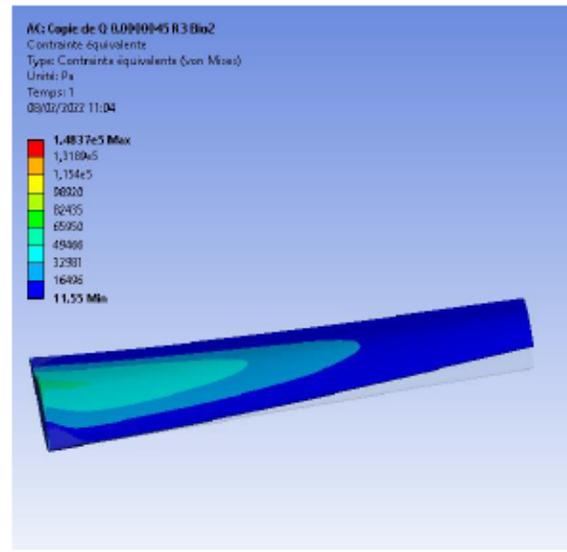


Figure 42 Contrainte équivalente (Bio2).

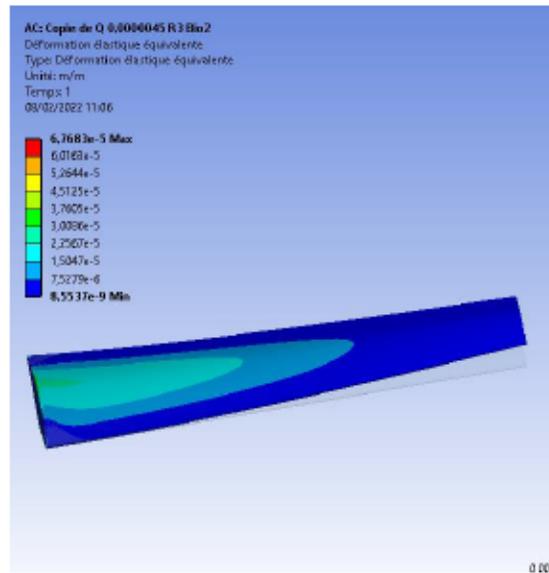


Figure 43 Déformation élastique équivalente (Bio2).

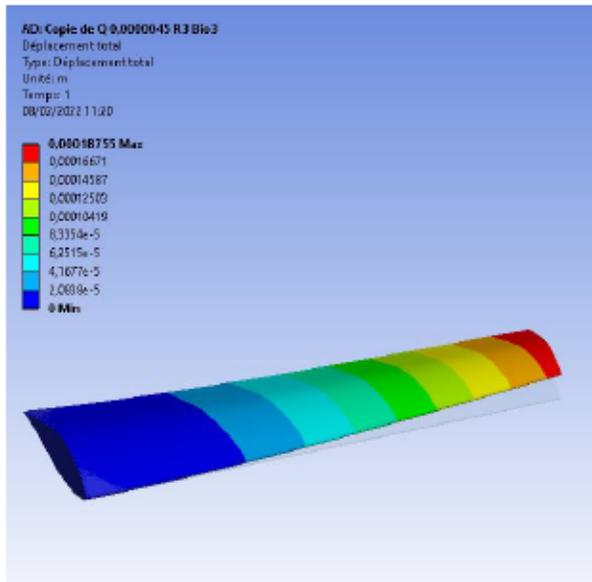


Figure 44 Déplacement total (Bio3).

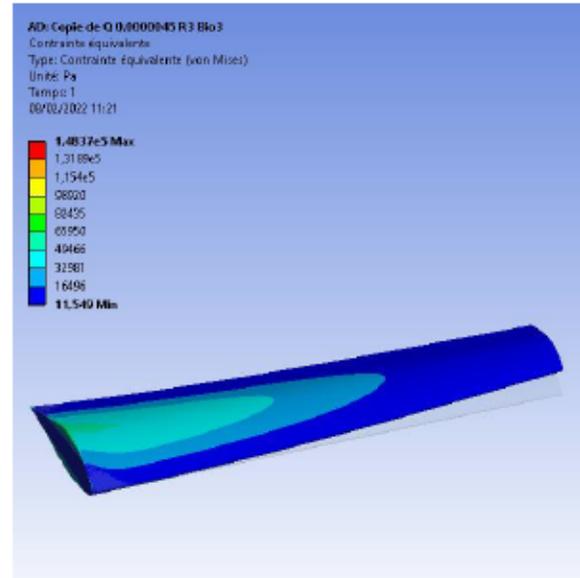


Figure 45 Contrainte équivalente (Bio3).

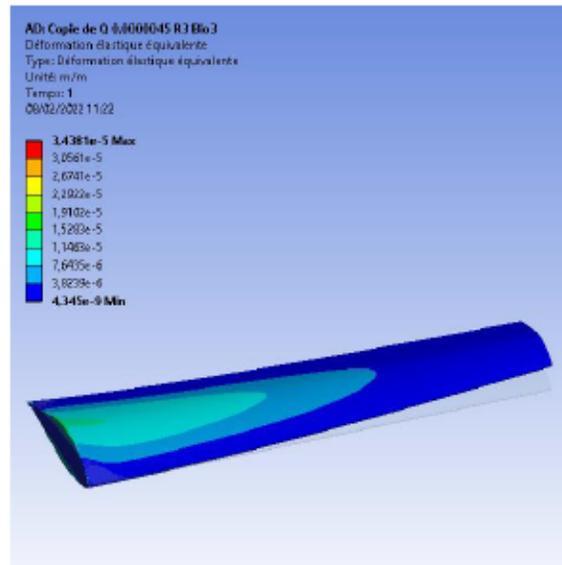


Figure 46 Déformation élastique équivalente (Bio3).

On observe qu'à l'application du vent sur l'aile, les contraintes maximales de Von Mises sont supérieures pour l'aluminium ce qui est compréhensible car il a une limite élastique très élevée cependant ils sont égaux pour ce qui concerne les 3 bio composites, par

ailleurs pour le déplacement en remarque l'aluminium possède le plus petit déplacement puis viens Bio3 puis Bio2 et enfin Bio1.

Déplacement total (m)				
	Temps (s)	Min (m)	Max (m)	Med (m)
Bio 1	1	0	6,71E-04	2,37E-04
Bio 2	1	0	3,69E-04	1,31E-04
Bio 3	1	0	1,88E-04	6,63E-05
Allu	1	0	1,14E-05	4,02E-06

Tableau 6 Déplacement total (m).

Contrainte équivalente (Pa)				
	Temps (s)	Min (Pa)	Max (Pa)	Med (Pa)
Bio 1	1	11,549	148370	11790
Bio 2	1	11,55	148370	11790
Bio 3	1	11,549	148370	11790
Allu	1	12,051	160080	11776

Tableau 7 Contrainte équivalente (Pa).

D'après le tableau présenté ci-dessus on notera que les contraintes équivalentes sont toutes égales pour les Bio-composites et ne varie pas énormément comparativement à celle de l'aluminium, c'est pour cela que nous ajouterons un autre critère de comparaison « Déformation élastique équivalente ».

Déformation élastique équivalente (m/m)				
	Temps (s)	Min (m/m)	Max (m/m)	Med (m/m)
Bio 1	1	1,56E-08	1,23E-04	9,78E-06
Bio 2	1	8,55E-09	6,77E-05	5,38E-06
Bio 3	1	4,35E-09	3,44E-05	2,73E-06
Allu	1	2,676 E-10	2,26E-06	1,665 E-07

Tableau 8 Déformation élastique équivalente (m/m).

On notera du tableau présenté ci-dessus l'évolution de la déformation élastique de la plus forte à la plus faible (de bio1 à bio 3), d'où l'on notera que le Bio3 se rapproche le plus de l'aluminium.

On remarque des images précédentes et les tableaux si dessus, que le matériau Bio 3 se rapproche le plus de l'aluminium.

Pour la suite de notre étude on se focalisera donc sur la comparaison entre le bio-composite numéro 3 et l'aluminium, pour les différentes vitesses et angle, on choisira la vitesse de 28m/s et angle d'incidence de 0°.

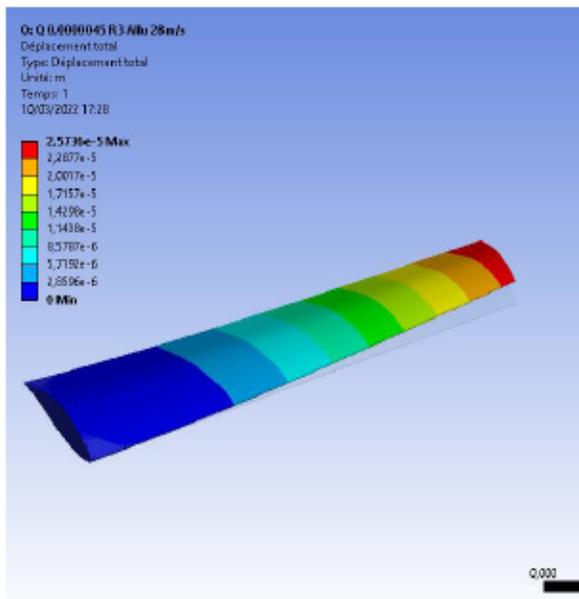


Figure 47 Déplacement total (Aluminium).

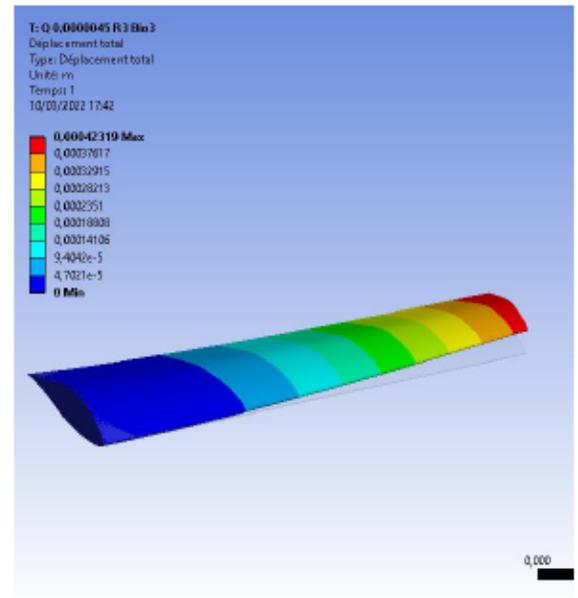


Figure 48 Déplacement total (Bio3).

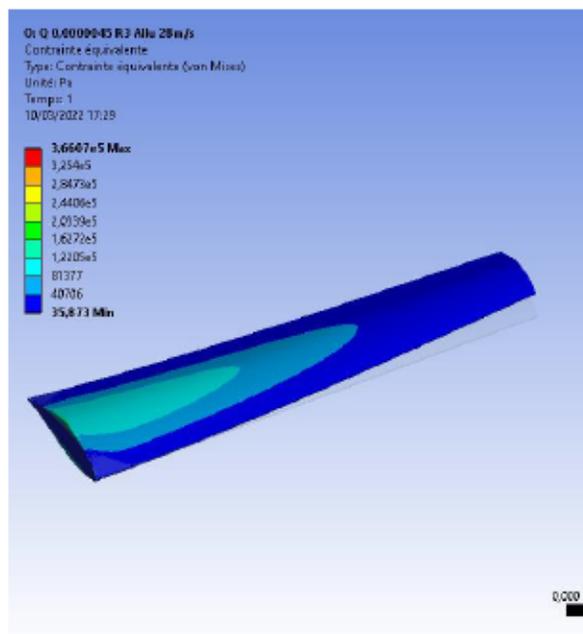


Figure 50 Contrainte équivalente (Aluminium).

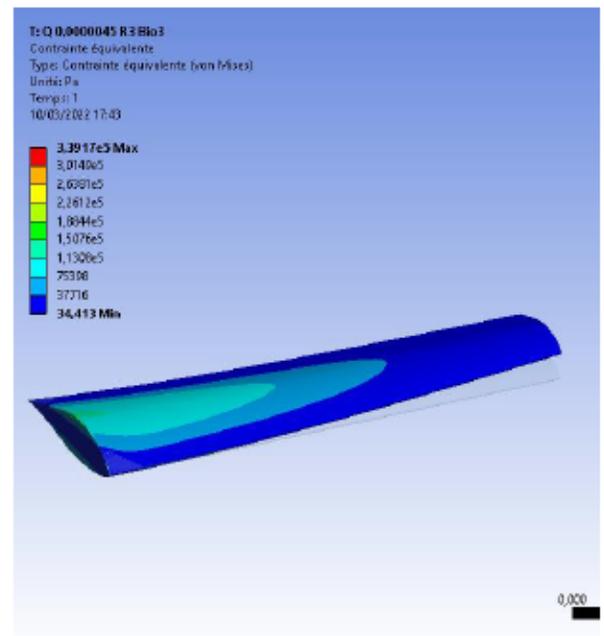


Figure 49 Contrainte équivalente (Bio3).

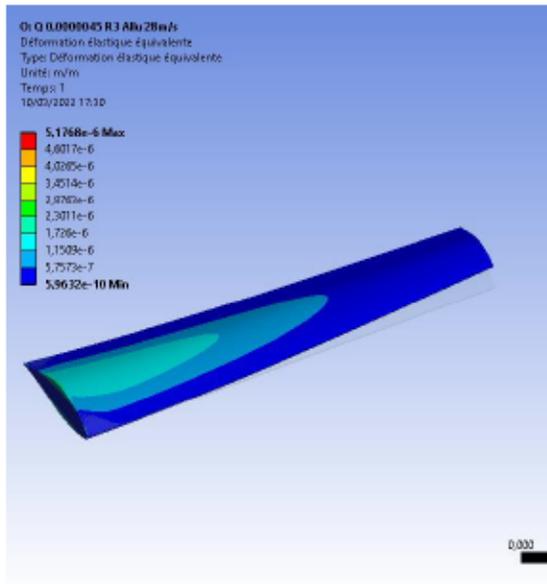


Figure 51 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

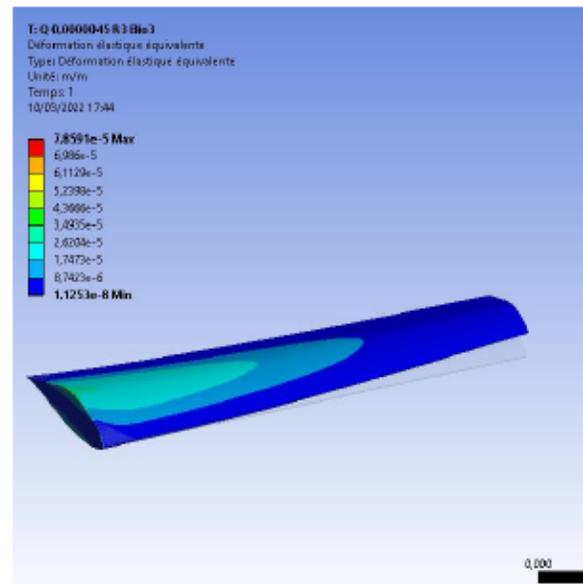


Figure 52 Déformation élastique équivalente (Bio3).

Ci-dessous voici les valeurs résumées sous forme de tableau des résultats obtenue après 21 000 itérations lors de nos simulations pour une vitesse e 28m/s a angle d'attaque nul.

	Aluminium			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	2,57E-05	9,09E-06
Contrainte équivalente (Pa)	1	35,873	3,66E+05	26604
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	5,96E-10	5,18E-06	3,76E-07

Temps (s)	Bio 3		
	min	max	med
1	0	4,23E-04	1,50E-04
1	34,413	3,39E+05	26634
1	1,13E-08	7,86E-05	6,17E-06

On remarque du tableau si dessus, que la [Tableau 9 Tables des valeurs : 28m/s, 0°](#) différence entre notre matériaux Bio3 et

l'aluminium est de 1/10 pour les déplacement totaux et Contrainte équivalente, certes ce nombre est relativement grand mais assimilé a de très faible valeur n'aura pas une réelle incidence sur notre modèle étudié.

Dans cette section on utilisera les paramètres suivant 37.5m/s a angle d'incidence nul (0°).

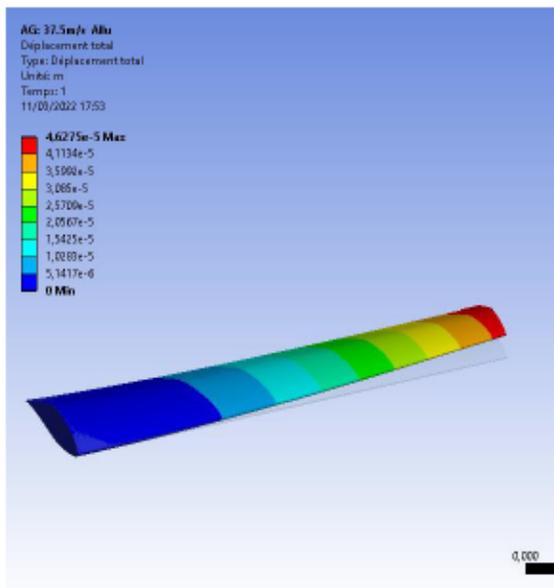


Figure 53 Déplacement total (Aluminium).

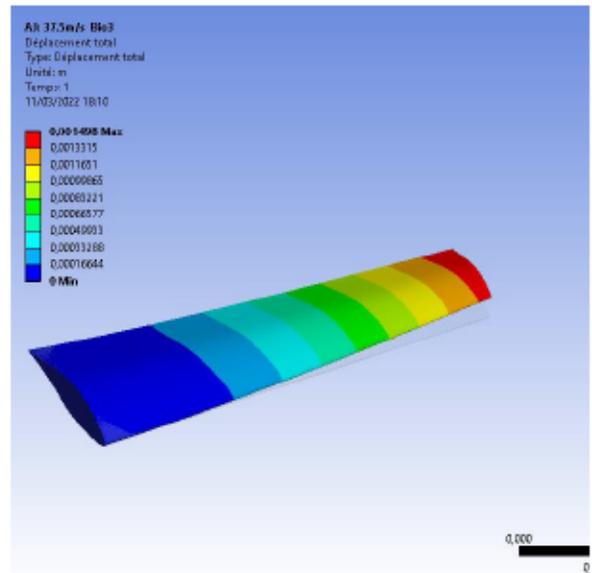


Figure 54 Déplacement total (Bio3).

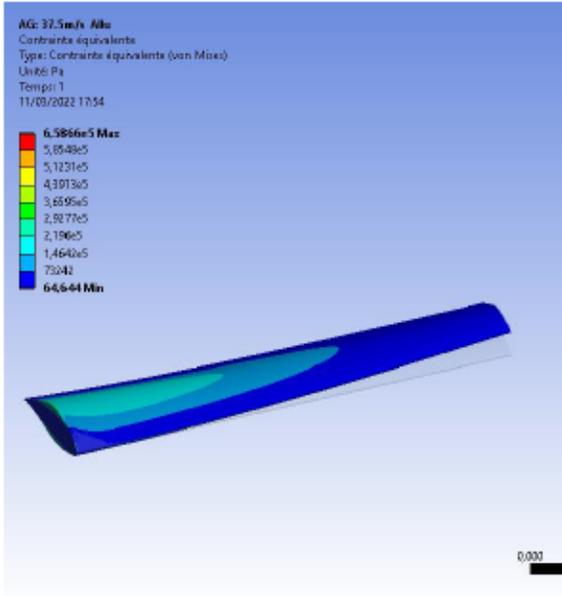


Figure 55 Contrainte équivalente (Aluminium).

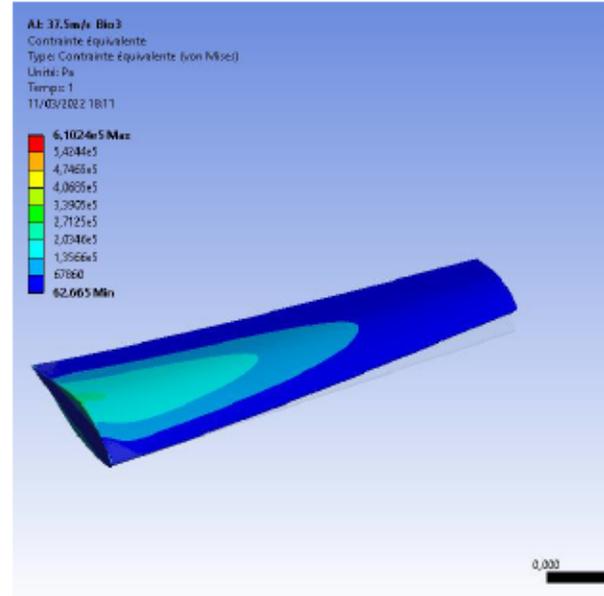


Figure 56 Contrainte équivalente (Bio3).

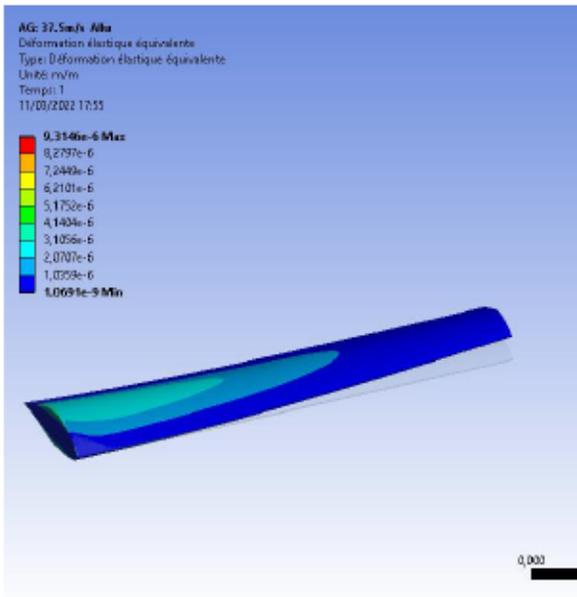


Figure 58 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

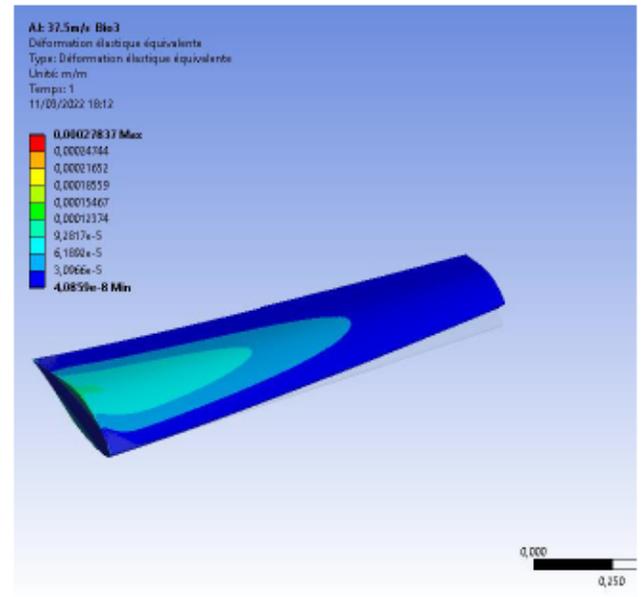


Figure 57 Déformation élastique équivalente (Bio3).

Ci-Dessous voici les valeurs résumées sous forme de tableau des valeurs obtenue après 12 000 itérations lors de nos simulations pour une vitesse de 37.5 m/s a angle d'incidence nul (0°).

	Allu			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	4,63E-05	1,64E-05
Contrainte équivalente (Pa)	1	64,644	6,59E+05	47833
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	1,07E-09	9,31E-06	6,76E-07

	Bio 3			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	1,50E-03	5,30E-04
Contrainte équivalente (Pa)	1	62,665	6,10E+05	47887
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	4,09E-08	2,78E-04	2,18E-05

Tableau 10 tables des valeurs : 37.5m/s, 0°.

Du tableau si dessus, on constatera que la différence entre l'aluminium et le matériaux Bio3 est similaire par rapport au tableau vu précédemment c'est-à-dire que les déformations sont tellement faibles que la différence entre les deux matériaux peut être négligé.

Dans cette section on utilisera les paramètre suivant 37.5m/s, angle d'incidence 7°.

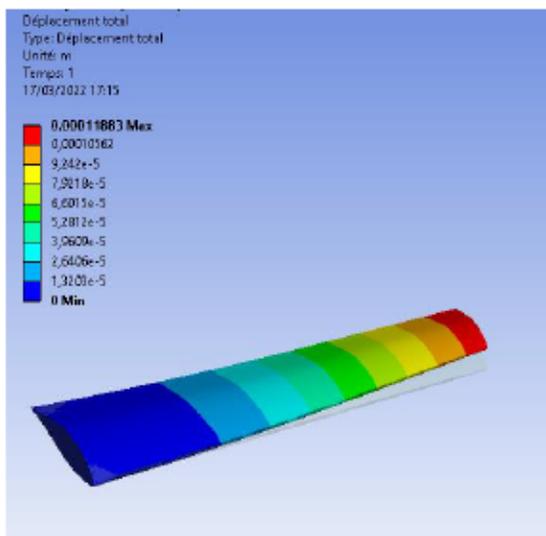


Figure 60 Déplacement total (Aluminium).

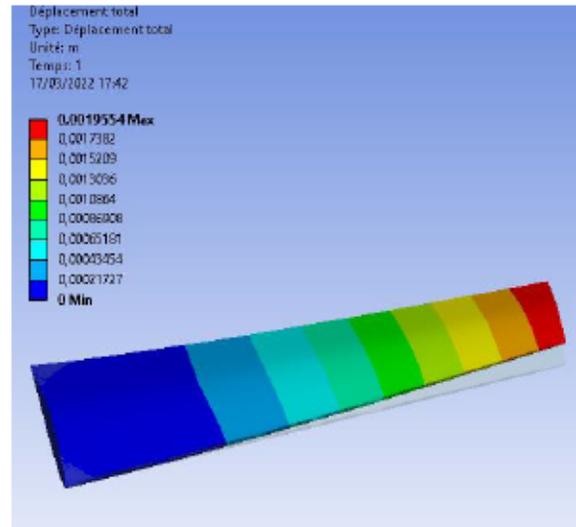


Figure 59 Déplacement total (Bio3).

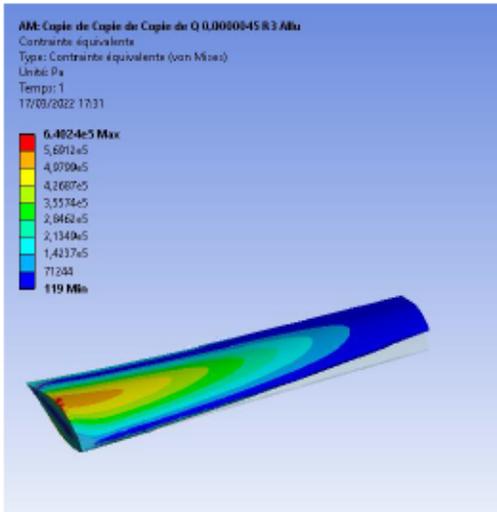


Figure 62 Contrainte équivalente (Aluminium).

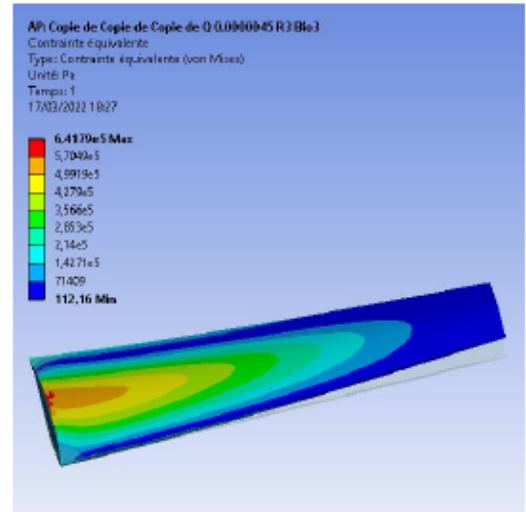


Figure 61 Contrainte équivalente (Bio3).

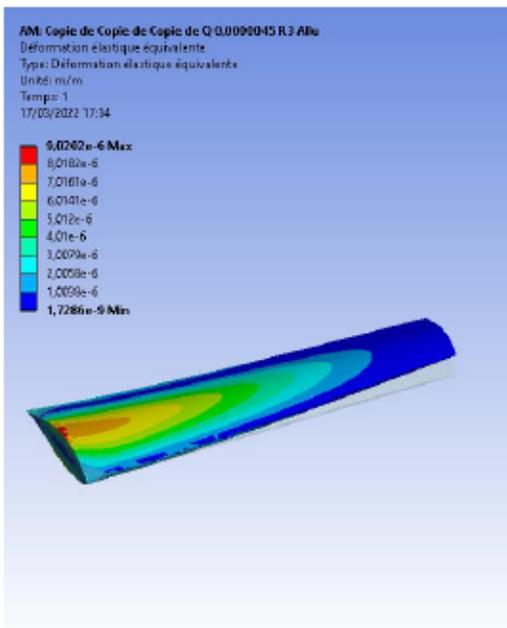


Figure 63 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

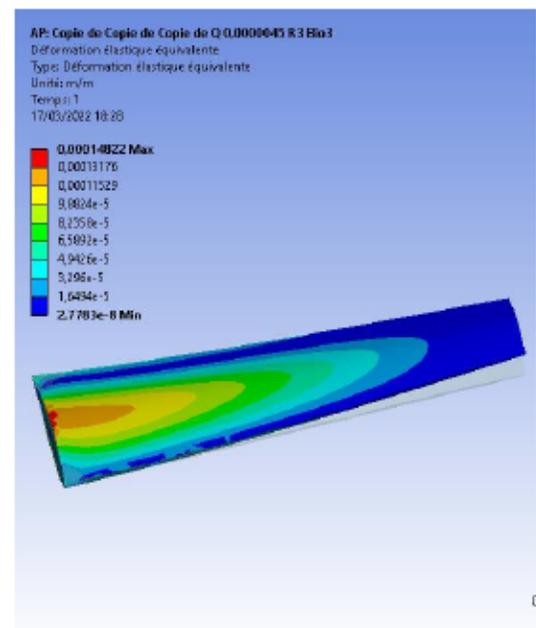


Figure 64 Déformation élastique équivalente (Bio3).

Ci-dessous voici les valeurs résumées sous forme de tableau des valeurs obtenue après 10 000 itérations lors de nos simulations pour une vitesse de 37.5 m/s a angle d'attaque de 7 °.

	Allu			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	1,19E-04	4,44E-05
Contrainte équivalente (Pa)	1	119	6,40E+05	1,23E+05
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	1,73E-09	9,02E-06	1,84E-06

	Bio 3			
	Temps (s)	min	max	med
	1	0	1,96E-03	7,31E-04
	1	112,16	6,42E+05	1,23E+05
	1	2,78E-08	1,48E-04	3,02E-05

Tableau 11 Tables des valeurs : 37.5m/s, 7°.

Des résultats obtenus on remarque que la différence des valeurs obtenue pour le déplacement total et la Déformation élastique équivalente pour aluminium et le bio3 et d'autant plus grand qu'a incidence nul, ceci s'explique du fait qu'a angle d'incidence positif l'aile n'ai pas en mesure de fondre l'air et donc subit la force de l'écoulement d'air sur la partie intrados et cela s'exprime sous forme de déformations plus importante (déplacement, flexion, déformation élastique ...).

Dans cette partie de l'étude on se focalisera sur la variation de l'angle d'incidence et on utilisera les paramètres suivants 37.5m/s a angle d'incidence 15 °. Apres simulations on obtient les résultats suivants.

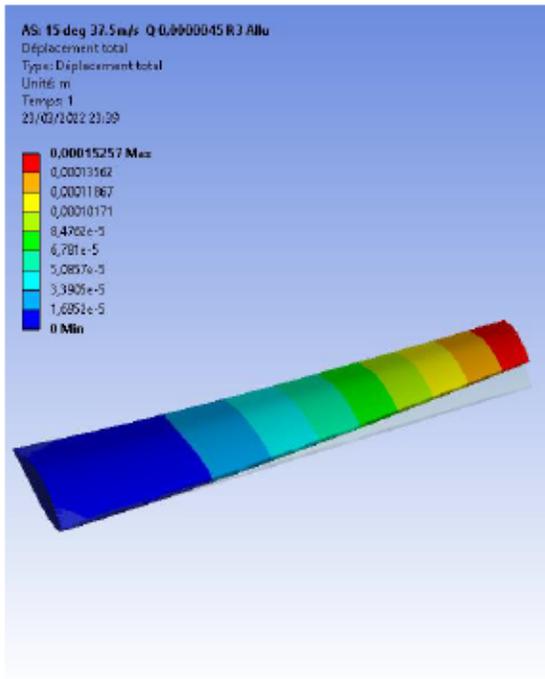


Figure 65 Contrainte équivalente (Aluminium).

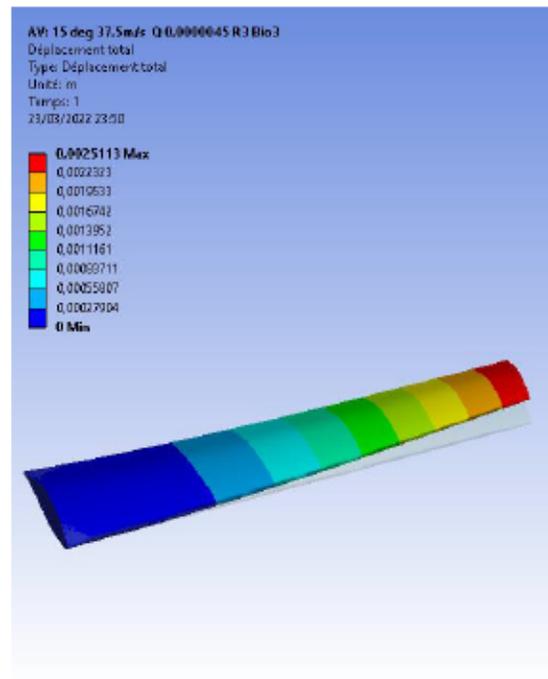


Figure 66 Contrainte équivalente (Bio3).

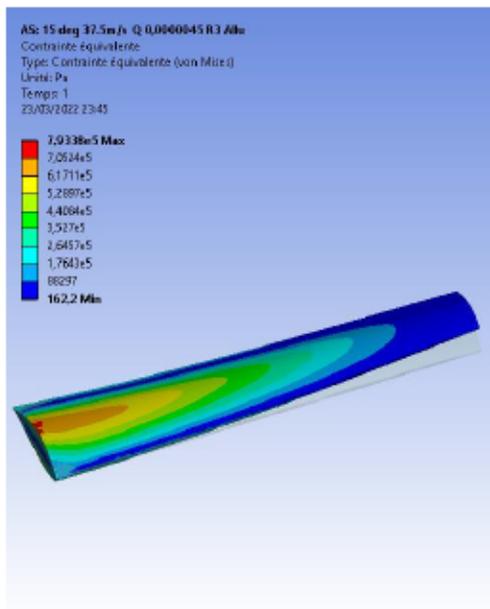


Figure 68 Contrainte équivalente (Aluminium).

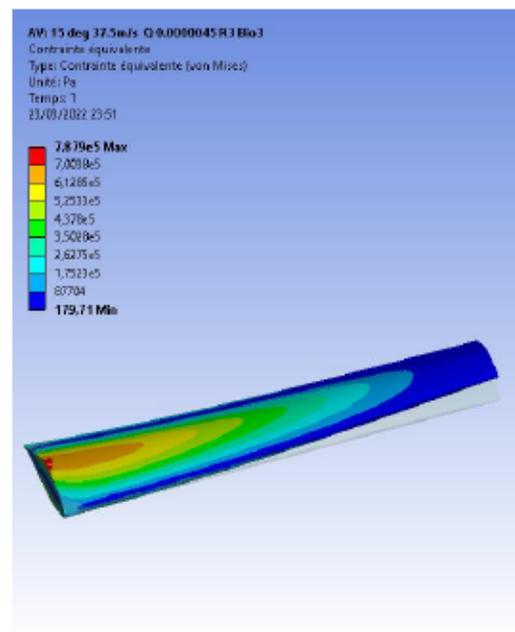


Figure 67 Contrainte équivalente (Bio3).

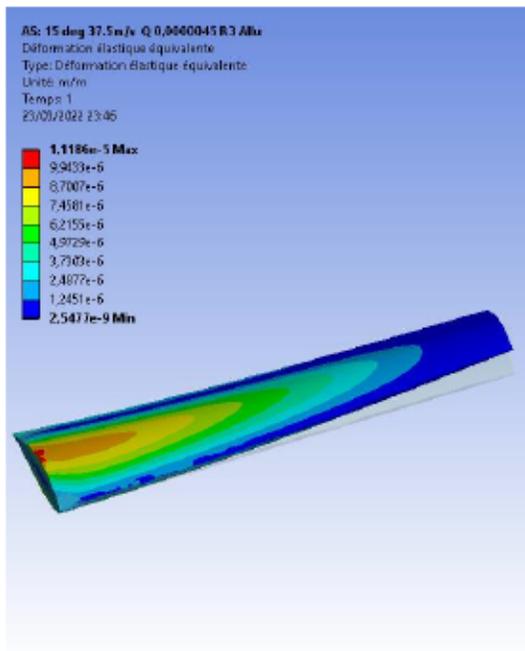


Figure 70 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

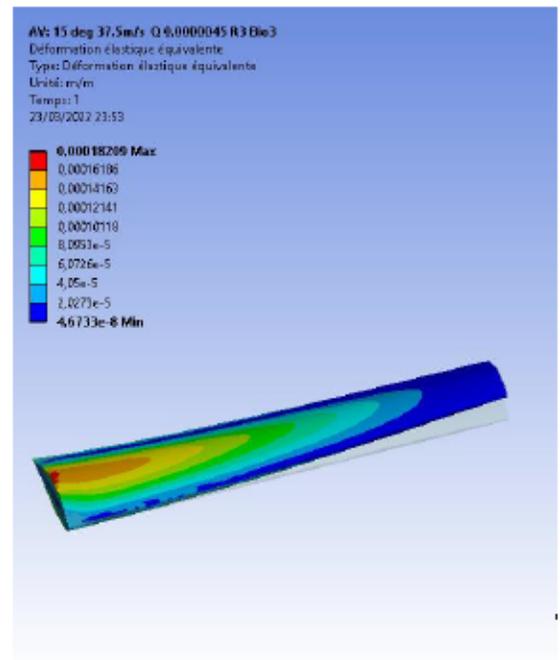


Figure 69 Déformation élastique équivalente (Bio3).

Ci-dessous voici les valeurs résumées sous forme de tableau des valeurs obtenue lors de nos simulations pour une vitesse de 37.5 m/s a angle d'attaque de 15 °.

	Allu			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	1,53E-04	5,72E-05
Contrainte équivalente (Pa)	1	162,2	7,93E+05	1,59E+05
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	2,55E-09	1,12E-05	2,37E-06

Temps (s)	Bio 3		
	min	max	med
1	0	2,51E-03	9,43E-04
1	179,71	7,88E+05	1,59E+05
1	4,67E-08	1,82E-04	3,88E-05

Tableau 12 Tables des valeurs : 37.5m/s, 15°.

Le même constant sera fait sur les résultat obtenue lors de cette simulation comme expliqué précédemment, on notera que les valeurs sont plus importantes et cela est dû au fait que l'angle d'incidence et d'autant plus grand (15°) comparativement au test effectué précédemment (7°).

Dans cette section on utilisera les paramètres suivant 37.5m/s, angle d'incidence négatif -4.75° .

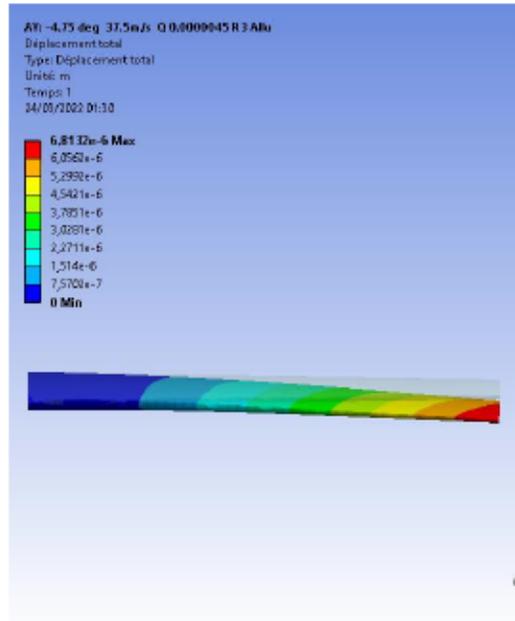


Figure 72 Déplacement total (Aluminium).

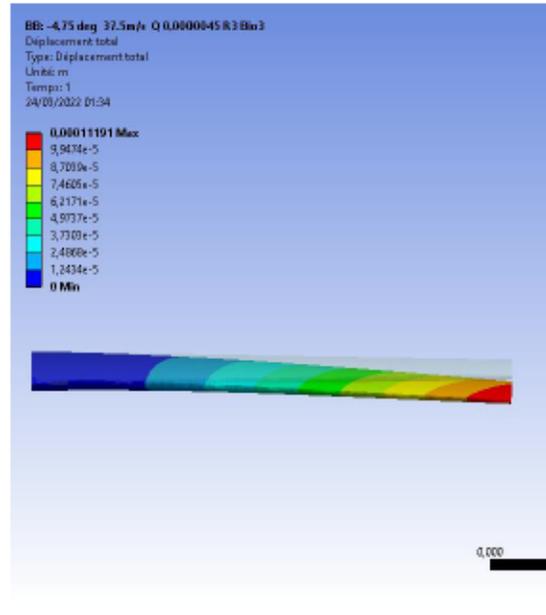


Figure 71 Déplacement total (Bio3).

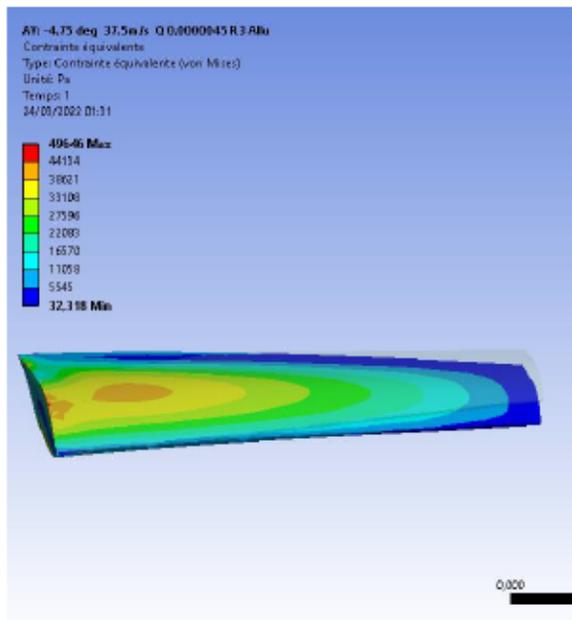


Figure 73 Contrainte équivalente (Aluminium).

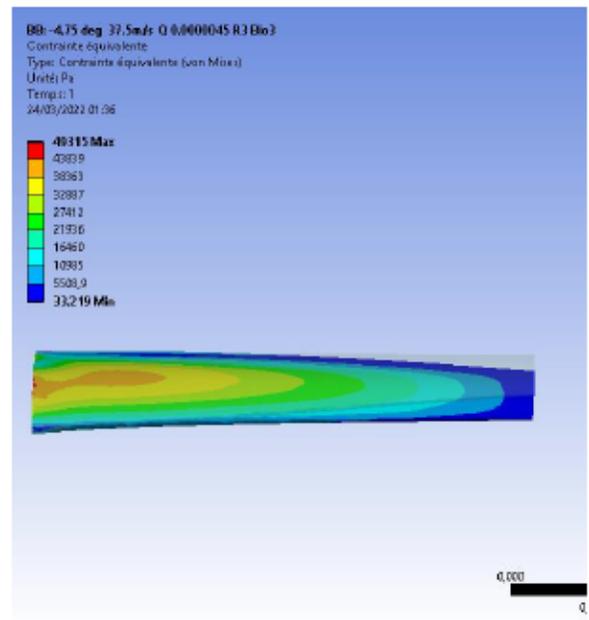


Figure 74 Contrainte équivalente (Bio3).

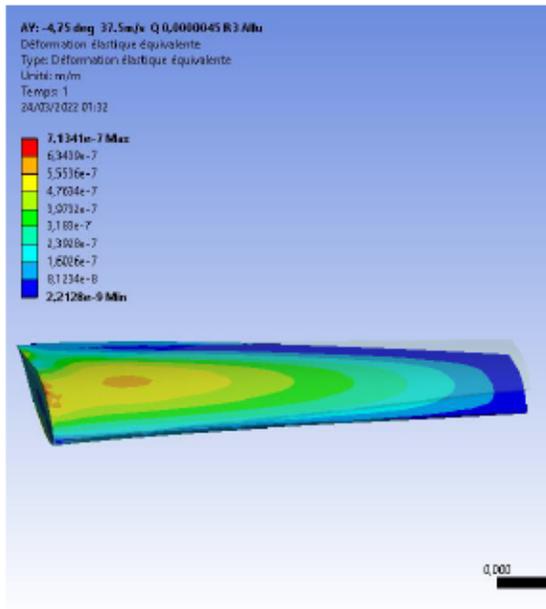


Figure 76 Déformation élastique équivalente (Aluminium).

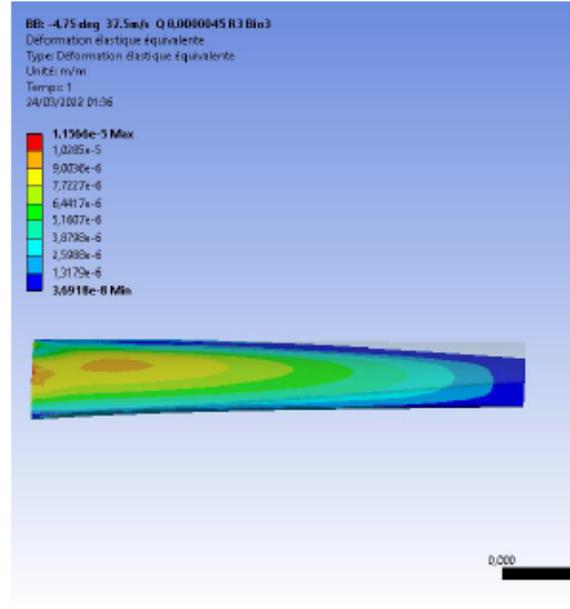


Figure 75 Déformation élastique équivalente (Bio3).

Ci-dessous voici les valeurs résumées sous forme de tableau des valeurs obtenue lors de nos simulations pour une vitesse de 37.5 m/s a angle d'incidence négatif -4.75 °.

	Allu			
	Temps (s)	min	max	med
Déplacement total (m)	1	0	6,81E-06	2,23E-06
Contrainte équivalente (Pa)	1	33,219	4,93E+04	1,18E+04
Déformation élastique équivalente (m/m)	1	2,21E-09	7,13E-07	1,78E-07

	Bio 3			
	Temps (s)	min	max	med
	1	0	1,12E-04	3,69E-05
	1	33,219	4,93E+04	1,18E+04
	1	3,69E-08	1,16E-05	2,91E-06

Tableau 13 Tables des valeurs : 37.5m/s, -4.75°.

Comme attendu on remarque que l'aluminium est plus rigide et donc il subit moins de déplacement que la matériaux Bio3, on notera que les résultats obtenus ce rapproche grandement des résultats obtenus précédemment lors de la simulation pour un angle d'incidence nul, car la variation de l'angle est relativement faible.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Ce projet concerne une étude sur le potentiel d'utilisation des bio-composites pour les secteurs des drones. Pour cela, des bio-composites renforcées par des particules de sciure de bois, en trois concentrations massique différentes (20%, 30% et 40%), ont été utilisés et mécaniquement caractérisé (module d'élasticité, la résistance mécanique maximale et allongement à la rupture). L'étude a été effectuée sur l'effet du vent (en incidence et en vitesse) sur le comportement mécanique, en déformation et en contraintes, sur un drone de type FX 66-S-196 (petite dimension). Pour cela, le Logiciel Fluent a été utilisé pour la modélisation numérique par la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus sont confrontés à ceux obtenus sur le même profil de drone, FX 66-S-196, en aluminium. L'analyse a montré que les bio-composites possèdent un niveau de performance et technique élevé pour concurrencer l'aluminium pour la conception et la fabrication de pales de petites dimensions pour les drones. Cette nouvelle génération de pales permettrait de concurrencer avec les pales traditionnelles tout en respectant les exigences environnementales. La concrétisation du projet a été réalisé en adoptant la structure suivante pour le mémoire :

Chapitres 1, 2 et 3 concernent, respectivement, des généralités sur les bio composites thermoplastiques (élaboration et caractérisation), les drones (Classification et matériaux conventionnels utilisé), la conception et l'aérodynamique des drones

Chapitres 4 et 5, sont orientés vers la modélisation géométrique et mécanique. À cet effet, dans une première étape, une étude sur la convergence du maillage a été réalisée pour un drone de type FX 66-S-196 (petite dimension) et, ensuite, après exposition des équations qui régisse la mécanique des structures, une modélisation numérique (à l'aide du logiciel Fluent) est réalisée sur l'effet de la vitesse du vent et de son orientation (angle d'incidence) sur le comportement mécanique du drone (déformations et contraintes). Les matériaux considérés dans cette modélisation sont les bio-composites et l'aluminium.

Dans le chapitre 6, les résultats des simulations numériques sont exposés. Les résultats montrent que les bio-composites possèdent un niveau de performance et technique pour concurrencer l'aluminium pour la conception et la fabrication de pales de petites dimensions pour les drones.

Perspectives

Les perspectives pour l'utilisation de bio composites dans les ailes d'avion sont prometteuses. Les avancées récentes dans la recherche ont montré que les bio composites peuvent avoir des propriétés mécaniques et une durabilité suffisante pour être utilisés dans des applications industrielles, telles que les ailes d'avion. Cependant, il reste encore des défis à relever pour que ces matériaux soient largement adoptés par l'industrie aéronautique.

L'un des principaux défis est l'optimisation des propriétés mécaniques et de la durabilité des bio composites, ainsi que leur résistance aux intempéries, à la fatigue et aux chocs. De plus, les coûts de production des bio composites doivent être réduits pour les rendre plus compétitifs par rapport aux matériaux composites traditionnels.

Cependant, les avantages des bio composites sont nombreux, notamment leur durabilité environnementale, leur poids léger, leur résistance élevée et leur meilleure isolation acoustique. Ils peuvent également être fabriqués à partir de ressources renouvelables, ce qui réduit leur empreinte carbone. De plus, l'utilisation de bio composites peut stimuler l'innovation dans les technologies de fabrication et ouvrir de nouveaux marchés pour les producteurs de fibres et de résines biosourcées.

En somme, les perspectives pour l'utilisation de bio composites dans les ailes d'avion sont très prometteuses et continuent d'être explorées par les chercheurs et les entreprises de l'industrie aéronautique.

Références

- [1] Lachance M., Prévisions de marchés des plastiques et bioplastiques, Premier Colloque québécois sur les bioplastiques composables, 2 juin 2011, Sherbrooke (Québec, Canada):
- [2] Kaddami, Dufresne A., Khelifi B. et al. Short palm tree fibers – Thermoset matrices composites, *Composites, Part A*, Vol.37, pp.1413 (2006)
- [3] Eichhorn S.J., Baillie C.A., Zafeiropoulos N., et al, Investigation of the Performance of Cotton Woven Fabrics, *Journal of Materials Science*, 36, pp.2107 (2001)
- [4] Migneault S., Koubaa A., Erchiqui F. and al, Tensile Behavior of Environment Friendly Jute Epoxy Laminated Composite, *Composites Part A*, Vol.40, pp.80 (2009).
- [5] Amor I. B, Rezik H., Kaddami H., Raihane M., et al, Investigation of the dielectric properties of natural fibre and conductive filler reinforced polymer composites , *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 5, pp. 717 (2009)
- [6] Erchiqui F., Kaddami H, Dituba-Ngoma G., Slaoui-Hasnaoui F. (2020). Comparative Study of the Use of Infrared and Microwave Heating Modes for the Thermoforming of Wood-Plastic Composite Sheets. *International journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 158, September 2020, 119996
- [7] Gáspár, M., Benkő, Z., Dogossy, G. et al, Reducing Water Absorption in Compostable Starch-Based Plastics. *Polymer Degradation and Stability* Vol.90, No.3, pp.563 (2005)
- [8] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Drone>
- [9] http://www.onera.fr/sites/default/files/ressources_documentaires/cours-exposes-conf/mieux-connaître-les-drones.pdf
- [10] Hogg, P., Wind turbine blade materials. University of Loughborough: SUPERGEN Wind - Wind Energy Technology (2010).
- [11] Brøndsted, P., Lilholt, H., & Lystruo, A. Composite Materials for Wind Power Turbine Blades. Materials Research, Department Risoe National Laboratory, DK 4000 Roskilde, Denmark (2005).
- [12] Migneault S., Koubaa A., Erchiqui F. et al. Application of micromechanical models to tensile properties of wood-plastic composites , *Wood Science and Technology*, Vol.45, No.3, pp.521 (2011)

- [13] Erchiqui F., Godard F., Gakwaya A. Engineering investigations on the potentiality of the thermoformability of HDPE charged by wood flours in the thermoforming part, et al, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, No 8, pp.1594 (2009)
- [14] Bledzki, A. K. et Faruk, O., Effect of Wood Fillers on the Viscoelastic and Thermophysical Properties of HDPE-Wood Composite, *Applied Composite Materials*, Vol.10, No.6, pp.365 (2003).
- [15] Erchiqui F., Fotso-Talla A., et al, 26th ASC Annual Technical Conference (the second USA-Canada conference on composites), September 26-28 Montreal, Canada (2011)
- [16] Fotso Talla A.S, Mfoumo E, Jeson S., Pagé J.S.Y.D , Erchiqui. Properties of a novel melt processed PET-Hemp composite: Influence of additives and fibers concentration, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [17] <http://epervier.sudluberon.free.fr/spp/index.html#introduction>
- [18] <http://www.lavionnaire.fr/AerodynDifProfils.php>
- [19] T. Keener, R. Stuart, T. Brown, Maleated Coupling Agents for Natural Fiber Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 35 (2004) 357.
- [20] N. Sombatsompop, C. Yotinwattanakumtorn, C. Thongpin, Influence of type and concentration of maleic anhydride grafted polypropylene and impact modifiers on mechanical properties of PP/wood sawdust composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 97 (2005) 475.
- [21] M. Tazi, M. S. Sukiman, F. Erchiqui, A Imad, T Kanit, Effect of Wood Fillers on the Viscoelastic and Thermophysical Properties of HDPE-Wood Composite, *International Journal of Polymer Science* 2016 (2016).
- [22] C. Burgstaller, Processing of thermal sensitive materials—a case study for wood plastic composites, *Monats. Chem.—Chem. Monthly* 138 (4) (2007) 343.
- [23] M. Tazi, F. Erchiqui, H. Kaddami, Influence of SOFTWOOD-fillers content on the biodegradability and morphological properties of WOOD–polyethylene composites, *Polym. Compos.* 39 (1) (2018) 29, doi:10.1002/app.40495

