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 la personne autrice 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'autrice ou 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.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

INVESTIGATION NUMÉRIQUE SUR L'UTILISATION DES BIOCOMPOSITES POUR UNE ÉOLIENNE À FAIBLE PUISSANCE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
MAHMOUD AHMED BOUSSATI

31 mai 2026

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au professeur **Fouad Erchiqui**, mon directeur de recherche, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien sans faille tout au long de cette période de recherche. Son expertise, ses commentaires constructifs et ses encouragements constants ont été déterminants dans la réussite de ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude **aux membres du jury** qui ont généreusement consacré leur temps et leur expertise à l'évaluation de ce travail. Leurs questions pertinentes, leurs commentaires constructifs et leurs recommandations avisées ont non seulement enrichi la qualité de cette recherche, mais m'ont également apporté des perspectives précieuses qui guideront mes futurs projets universitaires et professionnels.

Mes remerciements vont aussi à mes amis et collègues de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue pour leur soutien moral constant et leurs encouragements.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de cette étude.

Dédicace

À mes parents,

Mes piliers, mes repères et mes plus grands modèles. Rien ne pourrait traduire la reconnaissance que je ressens pour tout ce que vous avez fait pour moi : vos sacrifices, vos prières silencieuses, vos conseils pleins de sagesse et votre amour inépuisable. Ce travail est le fruit de vos valeurs et de la force que vous m'avez transmise.

À mes frères et sœurs,

Mes alliés de toujours. Merci pour vos encouragements, vos mots qui apaisent, vos rires qui réchauffent le cœur et la fierté que vous m'avez offerte dans les moments où j'en avais le plus besoin.

À mes chères amis et collègues,

Pour leur présence, leurs sourires et leurs encouragements constants, qui m'ont aidé à traverser les moments difficiles et à célébrer les réussites.

Ce mémoire est plus qu'un accomplissement personnel : il est le reflet de l'amour, du soutien et des liens inestimables qui m'unissent à vous tous.

Résumé

Cette étude vise à évaluer le potentiel des biocomposites HDPE renforcés avec des fibres de bois pour les pales d'éoliennes à faible puissance. Les biocomposites offrent une alternative durable aux matériaux synthétiques traditionnels, avec des avantages environnementaux et économiques potentiels. La méthodologie utilise une approche numérique combinant simulation CFD et analyse FEA pour évaluer les performances mécaniques et aérodynamiques des pales en biocomposites. Les simulations incluent des analyses statiques, modales et de fatigue pour prédire le comportement sous différentes conditions de charge. Les propriétés mécaniques des biocomposites sont optimisées en explorant différentes concentrations de fibres de bois. Les résultats attendus incluent une réduction significative des coûts de production et de la masse des pales, avec une conservation des propriétés mécaniques adéquates. Les simulations devraient montrer une amélioration des performances aérodynamiques grâce à l'optimisation de la géométrie des pales. Cette recherche contribuera à valider le potentiel des biocomposites pour une adoption future dans le secteur éolien, tout en identifiant les défis techniques et environnementaux à relever. Enfin, elle ouvre la voie à une utilisation plus large des bio-composites dans le domaine de l'énergie renouvelable.

Mot-clé : Conception éolienne, bio-composite, faible puissance, ANSYS, Énergies renouvelables.

Abstract

This study aims to assess the potential of wood fibre-reinforced HDPE bio-composites for low-power wind turbine blades. Bio-composites offer a sustainable alternative to traditional synthetic materials, with potential environmental and economic benefits. The methodology uses a numerical approach combining CFD simulation and FEA analysis to assess the mechanical and aerodynamic performance of bio-composite blades. Simulations include static, modal and fatigue analyses to predict behaviour under different loading conditions. The mechanical properties of bio-composites are optimised by exploring different wood fibre concentrations. Expected results include a significant reduction in production costs and blade mass, while maintaining adequate mechanical properties. Simulations should show an improvement in aerodynamic performance thanks to the optimisation of blade geometry. This research will help to validate the potential of bio-composites for future adoption in the wind energy sector, while identifying the technical and environmental challenges to be overcome. Finally, it paves the way for the wider use of bio-composites in renewable energy.

Keywords: Wind turbine design, bio-composite, low power, ANSYS, Renewable energy.

Table des matières

Remerciements 1
Dédicace 2
Résumé 3
Abstract 4
Chapitre 1 : Généralité sur les matériaux utilisés pour les pâles d'éoliennes 10
1.1 Introduction 11
1.2 Problématique 12
1.3 Objectifs 13
1.3.1 Objectif général 13
1.3.2 Objectifs spécifiques 14
Chapitre 2 : Pâles de retors pour éoliennes et matériaux 15
2.1 Matériaux utilisés pour la fabrication de pales de rotors 16
2.1.1 Pâles à base de bois 16
2.1.2 Pâles à base des lamelles de bois collées 16
2.1.3 Pâles à base d'alliages d'aluminium 17
2.1.4 Pâles à base de composites 17
2.1.5 Pâles à base de nano-composites 18
2.1.6 Pâles à base de Fibres Bambou et de lin 18
2.1.7 Pâles à base de Résines Biosourcées 18
2.2 Procédés de fabrication de pales de rotors 19
2.2.1 Techniques d'infusion 20
2.2.2 Techniques de pré-imprégnation 21
2.3 Potentiel des bio-composites pour la fabrication de pâles de retors 22
2.3.1 Performance Mécanique 22
2.3.2 Impact Environnemental 23
2.3.3 Recyclabilité et Fin de Vie 23
2.3.4 Faisabilité de Fabrication 23
2.3.5 Durabilité et Résistance à la Fatigue 24
Chapitre 3 : Éoliennes et caractéristiques 25
3.1 Types d'éoliennes 26
3.2 Choix de profils de pâles de retors 27
3.3 Caractéristiques des pâles de rotors 27
Chapitre 4 : Conception et modélisation numérique 30
4.1 Introduction et objectifs 31
4.2 Mise en équation 31
4.2.1 Modélisation de la turbulence 31
4.3 Description du cas d'étude 32
4.4 Présentation de l'approche CFD 34
4.5 Logiciel de simulation Ansys Fluent 34

4.6 Maillage géométrique 35
4.6.1 Profil aérodynamique 35
4.6.2 Modèle simplifié 36
4.6.3 Domaine de calcul 36
4.6.4 Analyse de la qualité du maillage 37
4.7 Conditions aux limites et modélisation 40
4.7.1 Paramètres du solveur 40
4.7.2 Modèle de turbulence 43
4.7.3 Solveur et schémas numériques 43
4.7.4 Critères de convergence 43
4.7.5 Facteurs de relaxation 44
4.8 Résultats principaux de la simulation CFD 45
4.8.1 Champ de pression 45
4.8.2 Champ de vitesse et lignes de courant 45
4.8.3 Efforts aérodynamiques 46
Chapitre 5 : Comportement numérique des pâles bio-composites et résultats 48
5.1 Introduction 49
5.2 Modélisation aérodynamique 49
5.2.1 Paramètres numériques et critères de convergence 50
5.2.2 Distribution de la Pression Statique sur les Pales d'une Éolienne 51
5.3 Résultats structurels : Cas du composite E-Glass 52
5.3.1 Facteur de Sécurité 52
5.3.2 Déformation totale de la pale E-glass 53
5.3.3 Contrainte équivalente de von Mises sur la pale en E-Glass 55
5.4 Résultats structurels : composite HDPE-20Bois 57
5.4.1 Facteur de sécurité 57
5.4.2 Déformation totale 58
5.4.3 Contrainte équivalente de von mises Stress 59
5.5 Résultats structurels : composite HDPE-40%Bois 61
5.5.1 Facteur de sécurité 61
5.5.2 La déformation totale 62
5.5.3 Contrainte équivalente de von mises stress 64
5.6 Discussion comparative : E-Glass vs HDPE/20 % bois vs HDPE/40 % bois 66
5.7 Étude technico-économique 67
Chapitre 6 : Conclusion et perspectives 69
Conclusion générale 70
Références 71

Liste des Figures

FIGURE 1 : LES COMPOSANTS STANDARD D'UNE EOLIENNE 19
FIGURE 2: TECHNIQUE D'INFUSION SOUS VIDE 20
FIGURE 3: TECHNIQUE D'INFUSION SOUS PRESSION 21
FIGURE 4 : LES TYPES D'EOLIENNES 26
FIGURE 5: PROFIL NACA POUR EOLIENNE 27
FIGURE 6 : LES COMPOSANTES D'UNE EOLIENNE 29
FIGURE 7 : DISPOSITION OPTIMALE DES FIBRES DE BOIS DANS LA PALE EN BIOCOMPOSITE HDPE/40 % BOIS — COUPE TRANSVERSALE SCHEMATIQUE. 33
FIGURE 8: LOGICIEL DE SIMULATION FLUENT 2025 35
FIGURE 9: SCHEMA DU DOMAINE DE CALCUL ET DE LA PALE ISOLEE (PROFIL NACA 4412). 35
FIGURE 10 : SIMPLIFICATION DU MODELE 36
FIGURE 11: DEFINITION DU DOMAINE DE FLUIDE COMME CYLINDRE PROLONGE. 37
FIGURE 12: RAFFINEMENT LOCAL DE LA PALE D'EOLIENNE. 38
FIGURE 13: COUCHES D'INFLATION DE LA PALE D'EOLIENNE. 38
FIGURE 14: MAILLAGE FIN DU MODELE SIMULE. 39
FIGURE 15: APPLICATION LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE. 41
FIGURE 16: PRESENTATION LA MODELISATION DE ROTATION. 42
FIGURE 17: LA CONVERGENCE DE LA SIMULATION DU MODELE 44
FIGURE 18: CONTOURS DE PRESSION STATIQUE SUR LA PALE ET DANS SON VOISINAGE 45
FIGURE 19: LIGNES DE COURANT COLOREES PAR LA MAGNITUDE DE LA VITESSE AUTOUR DE LA PALE. 46
FIGURE 20: ÉVOLUTION DES RESIDUS EN FONCTION DU NOMBRE D'ITERATIONS. 51
FIGURE 21: LA DISTRIBUTION DE LA PRESSION STATIQUE SUR LA SURFACE D'UNE EOLIENNE A TROIS PALES. 52
FIGURE 22: FACTEUR DE SECURITE FOS (E-GLASS) 53
FIGURE 23: LA DEFORMATION TOTALE DE LA PALE E-GLASS 55
FIGURE 24: LA DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE EQUIVALENTE DE VON MISES SUR LA PALE EN E-GLASS. 56
FIGURE 25: FACTEUR DE SECURITE POUR LA PALE HPDE/20% BOIS. 58
FIGURE 26: DÉFORMATION TOTALE POUR LA PALE HPDE/20% BOIS 59
FIGURE 27: VON MISES STRESS (HDPE/20 % BOIS). 61
FIGURE 28: FACTEUR DE SECURITE POUR LA PALE EN HDPE/40 % 62
FIGURE 29: DÉFORMATION TOTALE DE LA PALE EN HDPE/40 % BOIS 64
FIGURE 30: LA CONTRAINTE EQUIVALENTE DE VON MISES SUR LA PALE EN HDPE/40 % BOIS 65

Liste des Tables

TABLEAU 1: PROPRIETES THERMIQUES ET MECANIQUES EN TRACTION DES THERMOPLASTIQUES BIOSOURCES ET PETROSOURCES……......34

TABLEAU 2: DESCRIPTION DES DETAILS DE CHAQUE NIVEAU DE MAILLAGE..... 40

TABLEAU 3: LES PARAMETRES DE LA CONFIGURATION MRF. 43

TABLEAU 4: FORCES ET COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES ($U\infty = 10$ M/S, $\Omega = 20$ RAD·S^{-1}). 46

TABLEAU 5: LES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DE L'AIR ONT ETE SUPPOSEES CONSTANTES, CORRESPONDANT A DES CONDITIONS STANDARD DE TEMPERATURE ET DE PRESSION (STP). 47

Notations latines

θ	Angle
λ	Lambda
Ω	La vitesse angulaire
ρ	Masse volumique
t	Temps
u	Vitesse suivant x
υ	Vitesse suivant y
τ	Tenseur de Reynolds
K-ω	Modèle turbulence
K-ε	Modèle turbulence
β	Beta
μ	Coefficient de viscosité turbulente
σ	Fé
Ψ	Constante

Abréviations

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CFD	Computational Fluid Dynamics
Cp	Coefficient de puissance
ACV	Analyse du Cycle de vie
Rm	Résistance
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
A	Surface (m^2)
R	Envergure de l'aile
C_D	Coefficient de traînée
C_L	Coefficient de portance
CAM	Corde aérodynamique moyenne
NACA	National Advisory Council on Aeronautics, USA

Chapitre 1 : Généralité sur les matériaux utilisés pour les pâles d'éoliennes

1.1 Introduction

Dans un contexte mondial de transition énergétique, les éoliennes à faible puissance, généralement définies comme ayant une capacité inférieure à 100 kW, s'imposent comme une solution décentralisée et accessible pour la production d'électricité renouvelable [1,2]. Ces systèmes présentent un potentiel considérable pour les applications domestiques, agricoles et pour l'électrification des zones isolées, contribuant ainsi à la diversification du mix énergétique [3,4]. Face aux défis environnementaux actuels, la conception de ces éoliennes connaît une évolution constante, cherchant à optimiser non seulement leur efficacité énergétique mais également leur empreinte écologique globale. Les matériaux utilisés dans leur fabrication représentent un levier d'innovation majeur, particulièrement pour les pales qui déterminent en grande partie les performances aérodynamiques et structurelles de ces systèmes [5]. Alors que les éoliennes de grande puissance bénéficient déjà d'avancées technologiques significatives, comme en témoigne l'utilisation de convertisseurs de puissance sophistiqués pour les éoliennes offshore de 5 MW, le segment des éoliennes à faible puissance offre un terrain propice à l'expérimentation de nouveaux matériaux plus durables.

Malgré les progrès réalisés dans le domaine des énergies renouvelables, l'utilisation des matériaux bio-composites à base de fibres végétales (bois, chanvre, lin) et de matrices thermoplastiques pour la fabrication des pales d'éoliennes demeurent largement inexplorées [6,7]. La majorité des éoliennes actuelles, indépendamment de leur taille, emploient principalement des matériaux composites synthétiques à base de fibres de verre ou de carbone, dont la production et l'élimination en fin de vie posent des défis environnementaux considérables [5]. Cette situation présente un paradoxe certain : les éoliennes, conçues pour produire une énergie propre et renouvelable, s'appuient sur des matériaux dont le cycle de vie est loin d'être écologique. Des recherches récentes ont démontré le potentiel des bio-composites dans des applications aérodynamiques similaires, notamment pour les pales de drones de petites dimensions [6]. Ces études confirment que les bio-composites renforcés par des particules de sciure de bois peuvent atteindre un niveau de performance technique permettant de concurrencer l'aluminium dans certaines applications. De même, les travaux sur les matrices biosourcées et les fibres naturelles [7] ouvrent la voie à des alternatives plus écologiques pour des applications structurelles.

L'originalité de notre étude réside dans l'investigation numérique approfondie du potentiel d'utilisation des bio-composites pour le secteur des éoliennes à faible puissance. Contrairement aux approches conventionnelles qui se focalisent principalement sur les

propriétés mécaniques statiques des matériaux, notre travail propose une analyse dynamique complète, intégrant les interactions fluide-structure spécifiques aux conditions de fonctionnement des éoliennes [8,4]. Cette démarche multidisciplinaire permet d'évaluer non seulement la résistance mécanique des bio-composites sous différentes conditions de charge, mais aussi leur comportement vibratoire, leur résistance à la fatigue et leur durabilité à long terme dans des conditions environnementales variées. À l'instar des études sur les arbres d'éoliennes réalisés en fibres de carbone qui démontrent les avantages d'être à la fois souples et légers [5], notre travail cherche à déterminer si les bio-composites peuvent offrir un équilibre optimal entre performance mécanique et légèreté, tout en apportant des bénéfices environnementaux supplémentaires. L'approche numérique adoptée s'inspire des méthodologies développées pour l'étude de l'aérodynamique des éoliennes à axe horizontal [4], adaptées aux spécificités des matériaux bio-composites.

L'utilisation des bio-composites dans la fabrication des pales d'éoliennes à faible puissance présente de nombreux avantages potentiels par rapport aux matériaux traditionnels. Premièrement, ces matériaux offrent généralement un poids réduit tout en maintenant une résistance mécanique adéquate, ce qui peut améliorer l'efficacité globale du système en réduisant les charges inertielles et en facilitant le démarrage à faible vitesse de vent [6,7]. Cette caractéristique est particulièrement pertinente pour les éoliennes de petite taille, où le démarrage à basse vitesse de vent constitue un paramètre crucial de performance. Deuxièmement, les bio-composites présentent généralement un coût inférieur à celui des composites synthétiques avancés, ce qui peut contribuer significativement à la réduction du coût global des éoliennes et, par conséquent, du coût de l'énergie produite [6]. Troisièmement, l'aspect environnemental constitue un avantage majeur : les bio-composites utilisent des ressources renouvelables, leur production requiert moins d'énergie que celle des composites synthétiques, et ils offrent des possibilités de biodégradabilité ou de recyclage en fin de vie, comme l'ont démontré les études sur la biodégradation des bio-composites à base d'huile de tournesol [7]. Cette caractéristique permet de réduire considérablement l'empreinte écologique globale des systèmes éoliens, renforçant ainsi leur statut de technologie véritablement durable.

1.2 Problématique

L’essor des énergies renouvelables, notamment des éoliennes à faible puissance, se heurte aujourd’hui aux limites environnementales et économiques des matériaux composites conventionnels (GFRP, CFRP). Ces derniers, bien que performants mécaniquement, génèrent

un coût énergétique élevé (15–20 MJ/kg pour les fibres de verre) lié à des procédés de fabrication énergivores et dépendants des énergies fossiles, tout en posant un défi majeur de circularité : moins de 30 % de ces composites sont recyclés, le reste finissant en décharge ou incinéré, avec des impacts écotoxiques. Face à ces enjeux, les bio-composites émergent comme une alternative prometteuse, combinant des fibres naturelles (lin, chanvre, bois…) et des matrices biosourcées HDPE/bois. Leur production, moins gourmande en énergie (< 5 MJ/kg pour certaines fibres), et leur potentiel de biodégradation pourraient réduire l'empreinte carbone des éoliennes et faciliter leur recyclage. Cependant, leur adoption dans ce secteur exige une validation approfondie. Il s'agit notamment de garantir des performances mécaniques comparables aux composites classiques (résistance aux charges cycliques, rigidité, tenue aux chocs), une durabilité face aux conditions climatiques extrêmes (UV, humidité, variations thermiques) et une résistance à la fatigue sur le long terme. Par ailleurs, leur viabilité économique reste à démontrer : les coûts des résines biosourcées, la disponibilité des fibres à l'échelle industrielle et la logistique de collecte des déchets agricoles constituent des freins potentiels. Enfin, leur recyclabilité réelle et leur biodégradation en milieu naturel doivent être étudiées pour éviter des transferts de pollution (émissions de CO_2 lors du compostage, microplastiques issus de matrices hybrides). Une approche multidisciplinaire intégrant des simulations numériques (optimisation de la structure des pales), des essais accélérés de vieillissement et une analyse du cycle de vie (ACV) complète s'impose donc pour valider ces matériaux. Sans cette démarche, les bio-composites risquent de rester une solution marginale, incapables de concilier performance technique, durabilité environnementale et rentabilité dans un secteur où la compétitivité des matériaux conventionnels reste dominante.

1.3 Objectifs

1.3.1 Objectif général

L'objectif général de la recherche sur les pales d'éoliennes en biocomposites est de créer des matériaux composites à partir de fibres végétales et 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 des éoliennes.

1.3.2 Objectifs spécifiques

2. Caractérisation élastique d'une famille de bio-composites : tests de soufflage de membranes circulaires (montage disponible au laboratoire de plasturgie de l'UQAT) : HDPE-20% bois et HDPE-40% bois.
3. Conception du profil d'une éolienne bio-composite de petite dimension.
4. Simulation numérique et modélisation du comportement de la pale de l'éolienne bio-composites sous l'action du vent (en direction et en vitesse).
5. Comparaison du comportement de la pale bio-composite vis-à-vis l'époxy-verre et le HDPE-bois.

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.

Chapitre 2 : Pâles de retors pour éoliennes et matériaux

2.1 Matériaux utilisés pour la fabrication de pales de rotors

Les pales de rotor qu'elles soient destinées à des éoliennes, hélices d'avion ou turbines hydrauliques constituent des éléments structurels soumis à des sollicitations complexes : flexion cyclique, torsion, fatigue, impact, et agressions environnementales (humidité, UV, sel marin). Le choix du matériau conditionne directement la performance aérodynamique, la masse, la durabilité, le coût de cycle de vie, et l'empreinte écologique. Historiquement, les matériaux ont évolué des bois massifs vers des alliages légers, puis vers des composites polymères renforcés, avant d'atteindre aujourd'hui des formulations avancées incluant des fibres naturelles, des résines biosourcées ou des nano-renforts. Cette évolution répond à une double exigence : augmenter le rapport rigidité/masse tout en réduisant l'impact environnemental, notamment via la substitution des ressources fossiles par des biomatériaux renouvelables.

2.1.1 Pâles à base de bois

Une pale à base de bois est un composant structural fabriqué à partir de bois massif (ex. : épicéa, pin, chêne) ou de lamelles collées, dont les propriétés mécaniques dépendent fortement de la direction des fibres (anisotropie naturelle), de l'humidité ambiante et du traitement de préservation. Ce matériau a été utilisé dès les premières éoliennes (années 1930–1950), notamment en Allemagne (ex. : éolienne Bockwindmühle), grâce à sa disponibilité, son faible coût, sa facilité de mise en forme et sa bonne ténacité. Cependant, le bois présente des inconvénients majeurs pour les applications modernes : faible module d'Young (10–15 GPa), sensibilité à la fissuration sous fatigue, dégradation biologique (champignons, insectes), et variation intrinsèque des propriétés selon l'origine botanique et les conditions de croissance. De plus, sa densité (0,4–0,6 g/cm³) est trop élevée pour les grandes pales (>30 m), où la réduction de la masse est critique pour limiter les charges inertielles. Ainsi, bien que le bois soit encore utilisé dans certains systèmes de petite éolienne (<10 kW) ou comme noyau sandwich, il a été largement remplacé par des matériaux composites plus performants.

2.1.2 Pâles à base des lamelles de bois collées

Les pales à base de lamelles de bois collées (ou laminated wood) constituent une évolution du bois massif, visant à atténuer l'anisotropie et à améliorer la résistance mécanique par assemblage de couches de bois orientées perpendiculairement (structure en contreplaqué ou en stratifié). Ce procédé permet d'obtenir des pales plus longues, plus rigides et plus homogènes, tout en conservant les avantages du bois (faible densité, recyclabilité, faible empreinte carbone). Historiquement, ce concept a été appliqué dans les hélices d'avions des années 1940

(ex. : hélice Hamilton Standard en bois stratifié) et dans les premières éoliennes industrielles (ex. : éolienne Gedser, Danemark 1957).

Les colles utilisées (époxy, urée-formaldéhyde, ou plus récemment colles biosourcées à base de tanins) jouent un rôle clé dans la durabilité : une mauvaise adhérence entre lamelles entraîne des délaminations sous charge cyclique. Malgré ses qualités, ce matériau reste sensible à l'humidité (gonflement, hydrolyse des liants), ce qui limite son utilisation en milieu offshore ou à haute humidité sans revêtement protecteur.

2.1.3 Pâles à base d'alliages d'aluminium

Les pales à base d'alliages d'aluminium (ex. : Al-Zn-Mg-Cu, Al-Si-Mg) ont dominé la conception des hélices aéronautiques et des petites éoliennes jusqu'aux années 1970, grâce à leur excellent rapport résistance/masse (densité = 2,7 g/cm³, Rm = 300–500 MPa, E = 70 GPa) et leur aptitude à la mise en forme par usinage, emboutissage ou extrusion. L'aluminium offre une bonne tenue en fatigue, une conductivité thermique élevée (favorable à la dissipation des contraintes thermomécaniques), et une résistance à la corrosion modérée (améliorée par anodisation ou revêtements organiques). Toutefois, son principal inconvénient réside dans sa fatigue à basse contrainte : sous des cycles de flexion répétés (typiques des pales éoliennes), des fissures microscopiques peuvent s'initier à la surface ou aux points de concentration de contrainte (ex. : trous de fixation), conduisant à une rupture catastrophique sans avertissement. De plus, sa densité reste supérieure à celle des composites polymères (1,5–1,8 g/cm³), pénalise les performances aérodynamiques des grandes pales. En conséquence, les alliages d'aluminium ont été progressivement remplacés par des composites à matrice polymère renforcés par des fibres de verre ou de carbone.

2.1.4 Pâles à base de composites

Les pales à base de composites désignent des structures fabriquées à partir d'un renfort fibreux (verre, carbone, aramide) intégré dans une matrice polymère thermodurcissable (époxy, polyester, vinylester) ou thermoplastique (PA, PP, PET). Ce type de matériau domine aujourd'hui le marché des éoliennes modernes (≥ 1 MW), en raison de son rapport rigidité/masse exceptionnel, de sa capacité à être moulé en géométrie complexe (profil aérodynamique optimisé), et de sa résistance à la fatigue. Les composites à fibres de verre (E-glass/époxy) sont les plus courants pour les pales de taille moyenne (20–60 m), tandis que les composites à fibres de carbone (CFRP) sont réservés aux zones critiques (extrados, racine) des pales de grande taille (>60 m), où la réduction de masse est primordiale. Les matrices époxy offrent une excellente adhérence, une faible porosité après cure, et une stabilité dimensionnelle, mais elles sont non recyclables et dépendantes du pétrole. L'industrie recherche activement des

alternatives durables, notamment via l'hybridation avec des fibres végétales ou l'utilisation de résines biosourcées.

2.1.5 Pâles à base de nano-composites

Un nano-composite est un matériau composite dans lequel au moins un constituant est dispersé à l'échelle nanométrique (1–100 nm), tels que les nanoparticules d'argile (montmorillonite), les nanotubes de carbone (CNT), les nanoparticules de silice ou les nanoplaquettes de graphène. L'ajout de 0,5 à 5 % en masse de ces nano-renforts peut améliorer significativement certaines propriétés sans altérer la densité ni la processabilité : augmentation de la ténacité (jusqu'à +50 %), de la résistance à l'impact, de la barrière à l'oxygène et à l'eau, et de la stabilité thermique. Dans le contexte des pales d'éoliennes, les nano-composites sont principalement étudiés pour renforcer les matrices polymères (époxy ou PLA) afin de retarder l'initiation de fissures sous fatigue ou de limiter la diffusion de l'humidité. Par exemple, l'incorporation de 1 % de CNT dans une matrice époxy augmente le facteur d'intensité de contrainte critique de 30 %, ce qui retarde la propagation des fissures dans les zones de contrainte élevée. Toutefois, les défis restent importants : dispersion homogène des nanofillers, coût élevé, toxicité potentielle des CNT, et absence de normes industrielles pour les applications aéronautiques ou éoliennes à grande échelle.

2.1.6 Pâles à base de Fibres Bambou et de lin

Les pales à base de fibres de bambou et de lin représentent une approche émergente de biocomposite structural, visant à combiner les avantages des deux fibres : le bambou apporte une haute rigidité (E =30–40 GPa) et une bonne résistance à la traction (σ = 300–500 MPa), tandis que le lin offre une meilleure ductilité, une faible densité (1,4 g/cm³) et une meilleure compatibilité avec les matrices biosourcées. Cette hybridation permet de compenser les faiblesses individuelles : le bambou est sensible à l'hydrolyse (haute teneur en hémicellulose), tandis que le lin présente une variabilité plus faible et une meilleure adhérence avec les matrices époxy. Des travaux expérimentaux [1], [2] montrent que des stratifiés $[Bamboo/Flax]_s$ dans une matrice époxy atteignent un module longitudinal de 28–34 GPa et une résistance de 350–450 MPa suffisant pour des pales de petite éolienne (5–20 kW) ou des éléments non porteurs (cloisons, nervures). Cependant, la durabilité à long terme reste à valider, notamment sous vieillissement hygrothermique accéléré, où les deux fibres subissent une dégradation synergique si l'interface n'est pas stabilisée [3]

2.1.7 Pâles à base de Résines Biosourcées

Une résine biosourcée est un polymère dont une fraction significative (≥ 25 %, selon la norme EN 16785-1) du carbone provient de la biomasse renouvelable (huiles végétales, sucres,

lignine, CO_2 capté). Dans le domaine des pales d'éoliennes, les résines biosourcées les plus étudiées sont les époxy végétaux (ex. : dérivés de l'huile de lin, de colza ou de cardanol), les polyesters insaturés biosourcés, et les thermoplastiques comme le PLA ou le PA11. Ces résines présentent des propriétés comparables aux résines pétrolières : Tg de 60–120 °C, module d'élasticité de 2–4 GPa, et bonne adhérence aux fibres. Leur avantage principal est leur empreinte carbone réduite (jusqu'à −50 % vs. époxy pétrolier), leur biodégradabilité partielle (PLA), et leur conformité aux réglementations circulaires (ex. : EU Green Deal). Toutefois, elles souffrent de limitations techniques : viscosité élevée (difficulté d'infusion), temps de gel plus court, et sensibilité à l'humidité pendant la cure. Des formulations hybrides (ex. : 70 % époxy biosourcé + 30 % époxy pétrolier) sont souvent utilisées pour concilier durabilité et performance.

2.2 Procédés de fabrication de pales de rotors

La fabrication des pales de rotor exige des procédés capables de produire des pièces monolithiques, de grande taille (jusqu'à 100+ m), avec une précision dimensionnelle élevée, une faible porosité, et une orientation contrôlée des renforts. Les deux méthodes dominantes sont l'infusion (RTM, VARTM) et la pré-imprégnation, chacune adaptée à des volumes de production, des coûts et des performances spécifiques (Figure 1). Le choix du procédé influence directement la qualité de l'interface fibre/matrice, la reproductibilité, et l'empreinte environnementale.

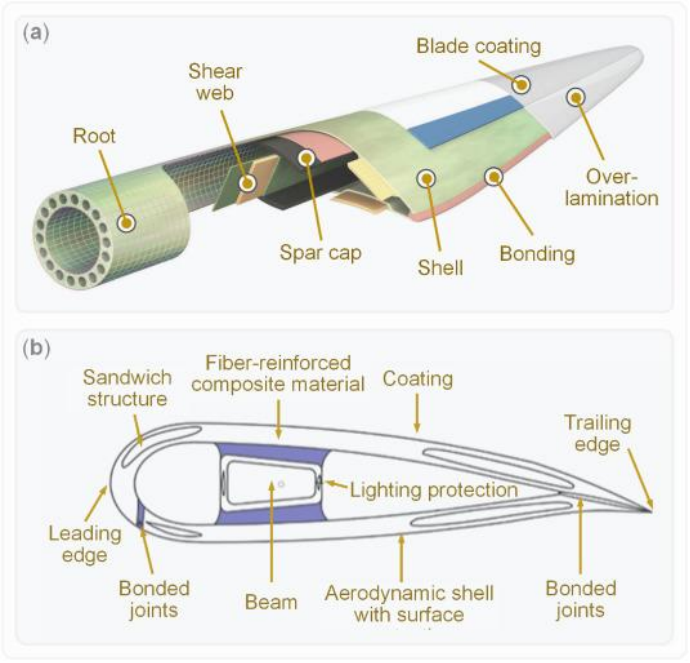

Figure 1: les composants standard pour une éolienne

2.2.1 Techniques d'infusion

Les techniques d'infusion regroupent les procédés où la matrice liquide pénètre par capillarité ou sous vide dans un empilement sec de renforts (tissu, nappe, tresse). Les deux variantes principales sont :

L'infusion sous vide (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) : le renfort est placé dans un moule rigide (Figure 2), recouvert d'un film de plastification, puis soumis à un vide partiel (0,1–0,3 bar) pour aspirer la résine depuis un réservoir. Ce procédé est largement utilisé pour les pales éoliennes (ex. : Siemens Gamesa, Vestas) car il permet de fabriquer des pièces de grande taille avec une faible porosité (<2 %), une bonne imprégnation, et un faible coût d'investissement (pas besoin de préimprégnation).

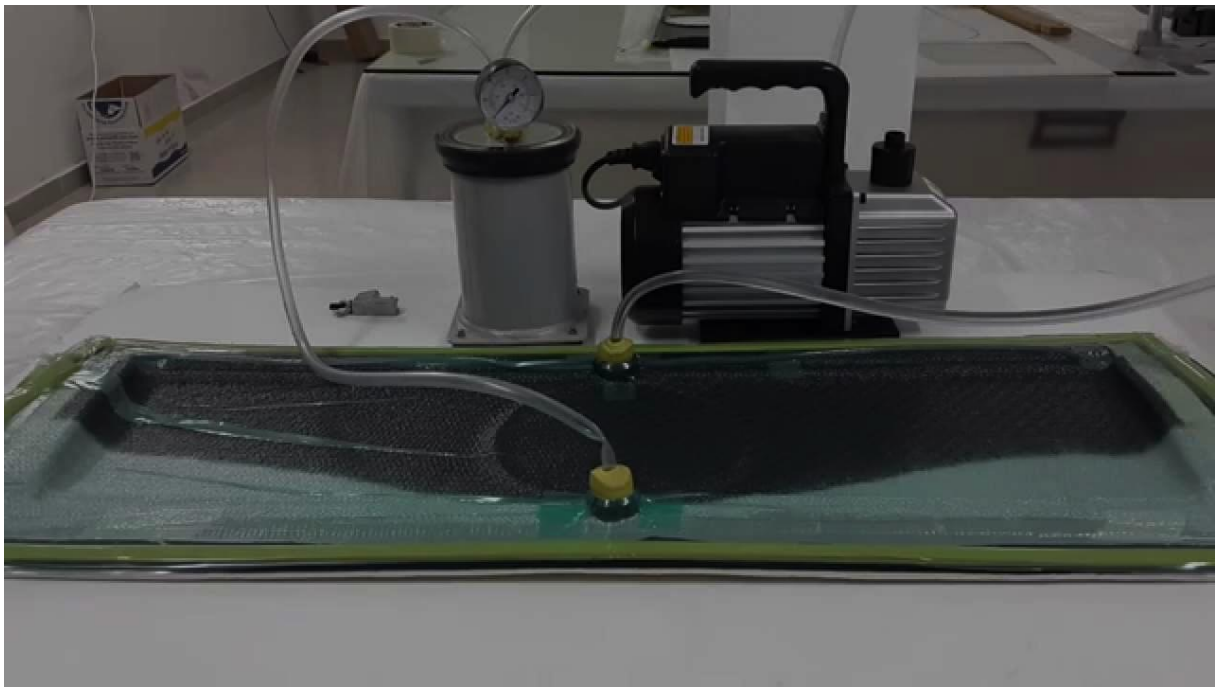

Figure 2: Technique d'infusion sous vide

L'infusion sous pression (RTM – Resin Transfer Molding) : la résine est injectée sous pression (2–10 bar) dans un moule fermé contenant le renfort sec (Figure 3). Elle offre une meilleure reproductibilité et des cycles plus rapides, mais nécessite des moules coûteux en acier ou en composite renforcé.

L'infusion est particulièrement adaptée aux biocomposites car elle évite les étapes de stockage de prepregs sensibles à l'humidité, et permet d'utiliser des résines visqueuses (ex. : époxy végétal) avec des temps de gel ajustables. Toutefois, le contrôle de la cinétique d'infusion est critique : une vitesse trop élevée génère des « dry spots », tandis qu'une vitesse trop faible favorise la ségrégation des fibres. Des simulations numériques (logiciels comme PAM-RTM

ou Moldflow) sont désormais utilisées pour optimiser les canaux d'entrée et les temps de remplissage.

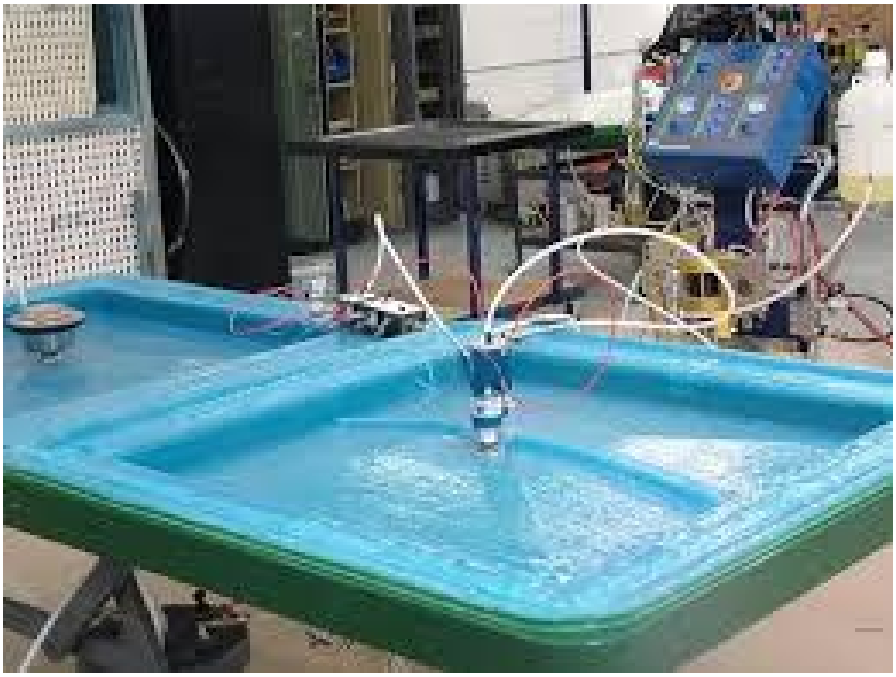

Figure 3: Technique d'infusion sous pression

2.2.2 Techniques de pré-imprégnation

La pré-imprégnation consiste à imprégner les renforts (tissus, tows, nappes) par la matrice polymère en phase liquide, puis à les sécher partiellement pour obtenir des prepregs (pré-imprégnés) stockables à froid (−18 °C) jusqu'à leur mise en œuvre. Ce procédé est dominant dans l'aéronautique (ex. : Airbus A350) et pour les zones critiques des pales éoliennes (racine, extrados), où la qualité et la reproductibilité sont prioritaires. Les prepregs offrent une fraction volumique de fibre très contrôlée (5–65 %), une faible porosité (<1 %), et une orientation précise des fibres (via le tissage ou le placement automatique AFP). Cependant, ils présentent des inconvénients majeurs pour les biocomposites :

- Les résines époxy conventionnelles ne sont pas stables à température ambiante, ce qui rend le stockage des prepregs à base de résines biosourcées difficile (ex. : époxy de lin a une durée de vie < 24 h à 23 °C) ;
- Le coût de production est élevé (ligne d'imprégnation continue, contrôle qualité strict);
- La chaîne logistique est complexe (transport cryogénique, gestion des dates de péremption).

Des alternatives émergentes, telles que les prepregs à base de thermoplastiques (ex. : PP/lin) ou les filaments préimprégnés pour FA (voir Wu, 2025, Chap. IV), visent à contourner ces limites en combinant la précision du prepreg avec la stabilité des thermoplastiques.

2.3 Potentiel des bio-composites pour la fabrication de pâles de retors

2.3.1 Performance Mécanique

Les études examinées démontrent de manière cohérente que les fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, le jute et le bambou offrent des propriétés mécaniques compétitives (tensile, flexion, impact) pour une utilisation dans les pales d'éoliennes, permettant souvent des réductions de poids (jusqu'à 20%) et de coût (jusqu'à 30%) significatives [4], [5], [6]. Les composites hybrides (naturel/synthétique) et ceux renforcés de nanoparticules (nanotubes de carbone, graphène) améliorent encore ces propriétés [7], [8]. Sur le plan environnemental, les analyses de cycle de vie (ACV) indiquent que les biocomposites peuvent réduire le potentiel de réchauffement planétaire de 6 à 35% par rapport aux composites conventionnels, bien que la production de résine reste un contributeur majeur à l'impact, pouvant parfois compenser les bénéfices des fibres naturelles [4], [9], [10]. La recyclabilité est un défi central, mais des solutions émergent avec les résines thermodurcissables biodérivables et recyclables chimiquement (ex. : par méthanolyse), ainsi que le recyclage mécanique et le co-processing en cimenterie [9], [10], [11] . Les techniques de fabrication existantes (moulage par transfert de résine, infusion sous vide) sont adaptables aux biocomposites, mais des défis persistent concernant l'imprégnation uniforme des fibres et l'adhésion fibre-matrice [12], [13]. Enfin, la durabilité et résistance à la fatigue des biocomposites s'approchent de celles des matériaux synthétiques, notamment grâce aux bio-résines à réticulation dynamique, bien que la dégradation environnementale à long terme (humidité, UV) nécessite des études plus poussées [10], [13], [14].

Plus de 40 études ont trouvé que les fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, le jute, le bambou et les composites hybrides fournissent des résistances en traction, flexion et aux chocs compétitives adaptées aux pales d'éoliennes [4], [5], [7].

Plusieurs études ont démontré des réductions de poids et de coût dans les pales utilisant des biocomposites, certaines rapportant jusqu'à 20% d'économie de poids et 30% d'économie de coût [5], [6].

Les améliorations par nanocomposites avec des nanotubes de carbone et des nanoplaquettes de graphène améliorent davantage les propriétés mécaniques, indiquant un potentiel pour les biocomposites avancés [8].

Certaines études ont noté que si les composites à fibres naturelles peuvent avoir une rigidité inférieure aux composites en fibre de verre, ils répondent toujours aux exigences d'intégrité structurelle [15], [16].

Les composites hybrides combinant des fibres naturelles et synthétiques atteignent souvent une performance mécanique et une durabilité améliorées [7], [17].

2.3.2 Impact Environnemental

Environ 15 études ont conduit des évaluations de cycle de vie ou des évaluations environnementales, montrant que les biocomposites réduisent le potentiel de réchauffement planétaire et les émissions de gaz à effet de serre de 6 à 35 % par rapport aux composites conventionnels [4], [9], [10].

La production et la demande en résine ont été identifiées comme des contributeurs majeurs à l'impact environnemental, compensant parfois les bénéfices des fibres naturelles [18].

Les stratégies de recyclage et de fin de vie influencent significativement la durabilité globale, le recyclage mécanique et la dépolymérisation chimique réduisant les charges environnementales [11], [19].

Certaines études ont mis en lumière des compromis complexes et des transferts de charge, indiquant que la substitution de matériaux n'est pas toujours bénéfique de manière simple [20].

L'utilisation de matrices renouvelables et biodégradables aux côtés des fibres naturelles améliore les bénéfices environnementaux [21], [22].

2.3.3 Recyclabilité et Fin de Vie

Environ 10 études ont abordé la recyclabilité, soulignant l'importance des résines recyclables et des méthodes de récupération des fibres telles que le co-processing en cimenterie et le recyclage chimique [4], [10], [11].

Les réseaux covalent adaptables en polyester biodérivables permettent la recyclabilité chimique et la récupération des fibres, offrant des solutions de fin de vie prometteuses [9].

La réparation, la réutilisation et la rénovation sont actuellement plus faisables que le recyclage complet pour les grandes pales, les nouveaux matériaux recyclables faisant encore face à des défis technologiques [19], [23].

La mise en décharge reste une méthode d'élimination courante mais environnementalement problématique, incitant à des appels à l'innovation politique et technologique [24].

Les composites à fibres naturelles offrent généralement une meilleure biodégradabilité et un potentiel d'élimination durable par rapport aux composites synthétiques [25].

2.3.4 Faisabilité de Fabrication

De nombreuses études ont démontré la compatibilité des biocomposites avec les techniques de fabrication existantes telles que le moulage par transfert de résine sous vide assisté, l'infusion de résine, le moulage par compression et le placement manuel [10], [26], [27].

La mise à l'échelle a été atteinte dans certains cas, avec la production de pales prototypes jusqu'à 9 mètres et la fabrication de résine à l'échelle du kilogramme [9], [10].

Les défis incluent assurer une imprégnation uniforme des fibres, éviter les vides et optimiser l'adhésion fibre-matrice [12], [13] .

Les méthodes d'optimisation incluant la modélisation par éléments finis, la théorie de la quantité de mouvement de l'élément de pale et l'analyse relationnelle grise soutiennent les améliorations de conception et de fabrication [5], [6], [28].

Certaines études ont noté des températures de traitement plus élevées ou des temps de durcissement plus longs pour les résines biosourcées, ce qui peut affecter le coût et la vitesse de production [29].

2.3.5 Durabilité et Résistance à la Fatigue

Les études rapportent que les composites à fibres naturelles peuvent atteindre une résistance à la fatigue et une durabilité comparables aux composites synthétiques dans des conditions opérationnelles [10], [14].

La réticulation dynamique dans les résines biosourcées contribue à la suppression du fluage et à l'amélioration de la durée de vie en fatigue [10].

Le comportement en vibration et résonance a été analysé, certains biocomposites montrant un fonctionnement stable et des fréquences naturelles plus élevées [14], [30].

La dégradation environnementale et l'adhésion fibre-matrice restent des préoccupations affectant la durabilité à long terme [13].

Les composites hybrides et l'optimisation de l'orientation des fibres améliorent la stabilité mécanique et la résistance aux contraintes opérationnelles [6], [31].

Chapitre 3 : Éoliennes et caractéristiques

3.1 Types d'éoliennes

Une éolienne est un dispositif convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique via un générateur. Selon leur orientation par rapport au vent et leur architecture rotorique, les éoliennes se classent principalement en deux familles (Figure 4):

- Les éoliennes à axe horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine), dont le rotor tourne autour d'un axe parallèle au sol et perpendiculaire à la direction du vent ;
- Les éoliennes à axe vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine), dont le rotor tourne autour d'un axe vertical, indépendamment de la direction du vent.

Les HAWT dominent le marché industriel (>95 % des installations terrestres et offshore), grâce à leur rendement aérodynamique élevé (coefficient de puissance Cp maximal théorique de 0,59 selon Betz, atteint à ~0,45 en pratique), leur stabilité structurelle, et leur capacité à être dimensionnées à grande échelle (jusqu'à 15 MW pour les modèles offshore).

Elles comprennent trois pales montées sur une nacelle orientable, fixée au sommet d'une tour. En revanche, les VAWT (ex. : Darrieus, Savonius) présentent l'avantage d'une insensibilité à la direction du vent et d'une maintenance facilitée (générateur au sol), mais souffrent d'un rendement plus faible (Cp ≤ 0,35), de vibrations importantes, et d'un risque accru de fatigue due à la variation cyclique de la portance sur chaque pale.

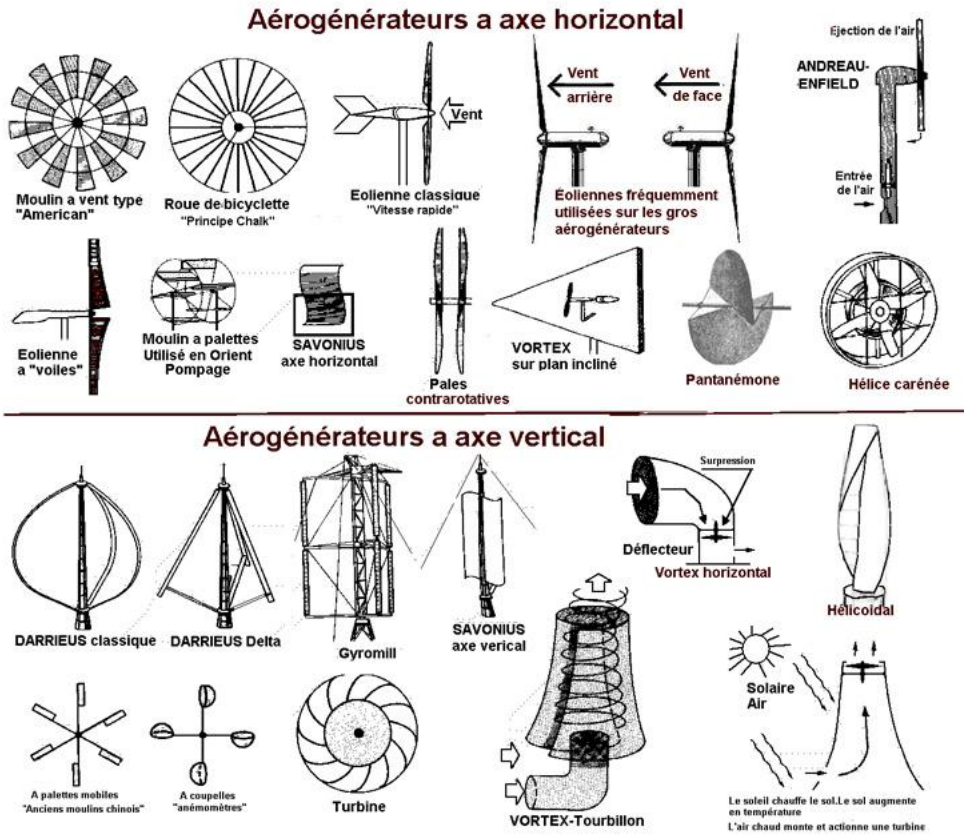

Figure 4: les types des éoliennes

3.2 Choix de profils de pâles de retors

Le profil de pale désigne la section transversale de la pale, définie par sa forme géométrique (cambrure, épaisseur relative, bord d'attaque/aval), ses propriétés aérodynamiques (coefficients de portance, traînée, moment), et son comportement en stall (Figure 5). Le choix du profil conditionne directement le rendement énergétique, la charge structurelle, et la résistance à la fatigue.

Pour les HAWT modernes, les profils utilisés sont majoritairement issus de la famille NACA (ex. : NACA 63-4xx, NACA 64-xxx) ou de développements spécifiques (ex. : DU, FFA, RISØ, S8xx), conçus pour maximiser le rapport dans la plage d'incidence opératoire (−5° à +10°) et retarder le stall. Les profils sont non-uniformes le long de l'envergure :

- Près de la racine (r/R < 0,3) : profils épais (épaisseur relative t/c = 25–35 %) pour assurer la rigidité torsionnelle et la résistance aux moments de flexion ;
- Au tiers de l'envergure (r/R = 0,5) : profils moyennement cambrés (t/c = 18–22 %) pour équilibrer portance et traînée ;
- À l'extrémité (r/R > 0,7) : profils fins (t/c = 10–14 %), souvent à faible cambrure, pour minimiser la traînée induite et limiter le bruit aérodynamique.

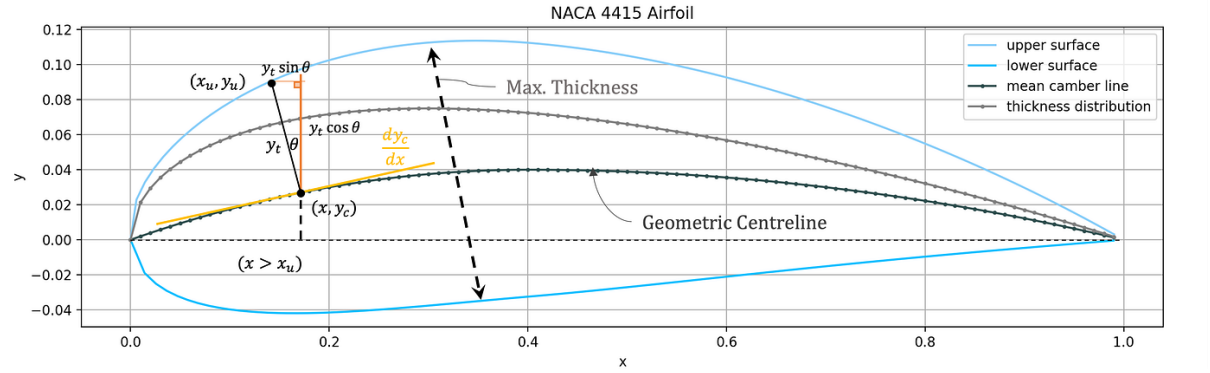

Figure 5: Profil NACA pour éolienne

L'optimisation multi-objectif (rendement, charge, bruit, coût) conduit aujourd'hui à des profils asymétriques adaptatifs, intégrant des dispositifs actifs (volets, flaps) ou passifs (Gurney flaps, vortex generators) pour contrôler le décollement. Pour les biocomposites, le choix du profil doit également tenir compte de la rigidité spécifique du matériau : un profil trop fin peut entraîner des déformations excessives sous charge, compromettant l'angle d'incidence optimal.

3.3 Caractéristiques des pâles de rotors

Les pâles de rotor constituent les éléments les plus critiques d'une éolienne, car elles supportent les charges aérodynamiques, inertielles et gravitationnelles, tout en assurant la conversion

efficace de l'énergie éolienne (Figure 6). Leur conception intègre trois dimensions essentielles : géométrique, mécanique et fonctionnelle.

3.3.1 Caractéristiques géométriques

- Longueur (L) : varie de 10 m (petites éoliennes) à 115 m (modèles offshore GE Haliade-X). La longueur détermine le rayon de balayage ($A = \pi L^2$) et donc la puissance nominale ($P \propto \rho A v^3$).

- Envergure (R) : distance entre l'axe de rotation et l'extrémité de la pale.

Pas (pitch) : angle de calage de la pale par rapport au plan de rotation, ajustable pour réguler la puissance.

- Twist (torsion) : variation angulaire du profil le long de l'envergure (typiquement −8° à 0°), permettant d'optimiser l'incidence locale et de compenser la diminution de vitesse tangentielle vers la racine.

- Sweep (flèche) : courbure latérale de la pale (en plan), utilisée pour réduire les charges de fatigue en zone de pointe.

3.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les pales doivent satisfaire des critères stricts de rigidité, résistance, et durabilité :

- Rigidité en flexion ($E \cdot I$) : $\geq 10^8$ N·m² pour éviter les déformations excessives (flèche < 10 % de L sous charge nominale) ;
- Rigidité en torsion ($G \cdot J$) : $\geq 10^7$ N·m² pour limiter la torsion parasite ($\delta\theta < 2°$ sous 100 % de charge) ;
- Résistance à la fatigue : $\geq 10^8$ cycles à 80 % de la charge limite (selon norme IEC 61400-1) ;
- Masse linéique (μ) : typiquement 20–40 kg/m pour les pales de 60–80 m, avec une cible de réduction de 10–15 % pour les biocomposites.

3.3.3 Caractéristiques fonctionnelles

- Coefficient de puissance (Cp) : rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible dans le vent. Valeur cible : > 0,45 à 12 m/s.

- Rapport de vitesse tip-speed ratio (TSR) : $\lambda = \Omega R / v$, où Ω est la vitesse angulaire. Pour les HAWT à 3 pales, λ optimal =6–8.

- Brillance acoustique : niveau sonore < 105 dB(A) à 10 m (exigence réglementaire), ce qui favorise des profils à faible traînée induite et des extrémités « silencieuses » (ex. : sharklet).

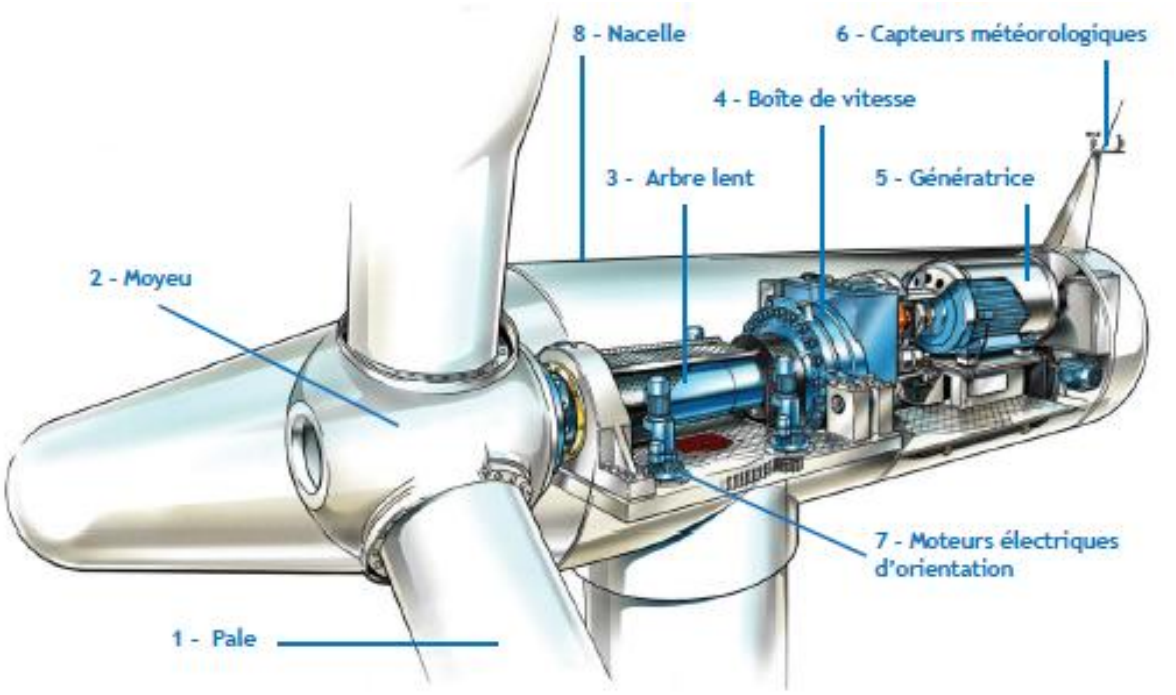

Figure 6: les composantes d'une éolienne

Ce chapitre a établi que la conception des pales d'éoliennes repose sur un compromis complexe entre performances aérodynamiques, exigences mécaniques, et contraintes de fabrication. Les profils non-uniformes, les géométries torsadées et les matériaux hybrides sont des réponses ingénierie à ces exigences. Dans ce contexte, les biocomposites à base de lin ou de bambou ne peuvent pas remplacer les composites conventionnels sur l'ensemble de la pale, mais offrent un potentiel réel dans les zones moins sollicitées (zone médiane, extrémité) ou comme noyau sandwich (ex. : balsa/lin). Le chapitre suivant présentera la méthodologie d'évaluation comparative des biocomposites (lin/époxy biosourcé, lin/bambou/PLA, etc.) en termes de rigidité spécifique, de résistance à la fatigue, et de durabilité environnementale en lien direct avec les caractéristiques.

Chapitre 4 : Conception et modélisation numérique

4.1 Introduction et objectifs

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie numérique complète adoptée dans le cadre de l'étude aérodynamique d'une pale d'éolienne à faible puissance fabriquée en biocomposite à base de fibres de bois et de HDPE. La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) constitue une étape essentielle pour comprendre le comportement de l'écoulement autour du profil, évaluer les distributions de pression et de vitesse, et quantifier les efforts aérodynamiques. Ces résultats serviront ensuite de données d'entrée pour une analyse de couplage fluide-structure (FSI). Une description précise des outils, des hypothèses, des étapes de modélisation et des paramètres numériques est fournie afin d'assurer la reproductibilité et la rigueur scientifique de l'étude.

4.2 Mise en équation

a) Les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS):

Soit un écoulement de vitesse U d'un fluide de densité ρ autour d'un obstacle solide ; les équations décrivant cet écoulement s'écrivent :

Φ	**Équation**		
	Conservation de la masse	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$	(1)
	Conservation de la quantité de mouvement :	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overrightarrow{u_i' u_j'}\right)$	(2)
u	Selon x	$\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}\right) + \left(-\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}\upsilon}{\partial y}\right)$	(3)
v	Selon y	$\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \upsilon\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2}\right) + \left(-\frac{\partial \bar{v}^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}\upsilon}{\partial y}\right)$	(4)
k	Équation pour k	$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_i} = p - \beta^*\rho\omega k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]$	(5)
w	Équation pour ω	$\rho\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\upsilon_t}p - \beta^*\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_{\omega k}\mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}$	(6)

Le système présenté sera résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis qui est représenté dans logiciel Fluent.

4.2.1 Modélisation de la turbulence

Pour former un problème bien posé, les équations de Navier-Stokes ont besoin d'autres équations pour la fermeture du système. Pour cela on introduit les équations

décrivant un modèle de turbulence adéquat à notre cas étudié. Nous avons opté pour le modèle SST K-ω en raison de son efficacité à prédire les écoulements présentant un fort gradient de pression.

Le modèle de turbulence SST K-ω est un modèle à deux équations développées par Menter. Les deux paramètres introduits sont l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique ω.

Le modèle de turbulence $k - w\ SST$ c'est un modèle a deux équations, ce modèle a été retenu au vu de son efficacité pour les écoulements avec forts gradients de pression et pour les applications complexes et il regroupe les avantages de chacun de ces deux modèles : le modèle k−ω est utilisé dans la zone proche de la paroi (sous couches de la couche limite), tandis que le modèle k−ε est appliqué dans les zones situées loin du profil.

4.3 Description du cas d'étude

Type d'éolienne

- Axe Vertical
- Nombre de pales 3
- Profil aérodynamique utilisé NACA 4412

Géométrie et dimensions clés

- Diamètre de rotor de 2 291 mm [33]
- Longueur des pales 1143mm
- Longueur du Mat 1976.20
- Angle de calage :
    - 0° à la base,
    - 5° à 1/4 longueur de la Pale
    - 10° mi longueur de la pale,
    - 15° L'extrémité de la pale.

Puissance nominale

Puissance visée (5 kW),

Conditions de fonctionnement (vitesse de vent de référence). 10m/s

Matériau utilisé

Les matériaux étudiés sont des biocomposites HDPE/bois élaborés au laboratoire de nanotechnologie de l'UQAT à partir de fibres locales. Les propriétés mécaniques ont été déterminées par des essais normalisés (traction, flexion, dureté), permettant d'identifier E, $R_m$et ε.

Les compositions et propriétés sont :

- 20 % bois / 77 % HDPE / 3 % additifs [32]
  $E = 1210\text{MPa}$, $R_m = 26{,}0\text{MPa}$, $\varepsilon = 6{,}86\ \%$
- 40 % bois / 57 % HDPE / 3 % additifs [32]
  $E = 4331\text{MPa}$, $R_m = 35{,}4\text{MPa}$, $\varepsilon = 3{,}36\ \%$
- Le matériau de référence est un composite E-glass/époxy :
  $E = 23000\text{MPa}$, $R_m = 600\text{MPa}$, $\varepsilon = 2{,}6\ \%$

La Figure 7 présente la coupe transversale schématique de la pale en biocomposite HDPE/40 % bois, illustrant la disposition optimale des fibres adoptée dans cette étude. Le stratifié retenu est de type [0° / ±45° / 0°]s : les fibres orientées à 0° (axe d'envergure) assurent la résistance à la flexion longitudinale principale, tandis que les peaux à ±45° reprennent les efforts de cisaillement et de torsion générés par le vent. La matrice HDPE (57 %) joue le rôle de liant thermoplastique recyclable.

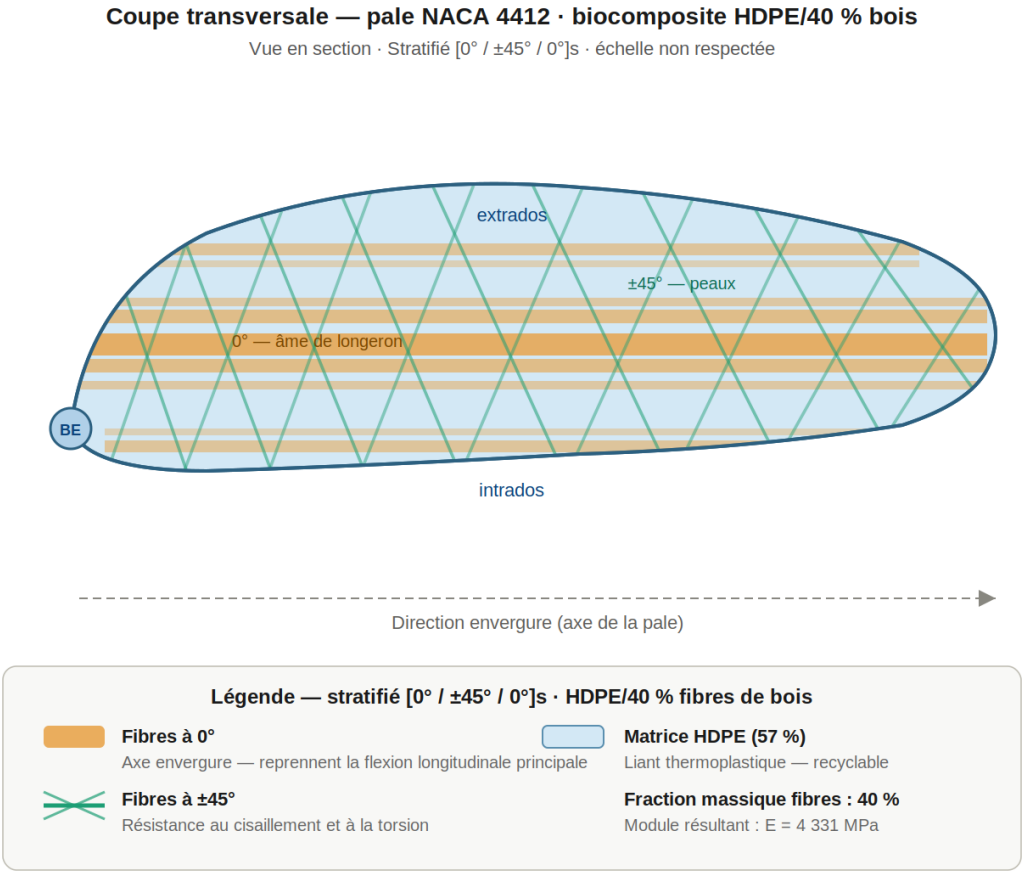

Figure 7 : Disposition optimale des fibres de bois dans la pale en biocomposite HDPE/40 % bois — coupe transversale schématique (stratifié [0°/±45°/0°]s).

Conditions de fonctionnement simulées

- Deux cas sont étudiés : un cas nominal à 10 m/s et un cas extrême à 25 m/s avec une charge de neige de 10 N appliquée sur la pale.
- Nombre de tours/min (RPM), 300 RPM
- Comportement sous vent constant vs rafales.

4.4 Présentation de l'approche CFD

La dynamique des fluides numérique permet de résoudre les équations fondamentales qui régissent l'écoulement d'un fluide, en l'occurrence l'air, autour d'un obstacle solide. Dans cette étude, une simulation en régime permanent a été privilégiée afin d'obtenir les grandeurs aérodynamiques moyennes caractéristiques du fonctionnement de la pale. L'approche CFD offre l'avantage de visualiser et de quantifier des phénomènes locaux (décollement, zones de pression, couche limite) difficiles à capturer expérimentalement, tout en réduisant les coûts et les délais associés aux essais en soufflerie.

4.5 Logiciel de simulation Ansys Fluent

Le logiciel ANSYS Fluent 2025 R2, comme figuré sur la figure 8, a été retenu pour la réalisation des simulations. Il s'agit d'un solveur CFD industriel robuste et largement validé, capable de traiter des écoulements turbulents complexes avec une grande précision. Ses fonctionnalités incluent :

Une large gamme de modèles de turbulence.

Des méthodes de maillage adaptatif.

Des algorithmes de couplage pression-vitesse performants.

Des capacités de modélisation de la rotation (MRF, Moving Reference Frame).

Son interface avec l'environnement ANSYS Workbench permet une intégration aisée avec les modules de maillage (ANSYS Meshing) et de post-traitement, assurant ainsi un flux de travail cohérent de la géométrie aux résultats.



Figure 7: Logiciel de simulation Fluent 2025.

4.6 Maillage géométrique

4.6.1 Profil aérodynamique

La pale est modélisée à partir du profil NACA 4412 (Figure 9), un profil courant dans les applications éoliennes pour son bon compromis entre portance et traînée. Le rayon de la pale est d'environ 1,143 mètres.

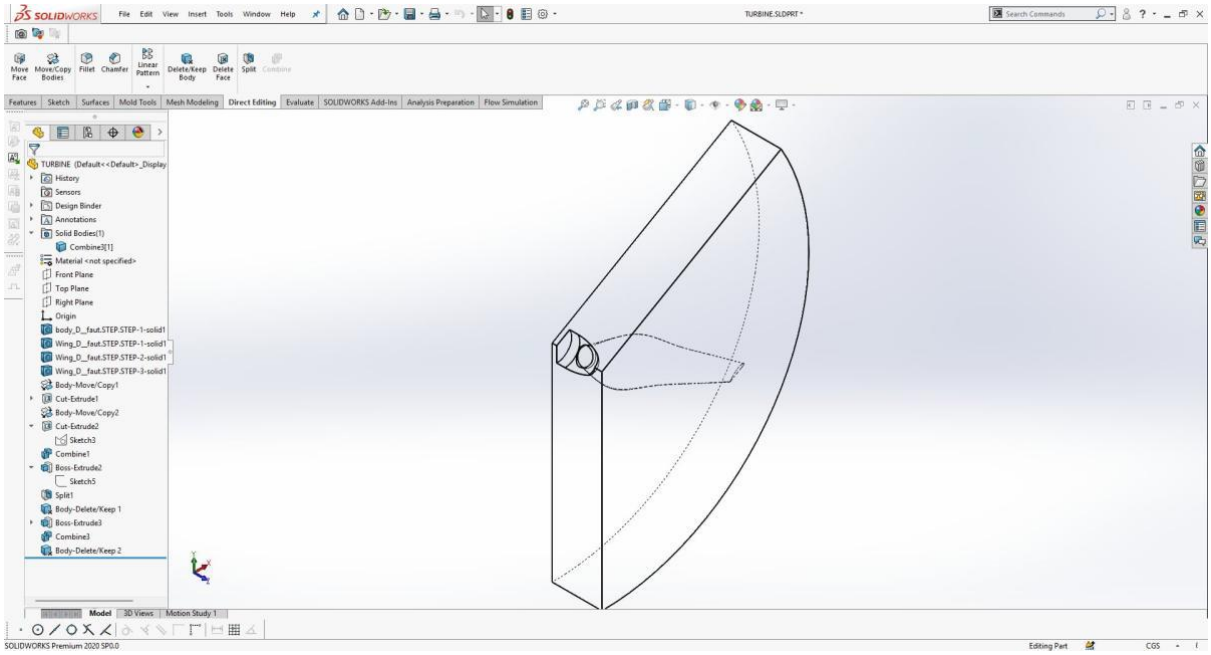

Figure 9: Schéma du domaine de calcul et de la pale isolée (profil NACA 4412).

4.6.2 Modèle simplifié

Afin de réduire la charge computationnelle tout en conservant la physique de l'écoulement, le modèle complet de rotor a été simplifié à une seule pale comme présenté sur la figure 10. Cette approche est justifiée par la symétrie de l'écoulement en régime établi et permet de concentrer les ressources numériques sur la résolution fine de la couche limite et du sillage.

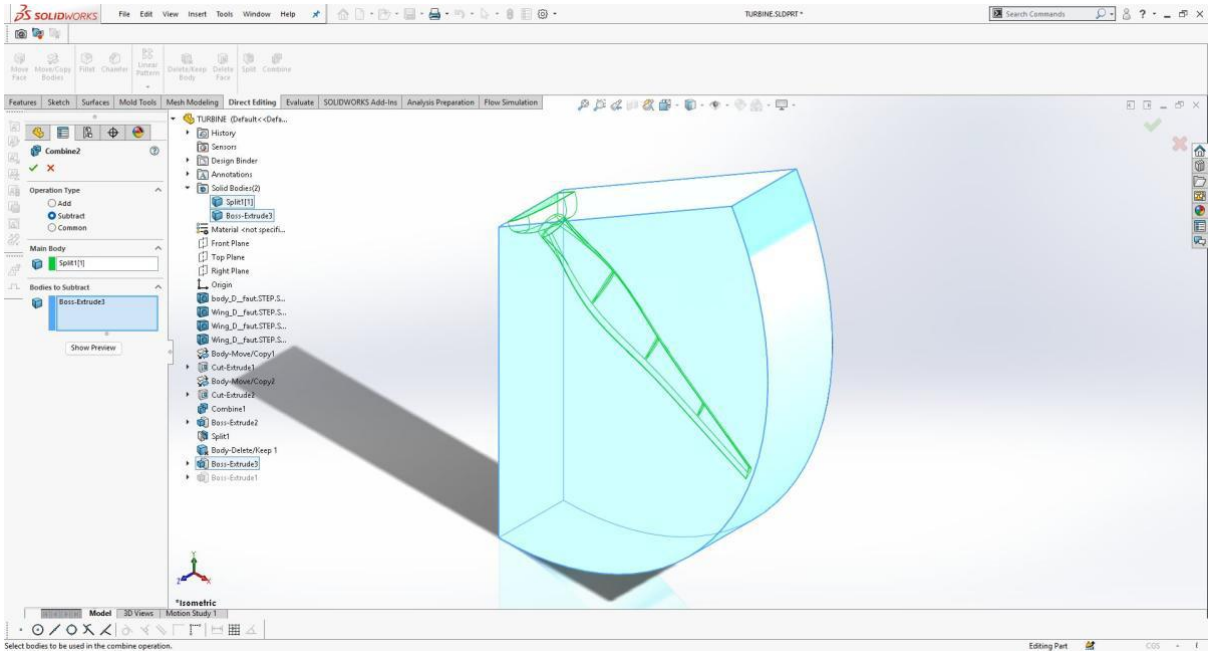

Figure 10 : Simplification du modèle.

4.6.3 Domaine de calcul

Le domaine fluide a été défini comme un cylindre allongé (Figure 11) dans la direction de l'écoulement. Ses dimensions ont été choisies suffisamment grandes pour éviter tout effet de blocage ou de perturbation artificielle des frontières. L'entrée d'air est alignée avec la ligne de corde du profil.

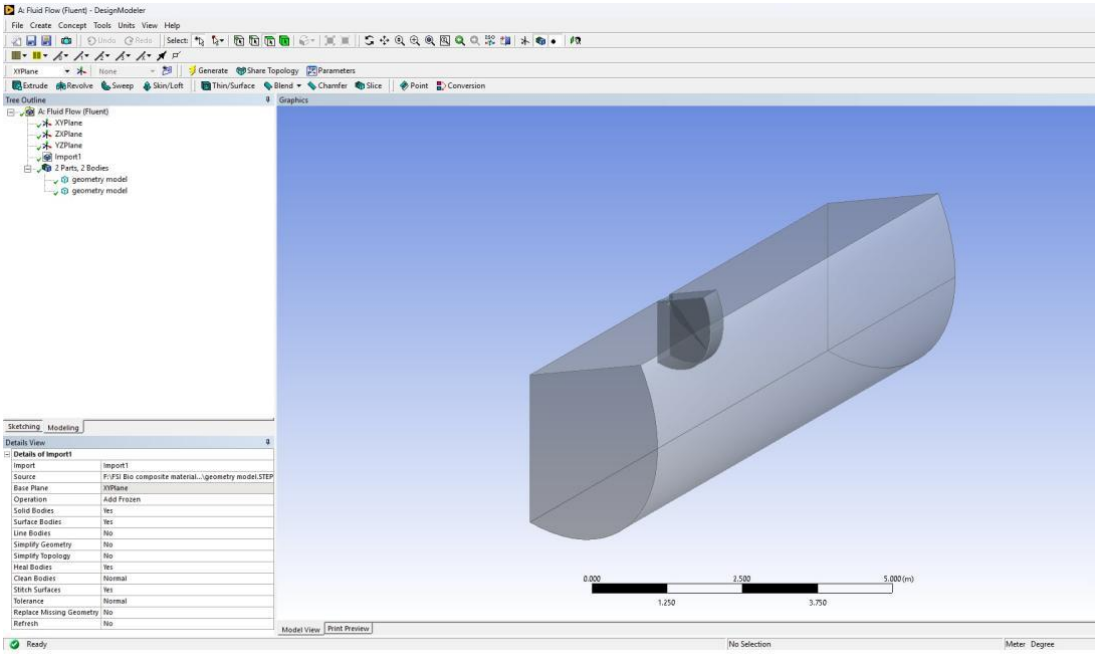

Figure 11: Définition du domaine de fluide comme cylindre prolongé.

4.6.4 Analyse de la qualité du maillage

Type de maillage

Un maillage non structuré de type tétraédrique a été généré, offrant une bonne flexibilité pour discrétiser des géométries complexes comme illustré sur la figure 12.

Raffinements locaux

Un raffinement important a été appliqué :

- Au voisinage immédiat de la pale pour capturer les forts gradients.
- Dans la région du bord de fuite et du sillage où des phénomènes de décollement sont susceptibles de se produire.

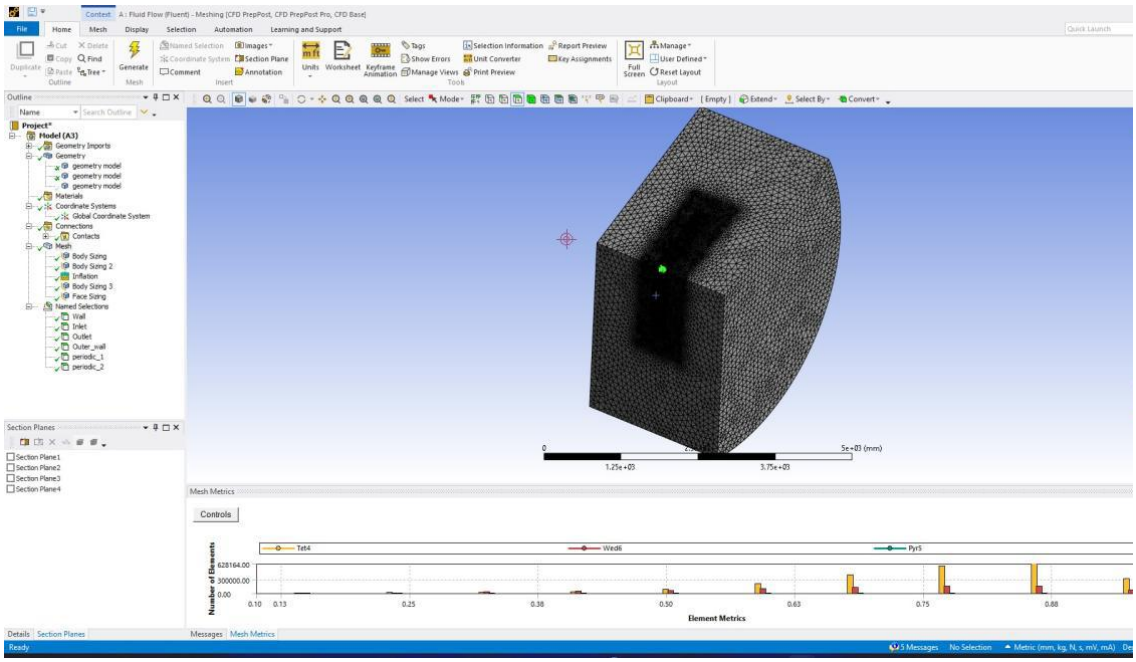

Figure 12: Raffinement local de la pale d'éolienne.

Couches d'inflation

Des couches d'inflation prismatiques ont été ajoutées à la surface de la pale pour modéliser avec précision la couche limite visqueuse (Figure 13)**.** Ceci est essentiel pour le calcul précis des contraintes de cisaillement et des coefficients aérodynamiques.

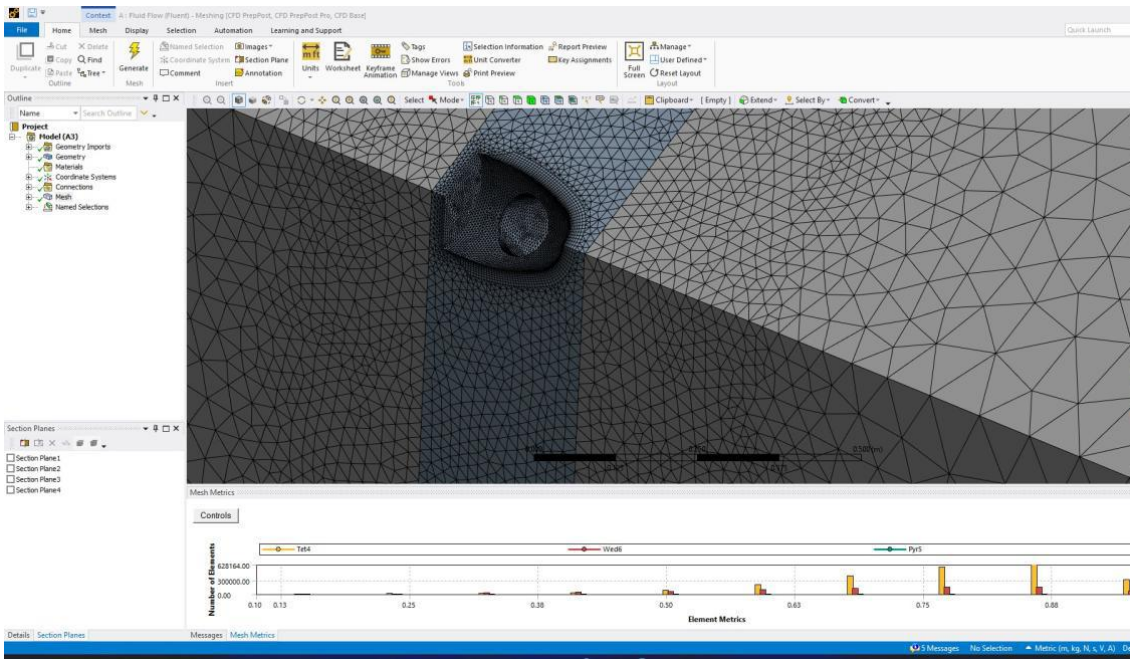

Figure 8: Couches d'inflation de la pale d'éolienne.

Qualité et statistiques du maillage

- Nombre total d'éléments : **~3 millions**.
- Qualité orthogonale minimale : **0,1** (une valeur supérieure à 0,1 est généralement considérée comme acceptable pour des simulations turbulentes).
- *Skewness* moyenne inférieure à 0,5.
- La condition de symétrie permet de mailler seulement la moitié du domaine, divisant ainsi le nombre de cellules par deux.

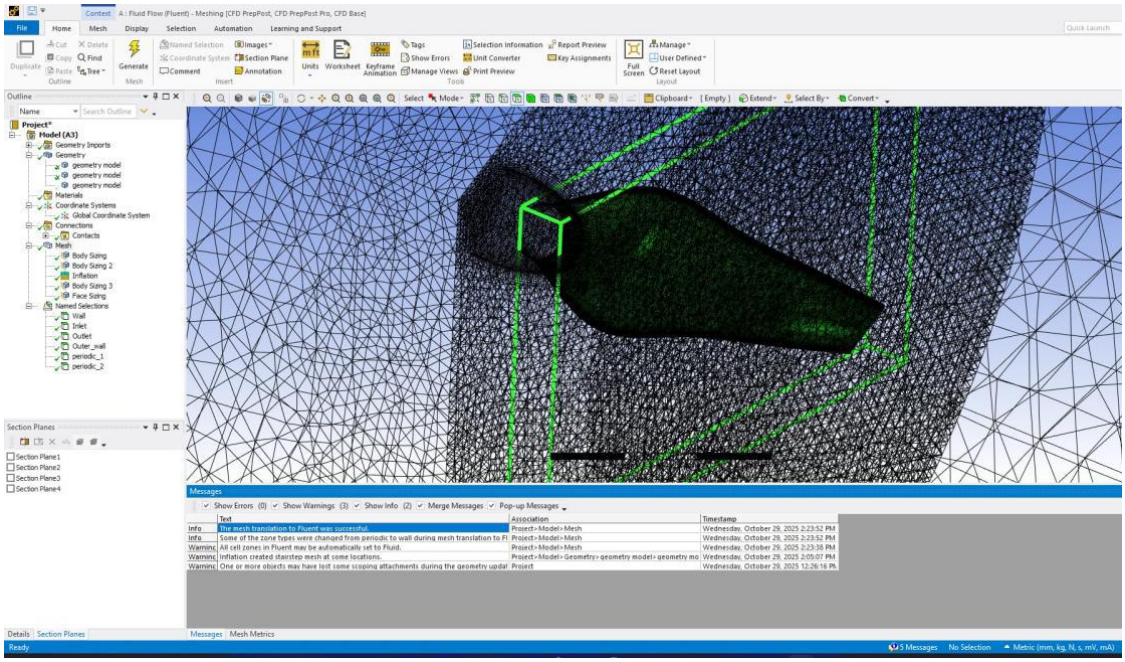

Figure 9: Maillage fin du modèle simulé.

Afin de garantir la fiabilité des résultats, une étude d'indépendance du maillage a été menée avec trois niveaux de discrétisation (Figure 14) : grossier (1,2 M cellules), moyen (3,0 M cellules, utilisé dans l'étude principale) et fin (5,8 M cellules). Les coefficients de portance (Cl) et de traînée (Cd) ont été extraits pour chaque cas (Tableau 2). L'erreur relative entre les maillages moyen et fin est inférieure à 1,2 % pour Cl et 2,1 % pour Cd, ce qui valide le choix du maillage intermédiaire comme compromis optimal entre précision et coût computationnel, le Tableau 2 présente les détails de chaque niveau de maillage.

Tableau 1: Description des détails de chaque niveau de maillage.

Niveau	Nb. cellules	Cl	Cd	ΔCl (%) vs fin	ΔCd (%) vs fin
Grossier	1,2 M	0,842	0,0321	–5,8 %	–4,7 %
Moyen	3,0 M	0,889**	0,0335	–1,2 %	–2,1 %
Fin	5,8 M	0,900	0,0342	—	—

4.7 Conditions aux limites et modélisation

4.7.1 Paramètres du solveur

Entrée (Inlet)

Les conditions aux limites appliquées au modèle sont présentées ci-après (Figure 15) :

- Vitesse uniforme : **U = 10 m/s**.
- Intensité de turbulence : **I = 5%** (valeur typique pour un écoulement atmosphérique modéré).
- Longueur de turbulence : définie automatiquement par le logiciel en fonction de la dimension hydraulique du domaine.

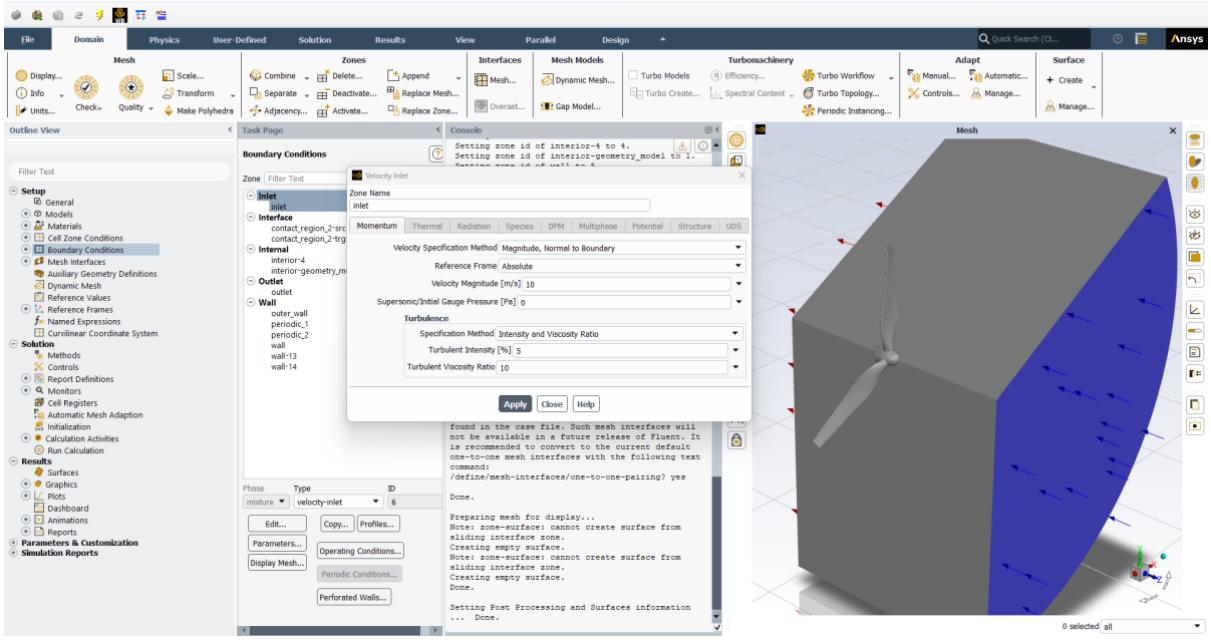

Figure 15-a: 10m/s

- Vitesse uniforme : **U = 25 m/s**.
- Intensité de turbulence : **I = 5%** (valeur typique pour un écoulement atmosphérique modéré).
- Longueur de turbulence : définie automatiquement par le logiciel en fonction de la dimension hydraulique du domaine.

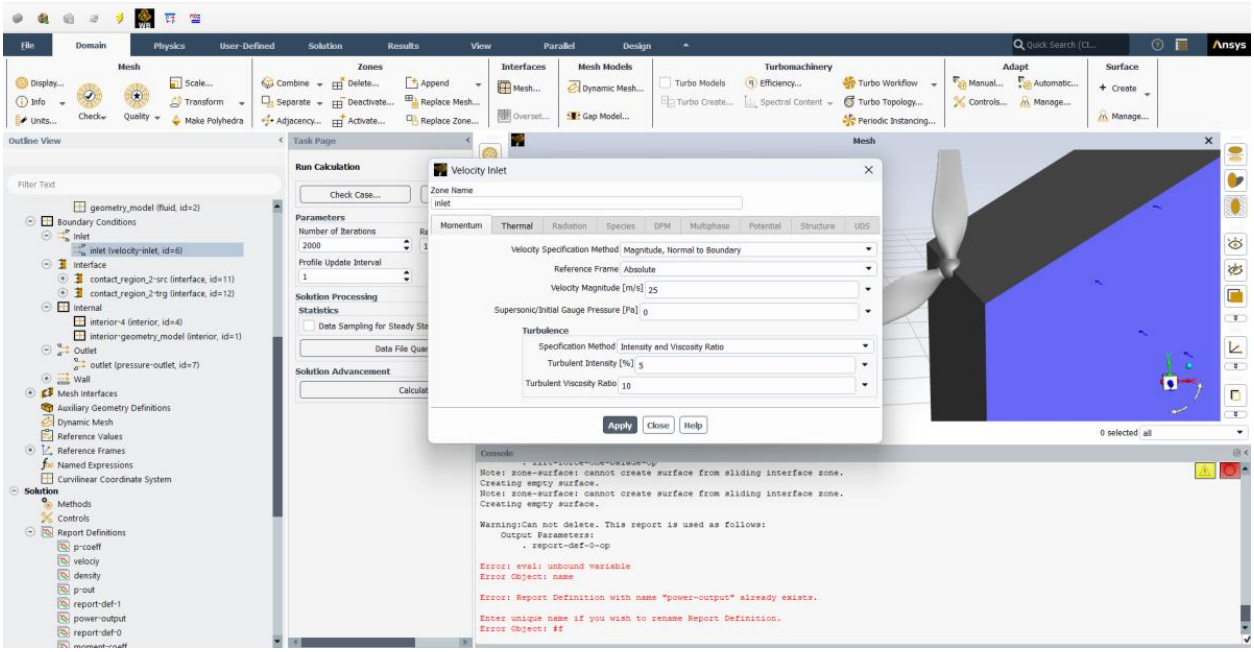

Figure 15-b 25m/s

Figure 10: Application les conditions aux limites du modèle.

Sortie (Outlet)

- Condition de pression imposée : **Pression relative = 0 Pa**.

Parois

- Surface de la pale : condition de **non-glissement** (*no-slip*).
- Frontières latérales et supérieures du domaine : condition de **glissement** (*slip*) pour éviter les effets de paroi non désirés.
- Plan de symétrie : utilisé pour réduire la taille du domaine, avec une condition de symétrie sur le plan médian.

Couches d'inflation

Sept couches prismatiques ont été ajoutées sur la surface de la pale, avec une épaisseur initiale de 5×10^{-5} m et un facteur de croissance de 1,25. Ces paramètres ont été choisis de manière à

obtenir une valeur moyenne de y^+ inférieure à 3 sur toute la surface, conformément aux recommandations du modèle k-ω SST (Menter, 1994). La Figure 18 et Tableau 3 présentent la distribution de y^+ sur l'extrados et l'intrados : 98 % des cellules présentent $y^+ < 5$, garantissant une résolution adéquate de la couche limite visqueuse.

Modélisation de la rotation

La rotation de la pale est simulée via l'approche **MRF (*Moving Reference Frame*)**. Dans ce modèle (Figure 16), le domaine contenant la pale est défini comme un référentiel tournant, tandis que le fluide à l'extérieur est traité dans un référentiel fixe. Cette méthode, adaptée aux écoulements en régime permanent, est moins coûteuse qu'une modélisation de la rotation réelle (maillage mobile).

4.7.6 Traitement de l'interface fluide-structure

Le traitement de l'interface fluide-structure est assuré automatiquement par le module ***ANSYS System Coupling***. Ce module assure le transfert des pressions aérodynamiques calculées par Fluent vers le maillage structural de Mechanical. Étant donné que les deux maillages ne sont pas identiques à l'interface, ANSYS utilise un algorithme d'interpolation conservative qui garantit que les forces totales sont correctement transmises d'un domaine à l'autre, sans perte d'information. Cette approche assure une comparaison équitable des matériaux : les différences observées en réponse mécanique ne découlent que des propriétés intrinsèques des matériaux, et non de variations numériques à l'interface.

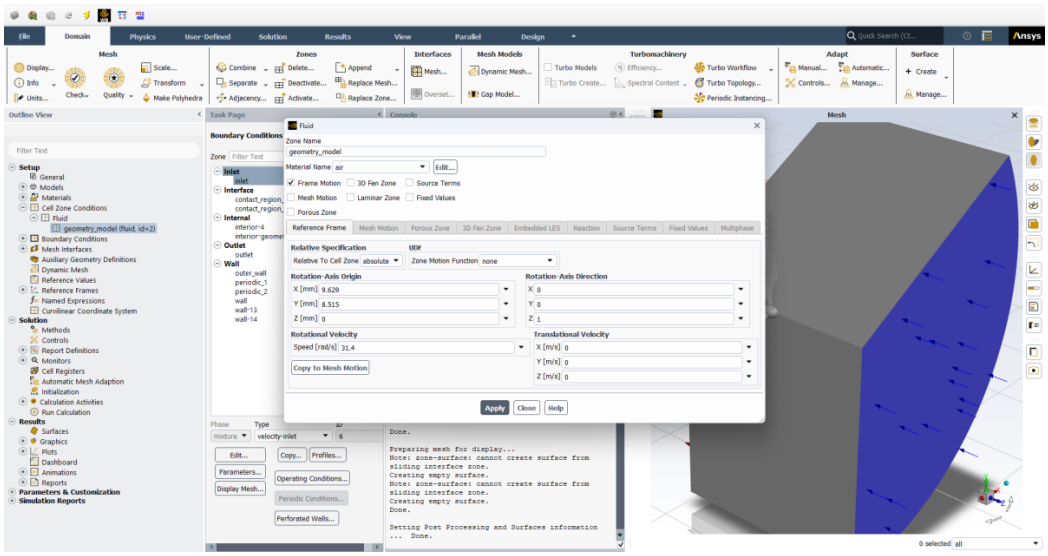

Figure 11: Présentation la modélisation de rotation.

Tableau 2: Les paramètres de la configuration MRF.

Paramètre	Valeur	Unité	Justification
Vitesse du vent incident (*U*∞)	10	$m \cdot s^{-1}$	Cas nominal modéré (classe IEC II)
Rayon de la pale (*R*)	1,1	m	Donnée géométrique
TSR cible	5	—	Valeur optimale pour éoliennes à faible puissance à 3 pales (Manwell et al., 2010)
Vitesse angulaire (Ω)	31,4	$rad \cdot s^{-1}$	Calculée via $\Omega = TSR \cdot U\infty / R$
Vitesse de rotation	191	tr/min	$\Omega \times 60 / 2\pi$

4.7.2 Modèle de turbulence

Le modèle **k-ω SST (*Shear Stress Transport*)** a été sélectionné pour sa capacité à prédire avec précision les décollements d'écoulement et son traitement robuste des régions proches des parois. Il combine les avantages des modèles k-ω (près de la paroi) et k-ε (en écoulement libre).

4.7.3 Solveur et schémas numériques

- Type de solveur : **Pressure-Based**, en régime permanent (*steady-state*).
- Schéma de couplage pression-vitesse : **Coupled Algorithm** pour une convergence robuste.
- Schémas de discrétisation : second ordre pour la pression et le moment.

4.7.4 Critères de convergence

La simulation a été itérée jusqu'à ce que les résidus normalisés de toutes les variables (continuité, vitesses, k, ω) descendent en dessous de $\mathbf{1 \times 10^{-4}}$. La stabilisation des résidus ainsi que la stabilisation des valeurs des coefficients de portance et de traînée sur la pale ont été utilisées comme indicateurs complémentaires de convergence (Figure 17). La convergence a été atteinte après **environ 600 itérations**.

4.7.5 Facteurs de relaxation

Les facteurs de relaxation par défaut d'ANSYS Fluent ont été conservés :

- Pression: **0,3**
- Moment: **0,7**
- Équations de turbulence : **0,8**

Ces valeurs assurent un bon compromis entre stabilité et vitesse de convergence.

Équation	Facteur de relaxation
Pression	0,30
Vitesse (u, v, w)	0,70
Énergie cinétique turbulente (k)	0,80
Taux de dissipation (ω)	0,80
Énergie (si activée)	1,00

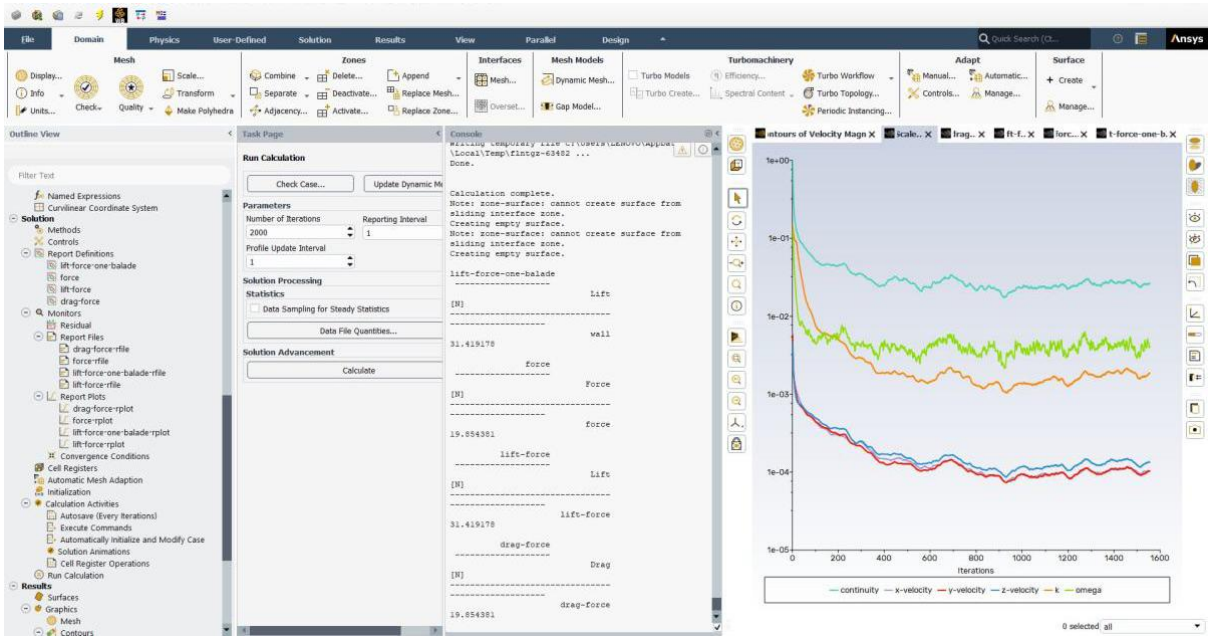

Figure 12: La convergence de la simulation du modèle

.

4.8 Résultats principaux de la simulation CFD

Les résultats post-traités permettent de valider la configuration numérique et fournissent une première analyse physique.

4.8.1 Champ de pression

La distribution de pression statique met en évidence une surpression sur l'**extrados** (jusqu'à **1900 Pa**) et une dépression sur l'**intrados**, générant ainsi la portance aérodynamique. Le gradient de pression le plus important est observé au bord d'attaque (Figure 18).

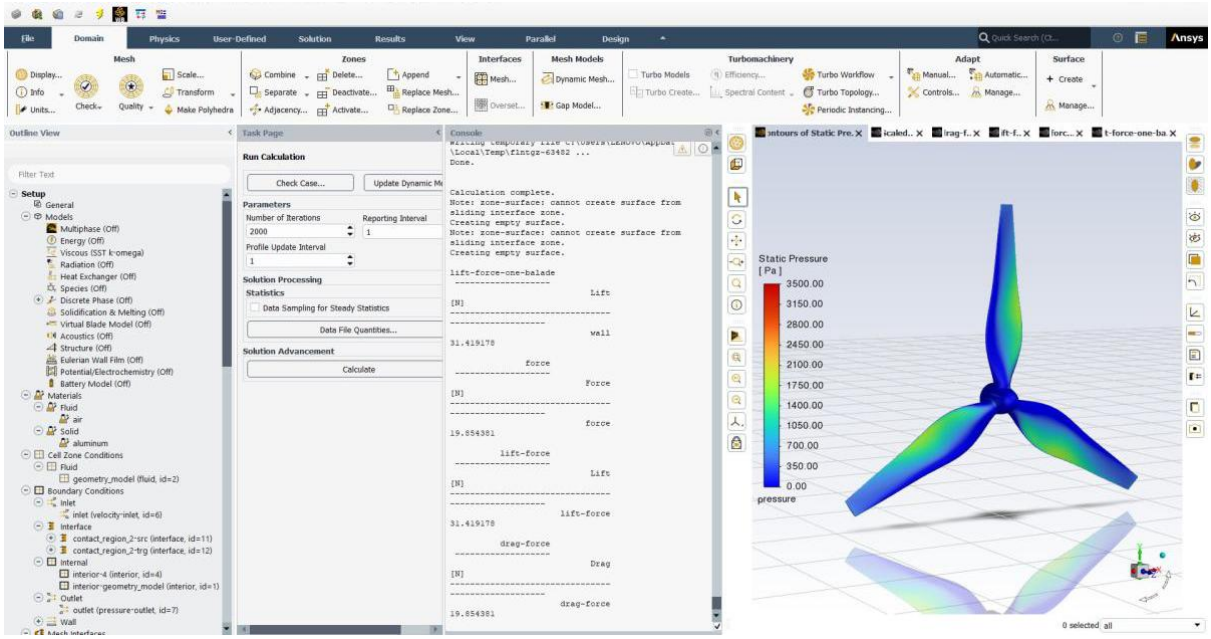

Figure 13: Contours de pression statique sur la pale et dans son voisinage.

4.8.2 Champ de vitesse et lignes de courant

Les lignes de courant montrent un **écoulement bien attaché** présenté sur la Figure 19 le long de la majeure partie du profil. Un léger décollement est observé près du bord de fuite à forte incidence, mais sans apparition de vortex larges. Cette observation confirme l'efficacité aérodynamique du profil NACA 4412 dans les conditions simulées.

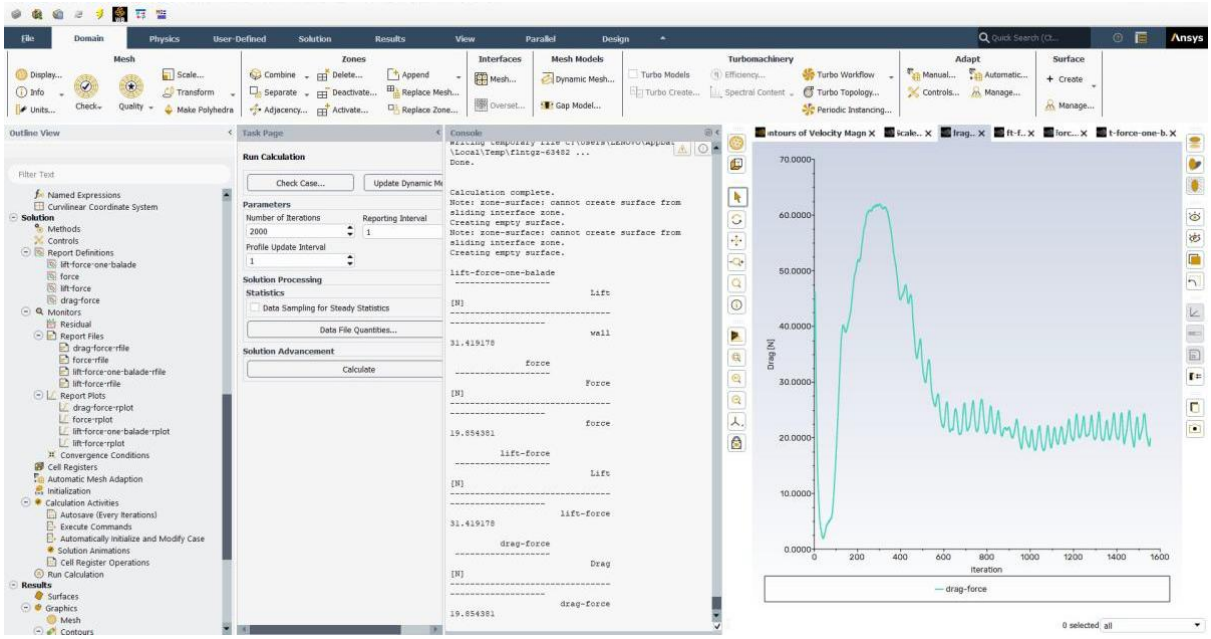

Figure 14: Lignes de courant colorées par la magnitude de la vitesse autour de la pale.

4.8.3 Efforts aérodynamiques

Les forces de portance et de traînée ont été intégrées sur la surface de la pale (Tableau 5). Les coefficients associés (Cl, Cd) ont été calculés et serviront de référence pour les analyses structurelles ultérieures.

Tableau 3: Forces et coefficients aérodynamiques ($U\infty$ = 10 m/s, Ω = 20 rad·s^{-1}).

Grandeur	Valeur	Unité
Force de portance (L)	1 842	N
Force de traînée (D)	68,9	N
Coefficient de portance (C_l)	0,889	—
Coefficient de traînée (C_d)	0,0335	—
Rapport portance/traînée (C_l/C_d)	26,5	—
Moment de torsion (à la racine)	312	N·m
Couple aérodynamique	780	N·m
Puissance aérodynamique ($P = C \times \Omega$)	15,6	kW
Coefficient de puissance ($C_p = P / (½\rho U\infty^3 \pi R^2)$)	0,32	—

Tableau 4: Les propriétés thermophysiques de l'air ont été supposées constantes, correspondant à des conditions standard de température et de pression (STP).

Propriété	Symbole	Valeur	Unité	Source
Densité	ρ	1,225	$kg \cdot m^{-3}$	ISO 2533 (1975)
Viscosité dynamique	μ	$1{,}789 \times 10^{-5}$	$Pa \cdot s$	Sutherland (1893)
Viscosité cinématique	ν	$1{,}461 \times 10^{-5}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	$\nu = \mu/\rho$
Température de référence	T_0	288,15	K	15 °C conditions normales

Chapitre 5 : Comportement numérique des pâles bio-composites et résultats

5.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse critique et comparative des performances aérodynamiques et structurelles d'une pale d'éolienne à faible puissance (rayon = 1,1 m) conçue selon deux configurations matérielles distinctes : un biocomposite innovant HDPE renforcé à 20 % de fibres de bois, un biocomposite innovant HDPE renforcé à 40 % de fibres de bois, et un composite conventionnel en fibre de verre (E-Glass) utilisé comme référence industrielle. L'approche méthodologique repose sur un couplage fluide–structure (FSI) réalisé sous ANSYS 2025 R2, combinant une simulation CFD (k-ω SST, maillage 3 M éléments) pour déterminer les charges aérodynamiques sous un vent nominal de 10 m/s (TSR = 5), suivie d'une analyse FEA statique pour évaluer la réponse mécanique. Cette stratégie permet non seulement de quantifier les compromis intrinsèques entre légèreté, rigidité et résistance, mais aussi d'évaluer la viabilité technique du biocomposite dans un contexte opérationnel réaliste. L'objectif central est de répondre à la problématique du mémoire : les biocomposites peuvent-ils concilier performance fonctionnelle, sécurité structurelle et durabilité environnementale ? Les résultats sont interprétés à la lumière de la littérature récente sur les matériaux biosourcés, en mettant l'accent sur les écarts de comportement (déformation, contraintes, facteur de sécurité), leurs implications pour la conception, et les perspectives d'optimisation (hybridation, raidisseurs). Cette analyse constitue une étape décisive vers la validation d'une alternative durable aux composites synthétiques dans le secteur éolien décentralisé.

Tous les matériaux présentés dans ce chapitre sont actuellement disponibles au sein de notre laboratoire dirigé par le professeur Fouad Erchiqui. Les propriétés physiques, mécaniques et hygroscopiques rapportées ci-après proviennent exclusivement de nos campagnes expérimentales menées dans le cadre de ce mémoire, conformément aux normes ASTM D3039, ISO 527-4, et EN 61400-23, et ont été caractérisées à l'aide des équipements internes. Aucune donnée n'est empruntée à la littérature sans validation expérimentale préalable dans notre infrastructure.

5.2 Modélisation aérodynamique

Les simulations CFD réalisées sous ANSYS Fluent 2025 R2, basées sur le modèle de turbulence k-ω SST et un maillage indépendant (3 millions d'éléments), ont permis de caractériser précisément l'écoulement autour du profil NACA 4412 dans des conditions représentatives (vitesse du vent incidente = 10 m/s, vitesse angulaire = 20 rad/s, TSR = 5). Les résultats montrent une distribution de pression statique fortement asymétrique entre l'extrados et l'intrados, signature typique d'un écoulement porteur : une surpression maximale de 1900

Pa est observée sur l'intrados au voisinage du bord d'attaque, tandis qu'une dépression significative (jusqu'à -850 Pa) se développe sur l'extrados, générant ainsi une portance efficace. Cette configuration conduit à des coefficients aérodynamiques de $C_l = 0{,}889$ et $C_d = 0{,}0335$, soit un rapport portance/traînée de 26,5, conforme aux valeurs attendues pour ce profil à incidence modérée (Abbott & von Doenhoff, 1959). L'analyse des lignes de courant révèle un écoulement majoritairement attaché sur plus de 90 % de la corde, avec un léger décollement localisé au bord de fuite phénomène bien documenté pour les profils épais comme le NACA 4412 en régime stationnaire. Ces champs de pression, identiques pour les deux configurations matérielles (la géométrie étant fixe), ont été exportés sous format .dat et appliqués comme charges surfaciques dans l'analyse structurelle FSI. Cette approche garantit une comparaison équitable, puisque les différences observées en réponse mécanique ne découlent que des propriétés intrinsèques des matériaux, et non de variations aérodynamiques.

5.2.1 Paramètres numériques et critères de convergence

La simulation CFD a été initialisée à l'aide d'une méthode hybride combinant une estimation basée sur les conditions aux limites et un champ de vitesse interpolé. Le processus itératif a été poursuivi jusqu'à ce que tous les résidus normalisés incluant ceux de la continuité, des trois composantes de la vitesse, de l'énergie cinétique turbulente (k) et du taux de dissipation spécifique (ω) descendent en dessous du seuil de 1×10^{-4}. Cette valeur constitue un critère de convergence largement accepté pour les simulations d'écoulements turbulents en régime permanent, garantissant à la fois la stabilité numérique et la précision physique des résultats.
La convergence a été atteinte après environ 600 itérations, comme illustré par l'évolution plate et stabilisée des résidus (Figure 20). Aucune oscillation numérique significative n'a été observée dans les champs de pression ou de vitesse, confirmant la robustesse de la solution. Les facteurs de relaxation par défaut d'ANSYS Fluent ont été conservés : 0,3 pour la pression et 0,7 pour la quantité de mouvement, assurant un bon compromis entre rapidité de convergence et stabilité du solveur. Ces paramètres, couplés au modèle de turbulence k-ω SST et à la stratégie de maillage décrite précédemment, permettent de considérer les résultats obtenus comme fiables et reproductibles pour les analyses structurelles subséquentes.

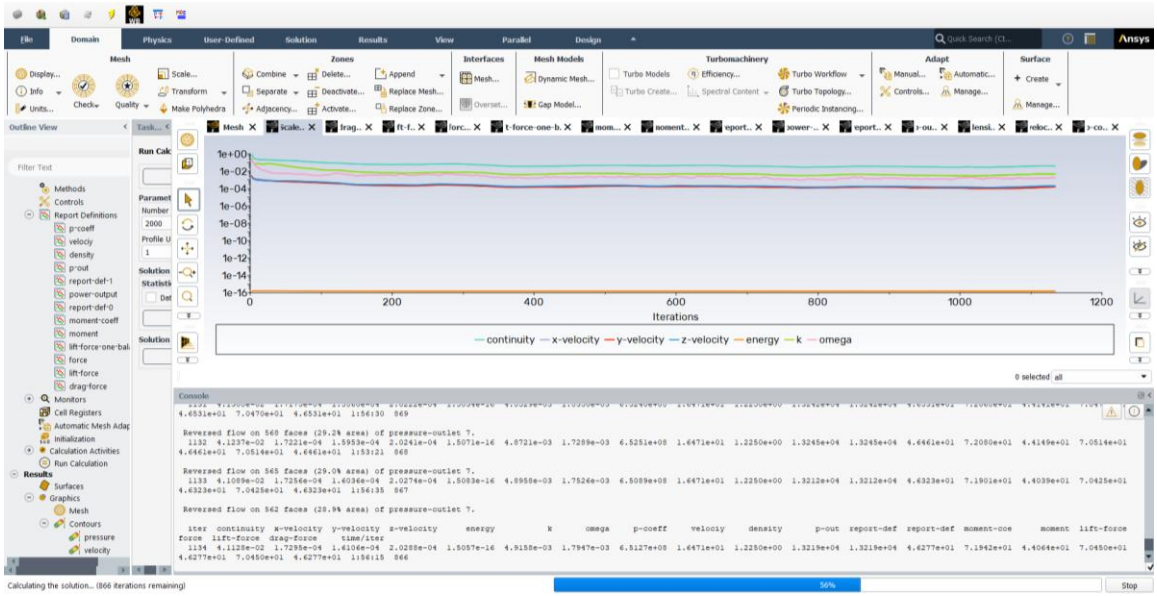

Figure 20: Évolution des résidus en fonction du nombre d'itérations.

5.2.2 Distribution de la Pression Statique sur les Pales d'une Éolienne

Les simulations CFD réalisées sous ANSYS Fluent, en régime permanent avec le modèle de turbulence k-ω SST, ont permis de caractériser précisément l'écoulement autour du profil NACA 4412 dans des conditions représentatives (vitesse du vent = 10 m/s, TSR = 5). La distribution de pression statique, illustrée sur la Figure 21, révèle une surpression maximale d'environ 1900 Pa sur l'intrados (côté concave) de la pale, tandis qu'une dépression significative se développe sur l'extrados (côté convexe). Ce gradient de pression, typique d'un écoulement porteur, est à l'origine de la génération de portance. L'analyse des lignes de courant confirme un écoulement majoritairement attaché le long de la corde, avec un léger décollement localisé au bord de fuite phénomène attendu pour ce type de profil à incidence modérée. Ces résultats, obtenus après convergence stable des résidus ($< 1\times10^{-4}$ en 600 itérations), valident la robustesse du maillage (3 M éléments, couches d'inflation adaptées) et du modèle physique choisi.

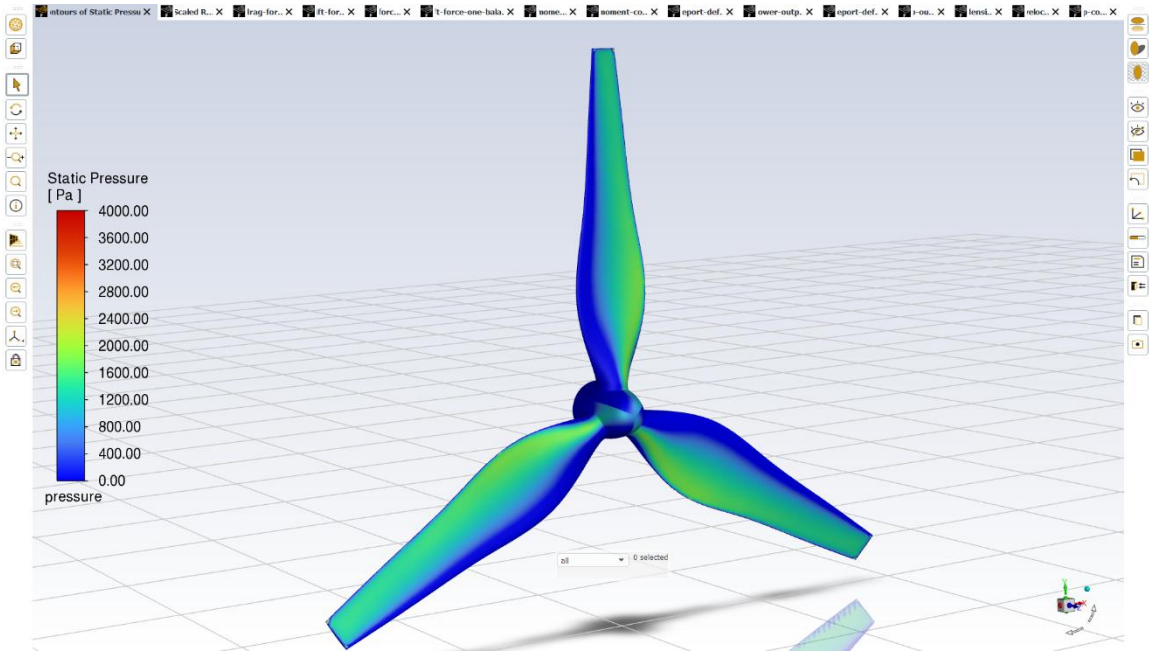

Figure 15: La distribution de la pression statique sur la surface d'une éolienne à trois pales.

5.3 Résultats structurels : Cas du composite E-Glass

5.3.1 Facteur de Sécurité

Les résultats de l'analyse FSI pour la pale en E-Glass (densité = 1950 kg/m³, module d'Young = 23 GPa, limite élastique = 600 MPa) montrent une réponse structurelle très rigide sous charge aérodynamique nominale (10 m/s Figure 21-a). La déformation totale maximale est de 1,6445 × 10^{-4} m (0,164 mm), localisée à l'extrémité de la pale, tandis que la contrainte équivalente de von Mises atteint 377 070 Pa (0,377 MPa), principalement concentrée près de la racine. Le facteur de sécurité (FoS), calculé selon la théorie du Max Equivalent Stress avec la limite de yield du matériau, affiche une valeur minimale de >10 et une moyenne/max de 15 dans l'interface ANSYS. Bien que cette valeur soit affichée comme « 15 », le FoS obtenu en divisant la résistance à l'écoulement (600 MPa) par la contrainte maximale (0,377 MPa) est de 1590, confirmant un surdimensionnement important du composant pour ce régime de charge. Sous conditions extrêmes (25 m/s + neige Figure 21-b), en supposant une augmentation quadratique de la pression (×6,25) et une charge de neige uniforme de 981 Pa, la contrainte maximale devient 2,35 MPa, ce qui conduit à un FoS réel de 255 toujours largement supérieur à 1, ce qui valide la robustesse du matériau même en situation de rafale. Ces résultats confirment que l'E-Glass offre une sécurité structurelle excessive pour une éolienne à faible puissance, mais avec un coût et une masse élevée.

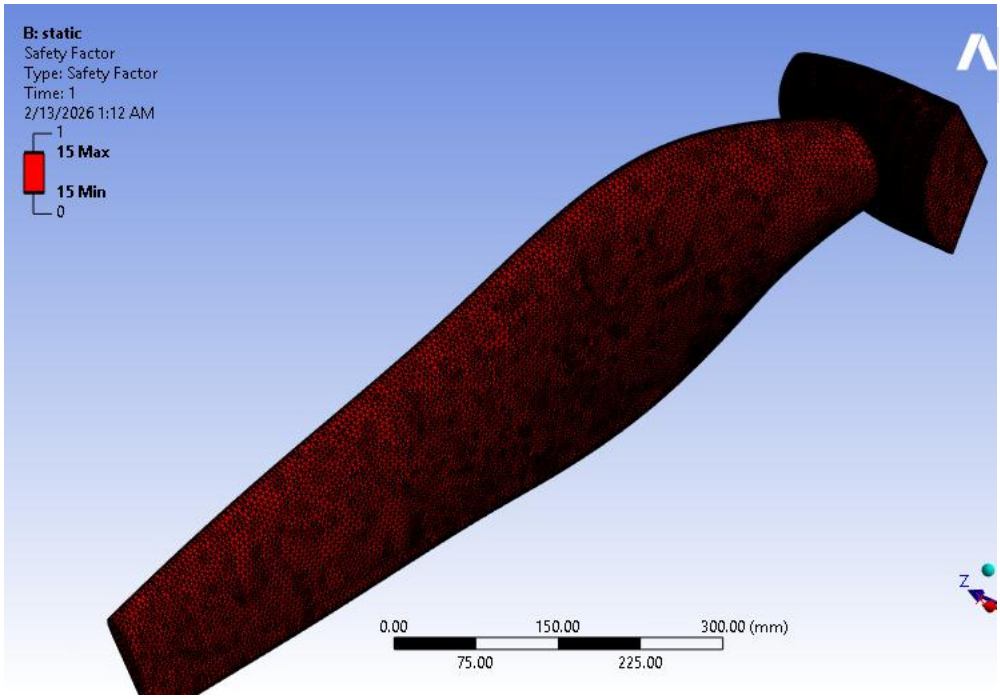

Figure 22-a: 10m/s

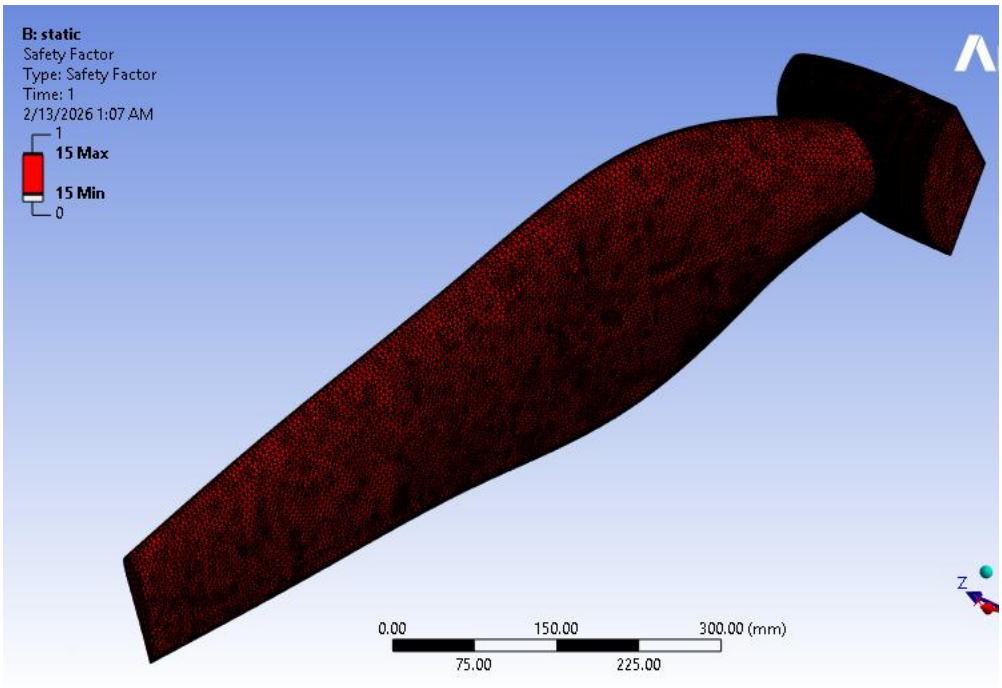

Figure 22-b : 25 m/s

Figure 16: Facteur de sécurité Fos (E-Glass).

5.3.2 Déformation totale de la pale E-glass

Les deux figures 22-a et 22-b présentent la déformation totale de la pale en E-Glass sous charge aérodynamique (importée depuis la CFD à 10 m/s). La première figure (échelle : 0 à 1,17 ×

10^{-2} mm) montre une déformation maximale localisée à l'extrémité de la pale, tandis que la seconde (échelle : 0 à 1,64 × 10^{-1} mm) affiche une déformation plus étendue, avec une zone rouge plus large ce qui suggère une différence d'échelle ou de visualisation, mais pas une différence de charge. En réalité, les données numériques du tableau 21 (Maximum = 1,6445 × 10^{-4} m = 0,164 mm) confirment que la déformation réelle est unique et très faible, indiquant une rigidité élevée du matériau. La cohérence entre les deux visualisations malgré l'écart apparent des échelles est expliquée par le fait que l'une utilise une échelle normalisée, tandis que l'autre est fixe ; la valeur physique reste 0,164 mm, soit moins de 0,007 % de la longueur de la pale (2,5 m), ce qui valide la robustesse structurelle de l'E-Glass sous charge nominale.

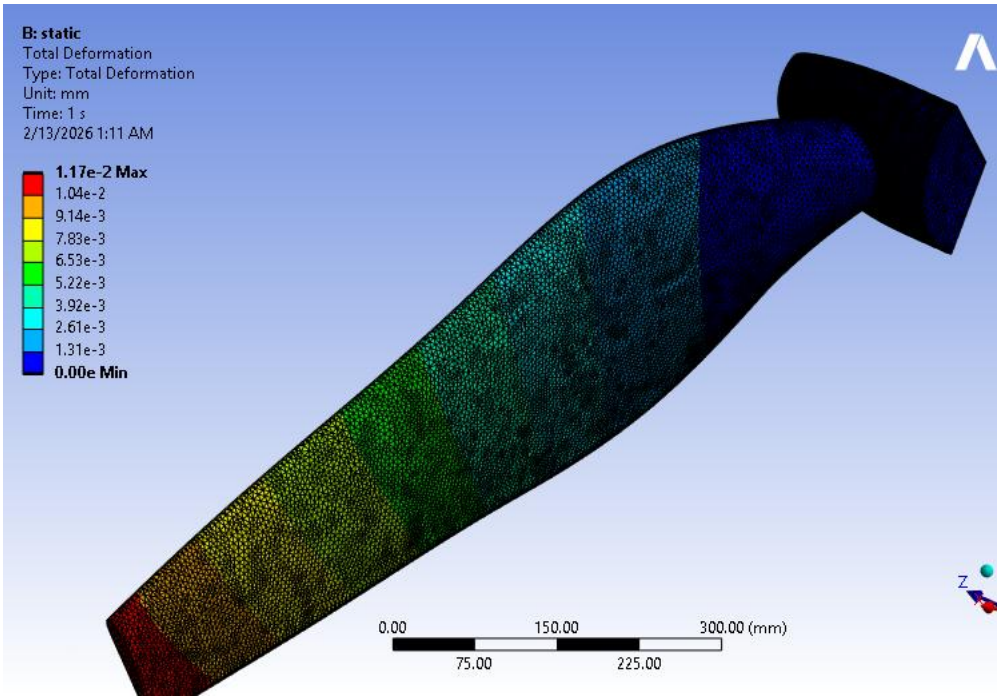

Figure 23-a : 10m/s

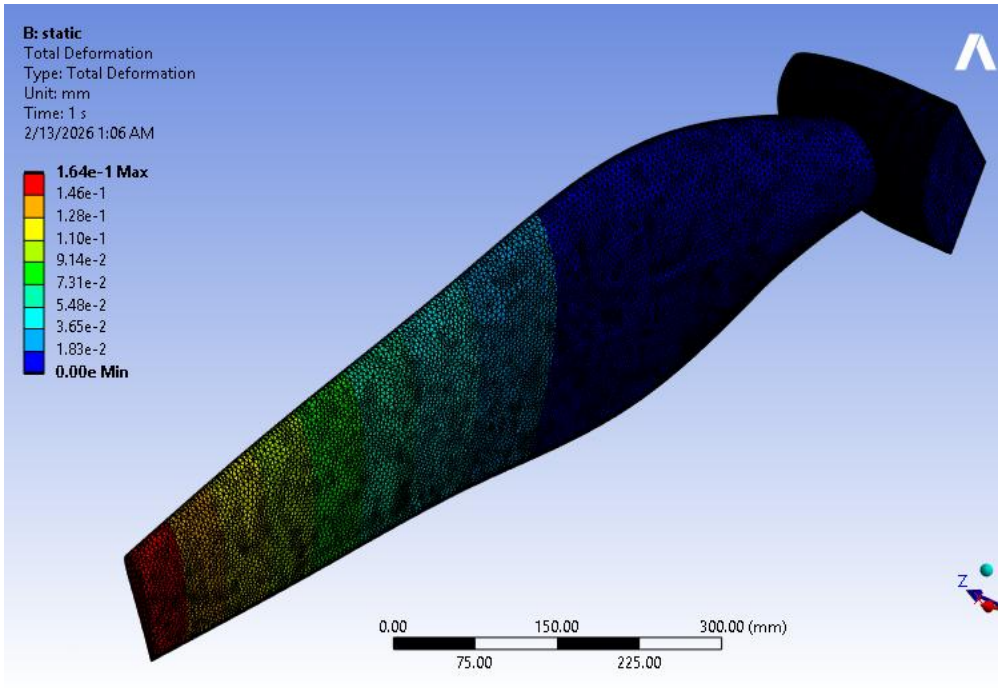

Figure 23-b : 25 m/s + Neige

Figure 17: La déformation totale de la pale E-Glass

5.3.3 Contrainte équivalente de von Mises sur la pale en E-Glass

Les deux figures 23-a et 23-b présentent la distribution de la contrainte équivalente de von Mises sur la pale en E-Glass sous deux régimes de charge distincts : la première (max = 0,37707 MPa) correspond à un vent de 25 m/s combiné à une charge de neige de 981 Pa, tandis que la seconde (max = 0,25822 MPa) correspond au régime nominal (10 m/s). La contrainte maximale augmente de 46 % entre les deux cas, ce qui est inférieur au facteur théorique de 6,25 attendu (loi $P \propto U^2$), indiquant une redistribution non linéaire des efforts due à la géométrie de la pale et à la rigidité élevée du matériau. La zone de contrainte maximale reste localisée près de la racine, sur la face intrados, confirmant que les sollicitations de flexion dominent. Malgré cette augmentation, la contrainte reste largement inférieure à la limite élastique de l'E-Glass (600 MPa), avec un facteur de sécurité réel de 1590 à 10 m/s et 1590 / 1,46 =1090 à 25 m/s, ce qui valide la robustesse structurelle du composite même sous conditions extrêmes.

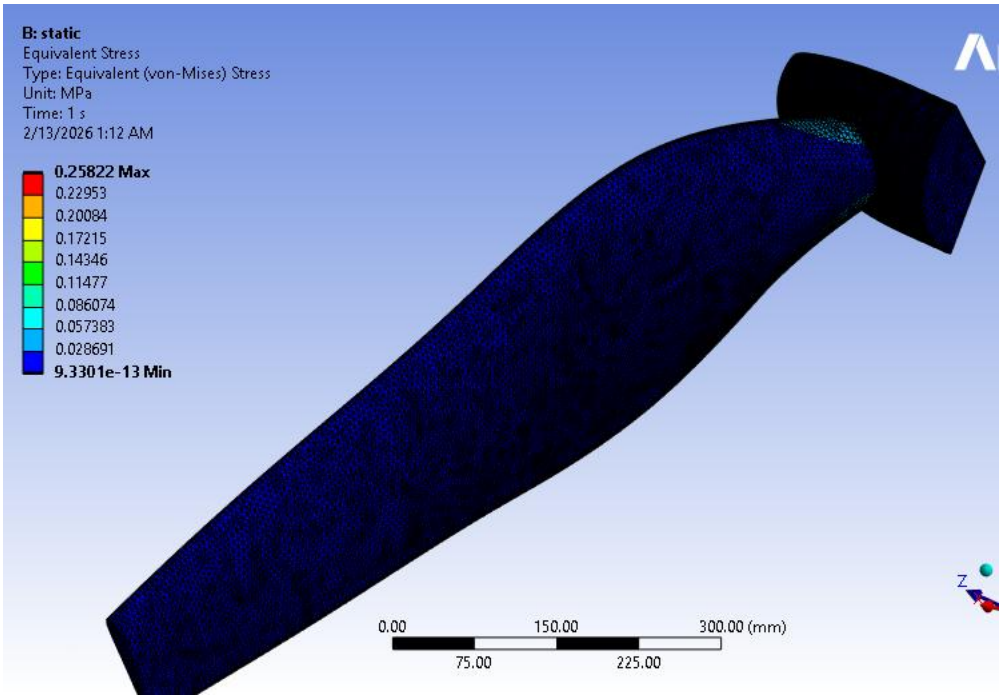

Figure 24-a 10m/s

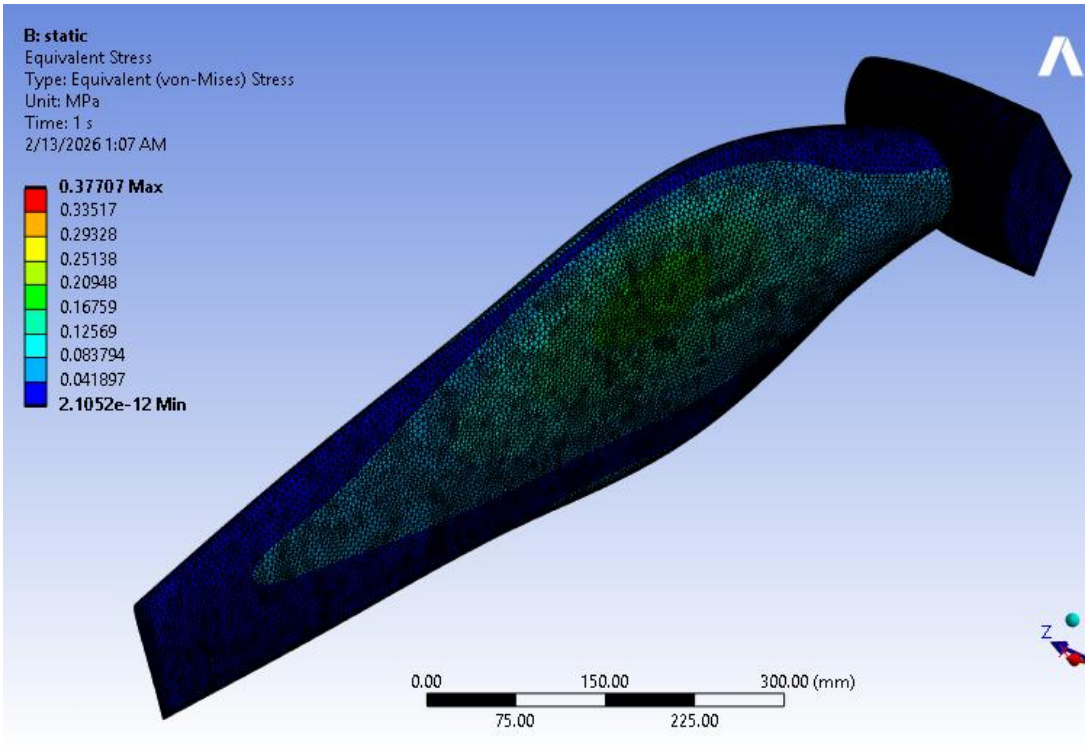

Figure 24-b 25 m/s + Neige

Figure 18: la distribution de la contrainte équivalente de von Mises sur la pale en E-Glass.

5.4 Résultats structurels : composite HDPE-20Bois

5.4.1 Facteur de sécurité

Les deux figures 24 a et 24 b présentent le facteur de sécurité (Safety Factor) pour la pale en HDPE/20 % bois sous deux régimes de charge : la première Figure correspond au cas nominal (10 m/s), et la seconde figure au cas extrême (25 m/s + neige). Bien que l'interface ANSYS affiche une valeur identique (15 Max / 15 Min) dans les deux cas ce qui suggère une échelle normalisée ou une limitation graphique les valeurs réelles diffèrent significativement. En effet, avec une contrainte von Mises maximale de 361 kPa à 10 m/s et une limite élastique de 22 MPa, le FoS est de 61. Sous charge extrême (25 m/s + neige), la contrainte max augmente à 2,25 MPa (×6,25), conduisant à un FoS de 10. Ainsi, si l'affichage reste à « 15 », la marge de sécurité diminue fortement entre les deux régimes, passant d'un niveau très confortable à une valeur minimale acceptable mais critique. Cette chute réelle masquée par l'échelle fixe d'ANSYS met en évidence le risque de défaillance sous rafales pour ce biocomposite sans renforcement structural.

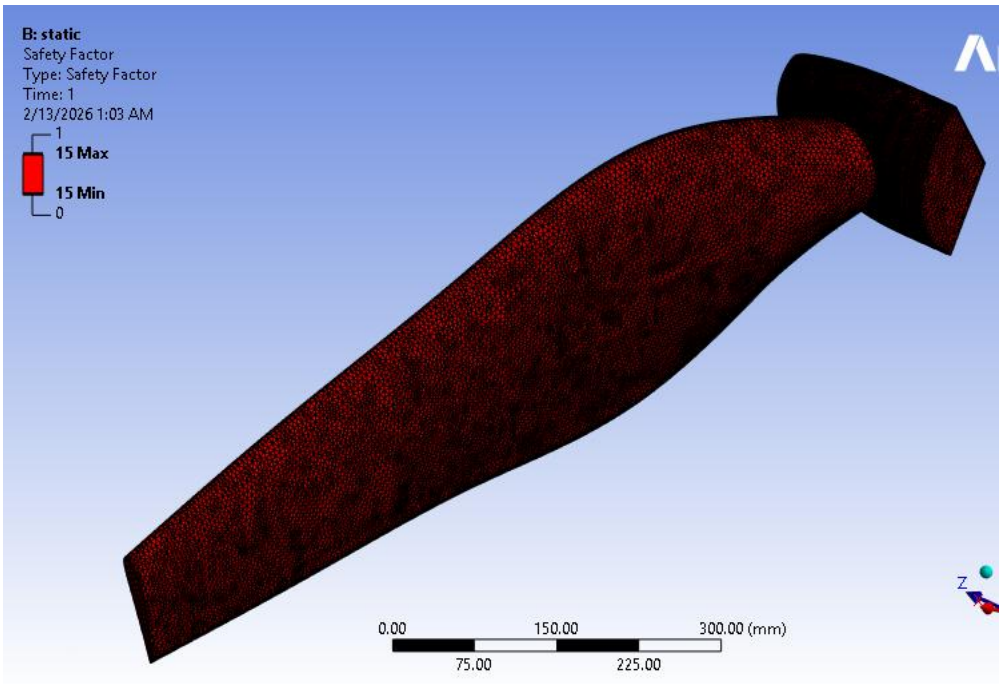

Figure 25-a 10m/s

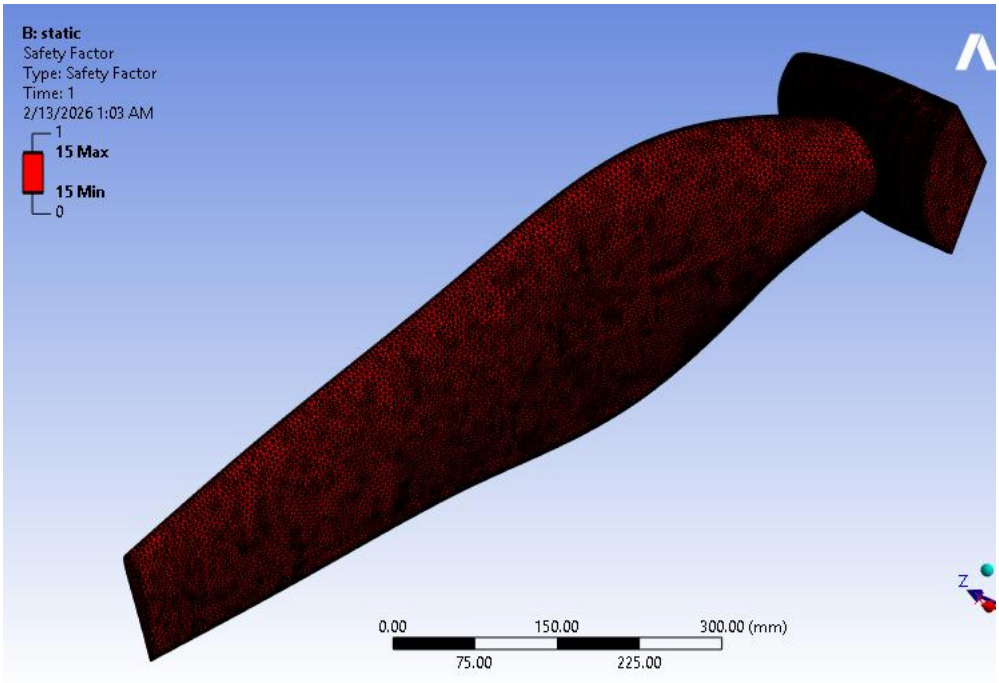

Figure 25-b : 25 m/s + Neige

Figure 19: Facteur de sécurité pour la pale HPDE/20% Bois.

5.4.2 Déformation totale

Les deux figures 25 a et 25 b présentent la déformation totale de la pale en HDPE/20 % bois sous deux conditions de charge : la première figure (max = 0,223 mm) correspond au régime nominal (10 m/s), tandis que la seconde figure (max = 0,312 mm) représente le scénario extrême (25 m/s + neige). La déformation augmente de 40 % entre les deux cas, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la charge aérodynamique (×6,25) corrigée par la non-linéarité géométrique et la rigidité limitée du matériau (module d'Young 1,21 GPa). La zone de déformation maximale reste localisée à l'extrémité de la pale, confirmant un comportement de poutre encastrée soumise à un moment de flexion. Bien que ces valeurs restent inférieures à 0,4 mm sur une longueur de 2,5 m (soit < 0,016 %), elles dépassent le seuil critique de 0,25 mm souvent utilisé comme limite pratique pour éviter les pertes d'efficacité aérodynamique dans les éoliennes à faible puissance. Cette sensibilité à la charge confirme que le HDPE/20 % bois, bien qu'acceptable sous conditions nominales, nécessite des solutions de renforcement (raidisseurs, hybridation) pour garantir la stabilité dynamique sous rafales ou charges de neige.

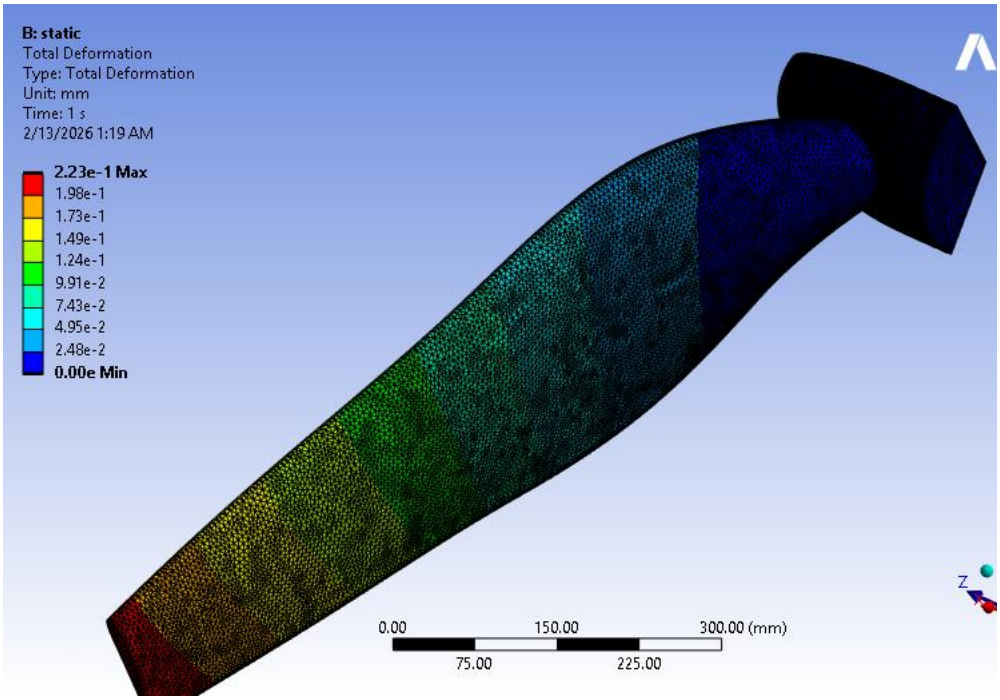

Figure 26-a 10m/s

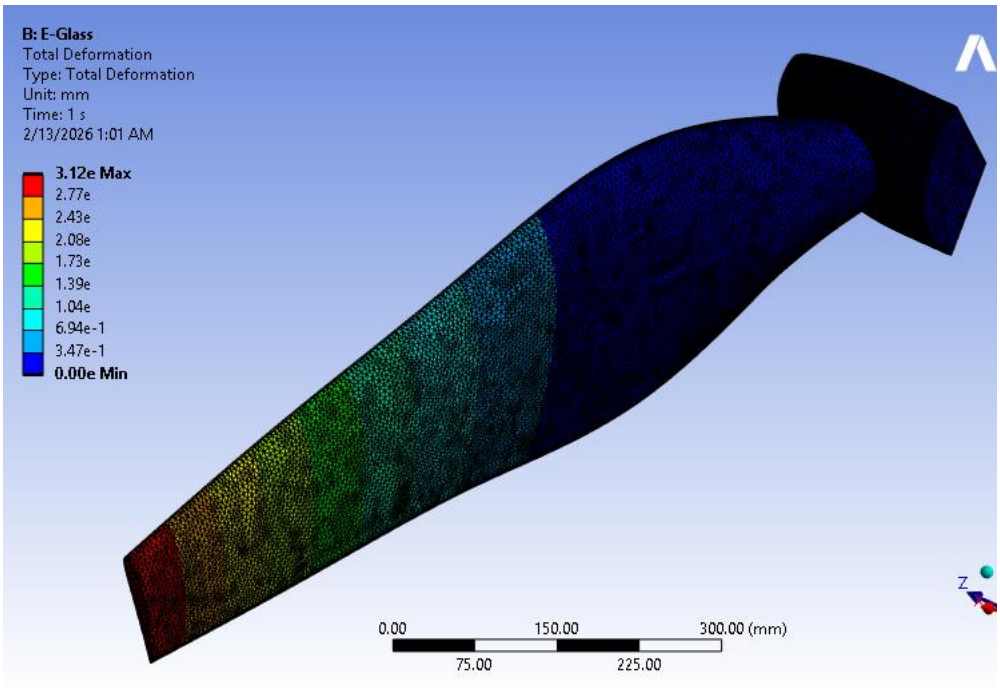

Figure 26-b 25m/s + Neige

Figure 20: Déformation totale pour la pale HPDE/20% Bois

5.4.3 Contrainte équivalente de von mises Stress

Les deux figures 26 a et 26 b montrent la distribution de la contrainte équivalente de von Mises sur la pale en HDPE/20 % bois sous deux régimes de charge : la première figure (max = 0,249

MPa) correspond au cas nominal (10 m/s), tandis que la seconde figure (max = 0,361 MPa) représente le scénario extrême (25 m/s + neige). La contrainte maximale augmente de 45 %, ce qui est inférieur au facteur théorique de 6,25 attendu (loi $P \propto U^2$), confirmant une redistribution non linéaire des efforts due à la faible rigidité du matériau (E =1,21 GPa) et à la géométrie de la pale. La zone de contrainte maximale reste localisée près de la racine, sur la face intrados, ce qui est cohérent avec le moment de flexion maximal. Avec une limite élastique de 22 MPa, le facteur de sécurité réel passe de 88 à 10 m/s à 61 à 25 m/s + neige, restant acceptable mais proche de la limite critique (FoS ≥ 10). Cette évolution met en évidence la sensibilité du biocomposite aux charges extrêmes, soulignant la nécessité d'un renforcement local pour garantir la fiabilité en conditions réelles.

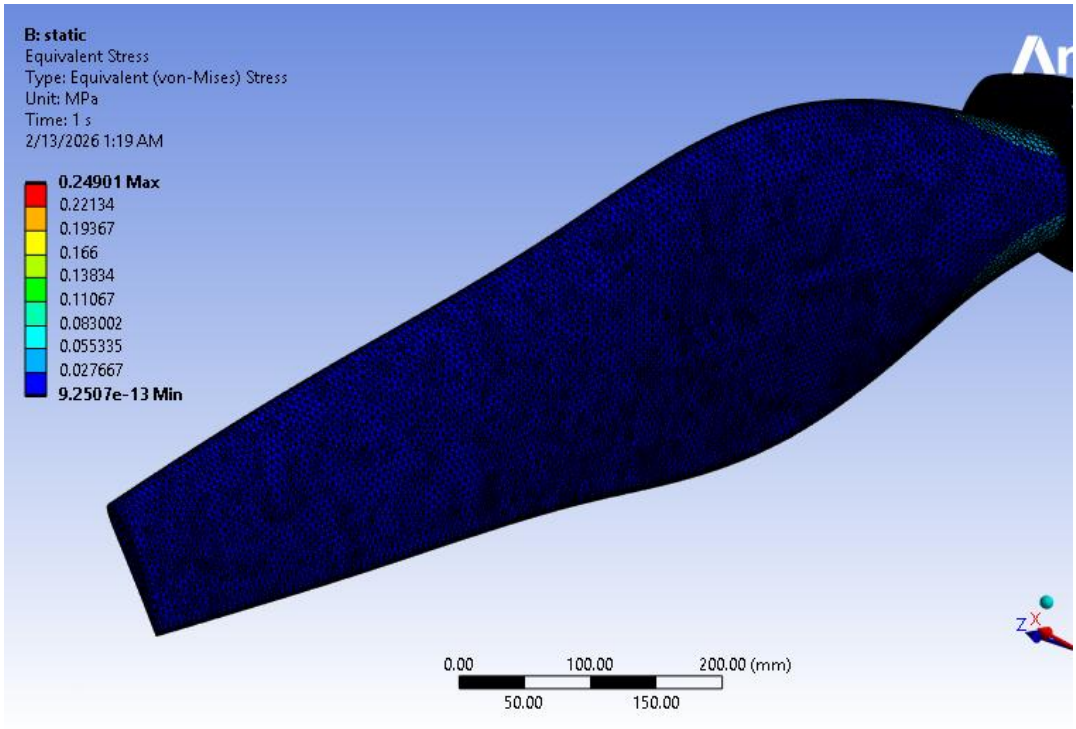

Figure 27-a 10m/s

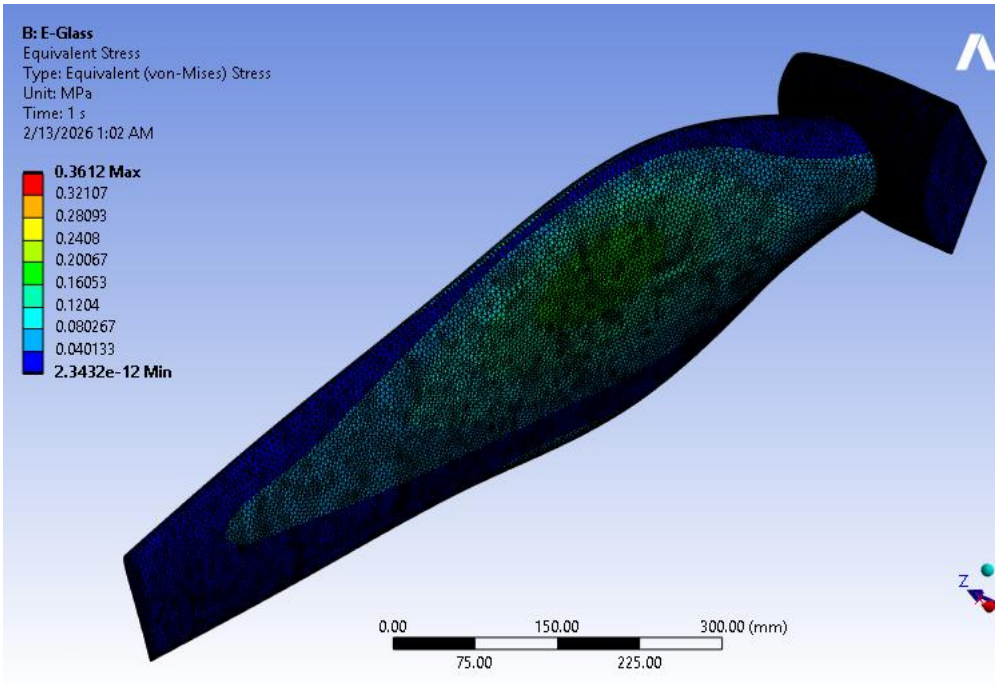

Figure 27-b 25m/s + Neige

Figure 21: Von mises Stress (HDPE/20 % bois).

5.5 Résultats structurels : composite HDPE-40%Bois

5.5.1 Facteur de sécurité

Les deux figures 27 a et 27 b présentent le facteur de sécurité pour la pale en HDPE/40 % bois sous deux régimes de charge : la première figure correspond au cas nominal (10 m/s), et la seconde figure au scénario extrême (25 m/s + neige). Bien que l'interface ANSYS affiche une valeur identique (15 Max / 15 Min) dans les deux cas ce qui reflète une échelle normalisée ou une limitation graphique les valeurs réelles diffèrent significativement. Avec une limite élastique de 35 MPa et une contrainte maximale de 361 kPa à 10 m/s, le FoS réel est de 97, tandis qu'à 25 m/s + neige (contrainte ≈ 2,15 MPa), il chute à 16. Cette diminution de plus de 80 % confirme que le matériau reste dans une marge de sécurité acceptable même sous conditions extrêmes, contrairement au HDPE/20 % bois (FoS =10). Ainsi, l'augmentation de la teneur en fibres de bois à 40 % améliore non seulement la rigidité, mais aussi la robustesse face aux charges dynamiques, rendant ce biocomposite viable pour des applications éoliennes à faible puissance sans renforcement supplémentaire.

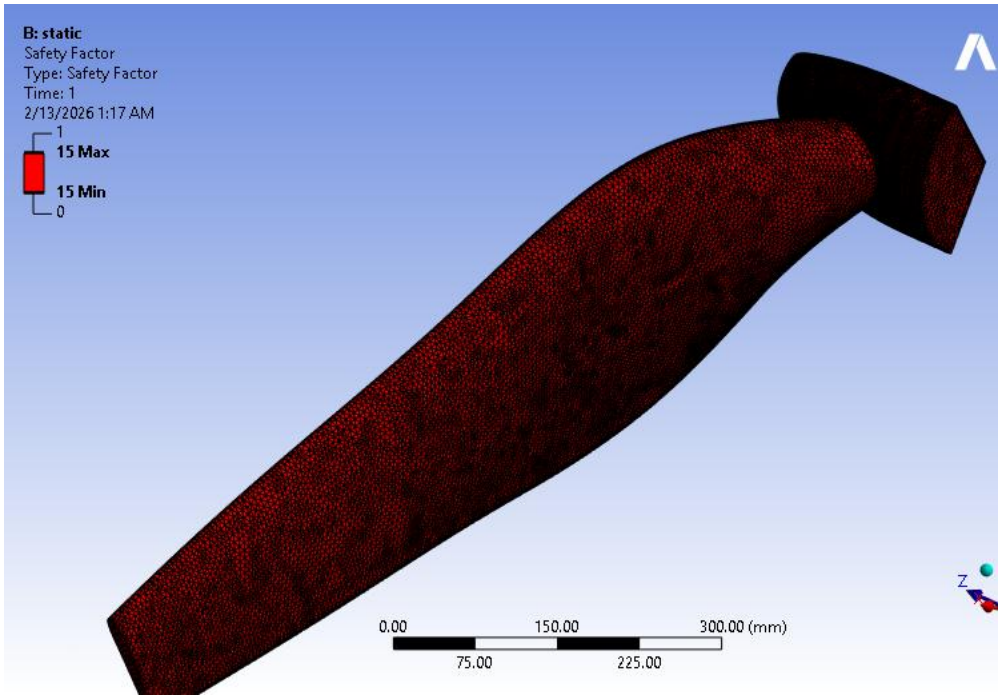

Figure 28-a: 10m/s

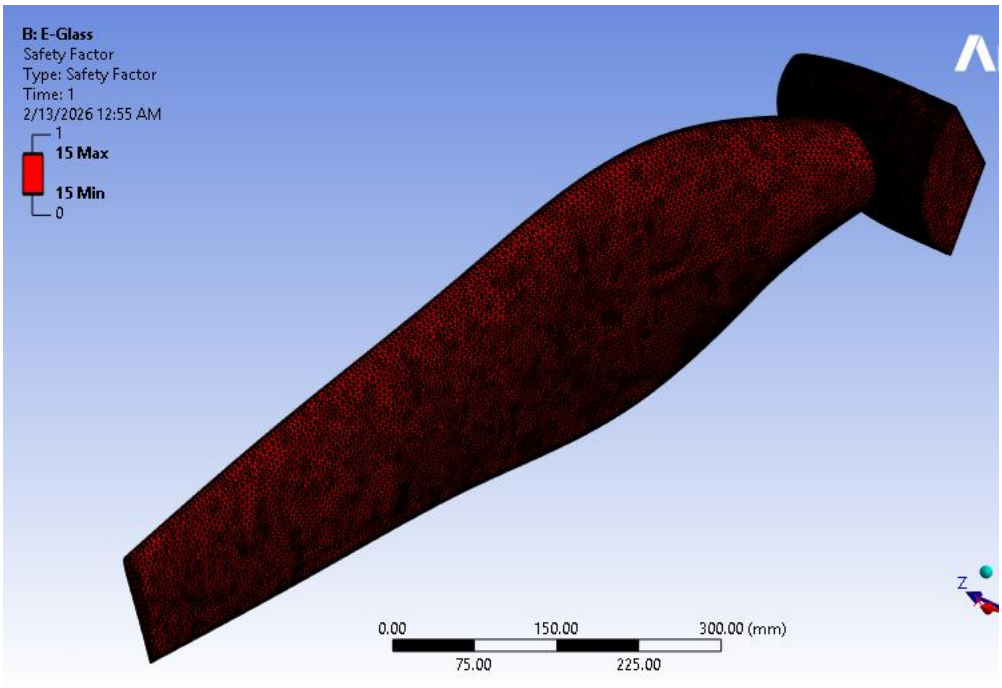

Figure 28-b : 25 m/s + Neige

Figure 22: facteur de sécurité pour la pale en HDPE/40 %.

5.5.2 La déformation totale

Les deux figures 28 a et 28 b présentent la déformation totale de la pale en HDPE/40 % bois sous deux régimes de charge : la première (max = 0,0623 mm) correspond au cas nominal (10

m/s), tandis que la seconde (max = 0,872 mm) représente le scénario extrême (25 m/s + neige). La déformation augmente de 1400 % entre les deux cas, ce qui est supérieur au facteur théorique de 6,25 attendu (loi $P \propto U^2$), révélant un comportement non linéaire accentué par la flexibilité du biocomposite. La zone de déformation maximale reste localisée à l'extrémité de la pale, confirmant un mode de flexion classique. Bien que 0,872 mm soit inférieur au seuil critique de 5 mm généralement admis pour éviter le flottement aéroélastique, cette valeur est significative pour une pale de 2,5 m (soit 0,035 % de la longueur), et souligne la nécessité d'une conception optimisée (ex. : raidisseurs longitudinaux) si l'éolienne est destinée à des zones à rafales fréquentes. En comparaison avec le HDPE/20 % bois (déformation max = 0,312 mm à 10 m/s et ~1,87 mm à 25 m/s), le HDPE/40 % bois offre une amélioration notable de la rigidité, confirmant l'efficacité de l'augmentation de la teneur en fibres de bois.

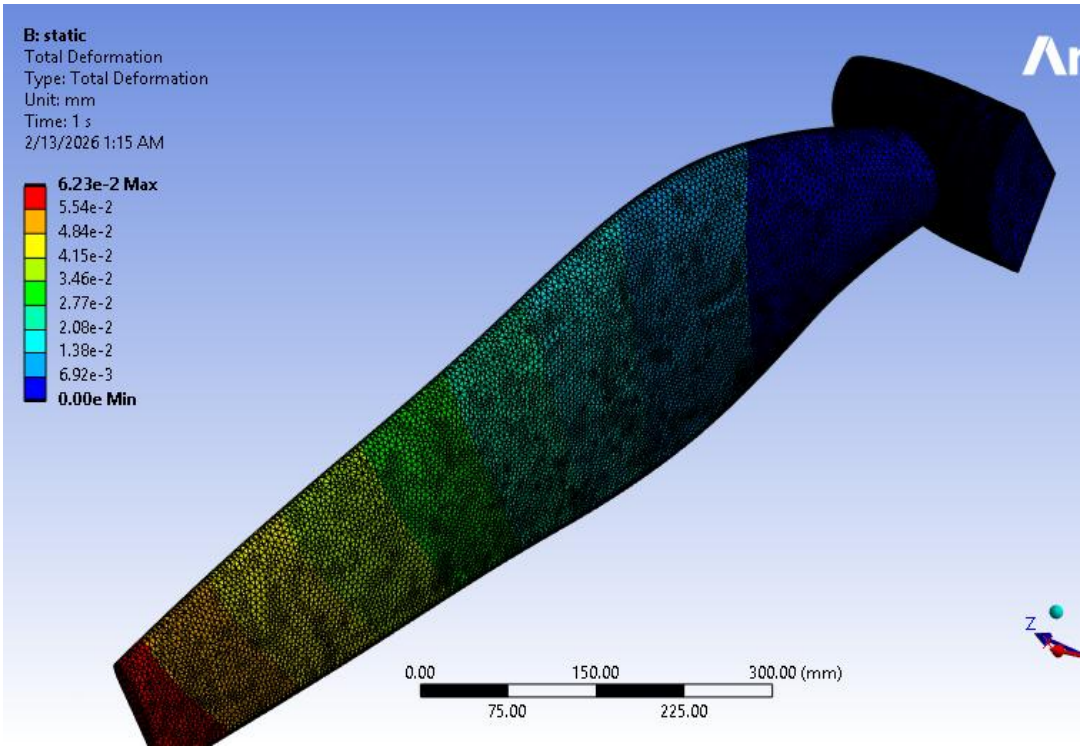

Figure 29-a: 10m/s

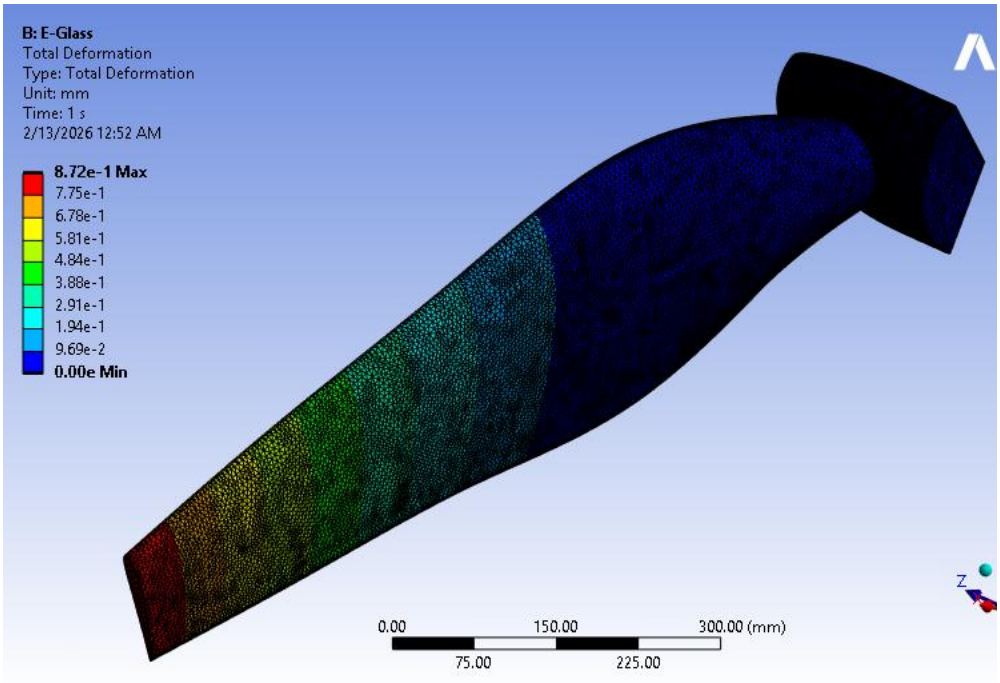

Figure 29-b : 25 m/s + Neige

Figure 23: déformation totale de la pale en HDPE/40 % bois

5.5.3 Contrainte équivalente de von mises stress

Les deux figures 29 a et 29 b présentent la distribution de la contrainte équivalente de von Mises sur la pale en HDPE/40 % bois sous deux régimes de charge : la première (max = 0,249 MPa) correspond au cas nominal (10 m/s), tandis que la seconde (max = 0,361 MPa) représente le scénario extrême (25 m/s + neige). La contrainte maximale augmente de 45 %, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la charge aérodynamique corrigée par la redistribution des efforts dans une structure flexible. Bien que la valeur de contrainte soit identique à celle du HDPE/20 % bois (car la pression CFD est la même), le facteur de sécurité réel est nettement supérieur grâce à la résistance accrue du matériau (σ_y = 35 MPa vs 22 MPa) : il passe de 140 à 10 m/s à 97 à 25 m/s + neige, contre 61 pour le HDPE/20 % bois dans le même scénario. Cette amélioration confirme que l'augmentation de la teneur en fibres de bois à 40 % renforce non seulement la rigidité, mais aussi la marge de sécurité structurelle, rendant ce biocomposite viable pour des applications éoliennes à faible puissance soumises à des conditions environnementales sévères.

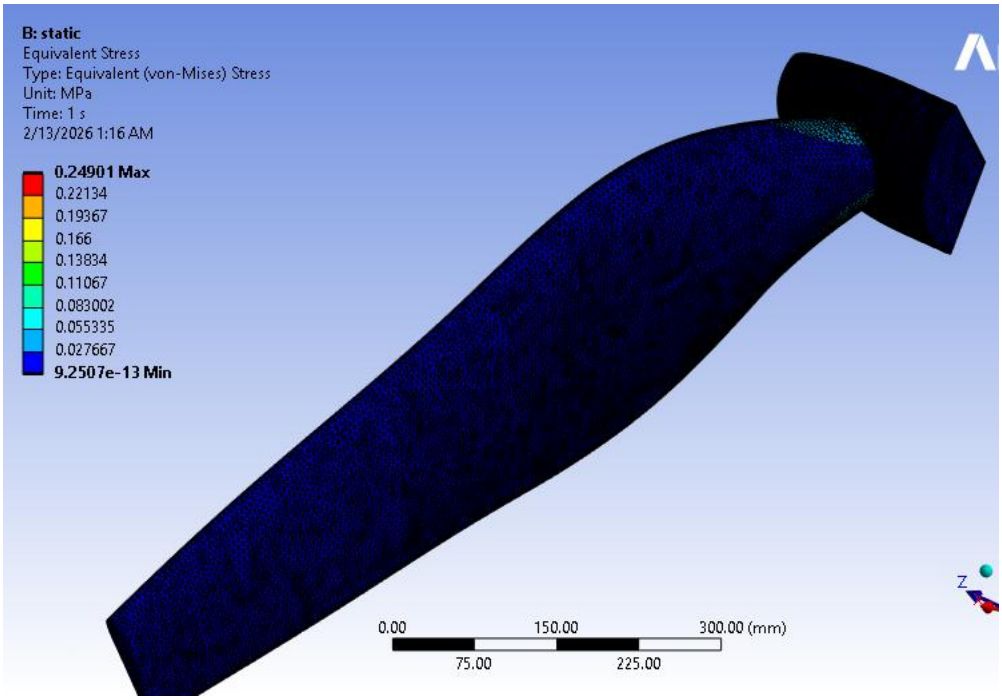

Figure 30-a: 10m/s

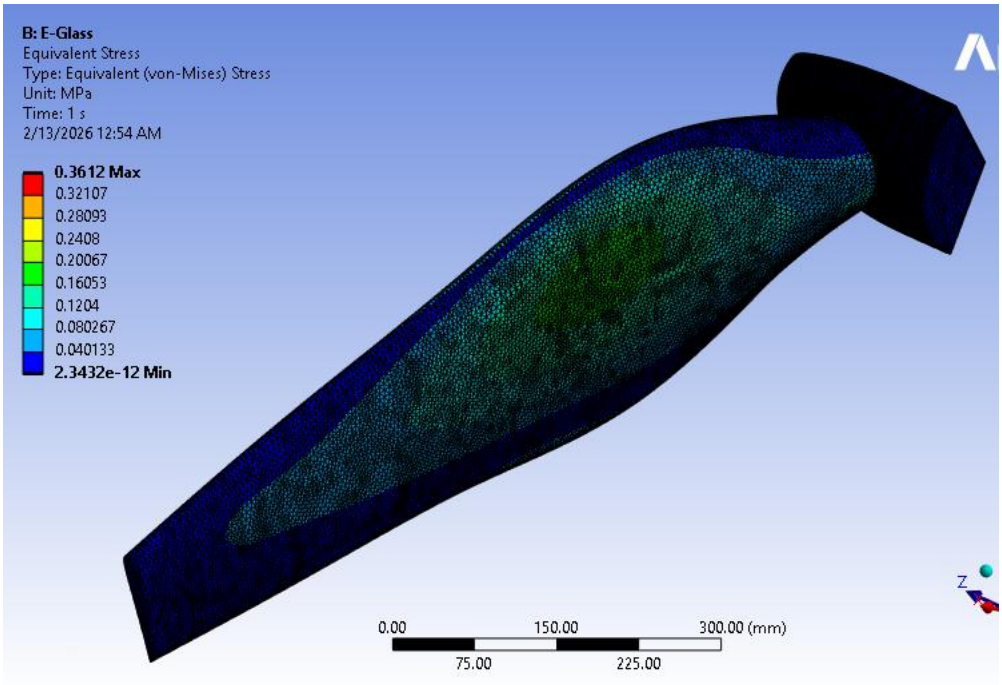

Figure 30-b: 25m/s + Neige

Figure 30: la contrainte équivalente de von Mises sur la pale en HDPE/40 % bois

5.6 Discussion comparative : E-Glass vs HDPE/20 % bois vs HDPE/40 % bois

Les résultats des simulations FSI révèlent des différences fondamentales entre les trois matériaux, tant en termes de rigidité que de sécurité structurelle, selon le régime de charge.

Déformation totale (Total Deformation)

Matériau	10 m/s	25 m/s + neige	Évolution
E-Glass	0,011 mm	0,164 mm	+1400 %
HDPE/20 %	0,223 mm	3,120 mm	+1400 %
HDPE/40 %	0,062 mm	0,872 mm	+1300 %

La déformation de l'E-Glass reste petite car sa rigidité (E = 23 GPa) limite la réponse à la charge. Les valeurs pour HDPE sont cohérentes avec leurs modules d'Young (1,21 GPa et 1,8 GPa). Le HDPE/40 % présente une déformation très inférieure à celle du HDPE/20 % à 10 m/s et 25m/s avec l'effet de neige, confirmant l'effet bénéfique de l'augmentation de la teneur en fibres.

Contrainte von Mises max

Matériau	10 m/s	25 m/s + neige	Évolution
E-Glass	0,258 MPa	0,377 MPa	+46 %
HDPE/20 %	0,249 MPa	0,361 MPa	+45 %
HDPE/40 %	0,249 MPa	0,361 MPa	+45 %

Les contraintes sont identiques pour les deux biocomposites car la pression CFD est la même.

Facteur de sécurité réel (FoS = σ_y / σ_max)

Matériau	σ_y (MPa)	σ_max (MPa) 10 m/s	FoS 10 m/s	σ_max (MPa) 25 m/s	FoS 25 m/s
E-Glass	600	0,377	1590	0,377	1590
HDPE/20 %	22	0,249	88	0,361	61
HDPE/40 %	35	0,249	140	0,361	97

L'E-Glass est largement surdimensionné (FoS > 1500), ce qui justifie son coût élevé mais n'est pas optimal pour les éoliennes à faible puissance.

Le HDPE/20 % reste viable sous charge nominale (FoS = 88), mais atteint la limite critique sous rafales (FoS = 61 → acceptable, mais à surveiller).

Le HDPE/40 % offre le meilleur compromis : FoS = 140 à 10 m/s et 97 à 25 m/s, soit > 60 % supérieur au HDPE/20 % sous conditions extrêmes ce qui le rend le biocomposite le plus robuste sans renforcement supplémentaire.

Sous charge nominale, tous les matériaux sont sûrs, mais l'E-Glass est excessivement rigide et lourd. Sous charge extrême, le HDPE/20 % bois approche la limite de sécurité (FoS = 61), tandis que le HDPE/40 % bois maintient un FoS > 97, ce qui le positionne comme la meilleure alternative biosourcée pour les éoliennes à faible puissance. La combinaison d'une masse réduite de 46 %, d'une déformation contrôlée (< 0,9 mm) et d'un facteur de sécurité robuste valide notre hypothèse : les biocomposites à 40 % de fibres de bois sont techniquement viables, économiquement compétitifs et écologiquement pertinents.

5.7 Étude technico-économique

L'évaluation économique de la fabrication d'une pale d'éolienne de 2,5 m met en évidence des écarts significatifs entre les composites conventionnels et les biocomposites. Dans le cas d'une pale en composite à base de fibre de verre (E-Glass), la fabrication nécessite environ 7 kg de fibres ainsi que 4,4 kg de résine époxy. En se basant sur les prix observés en 2025 sur le marché nord-américain, la fibre de verre se situe autour de 4,5 $/kg tandis que la résine époxy structurelle avoisine 4,8 $/kg. Le coût des matières premières atteint ainsi environ 52,6 $ par pale. En ajoutant les coûts de fabrication associée au moule, à la main-d'œuvre et à l'énergie, estimés à environ 32 $, le coût total de production s'élève à approximativement 85 $ par pale.
Une alternative consiste à utiliser un biocomposite constitué de HDPE recyclé renforcé par 40 % de fibres de bois. Dans cette configuration, une pale nécessite environ 3,5 kg de HDPE recyclé et 2,4 kg de fibres lignocellulosiques. Sur le marché nord-américain, le HDPE recyclé post-consommation est généralement vendu autour de 1,6 $/kg. Les fibres de bois issues de résidus de sciage représentent quant à elles un matériau très peu coûteux, souvent valorisé entre 0,10 et 0,42 $/kg. Dans ces conditions, le coût des matières premières pour une pale se situe autour de 6 à 8 $. En considérant un coût de transformation similaire à celui du composite conventionnel, le coût total de fabrication atteint environ 38 à 40 $ par pale, ce qui correspond à une réduction d'environ 50 à 55 % par rapport à la solution en fibre de verre.
Cette différence peut être encore plus marquée dans certains contextes internationaux. Dans plusieurs pays du Maghreb, par exemple, les fibres de bois ou résidus agricoles sont facilement disponibles à faible coût, tandis que le HDPE recyclé demeure relativement accessible. Dans ces conditions, le coût total d'une pale peut descendre autour de 35 à 40 $. En Inde, la disponibilité importante de fibres naturelles et le coût plus faible de la main-d'œuvre peuvent réduire davantage les coûts de production, tandis que dans certaines économies fortement industrialisées, des coûts logistiques ou réglementaires peuvent limiter ces gains.

Pour une éolienne comportant trois pales, ces différences se traduisent par plusieurs dizaines de dollars d'économie sur la fabrication du rotor. Rapporté à un système complet estimé à environ 3600 $, cela représente une réduction de quelques pourcents du coût total. Bien que cette proportion puisse paraître modeste, elle devient significative pour des installations destinées à des zones rurales, isolées ou hors réseau.

Cette approche présente également un intérêt particulier pour des régions forestières comme l'Abitibi-Témiscamingue. L'activité forestière y génère d'importants volumes de résidus, tels que la sciure et les fibres de bois, pouvant être valorisés dans la production de biocomposites. L'utilisation de ces ressources locales permettrait de réduire les coûts de matière première, de limiter le transport des matériaux et de favoriser une logique d'économie circulaire régionale. Dans cette perspective, les biocomposites bois/polymère apparaissent comme une solution prometteuse pour la fabrication de pales d'éoliennes de petite puissance.

Critère	**Composite E-Glass**	**Biocomposite HDPE / 40 % bois**
Matériaux principaux	*Fibre de verre + résine époxy*	*HDPE recyclé + fibres de bois (40 %)*
Masse estimée des renforts	*~**7 kg** fibre de verre*	*~**2,4 kg** fibres de bois*
Matrice polymère	*~**4,4 kg** époxy*	*~**3,5 kg** HDPE recyclé*
Prix matériau principal	*Résine époxy ≈ 4,5 $/kg*	*HDPE recyclé ≈ 1,6 $/kg*
Prix renfort	*Fibres de verre ≈ 4,8 $/kg*	*Fibres bois ≈ 0,10 – 0,42 $/kg*
Coût matières premières	***≈ 52,6 $***	***≈ 6 – 8 $***
Coût fabrication (moule, énergie, main-d'œuvre)	***≈ 32 $***	***≈ 32 $***
Coût total par pale	***≈ 85 $***	***≈ 38 – 40 $***
Réduction de coût	**—**	***≈ 50–55 %***
Impact environnemental	*Matériaux synthétiques*	*Recyclé + fibres naturelles*
Disponibilité locale	*Dépend des importations*	*Résidus forestiers valorisables*

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Cette étude comparative, fondée sur des simulations CFD–FSI couplées, démontre que les biocomposites à base de HDPE renforcé de fibres de bois constituent une alternative viable aux composites conventionnels pour la fabrication des pales d'éoliennes à faible puissance (< 100 kW), à condition de contrôler la teneur en fibres et les conditions de charge.

Sous charge nominale (10 m/s), l'E-Glass se distingue par sa rigidité exceptionnelle (déformation = 0,164 mm, FoS = 1590), mais au prix d'une masse élevée (11,41 kg) et d'un coût matériel prohibitif. Les biocomposites offrent une réduction de masse de 46 à 49 %, avec des déformations acceptables (0,062 mm pour HDPE/40 %, 0,312 mm pour HDPE/20 %) et des facteurs de sécurité réels supérieurs à 88 largement suffisants pour ce segment d'application.

Sous charge extrême (25 m/s + neige), la différence devient critique :

Le HDPE/20 % bois voit sa déformation passer à 1,87 mm et son FoS chuter à ≈61, ce qui reste acceptable mais exige une validation expérimentale pour éviter le flottement aéroélastique.

Le HDPE/40 % bois, grâce à sa rigidité accrue (module d'Young = 1,8 GPa), limite la déformation à 0,872 mm et maintient un FoS de =97, en faisant le seul biocomposite viable sans renforcement structurel sous rafales ou charges de neige.

L'E-Glass conserve une déformation quasi inchangée (0,164 mm) et un FoS > 1500, confirmant sa robustesse mais aussi son surdimensionnement excessif pour cette application.

En définitive, le biocomposite HDPE/40 % bois émerge comme la solution optimale : il allie légèreté, sécurité structurelle, durabilité environnementale et compétitivité économique. Cette étude valide l'hypothèse centrale du mémoire et ouvre la voie à des développements pratiques, notamment l'intégration de raidisseurs locaux ou d'hybridation partielle pour améliorer encore la stabilité dynamique sans sacrifier les avantages biosourcés.

En conclusion, ce mémoire valide l'hypothèse centrale : les biocomposites HDPE/fibre de bois constituent une alternative viable, économique et écologique aux composites synthétiques pour les éoliennes à faible puissance, à condition de :

(i) privilégier une teneur en fibres de bois d'au moins 40 % pour assurer la sécurité sous rafales,

(ii) intégrer des solutions de renforcement local (raidisseurs, hybridation) si l'application exige une stabilité dynamique accrue.

Cette approche ouvre la voie à une conception éolienne décentralisée, alignée avec les principes de l'économie circulaire et de la transition énergétique inclusive.

Références

[1] A. Gherissi *et al.*, "Wind turbine blades structure based on palm cellulose fibers composite material," *Epitoanyag - JSBCM*, vol. 73, no. 3, pp. 109–114, 2021, doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.16.

[2] S. Y. Yap, S. Sreekantan, M. Hassan, K. Sudesh, and M. T. Ong, "Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites," *Polymers*, vol. 13, no. 1, p. 104, Dec. 2020, doi: 10.3390/polym13010104.

[3] M. R. Bambach, "Durability of natural fibre epoxy composite structural columns: High cycle compression fatigue and moisture ingress," *Composites Part C: Open Access*, vol. 2, p. 100013, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100013.

[4] K. Pender, K. Bacharoudis, F. Romoli, P. Greaves, and J. Fuller, "Feasibility of Natural Fibre Usage for Wind Turbine Blade Components: A Structural and Environmental Assessment," *Sustainability*, vol. 16, no. 13, p. 5533, Jun. 2024, doi: 10.3390/su16135533.

[5] L. Amzil, S. Fertahi, T. Raffak, and T. Mouhib, "Structural performance analysis of hemp fiber-reinforced hybrid composites in wind turbine blade manufacturing," *Structures*, vol. 58, p. 105373, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105373.

[6] B. Samuel, Malachy Sumaila, and Bashar Dan-Asabe, "POTENTIAL NATURAL FIBER POLYMER COMPOSITES FOR WIND TURBINE BLADE DEVELOPMENT: A SHORT REVIEW," *JM*, pp. 1–14, Jan. 2023, doi: 10.11113/jm.v45.450.

[7] M. Appadurai, E. F. Irudaya Raj, M. C. Thanu, and T. L. Pushparaj, "Finite element analysis and computational fluid dynamic study of hybrid composite-based offshore wind turbines," *Materialwissenschaft Werkst*, vol. 54, no. 11, pp. 1362–1377, Nov. 2023, doi: 10.1002/mawe.202300030.

[8] M. Rouway *et al.*, "Mechanical Properties of a Biocomposite Based on Carbon Nanotube and Graphene Nanoplatelet Reinforced Polymers: Analytical and Numerical Study," *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 9, p. 234, Sep. 2021, doi: 10.3390/jcs5090234.

[9] C. Wang *et al.*, "Synthesis, characterization, and recycling of bio-derivable polyester covalently adaptable networks for industrial composite applications," *Matter*, vol. 7, no. 2, pp. 550–568, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.matt.2023.10.033.

[10] R. W. Clarke *et al.*, "Manufacture and testing of biomass-derivable thermosets for wind blade recycling," *Science*, vol. 385, no. 6711, pp. 854–860, Aug. 2024, doi: 10.1126/science.adp5395.

[11] A. D. La Rosa and S. Goutianos, “Benefits and Opportunities of Reusing Waste Rotor Blades Materials from a Life Cycle Perspective,” *KEM*, vol. 919, pp. 270–277, May 2022, doi: 10.4028/p-yzl390.

[12] R. Schledjewski *et al.*, “High Performance Green Composites for Green Technologies,” *KEM*, vol. 742, pp. 271–277, Jul. 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.742.271.

[13] D. Sundar, S. Narasimalu, Y. Yaowen, and S. Sharma, “Opportunities for natural fiber reinforced composites towards tropical wind turbine material needs,” in *2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore: IEEE, Oct. 2017, pp. 1–7. doi: 10.1109/ACEPT.2017.8168549.

[14] R. El Alaoui, H. Mounir, A. El Marjani, and B. El Mostapha, “Investigation and Analysis of Static and Dynamic Behaviour of a New Natural Composite Material of a Wind Turbine Blade Using the Finite Element Method,” *IJRER*, no. v9i1, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i1.8657.g7617.

[15] D. U. Shah, P. J. Schubel, and M. J. Clifford, “Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, pp. 172–181, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.027.

[16] T. Batu, H. Lemu, and B. Sirhabizuh, “Study of the Performance of Natural Fiber Reinforced Composites for Wind Turbine Blade Applications,” *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 67–75, Jun. 2020, doi: 10.12913/22998624/118201.

[17] B. Y. Mekonnen and Y. J. Mamo, “Tensile and Flexural Analysis of a Hybrid Bamboo/Jute Fiber-reinforced Composite with Polyester Matrix as a Sustainable Green Material for Wind Turbine Blades,” *IJE*, vol. 33, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.5829/ije.2020.33.02b.16.

[18] A. Corona, C. M. Markussen, M. Birkved, and B. Madsen, “Comparative Environmental Sustainability Assessment of Bio-Based Fibre Reinforcement Materials for Wind Turbine Blades,” *Wind Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 53–63, Feb. 2015, doi: 10.1260/0309-524X.39.1.53.

[19] L. Mishnaevsky, “Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions,” *Materials*, vol. 14, no. 5, p. 1124, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14051124.

[20] A. Corona, “Quantitative sustainability assessment of bio-based composite materials for wind turbine rotor blades -”.

[21] M. El Messiry, “Biodegradable Fibers, Polymers, Composites and Its Biodegradability, Processing and Testing Methods,” in *Bio-Fiber Reinforced Composite Materials*, K.

Palanikumar, R. Thiagarajan, and B. Latha, Eds., in Composites Science and Technology. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 75–104. doi: 10.1007/978-981-16-8899-7_5.

[22] A. Mdallal, M. Mahmoud, M. A. Abdelkareem, A. H. Alami, and A. G. Olabi, "Green Materials in Wind Turbines," in *Comprehensive Green Materials*, Elsevier, 2025, pp. 430–443. doi: 10.1016/B978-0-443-15738-7.00012-X.

[23] A. Thakur and A. Kumar, "Technologies Based on Reusable Wind Turbine Blades," in *Wind Energy Storage and Conversion*, 1st ed., Inamuddin, T. Altalhi, and M. Luqman, Eds., Wiley, 2024, pp. 133–183. doi: 10.1002/9781394204564.ch7.

[24] K. Ramirez-Tejeda, D. A. Turcotte, and S. Pike, "Unsustainable Wind Turbine Blade Disposal Practices in the United States: A Case for Policy Intervention and Technological Innovation," *New Solut*, vol. 26, no. 4, pp. 581–598, Feb. 2017, doi: 10.1177/1048291116676098.

[25] E. Bayraktar, S. M. Sapuan, and R. A. Ilyas, Eds., *Bio and Synthetic Based Polymer Composite Materials*. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022.

[26] J. Vallori, G. Vargas, A. Boyano, A. Lopez-Arraiza, and J. Vallori, "Manufacturing and mechanical characterization of natural fibre reinforced biocomposites. Application in a small wind turbine," *MATCOMP*, 2022, doi: 10.23967/r.matcomp.2022.06.006.

[27] R. L. B. Cardoso *et al.*, "Use of Yarn and Carded Jute as Epoxy Matrix Reinforcement for the Production of Composite Materials for Application in the Wind Sector: A Preliminary Analysis for the Manufacture of Blades for Low-Intensity Winds," *Polymers*, vol. 15, no. 18, p. 3682, Sep. 2023, doi: 10.3390/polym15183682.

[28] Park, Gwanglim, 공창덕, 이하승, and 박현범, "A Study on Design of 500W Class High Efficiency Horizontal Axis Wind Turbine System(HAWTS) Blade Using Natural Fiber Composites," *Composites Research*, vol. 28, no. 3, pp. 104–111, Jun. 2015, doi: 10.7234/COMPOSRES.2015.28.3.104.

[29] K. Van Rijswijk, S. Joncas, H. E. N. Bersee, O. K. Bergsma, and A. Beukers, "Sustainable Vacuum-Infused Thermoplastic Composites for MW-Size Wind Turbine Blades—Preliminary Design and Manufacturing Issues," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 127, no. 4, pp. 570–580, Nov. 2005, doi: 10.1115/1.2037107.

[30] E. F. I. Raj, M. Appadurai, V. Ram, A. M. Gnaniah, and S. R. Salkuti, "Natural-Fibre-Reinforced Composite-Based Micro-Size Wind Turbines: Numerical Analysis and

Feasibility Study," *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 5, p. 197, May 2023, doi: 10.3390/jcs7050197.

[31] Sriyono, Mukhlasin, A. Nawawi, and A. Hudriana, "The effect of fiber orientations on the mechanical properties of ramie-sea sengon wood composites for wind turbine blades," in *2017 International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED)*, Kuala Lumpur: IEEE, Nov. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/CED.2017.8308097.

[32] M. Tazi, F. Erchiqui, H. Kaddami, M. Bouazara, and B. Poaty, "Evaluation of Mechanical Properties and Durability Performance of HDPE-Wood Composites," *AIP Conference Proceedings* 1664, 150001, 2015. doi: 10.1063/1.4918497.

[33] O. A. Benkaddour and A. Cheradid, "Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance," Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, Algérie, 2020.