

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Développement de turbines éoliennes domestiques : Analyse
aéroélastique, conception et fabrication de pales de rotor basées sur
des fibres naturelles

BOUCHAIB Souheil et ZERGUINE Abdelhadi

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président :	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Promoteur :	M. Said RECHAK	Professeur	ENP
Promoteur :	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur :	M. Abdelhamid BOUHELAL	Dr	ENP
Promoteur :	M.Nacereddine ZEROUDI	MCA	ENP
Examineur :	M.Samir OUCHENE	MCA	ENP
Invité :	M.Brahim Guergueb	MCA	ENP
Invité :	M.M'Hamed BOUSBAI	Dr	ENP

ENP 2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Développement de turbines éoliennes domestiques : Analyse
aéroélastique, conception et fabrication de pales de rotor basées sur
des fibres naturelles

BOUCHAIB Souheil et ZERGUINE Abdelhadi

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président :	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Promoteur :	M. Said RECHAK	Professeur	ENP
Promoteur :	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP
Promoteur :	M. Abdelhamid BOUHELAL	Dr	ENP
Promoteur :	M.Nacereddine ZEROUDI	MCA	ENP
Examineur :	M.Samir OUCHENE	MCA	ENP
Invité :	M.Brahim Guergueb	MCA	ENP
Invité :	M.M'Hamed BOUSBAI	Dr	ENP

ENP 2024

ملخص

هذا المشروع النهائي الذي تم تنفيذه في إطار شركة ناشئة يهدف إلى تطوير توربينات الرياح المنزلية المبتكرة باستخدام الألياف الطبيعية لتصميم شفرات الدوار. الهدف الرئيسي هو إجراء تحليل هوائي من معمق لتحسين تصميم الشفرات وتحسين أدائها الهوائي. هذه الخطوة المبتكرة تأتي في إطار منظور الاستدامة والبيئة، حيث تقدم بديلاً للمواد المستخدمة تقليدياً، مثل ألياف الكربون أو الزجاج. سيشمل المشروع أيضاً مرحلة تصنيع شفرات الدوار باستخدام تقنيات تتوافق مع المعايير البيئية. باختصار، تهدف هذه المبادرة إلى المساهمة في تطوير حلول طاقة مستدامة ومتاحة للأسر المنزلية، مع الترويج لاستخدام الموارد الطبيعية المتجددة.

الكلمات المفتاحية : المرونة الهوائية، توربينات الرياح، المواد المركبة، التصنيع، ألياف نخيل التمر، المحاكاة الرقمية.

Abstract

This end-of-studies project conducted within a startup aims to develop innovative domestic wind turbines using natural fibers for rotor blade design. The main objective is to conduct an in-depth aeroelastic analysis to optimize blade design and enhance their energy performance. This innovative approach is in line with sustainability and ecology goals, offering an alternative to traditionally used materials such as carbon or glass fibers. The project will also involve the manufacturing phase of rotor blades using environmentally friendly techniques. In summary, this initiative aims to contribute to the development of sustainable and accessible energy solutions for household use while promoting the use of renewable natural resources.

Keywords : Aeroelasticity, wind turbines, composite materials, manufacturing, date palm fibre, numerical simulations.

Résumé

Ce projet de fin d'études réalisé dans le cadre d'une start-up vise à développer des turbines éoliennes domestiques innovantes en utilisant des fibres naturelles pour la conception des pales de rotor. L'objectif principal est d'effectuer une analyse aéroélastique approfondie pour optimiser la conception des pales et améliorer leur performance aérodynamiques. Cette démarche novatrice s'inscrit dans une perspective de durabilité et d'écologie, en proposant une alternative aux matériaux traditionnellement utilisés, tels que les fibres de carbone ou de verre. Le projet comprendra également la phase de fabrication des pales de rotor en utilisant des techniques conformes aux normes environnementales. En résumé, cette initiative vise à contribuer au développement de solutions énergétiques durables et accessibles pour les foyers domestiques, tout en promouvant l'utilisation de ressources naturelles renouvelables.

Mots clés : Aéroélasticité, éoliennes, matériaux composites, fabrication, fibre de palmier dattier, simulations numériques.

Dédicace

*J'ai dédié ce travail à mes parents,
mon père, dont les efforts incessants et le soutien
inébranlable m'ont toujours poussé vers la réussite,
et ma mère, qui a été une présence constante et
réconfortante à mes côtés.*

*À mes frères, Aymen et Bachir qui m'ont toujours
épaulé et qui m'ont chaleureusement soutenu et
encouragé tout au long de mon parcours.*

*À mes cousins très proches, Akrem et Mouhamed. À
mes amis, avec qui j'ai passé les meilleurs moments
de ma vie, notamment Aymen TOUMI, Ayoub
FENGHOUR*

*Aux étudiants de troisième année Génie Mécanique
promo 2024, notamment Lyes, Youcef, Ayoub, Islem,
Hichem, Amine et les autres, pour tous les moments
que nous avons partagés ces trois dernières années, ce
fut un plaisir.*

Et à M. Anis GUENDOZ.

*Merci à tous de m'avoir aidé et d'être toujours là pour
moi.*

Souheil BOUCHAIB

Dédicace

A ma mère et mon père bien-aimés, Cette dédicace est tout d'abord pour vous, mes piliers les plus solides. Vous m'avez donné l'amour, le soutien et les encouragements nécessaires pour que je puisse poursuivre mes études et atteindre cet important jalon de ma vie. Votre dévouement et votre confiance en moi ont été ma source d'inspiration constante. Merci d'avoir cru en mes rêves et de m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes professeurs et mes collègues de classe. Votre enseignement de qualité, vos discussions stimulantes et notre collaboration m'ont aidé à développer mes compétences et à élargir mes horizons .Un merci spécial à mes amis (B.Moncef, H,Abdechafi, C.Moumen, M.Nacereddine, C,Said, H.Issam, S.Zakaria,H.mouhamed, Z.Abdelmalek, Z.Yahia, B,Ihab ,D.Zinneddine et O.Youcef) qui ont été mes piliers dans les moments de doute et de fatigue. Votre amour, votre patience et votre croyance en moi ont été une source d'inspiration constante.

Abdelhadi ZERGUINE

Remerciements

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à nos encadrants, M. Said RECHAK, M. Arezki SMAILI, M. Abdelhamid BOUHELAL, et M. ZEROUDI, pour leur patience, leurs conseils avisés, leur encadrement, leur assistance et leur soutien tout au long de notre parcours académique au sein du département.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos enseignants du département de Génie Mécanique pour les connaissances qu'ils nous ont transmises et leur accompagnement tout au long de notre formation

remerciement spéciaux sont également adressé à M. Azzeddine BOUCHABOUT Qui nous aide à faire la conception de moule.

Nous remercions également les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail. Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	17
Problématique	19
1 Etat de l'art des petites éoliennes a axe horizontal	20
1.1 Introduction	20
1.1.1 La transition énergétique vers un avenir durable : le rôle essentiel de l'énergie éolienne	20
1.1.2 Historique de l'énergie éolienne	21
1.1.2.1 Bénéfices de l'Énergie Éolienne	21
1.1.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne	22
1.2 Le rôle de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale	22
1.3 L'éolienne à axe horizontale	22
1.3.1 Paramètres de classification des éoliennes	23
1.3.2 Fonctionnement des Éoliennes à Axe Horizontal	24
1.3.3 Les catégories des éoliennes	24
1.3.4 L'énergie éolienne domestique (petites éoliennes)	24
1.4 Les matériaux composites utilisés dans les éoliennes	25
1.4.1 Utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes	26
1.5 Conclusion	27
2 Étude aéroélastique des éoliennes à axe horizontale	28

2.1	Introduction	28
2.2	Étude aérodynamique des éoliennes à axe horizontale	28
2.2.1	Théorie de la quantité de mouvement	28
2.2.1.1	Betz Limit	28
2.2.1.2	Rotation du sillage(Wake rotation)	30
2.2.2	Théorie de l'élément de pale	31
2.2.2.1	Modèle BEM	32
2.2.3	Paramètres de conception de rotor	34
2.2.3.1	Vitesse de vent de conception	34
2.2.3.2	Sélection des profils aérodynamiques	35
2.2.3.2.1	Etude multi-objectif :	35
2.2.3.2.2	Resultats des précédentes études :	37
2.2.3.2.3	Analyse des profils aérodynamiques :	37
2.2.3.2.4	Analyse Des deux profils aérodynamiques SG6041,S809 :	38
2.2.3.2.5	Comparaison des Coefficients de Portance et des Rap- ports Portance sur Traînée entre les Profils Aérodyna- miques SG6041 et S809 :	38
2.2.3.3	Angle d'attaque	40
2.2.3.4	Vitesse du rotor et rapport de vitesse à la pointe de pale	41
2.2.4	Conception de pales de rotor	41
2.2.4.1	Angle de calage (Pitch Angle)	43
2.2.5	Analyse des performances du rotor	45
2.2.5.1	Application de la méthode BEM avec QBlade	45
2.2.5.2	Resultats Obtenu	46
2.2.6	Analyse CFD détaillée de la pale	47
2.2.6.1	Préparation du modèle :	48
2.2.6.1.1	Conception du corp de la pale :	48
2.2.6.1.2	Conception du pied de la pale :	49
2.2.6.1.3	Conception de la tête de la pale :	50
2.2.6.2	Domain de calcul	51
2.2.6.3	Génération de maillage	52

2.2.6.4	Configuration de la Simulation CFD	53
2.2.6.4.1	Modèle mathématique :	54
2.2.6.4.2	Modèle de turbulence :	54
2.2.6.4.3	Définition des Conditions aux Limites et du Mouvement de la Grille :	54
2.2.6.4.4	Initialisation et les Paramètres de Solution	55
2.2.6.5	Dépendance du Maillage	56
2.2.7	Comparison des resultats des deux méthodes	58
2.2.8	Conclusion	58
2.3	L'étude de l'aéroélasticité de la pale optimisée	59
2.3.1	Introduction	59
2.3.2	la modélisation par éléments finis (FEA)	59
2.3.2.1	Géométrie	59
2.3.2.2	Propriétés des matériaux	59
2.3.2.3	Maillage FEA	60
2.3.2.4	Conditions aux limites	61
2.3.2.5	Résoudre et post-traiter les résultats	61
2.3.3	Couplage FSI unidirectionnel	61
2.3.4	Résultats et discussion	62
2.3.4.1	Distributions de pression	62
2.3.4.2	Déformations	62
2.3.4.3	Distributions de contraintes	63
2.3.5	Conclusion	64
3	Conception et de réalisation du moule	65
3.1	Introduction	65
3.2	Types de moules	65
3.2.1	Moules d'injection :	65
3.2.2	Moules par compression :	66
3.2.2.1	Cycle de moulage[1]	66
3.2.3	Le moulage par transfert	67

3.2.3.1	Cycle de moulage	67
3.3	Conception de moule	67
3.3.1	La fabrication par usinage	68
3.3.1.1	Sélection du plan de moulage :	68
3.3.1.2	Analyse de dépouille :	69
3.3.1.3	Traitement des Contre-Dépouilles :	69
3.3.1.4	Définition des lignes de joint (Parting Lines) :	70
3.3.1.5	Création des surfaces de joint (Parting Surfaces) :	70
3.3.1.6	Séparation des moitiés du moule (Tooling Split) :	71
3.3.2	Les parties de moule	71
3.3.2.1	Plaques semelles :	71
3.3.2.2	Colonnes de guidage.	73
3.3.2.3	Noyau	74
3.3.2.4	Coulisseaux	75
3.3.2.5	Empreinte	78
3.3.2.6	Validation du moule :	79
3.3.3	Matériaux utilisé	81
3.3.3.1	Documentation et préparation pour fabrication :	82
3.3.3.2	Cycle de moulage	82
3.3.4	Fabriquer le moule en silicone	82
3.3.4.1	Processus pour fabrication des moules en silicone	83
3.4	Comparaison des matériaux pour la fabrication de moules	86
3.5	Méthode alternative pour la fabrication des moules	87
3.6	Conclusion	88
4	Extraction des fibres et fabrication effective de la pale	89
4.1	Introduction	89
4.2	Extraction des fibres de palmiers dattiers.	89
4.2.1	Le palmier dattier	89
4.2.2	Résumé des recherches sur le palmier dattier	90
4.3	Techniques d'extraction des fibres et des particules	93

4.3.1	Méthode mécanique	93
4.4	Les matériaux utilisés dans la fabrication de la pale	96
4.4.1	Presparation de Résine époxy	97
4.4.1.1	La proportion du mélange des composants :	97
4.5	Fabrication de noyau	97
4.5.1	Fabrication de sheer web	97
4.5.2	Fabrication de noyaux	97
4.6	Fabrication de la pale	98
4.7	Traiter la surface de la pale	99
4.8	Conclusion	100
	Conclusion	101
	Bibliographie	102
	Annexes	105

Liste des tableaux

1.1	Tableau des caractéristiques du rotor[2]	25
2.1	Different winds classes in small wind turbines [3].	34
2.2	Caractéristiques géométriques des sections du profil	42
2.3	Tableau des caractéristiques du rotor	46
2.4	Dépendance du Maillage	56
2.5	Résultats des deux méthodes	58
2.6	Tableau des caractéristiques du rotor	62
3.1	Comparaison des matériaux pour la fabrication de moules	86
4.1	Nombre d'arbres dattiers en Algérie par variété (2012)[4]	90
4.2	Propriétés mécaniques de quelques variétés du Lif de palmier [5].	91
4.3	Fraction massique de la fibre Lif et désignation des plaques en Lif-époxy	98

Table des figures

1.1	L'éolienne de Charles F. Brush (États-Unis, 1888)[6]	21
1.2	Total de la puissance installée des éoliennes à travers le monde[7]	22
1.3	Eolienne a axe horizontale[8]	23
1.4	Classification des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales[9] .	23
1.5	Variation du coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types de turbines [10]	23
1.6	Principe du fonctionnement de base d'une éolienne à axe horizontal	25
1.7	Eolienne domestique[11]	26
2.1	Modèle de disque actuateur pour l'analyse du rotor[12]	29
2.2	Définition des différents angles[13]	31
2.3	la géométrie des trente profils aérodynamiques de petites éoliennes	36
2.4	Résultats de la classification des 30 profils aérodynamiques étudiés, présentés dans les colonnes de gauche à droite, basés sur : (i) Colonne 1 : Rapport de C_l/C_d maximal, (ii) Colonne 2 : Coefficient de portance maximal, (iii) Colonne 3 : Stabilité aérodynamique, (iv) Colonne 4 : Indice d'efficacité des matériaux, et (v) Colonne 5 : Utilisation de la fonction objective.	37
2.5	Géométrie du profil aérodynamique SG6041	38
2.6	Géométrie du profil aérodynamique S809	38
2.7	Coefficient de portance pour différents profils à un nombre de Reynolds de 168000	39
2.8	rapport C_l/C_d pour différents profils à un nombre de Reynolds de 168000 . . .	39
2.9	Angle d'attaque et forces aérodynamiques sur une pale d'éolienne en fonctionnement[14]	40
2.10	rapport de C_l/C_d en fonction de AOA	41
2.11	Répartition de la corde et torsion d'une pale	42
2.12	Distribution de la longueur de corde de la pale	43
2.13	Distribution de l'angle de torsion le long de la pale	43
2.14	Angle d'attaque α et pitch angle β pour une section de pale donnée	44

2.15	Graphes de la puissance $P(KW)$ en fonction de l'angle de calage (pitch angle) β	44
2.16	Turbine éolienne à axe horizontal conçue avec QBlade	45
2.17	Le coefficient de puissance en fonction de TSR	46
2.18	La puissance générée (W) en fonction de la vitesse de vent (m/s)	46
2.19	Le couple produit (Nm) en fonction de la vitesse de vent (m/s)	47
2.20	Distribution de la corde	48
2.21	Distribution de la corde et l'angle de torsion	49
2.22	corps de la pale	49
2.23	Pied de la pale	50
2.24	Sélection de plan passant par le dernier profile	50
2.25	La forme dome	51
2.26	La forme finale	51
2.27	Domaine de calcul et conditions aux limites pour la modélisation CFD	52
2.28	Maillage du domaine de calcul	52
2.29	Maillage CFD : (a) maillage du domaine de calcul, (b) couches prismatiques sur les surfaces des pales	53
2.30	Distribution de Y^+ des pales	53
2.31	Frame motion	55
2.32	critere de convergence	55
2.33	Pression pour un angle d'attaque de 4,5 degrés	57
2.34	Vitesse dans la couche limite	57
2.35	Lignes de courant autour de la pale	57
2.36	Les propriétés mecaniques	60
2.37	Maillage de la pale	60
2.38	L'interaction fluid-structure	61
2.39	distribution de la pression (face avant)	62
2.40	distribution de la pression (face arrière)	63
2.41	Déformation de la pale	63
2.42	distributions de contraintes (face avant)	63
2.43	distributions de contraintes (face arrière)	64
3.1	Moule d'injection plastique [15]	66

3.2	Moule par compression [1]	67
3.3	Moule par transfert[1]	68
3.4	Plan de joint	68
3.5	Analyse de dépouille	69
3.6	Traitement des Contre-Dépouilles	70
3.7	Traitement des Contre-Dépouilles	70
3.8	Surfaces de joint et Séparation des moitiés du moule	71
3.9	La plaque semelle pour matrice supérieure	72
3.10	La plaque semelle pour matrice inférieure	73
3.11	Colonne de guidage	74
3.12	Montage du colonne de guidage	74
3.13	Noyaux	75
3.14	Noyaux	75
3.15	Doigt de guidage	76
3.16	Coin	76
3.17	Coins	76
3.18	Base Coulissante	76
3.19	Coulisseaux moule fermi	77
3.20	Coulisseaux moule ouvert	77
3.21	Coulisseaux	77
3.22	Empreinte supérieure	78
3.23	Empreinte supérieure	78
3.24	Empreinte inférieure	79
3.25	Empreinte inférieure	79
3.26	moule ouvert	79
3.27	moule fermé	80
3.28	moule ouvert (wireframe)	80
3.29	Moule fermé (wireframe)	80
3.30	Partie supérieure	80
3.31	Partie supérieure	81
3.32	Partie inférieure	81

3.33	partie inférieur	81
3.34	l'impression 3D des parties	83
3.35	Assemblage des partie	84
3.36	Application de mastic	84
3.37	Moule en ciment blanc	87
3.38	Moule en sable et silicate de sodium	87
3.39	Le bout de la pale après le moulage en sable	88
3.40	Le bout de la pale après le moulage en sable	88
3.41	Moule en ciment blanc et de plâtre	88
4.1	Schéma du palmier dattier (Munier, 1973)	90
4.2	Des tiges de palmiers dattiers	92
4.3	les feuilles	92
4.4	kornav	93
4.5	Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL	94
4.6	Échantillons de morceaux après utilisation du broyeur GHE 150 STIHL	95
4.7	Broyeur kitchef grinder	95
4.8	les tamiseurs	96
4.9	Sheer web[16]	98
4.10	Sheer web	98
4.11	Courbe contrainte-déformation pour le composite Lif-Epoxy	99
4.12	Résultats des essais de traction (Lif-époxy)	99

Liste des acronymes

- **BEM** : Blade Element Momentum
- **HAWT** : Horizontal Axis Wind Turbine
- **RANS** : Reynolds Averaged Navier-Stokes (Équations moyennées de Navier-Stokes)
- **CFD** : Computational Fluid Dynamics (Dynamique des Fluides Numérique).
- **FSI** : Fluid Structure Interaction.
- **FEA** : Finite Element Analysis .
- **AOA** :Angle Of Attack.
- **TSR** : Tip Speed Ratio.
- **CAO** : Conception Assisté Par Ordinateur.
- **N-S** : Navier stokes.
- **S-A** : Spalart Allmaras.
- **RPM** : Rotation Per Minute.

Introduction générale

L'essor des éoliennes domestiques offre une réponse prometteuse à la demande croissante en énergie renouvelable locale. Ce développement s'accompagne de nombreux défis techniques, particulièrement dans la conception des pales de rotor, essentielles pour optimiser l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes.

Notre approche intègre une analyse aéroélastique approfondie, cruciale pour décrypter les interactions complexes entre les forces aérodynamiques et la structure de la pale. Nous avons constaté que le choix judicieux du profil de pale joue un rôle déterminant dans la maximisation de la conversion d'énergie éolienne en électricité. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur des critères tels que le coefficient de puissance maximal et la résilience face aux conditions météorologiques changeantes.

Nos recherches ont montré qu'une optimisation minutieuse de la conception de la pale est indispensable. Nous avons donc travaillé sur l'ajustement de la distribution de corde le long de la pale et la détermination de l'angle d'attaque optimal pour diverses conditions de vent. Ces paramètres, nous l'avons observé, influencent directement les performances et la longévité de la turbine éolienne domestique, tout en respectant les contraintes spécifiques de compacité et de légèreté inhérentes à une installation résidentielle.

Un aspect innovant de notre étude concerne l'utilisation de fibres naturelles dans la fabrication des pales de rotor. Nos expériences ont révélé que les matériaux composites renforcés de fibres naturelles constituent une alternative séduisante aux fibres synthétiques traditionnelles. Ils offrent une réduction significative de l'empreinte environnementale tout en maintenant des niveaux de performance satisfaisants. Néanmoins, nous avons dû développer une expertise spécifique pour garantir la durabilité, la résistance et la sécurité des turbines éoliennes domestiques utilisant ces matériaux, tout en respectant les normes de qualité en vigueur.

En combinant ces différentes approches - analyse aéroélastique poussée, sélection de profil basée sur des critères d'efficacité et de robustesse, optimisation précise de la conception, et utilisation de fibres naturelles - nos travaux ouvrent la voie à des turbines éoliennes domestiques capables de fournir une source d'énergie renouvelable fiable et durable pour les foyers et les petites communautés.

Ce mémoire s'articule autour de six chapitres, chacun explorant un aspect crucial de notre recherche :

Chapitre 1 : Dans ce chapitre d'introduction, nous nous efforcerons de dresser un panorama complet des éoliennes à axe horizontal, en nous penchant particulièrement sur leurs variantes à petite échelle. Notre analyse s'étendra aux matériaux composites employés dans la fabrication des pales de rotor. Ce faisant, nous cherchons à établir un socle de connaissances solide, essentiel pour appréhender les avancées récentes dans le domaine des turbines éoliennes domestiques. Notre objectif est de fournir au lecteur les outils conceptuels nécessaires pour naviguer aisément à travers les chapitres suivants.

Chapitre 2 : Ce chapitre traite de l'optimisation aérodynamique et de l'analyse aéroélastique des rotors des éoliennes domestiques. En utilisant la méthode BEM et un algorithme d'optimisation multi-objectifs, l'optimisation de la forme des pales pour maximiser l'efficacité énergétique tout en minimisant les contraintes mécaniques. L'analyse aéroélastique, qui combine la mécanique des fluides et des structures, garantit que les pales optimisées sont stables et résistantes. Les résultats montrent une amélioration significative des performances et ouvrent la voie à de nouvelles perspectives dans la conception des rotors.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous vous invitons dans les coulisses de la conception et de la réalisation du moule utilisé pour fabriquer nos pales de rotor optimisées. C'est un voyage passionnant, depuis les premières esquisses jusqu'à la fabrication finale du moule. Nous partagerons avec vous les défis techniques rencontrés, les choix de matériaux parfois surprenants, les techniques de fabrication innovantes et nos méthodes rigoureuses de contrôle qualité.

Chapitre 4 : Ce chapitre nous plongera dans l'exploration fascinante du processus d'extraction des fibres de palmier dattier et la fabrication des pales. Les fibres de palmier dattier, un matériau naturel possédant un potentiel prometteur pour la fabrication de pales de rotor destinées aux éoliennes domestiques, seront au cœur de notre étude. Nous examinerons en détail les méthodes d'extraction ainsi que la fabrication concrète de ces pales de rotor.

Problématique

Le problème de ce mémoire réside dans la nécessité de concevoir, développer et Optimiser les éoliennes domestiques efficaces et durables. En effet, comme le nombre de Demande croissante d'énergies renouvelables et prise de conscience des enjeux environnementaux Les éoliennes domestiques représenteraient une solution prometteuse pour la production locale Électricité issue de sources d'énergie renouvelables. Cependant, pour réaliser leur plein potentiel, Ces éoliennes doivent surmonter plusieurs défis techniques. Premièrement, la conception aérodynamique des pales du rotor joue un rôle essentiel. Efficacité globale de l'éolienne. Forme de la pale optimisée pour une capture maximale L'énergie éolienne tout en minimisant les pertes est une tâche complexe qui nécessite Analyse approfondie et méthodes d'optimisation avancées. De plus, les limitations liées aux matériaux utilisés pour fabriquer les pales sont d'égale importance. Les éoliennes domestiques doivent être légères, puissantes et durables pour fonctionner efficacement dans divers environnements, tout en minimisant leur impact environnemental. En fin de compte, l'aéroélasticité des pales constitue un autre obstacle important. Les forces aérodynamiques sur les pales peuvent entraîner des vibrations et des changements structurels, cela nécessite une conception minutieuse afin de garantir la sécurité et la stabilité de la turbine dans différentes conditions de fonctionnement.

En conséquence, l'enjeu de cette thèse est de créer une approche intégrée pour concevoir, optimiser et produire des éoliennes domestiques efficaces et durables qui prennent en compte les problèmes liés à la conception aérodynamique, aux substances utilisées et à l'aéroélasticité des pales du rotor. Cette thèse tente de contribuer au développement de la technologie des énergies renouvelables en proposant de nouvelles solutions pour la production d'électricité propre et portable à l'échelle domestique.

Chapitre 1

Etat de l'art des petites éoliennes a axe horizontal

1.1 Introduction

Le chapitre qui introduit le concept vise à établir les bases théoriques et techniques nécessaires. pertinent à la compréhension globale du sujet de recherche. Il tente d'expliquer le contexte à l'échelle nationale et discuter des principes fondamentaux de la conception d'éoliennes à plus grande échelle. D'autres modèles incluent des éoliennes verticales et à petit axe horizontal (également connues sous le nom de HAWT). En fin de compte, cette introduction servira de rampe de lancement pour approfondir nos recherches. les différents aspects techniques et scientifiques abordés dans les pages suivantes.

Dans ce premier chapitre, nous aborderons les principes des éoliennes à axe horizontal, des petites éoliennes à axe horizontal et des matériaux composites. Nous commencerons par une description historique et technique des parcs éoliens à turbines horizontales, en discutant de leur rôle dans la production d'énergie éolienne à grande échelle. Nous discuterons ensuite de l'évolution des petites éoliennes à axe horizontal, nous mettrons en évidence leurs avantages et inconvénients spécifiques par rapport aux éoliennes traditionnelles. Finalement, nous discuterons des matériaux composites, de leur popularité croissante dans la construction de pales de rotor en raison de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles et de leur composition légère. Ce chapitre fournira ainsi une compréhension fondamentale du contexte technique et scientifique entourant l'enquête détaillée présentée dans cette memoire.

1.1.1 La transition énergétique vers un avenir durable : le rôle essentiel de l'énergie éolienne

Les sociétés modernes font face à des besoins énergétiques pressants en raison de la croissance démographique et de l'industrialisation accrue. Cette augmentation du développement entraîne une demande croissante en énergie, rendant essentiel de trouver des sources d'énergie alternatives durables et renouvelables pour protéger notre environnement. L'énergie éolienne apparaît comme une solution prometteuse à ce défi. Cette énergie propre et renouvelable transforme l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des éoliennes. Aujourd'hui, la question de l'énergie est au cœur des stratégies nationales et mondiales. L'énergie éolienne, en tant que source alternative, joue un rôle vital dans la transition vers un avenir plus respectueux de l'environnement.

1.1.2 Historique de l'énergie éolienne

Les énergies renouvelables proviennent de différentes sources comme le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau et les marées. Elles ont l'avantage de ne pas produire de déchets ni d'émissions polluantes, ce qui les rend très utiles dans la lutte contre l'effet de serre et la réduction des émissions de CO₂. Parmi ces énergies, le vent se distingue par ses variations importantes et irrégulières.

Les sources d'énergie alternatives comprennent le soleil, le vent et La chaleur de la terre, les cascades et les marées. Ils ont l'avantage de ne pas créer soit des déchets nuisibles à l'environnement, soit des émissions polluantes. tout cela les rend très bénéfiques dans la lutte contre le réchauffement climatique. et la diminution des émissions de CO₂. Au fil du temps, les moulins ont converti l'énergie éolienne en énergie mécanique, qui était utilisée pour des processus tels que moulin des céréales, extraire l'huile des graines, déchiqueter les métaux, traiter les fibres ou pomper de l'eau. En 1888, Charles F. Brush a construit une petite turbine qui utilisait le vent pour alimenter sa maison, en utilisant une batterie pour stocker l'énergie. Ce fut la création de la première éolienne utilisant le vent[6].

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est pleinement reconnue comme une nouvelle forme d'énergie renouvelable et est considérée comme une forme d'énergie importante pour l'avenir. Cependant, il reste encore médiocre par rapport à son potentiel. La rentabilité d'une éolienne dépend avant tout de l'emplacement et de la destination de son installation. Les sites les plus productifs sont souvent situés à proximité de l'océan ou au sommet des montagnes et des mers.

L'énergie éolienne est directement applicable à l'utilisation d'éoliennes ou d'anciennes éoliennes pour pomper de l'énergie, ou elle peut être convertie en énergie électrique via un générateur, c'est ce qu'on appelle une éolienne. Ces derniers prennent l'énergie du vent dans leurs pales et génèrent de l'électricité grâce à un générateur renouvelable. Autrefois considérée comme une forme de bricolage, l'éolienne est désormais le résultat d'une science avancée.



FIGURE 1.1 – L'éolienne de Charles F. Brush (États-Unis, 1888)[6]

1.1.2.1 Bénéfices de l'Énergie Éolienne

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages. Il ne dégage aucune pollution. peut se substituer aux sources d'énergie traditionnelles. ne nécessitant aucune aide, C'est copieux et durable. De plus, les terres consacrées aux parcs éoliens peuvent être utilisées. D'autres animaux sont employés à des fins agricoles, ainsi qu'à d'autres fins, comme la foresterie. D'autres sources d'énergie renouvelables sont également considérées comme l'un des systèmes. de la production d'électricité, avec des équipements ayant une longue durée de vie.

1.1.2.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

Des défis surviennent dans l'énergie éolienne en raison de l'instabilité résultant de la variabilité des vents et des périodes calmes où aucune énergie n'est produite, ainsi que de la difficulté de stocker l'énergie. D'autres incluent également des équipements coûteux qui peuvent produire du bruit ayant des impacts visuels notables.[17].

1.2 Le rôle de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale

La consommation mondiale d'énergie a connu une forte augmentation ces dernières années. Selon les statistiques de 2024 du Global Wind Energy Council (GWEC), la figure (I.2) montre qu'à la fin de 2023, la puissance éolienne installée dans le monde atteignait 1021 GW. La capacité ajoutée sur la période 2016-2023 a représenté un taux de croissance de 11 %. Au cours des dix dernières années, ce taux moyen de croissance a été de 28 % par an. [18].

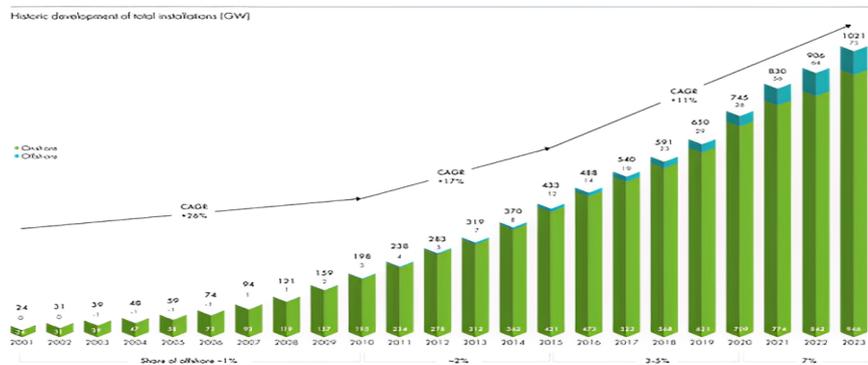


FIGURE 1.2 – Total de la puissance installée des éoliennes à travers le monde[7]

1.3 L'éolienne à axe horizontale

Ces machines sont directement issues des moulins à vent, où les voiles tendues sur une structure généralement en bois ont été progressivement remplacées par des éléments ressemblant à des ailes d'avion, comme illustré à la figure (1.3). Ces ailes, exposées au vent, ne visent pas à faire voler un avion, mais plutôt à générer un couple moteur pour entraîner divers dispositifs mécaniques tels qu'une génératrice électrique ou une pompe [19].

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées en raison de leur meilleure efficacité aérodynamique par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ces machines ont généralement entre 1 et 3 pales profilées aérodynamiquement, comme illustré à la figure (1.4), et peuvent produire des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de rotation est parallèle au sol [10]. On distingue différents types d'éoliennes en fonction du nombre de pales, comme illustré à la figure (1.4) [19].

En général, le rotor de ces éoliennes est équipé de trois pales, car ce nombre représente un compromis optimal entre le coefficient de puissance et la vitesse spécifique λ , comme illustré dans la figure (1.5).



FIGURE 1.3 – Eolienne a axe horizontale[8]

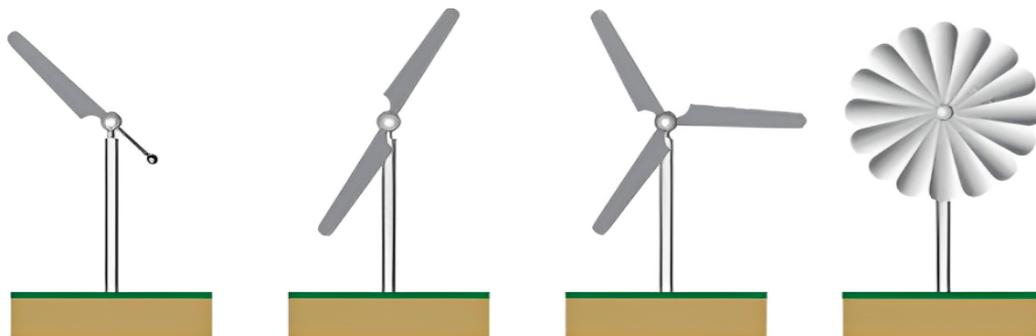


FIGURE 1.4 – Classification des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales[9]

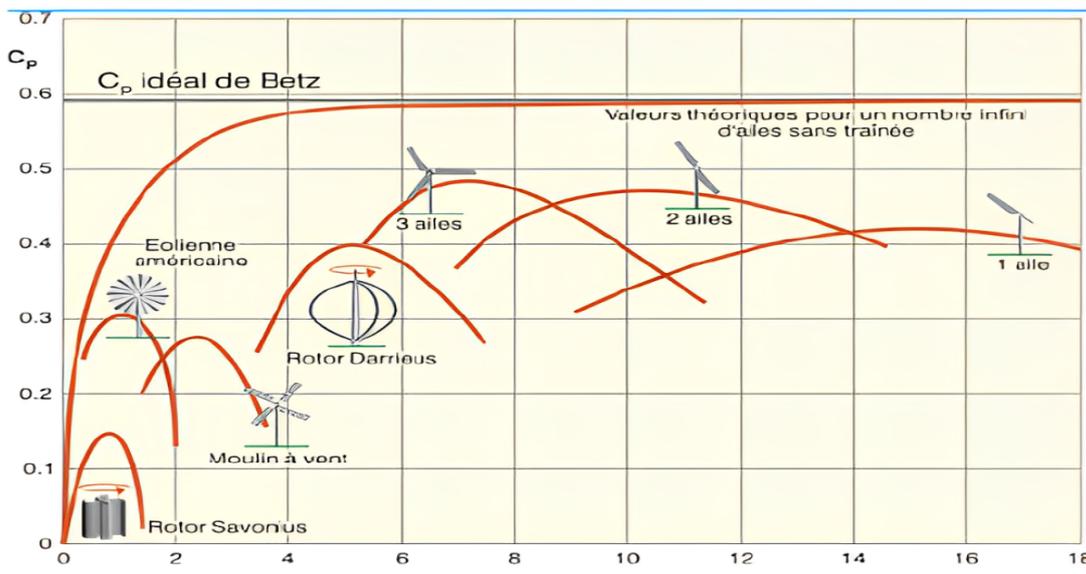


FIGURE 1.5 – Variation du coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types de turbines [10]

1.3.1 Paramètres de classification des éoliennes

Une classification méthodique, largement adoptée, révèle les groupes, les noms et les formes de ces éoliennes. Trois principaux paramètres de fonctionnement sont utilisés pour ca-

racteriser un capteur éolien et évaluer son efficacité [10] :

- **La vitesse périphérique** : C'est la vitesse à l'extrémité de la pale, notée $V = \Omega \cdot R$ (où Ω est la vitesse de rotation de la machine éolienne et R le rayon de l'extrémité de la pale). Ce paramètre est également appelé vitesse spécifique λ . Les éoliennes peuvent être classées comme lentes si $\lambda < 3$, et rapides si $\lambda > 3$.
- **Le coefficient de puissance (CP)** : Ce paramètre, noté CP, mesure le rapport de la puissance P collectée sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait à travers le disque du rotor. Il est crucial pour évaluer l'efficacité d'une éolienne, avec une valeur maximale fixée par Betz à 0.592. Des détails supplémentaires seront développés dans le deuxième chapitre.
- **Le coefficient de couple (CT)** : Ce troisième paramètre, noté CT, est essentiel car il représente le rapport entre le coefficient de puissance CP et la vitesse spécifique λ .

1.3.2 Fonctionnement des Éoliennes à Axe Horizontal

Le rotor : C'est la partie de l'éolienne qui capte l'énergie cinétique du vent. Il est constitué de plusieurs pales fixées à un moyeu central. Lorsque le vent souffle, il exerce une force sur les pales, les faisant tourner autour de l'axe horizontal.

Le générateur : Il est connecté au moyeu du rotor et convertit l'énergie mécanique produite par la rotation des pales en énergie électrique. Le générateur contient des aimants et des bobines de cuivre qui génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont mis en mouvement par le rotor.

La tour de support : Elle soutient le rotor et le générateur à une hauteur optimale pour capturer le vent. La hauteur de la tour est importante car elle permet d'accéder à des vents plus forts et plus constants qui augmentent la production d'électricité.

Le fonctionnement de l'éolienne à axe horizontal repose sur le principe de la conservation de l'énergie. Lorsque le vent fait tourner les pales du rotor, l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transmise au générateur, où elle est transformée en énergie électrique utilisable grâce à l'induction électromagnétique.

1.3.3 Les catégories des éoliennes

La distinction entre les petites et les grandes éoliennes n'est pas clairement établie. Les petites éoliennes sont généralement définies pour des puissances inférieures à 40 kW (Tableau I.1). Certaines classifications incluent même des catégories supplémentaires comme les éoliennes micro et moyennes [20]. Conçues pour équiper des habitations individuelles et des entreprises, les petites éoliennes permettent de réduire les factures d'électricité et favorisent parfois l'indépendance énergétique.

1.3.4 L'énergie éolienne domestique (petites éoliennes)

Les éoliennes domestiques, également connues sous le nom d'éoliennes résidentielles, sont des dispositifs utilisant de petites éoliennes pour produire de l'énergie dans des applications domestiques. Cette approche vise à fournir de l'électricité aux foyers ou petites communautés en

Énergie Cinétique → Énergie Mécanique → Énergie Électrique

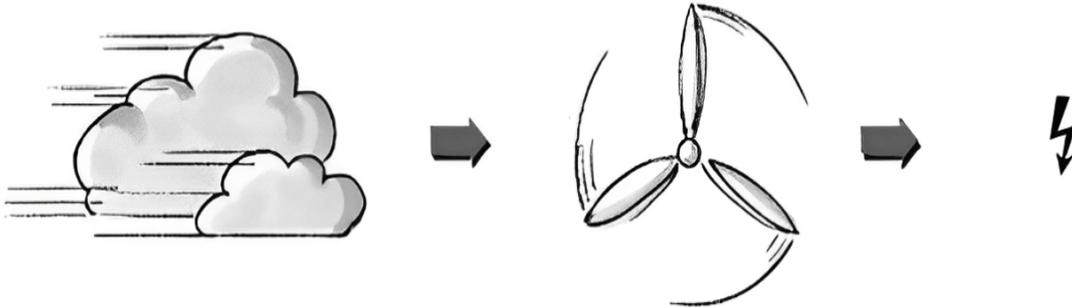


FIGURE 1.6 – Principe du fonctionnement de base d'une éolienne à axe horizontal

TABLE 1.1 – Tableau des caractéristiques du rotor[2]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petites	<12m	<40kW
Moyennes	>12m, <45m	>40kW, <1MW
Grandes	>45m	>1MW

utilisant l'énergie éolienne disponible localement. Il est crucial dans le contexte de l'éolien domestique de sélectionner des éoliennes adaptées à l'échelle et aux besoins spécifiques du ménage ou de la communauté. Typiquement de petite taille, les éoliennes domestiques ont une capacité de production d'électricité allant de quelques kilowatts à quelques dizaines de kilowatts. L'avantage principal de l'éolien domestique est qu'il permet aux utilisateurs de devenir plus autonomes sur le plan énergétique en produisant leur propre électricité à partir de sources renouvelables. Cela peut réduire leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie traditionnels et diminuer leur empreinte carbone en utilisant une source d'énergie propre.

Dans le cadre de l'éolien domestique, les matériaux composites jouent un rôle crucial. Les pales des éoliennes domestiques sont souvent fabriquées à partir de composites renforcés de fibres, tels que les composites de fibre de verre ou de fibre de carbone. Ces matériaux offrent une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité, les rendant adaptés à une utilisation dans des conditions environnementales variées.

1.4 Les matériaux composites utilisés dans les éoliennes

Les matériaux composites sont des matériaux fabriqués en combinant deux ou plusieurs composants distincts pour obtenir des propriétés synergiques qui dépassent celles des composants individuels pris séparément. Ils sont largement utilisés dans divers domaines industriels en raison de leur légèreté, de leur résistance et de leur adaptabilité aux exigences spécifiques des applications.



FIGURE 1.7 – Eolienne domestique[11]

Un matériau composite typique se compose de deux éléments principaux : la matrice et le renfort. La matrice agit comme une liaison entre les différentes parties du composite, tandis que le renfort renforce la structure et lui confère des propriétés mécaniques spécifiques[21].

Dans le contexte des éoliennes, les matériaux composites jouent un rôle crucial, notamment dans la fabrication des pales. Les pales d'éoliennes sont soumises à des forces importantes telles que les forces aérodynamiques et les contraintes mécaniques. Les composites offrent une solution idéale car ils combinent une matrice polymère résistante avec un renfort de fibres (comme la fibre de verre ou la fibre de carbone) pour fournir une résistance mécanique élevée tout en restant légers.

Les composites de fibre de verre sont largement utilisés dans les éoliennes en raison de leur bonne résistance à la flexion, de leur faible densité et de leur résistance à la corrosion. Ils sont également disponibles à un coût relativement bas, ce qui en fait un choix populaire dans l'industrie éolienne.

En plus des composites de fibre de verre, d'autres matériaux composites sont explorés pour les éoliennes, tels que les composites de fibre de carbone. Les fibres de carbone offrent une résistance exceptionnelle et une légèreté supérieure à celle de la fibre de verre, bien que leur fabrication puisse être plus complexe et coûteuse.

Des recherches sont également en cours pour évaluer l'utilisation de fibres naturelles, comme les fibres de palmier dattier, dans les éoliennes. Ces fibres naturelles présentent des avantages potentiels en termes de durabilité, de légèreté et de réduction de l'empreinte carbone par rapport aux fibres synthétiques traditionnelles, bien que des études plus approfondies soient nécessaires pour garantir leur compatibilité avec les exigences spécifiques des éoliennes.

En conclusion, les matériaux composites jouent un rôle essentiel dans la fabrication des éoliennes en offrant une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité énergétique et la performance globale des éoliennes. Les recherches se poursuivent pour explorer de nouveaux matériaux et optimiser leur utilisation afin de relever les défis de durabilité et de réduction de l'impact environnemental des éoliennes.

1.4.1 Utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes

L'utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes remonte à plusieurs siècles, mais c'est au cours des dernières décennies que cette pratique a connu un regain d'intérêt significatif. Pendant des millénaires, les humains ont exploité diverses fibres végétales pour fabriquer des matériaux durables et résistants. Par exemple, les anciens Égyptiens utilisaient des fibres de

papyrus pour fabriquer des voiles pour leurs embarcations, exploitant ainsi la légèreté et la résistance naturelle de cette plante aquatique. De même, les civilisations anciennes en Chine utilisaient des fibres de bambou pour construire des structures légères mais robustes.

Au fil du temps, l'utilisation de fibres naturelles s'est diversifiée et a gagné en sophistication. Au XIXe siècle, avec l'essor de la révolution industrielle, les techniques de fabrication de matériaux composites ont évolué pour inclure des fibres naturelles comme le lin et le coton. Ces fibres ont été intégrées dans des composites avec des résines naturelles ou synthétiques pour créer des matériaux légers mais solides utilisés dans diverses applications, de la construction navale à l'aéronautique.

Dans le domaine des éoliennes, l'utilisation de fibres naturelles a commencé à être explorée plus sérieusement au cours des dernières décennies, notamment en réponse aux préoccupations croissantes concernant la durabilité et l'empreinte environnementale des énergies renouvelables. Les fibres de palmier dattier, par exemple, ont été étudiées pour leur potentiel en tant que renforts dans les pales d'éoliennes en raison de leur résistance mécanique et de leur disponibilité régionale dans certaines zones.

Cependant, malgré ces avancées, des défis persistent dans l'utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes. Des recherches approfondies sont nécessaires pour évaluer leur durabilité à long terme, leur résistance aux conditions environnementales extrêmes et leur performance en termes de production d'énergie. Des efforts continus sont déployés pour optimiser les processus de fabrication et explorer de nouvelles technologies qui permettent d'intégrer efficacement ces fibres naturelles dans les éoliennes, contribuant ainsi à promouvoir une transition vers des énergies renouvelables plus durables et respectueuses de l'environnement.

1.5 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre a souligné l'impératif croissant de répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société moderne en adoptant des sources d'énergie durables et renouvelables. L'énergie éolienne émerge comme une solution prometteuse, exploitant le potentiel du vent pour générer de l'électricité de manière propre et renouvelable.

Les éoliennes, constituées de divers éléments tels que les pales, le rotor, la génératrice et le système de contrôle, jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique exploitable. Les matériaux composites, notamment les composites de fibre de verre et de fibre de carbone, sont essentiels dans la fabrication des éoliennes, offrant une combinaison optimale de légèreté, de résistance et de durabilité.

De plus, l'intérêt croissant pour l'utilisation de fibres naturelles dans les éoliennes repose sur leurs avantages potentiels tant sur le plan environnemental qu'économique. Ce chapitre d'introduction à l'énergie a mis en lumière les avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie éolienne, en mettant l'accent sur les composants et les matériaux clés utilisés dans la fabrication des éoliennes.

Il a également souligné l'importance croissante de l'éolien domestique et l'utilisation de matériaux composites, en mettant en évidence les avantages des fibres naturelles dans la conception des éoliennes. Ces informations jetteront les bases nécessaires pour approfondir notre compréhension de l'énergie éolienne et explorer les aspects spécifiques abordés dans les chapitres suivants de ce mémoire de maîtrise.

Chapitre 2

Étude aéroélastique des éoliennes à axe horizontale

2.1 Introduction

Pour assurer la performance et la durabilité des éoliennes à axe horizontal, nous commençons par une analyse approfondie de leur comportement aéroélastique. Cette étape examine comment les forces du vent interagissent avec la structure mobile des pales, évaluant ainsi leur stabilité et leur capacité à résister dans diverses conditions.

En utilisant des outils avancés de simulation qui combinent la mécanique des fluides (CFD) et des structures (FEA), nous prédisons avec précision les déformations et les contraintes subies par les pales sous l'influence des forces aérodynamiques. Cette approche garantit que les pales, optimisées pour leur comportement aéroélastique, répondent aux normes de sécurité et de fiabilité tout au long de leur cycle de vie. Nous abordons d'abord une étude aérodynamique, visant à maximiser l'efficacité énergétique en ajustant la conception des pales pour capturer plus efficacement l'énergie éolienne. À l'aide de simulations CFD telles qu'ANSYS Fluent, nous évaluons comment différentes configurations géométriques et conditions de vent affectent les performances globales de l'éolienne.

En combinant ces deux approches complémentaires, ce chapitre explore de nouvelles possibilités pour améliorer l'efficacité énergétique des éoliennes domestiques tout en garantissant leur sécurité et leur fiabilité. Ces résultats ouvrent ainsi la voie à des avancées significatives dans la conception des rotors éoliens, contribuant ainsi à l'essor des énergies renouvelables.

2.2 Étude aérodynamique des éoliennes à axe horizontale

2.2.1 Théorie de la quantité de mouvement

2.2.1.1 Betz Limit

Albert Betz a développé un modèle simple pour prédire la performance des hélices de navires. Ce même modèle est largement utilisé pour illustrer le fonctionnement des éoliennes.

Betz a fait l'hypothèse d'un écoulement d'air unidimensionnel, incompressible et stationnaire. En s'appuyant sur le principe de conservation de la quantité de mouvement, il a démontré que la force T exercée sur l'éolienne correspond à la poussée s'effectuant entre les sections 1 et 4 de la figure (2.1).

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) = U(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

Ou :

- T représente la force exercée par le vent sur l'éolienne.
- \dot{m} désigne le débit massique d'air.
- U_1, U_2, U_3 et U_4 correspondent aux vitesses de l'air aux sections 1, 2, 3 et 4 respectivement.

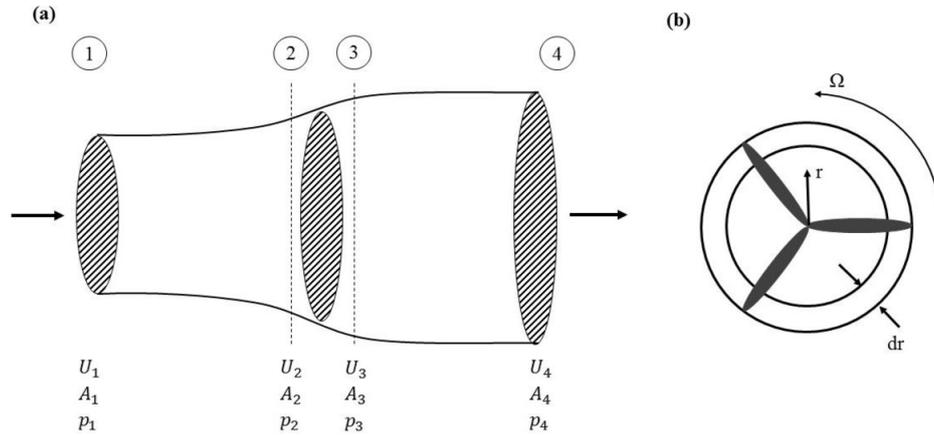


FIGURE 2.1 – Modèle de disque actuateur pour l'analyse du rotor[12]

En utilisant la fonction de Bernoulli, pour les sections 1 et 2, 3 et 4 respectivement.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.2)$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.3)$$

Où p_1, p_2, p_3 et p_4 représentent la pression de l'air aux sections 1 à 4, respectivement. Pour les sections 2 et 3, en supposant que $p_1 = p_4$ et $U_2 = U_3$, la poussée sur le disque peut également être déduite.

$$T = A_2(p_2 - p_3) = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (2.4)$$

En se basant sur les équations (3.1) et (3.4), on peut obtenir

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.5)$$

Ainsi, le facteur d'induction axial, a , est défini comme la diminution de vitesse entre le profil 1 et le profil 2.

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.6)$$

On obtient alors la puissance P

$$P = T \cdot U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.7)$$

En règle générale, A_2 est remplacé par A , U_1 par U , et le rendement d'une éolienne est représenté par le coefficient de puissance C_p .

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.8)$$

En calculant la dérivée du coefficient de puissance (C_p) pour trouver sa valeur maximale ($C_{p,max}$), on obtient $C_{p,max} = 0,5926$ pour une valeur de a égale à $1/3$. Cette valeur correspond à la limite de Betz, qui représente le rendement théorique maximal qu'une éolienne puisse atteindre. En pratique, aucune éolienne n'atteint cette limite. Johansen et al. (2009) ont toutefois obtenu un coefficient de puissance global légèrement supérieur à 0,51 grâce à des simulations numériques tridimensionnelles (CFD) tenant compte de l'écoulement complet autour du rotor. Ces simulations ont également montré que le coefficient de puissance local peut dépasser légèrement la limite de Betz dans la partie interne du rotor.

En utilisant des méthodes similaires, la poussée axiale T sur le disque en position 2 peut être déduite. Le coefficient de poussée C_T est défini pour caractériser la poussée, comme indiqué dans les équations (2.9) et (2.10).

$$T = \frac{1}{2}\rho AU^2 4a(1-a)^2 \quad (2.9)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = 4a(1-a) \quad (2.10)$$

2.2.1.2 Rotation du sillage(Wake rotation)

Dans la section 2.2.1.1, la rotation du sillage n'est pas prise en compte pour influencer l'écoulement de l'air. En réalité, l'analyse de la rotation du sillage est une autre méthode de calcul de la puissance d'une éolienne, développée initialement par Glauert en 1935. Lorsque l'on considère un tube de courant annulaire au niveau du plan du rotor (profils 2 et 3), la poussée sur un élément annulaire est représentée par dT .

$$dT = (p_2 - p_3)dA = \rho(\Omega + \frac{1}{2}\omega)\omega r^2 2\pi dr \quad (2.11)$$

Où r désigne le rayon de la pale, dr son épaisseur, Ω la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne et ω la vitesse angulaire du vent. De même, a' est défini comme le facteur d'induction angulaire (ou tangentiel), tel que :

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.12)$$

En remplaçant l'équation (3.12) dans l'équation (3.11), on obtient :

$$dT = 4\pi a'(1+a')\rho\Omega^2 r^3 dr \quad (2.13)$$

En reprenant l'analyse de la section 3.2.1, la quantité de mouvement axiale peut également être définie comme suit :

$$dT = \rho U^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (2.14)$$

En utilisant les équations (3.13) et (3.14), le rapport de vitesse local (local speed ratio) λ_r est défini comme :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} = \left[\frac{a(1-a)}{a'(1-a')}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Par conséquent, le rapport de vitesse de pointe(TSR) est défini comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\Omega R}{U} \quad (2.16)$$

En appliquant la conservation du moment angulaire, le couple sur l'élément annulaire est dQ ,

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (2.17)$$

2.2.2 Théorie de l'élément de pale

La théorie de l'élément de pale évalue les forces aérodynamiques sur chaque section de la pale en fonction des propriétés géométriques et de l'angle d'incidence de l'écoulement. Lorsque l'angle d'incidence est calculé, les forces aérodynamiques peuvent être obtenues à partir des données correspondantes de la section de profil.

La théorie de la quantité de mouvement de l'élément de pale (Blade Element Momentum theory) est basée sur les hypothèses suivantes[13] :

- L'écoulement est stationnaire, incompressible et 2D
- L'écoulement est uniforme, homogène et non turbulent
- Il n'y a pas d'interaction aérodynamique entre les éléments (donc pas d'écoulement dans la direction radiale).
- Les forces des pales sont uniquement déterminées par les caractéristiques de portance et de traînée.
- L'écoulement amont est perpendiculaire au plan de rotation (donc pas de lacet).
- Les pales sont supposées être rigides.

Pour chaque section le long du rayon, les angles et les vitesses peuvent être définis comme indiqué dans la Figure 2.2. L'angle géométrique est défini comme l'angle de calage augmenté de l'angle de vrillage local de la section. La différence entre cet angle et l'angle d'incidence relatif

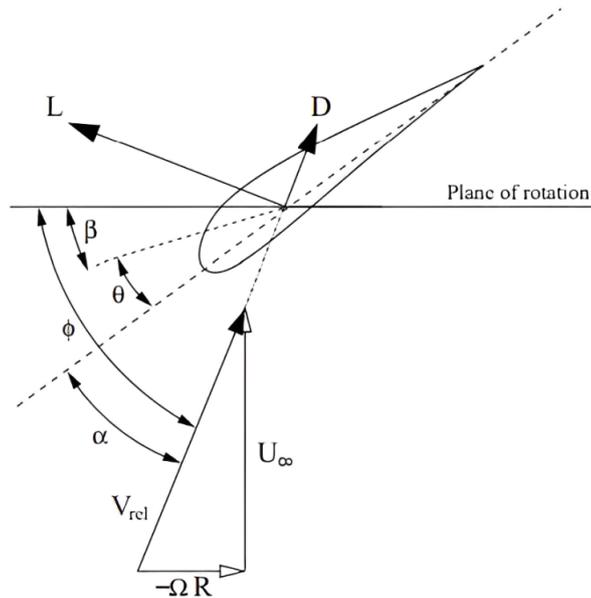


FIGURE 2.2 – Définition des différents angles[13]

peut être définie comme l'angle d'incidence local :

$$\alpha = \phi - (\beta + \theta) \quad (2.18)$$

où : α est l'angle d'incidence local, β est l'angle de calage local, θ est l'angle de vrillage local, ϕ est l'angle d'incidence relatif.

Lorsqu'on considère les forces aérodynamiques avec la théorie de l'élément de pale et l'aide de la Figure 3.4, les équations suivantes peuvent être dérivées :

$$\frac{dT(r)}{dr} = \frac{B}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \cdot c dr \quad (2.19)$$

$$dQ(r) = \frac{B}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \cdot cr dr \quad (2.20)$$

où : $dT(r)$ est l'élément de poussée différentielle à la distance r du centre de rotation, B est le nombre de pales ρ est la masse volumique de l'air, U_{rel} est la vitesse relative de l'écoulement C_l est le coefficient de portance de la section de profil, C_d est le coefficient de traînée de la section de profil, ϕ est l'angle d'incidence relatif, c est la corde de la pale, dr est un élément infinitésimal de rayon.

$dQ(r)$ est l'élément de couple différentiel à la distance r du centre de rotation.

Avec l'aide de la Figure 2.2 et l'utilisation des vitesses induites, la vitesse relative et l'angle d'incidence relatif peuvent être définis par les équations suivantes :

$$U_{rel} = (1 - a)^2 U^2 + (1 + a')^2 (\Omega r)^2 \quad (2.21)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(1 - a)U}{(1 + a')\Omega r} \right) \quad (2.22)$$

où : U_{rel} est la vitesse relative de l'écoulement, a est le facteur d'induction axial, a' est le facteur d'induction tangentiel, U est la vitesse du vent amont, Ω est la vitesse de rotation de la turbine, r est le rayon de la section considérée, ϕ est l'angle d'incidence relatif.

Puisque les équations ci-dessus dépendent du rayon r , la vitesse relative et l'angle d'incidence relatif diffèrent pour chaque section. En utilisant l'équation 2.22 et la définition du rapport de vitesse, il est possible de dériver une équation pour la relation entre les deux facteurs d'induction :

$$\tan(\phi) = \frac{1 - a}{\lambda_r(1 + a')} \quad (2.23)$$

$$a = 1 - \tan(\phi)\lambda_r(1 + a') \quad (2.24)$$

où λ_r est défini comme le rapport de vitesse :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} \quad (2.25)$$

2.2.2.1 Modèle BEM

Coupler la théorie de la quantité de mouvement avec la théorie de l'élément de pale donnera le modèle BEM. Cela est réalisé en couplant les relations pour la poussée et le couple des deux méthodes. Donc en égalisant et en réécrivant les équations 2.14, 2.17, 2.19 et 2.20, on obtient les expressions suivantes [13] :

$$U^2 4a(1 - a)\pi r = \frac{B}{2} c \cdot U_{rel}(C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \quad (2.26)$$

$$4a'(1 - a)U\pi r^2 \Omega = \frac{B}{2} c \cdot U_{rel}(C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \quad (2.27)$$

Les définitions de la vitesse relative, introduites dans les équations 2.21 et 2.22, peuvent être combinées pour donner :

$$U_{rel} = U \frac{1 - a}{\sin(\phi)} \quad (2.28)$$

En substituant cela dans les équations 2.26 et 2.27 et en réécrivant ces équations, on obtient une expression pour les facteurs d'induction axiaux et angulaires :

$$8a\pi r \sin(\phi) = \frac{Bc}{2}(1 - a)(C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \quad (2.29)$$

$$a(1 - a) = \frac{Bc}{8\pi r \sin(\phi)^2}(C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)) \quad (2.30)$$

Où dans l'équation pour le facteur d'induction angulaire, l'équation 2.24 est substituée pour le facteur d'induction axial a afin d'obtenir une équation pour a' indépendante de a :

$$8a'\pi r^2 \Omega \sin(\phi)^2 = \frac{BcU_\infty}{2}(1 - a)(C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \quad (2.31)$$

$$a'(1 - a) = \frac{BcU}{8\pi r^2 \Omega \sin(\phi)^2}(C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \quad (2.32)$$

$$a' \left[1 - \left(1 - \tan(\phi) \frac{\lambda r}{1 + a'} \right) \right] = \frac{Bc}{8\pi r \lambda r \sin(\phi)^2}(C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \quad (2.33)$$

$$a'(1 + a') = \frac{Bc}{4\pi r \sin(2\phi)}(C_l \sin(\phi) - C_d \cos(\phi)) \quad (2.34)$$

Pour une vitesse de vent, une géométrie de pale et des conditions de fonctionnement données, le problème peut être décrit par les équations 2.22, [2.29-2.34] et 2.18, qui sont répétées ci-dessous. Lorsque les données aérodynamiques des profils utilisés sont disponibles, ces équations peuvent être résolues de manière itérative. Après avoir fait une première estimation des facteurs d'induction, ces équations peuvent être résolues et donneront une "nouvelle" valeur pour les coefficients d'induction. Ce processus peut être répété jusqu'à ce que la différence dans les facteurs d'induction atteigne une limite acceptable. En répétant cela pour chaque section dr le long du rayon, on obtient une solution pour l'ensemble de la pale.

$$\phi = \arctan \left(\frac{1 - a}{\lambda r (1 + a')} \right) \quad (2.35)$$

$$\alpha = \phi - (\theta + \beta) \quad (2.36)$$

$$a(1 - a) = \frac{Bc}{8\pi r \sin(\phi)^2} (C_l(\alpha) \cos(\phi) + C_d(\alpha) \sin(\phi)) \quad (2.37)$$

$$a'(1 + a') = \frac{Bc}{4\pi r \sin(2\phi)} (C_l(\alpha) \sin(\phi) - C_d(\alpha) \cos(\phi)) \quad (2.38)$$

Pour l'ensemble d'équations ci-dessus, l'influence de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement est capturée dans le rapport de vitesse λ_r qui peut être calculé à l'aide de l'équation 2.25. Lorsque ces équations sont résolues, d'autres propriétés comme la poussée, le couple, la vitesse induite et le coefficient de portance local peuvent être déterminées. Cela peut être fait soit avec les équations dérivées de la théorie de la quantité de mouvement, soit avec les

équations de la théorie de l'élément de pale. Pour calculer le couple et la poussée par section dr , les équations suivantes sont utilisées :

$$dT(r) = \rho U^2 4a(r)(1 - a(r))\pi r dr \quad (2.39)$$

$$dQ(r) = 4a'(r)(1 - a(r))\rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (2.40)$$

En sommant toutes les valeurs sectionnelles pour la poussée et le couple, on peut obtenir la poussée totale et le couple total par pale.

$$T = \int_{r_0}^R \frac{dT(r)}{B} dr \quad (2.41)$$

$$Q = \int_{r_0}^R \frac{dQ(r)}{B} dr \quad (2.42)$$

Afin de vérifier ce modèle, les calculs de la poussée et du couple peuvent être répétés avec les équations dérivées de la méthode de l'élément de pale :

$$dT(r) = \frac{B}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l(r) \cos(\phi(r)) + C_d(r) \sin(\phi(r))) c dr \quad (2.43)$$

$$dQ(r) = \frac{B}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l(r) \sin(\phi(r)) - C_d(r) \cos(\phi(r))) cr dr \quad (2.44)$$

Les performances d'une éolienne sont souvent exprimées en termes de puissance. Pour éliminer l'influence directe de la vitesse du vent, on calcule le coefficient de puissance adimensionnel, qui est le rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible dans l'écoulement. Le coefficient de puissance peut être défini comme :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (2.45)$$

2.2.3 Paramètres de conception de rotor

2.2.3.1 Vitesse de vent de conception

La vitesse de conception du vent est définie comme la vitesse du vent à laquelle le rotor de l'éolienne tourne avec un coefficient de puissance maximal [22]. Selon la norme IEC61400-2, la vitesse de conception du vent, V_{design} , doit être 1,4 fois la vitesse moyenne annuelle du vent, V_{AMWS} [23].

TABLE 2.1 – Different winds classes in small wind turbines [3].

S	IV	III	II	I	classes
Spécifié par le concepteur	30	37.5	42.5	50	$V_{ref}(m/s)$
	6	7.5	8.5	10	$V_{ave}(m/s)$
	0.18	0.18	0.18	0.18	I_{15}
	2	2	2	2	a

Dans la présente étude, une éolienne de classe II a été sélectionnée pour la conception de l'éolienne. Cela correspond à une V_{AMWS} de 8,5 m/s. Par conséquent, la vitesse de conception du vent peut être facilement calculée en utilisant l'équation suivante [24] :

$$V_{\text{design}} = 1.4 \cdot V_{AMWS} = 11.9 \text{ m/s} \quad (2.46)$$

Étant donné que l'éolienne est conçue pour fonctionner à son coefficient de puissance maximal (C_p) entre la vitesse de démarrage et la vitesse nominale du vent, la vitesse de conception est définie comme étant égale à la vitesse nominale du vent.

2.2.3.2 Sélection des profils aérodynamiques

La sélection du profil aérodynamique est une étape critique du processus de conception d'une pale de petite éolienne. Les caractéristiques aérodynamiques associées au régime de faible nombre de Reynolds peuvent gravement compromettre les performances de la pale si le profil choisi n'est pas adapté aux applications à faible nombre de Reynolds [25]. La plupart des caractéristiques aérodynamiques inhabituelles à bas nombre de Reynolds peuvent être justifiées par la présence d'une bulle de séparation laminaire sur le profil. Plusieurs profils ont été utilisés dans l'industrie de l'énergie éolienne de petite taille. Cela inclut la famille de profils SG604x, développée spécifiquement pour les éoliennes à vitesse variable de petite taille allant de 1 à 5 kW [26], les profils de la série S (en particulier les S823 et S822) conçus pour les éoliennes à régulation de décrochage de petite taille allant de 2 à 20 kW [27], ainsi que le profil SD7062, initialement conçu comme profil pour planeurs modèle.

Les forces de portance et de traînée résultent du mouvement d'un corps en forme de profil aérodynamique dans un fluide et caractérisent la performance de la pale [28].

2.2.3.2.1 Etude multi-objectif : La première étude, menée par M. Bouhelal et al, explore la procédure complexe de la sélection des configurations aérodynamiques les plus efficaces pour les petites centrales éoliennes exploitées à nombre de Reynolds moyen faible (100 000 à 500 000). Trente profils aérodynamiques courants fréquemment utilisés. les produits utilisés ont été minutieusement évalués sur la base de principes aérodynamiques y compris la finesse maximale, le coefficient de portance maximal C_L et le la différence minimale dans l'angle de repos. De plus, une nouvelle mesure, l'indice d'efficacité, a été créée. Le concept de cité des matériaux (MEI) a été ajouté pour évaluer le volume de matériaux consommés et Les dépenses liées à la fabrication de profils aérodynamiques avec une géométrie spécifiée sont prises en compte.

Conscient de la complexité du choix de profils aéroefficaces, un la fonction objectif a été proposée qui incluait la valeur normalisée du rapport de finesse, le C_L , la cohérence et le MEI maximum. Les résultats de la classification ont indiqué les 5 profils aérodynamiques les plus performants - BW-3, E-216, SG6041, SG6042 et NACA 4410 - prouvant leur conformité à l'objectif proposé.

Le processus de sélection des profils aérodynamiques impliquait une analyse complète de 30 profils aérodynamiques courants utilisés dans la pratique, en utilisant les puissants outils informatiques XFOIL et QBlade pour effectuer les analyses. Ces instruments utilisent des méthodes avancées de calcul du tourbillon et une méthodologie qui prend en compte les effets visqueux et les régions de transition. Ces méthodes produisent des estimations précises des caractéristiques aérodynamiques. L'analyse complète comprenait une variété de nombres de Reynolds associés aux petites éoliennes, dont la valeur typique est de 100 000 à 500 000. Elle a

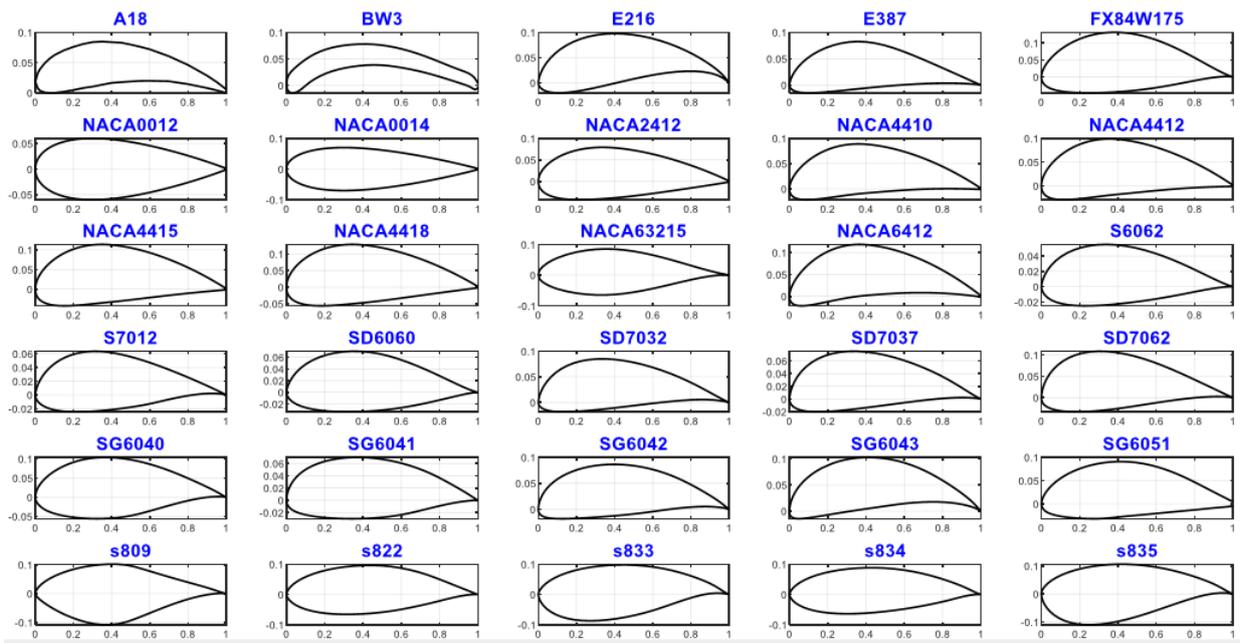


FIGURE 2.3 – la géométrie des trente profils aérodynamiques de petites éoliennes

été réalisée afin de représenter les différentes conditions d'écoulement que les petites éoliennes rencontreront dans le monde réel.

L'évaluation des performances des profils aérodynamiques comprenait le calcul des coefficients aérodynamiques primaires, à savoir le coefficient de portance (C_L) et le coefficient de traînée (C_D). La différence d'angle d'attaque entre -25 et 25 degrés pour chaque profil a été sélectionnée avec soin pour explorer toute la gamme du comportement aérodynamique. Les angles d'attaque négatifs et positifs ont facilité une compréhension globale des propriétés de portance et de traînée ; ces informations ont ensuite été capturées par le comportement du profil dans des conditions d'écoulement positif et négatif.

La sélection des profils aérodynamiques était basée sur plusieurs critères :

1. Maximisation du rapport de C_L/C_D : L'accent est mis sur la maximisation du rapport. L'émergence du port C_L/C_D est attribuée à son rôle dans la maximisation de l'efficacité aérodynamique. A un rapport élevé est associé à un profil capable de générer de la portance tout en minimisant le poids, la traînée, qui est cruciale pour l'amélioration de l'efficacité globale des petites éoliennes.

2. Maximisation du coefficient de portance C_L : La maximisation du coefficient de portance (C_L) est essentielle pour garantir que le profil puisse générer une portance significative à de faibles angles d'attaque. Cette caractéristique est particulièrement pertinente dans conditions de vent faibles, contribuant à la capacité du profil à capter efficacement l'énergie

3. Stabilité - Différence d'angle de décrochage : La stabilité a été déterminée par comparaison de la différence d'angle de décrochage pour des nombres de Reynolds de 100 000 et 500 000. Une différence plus petite indique une meilleure stabilité – où le profil présente un comportement uniforme par rapport à des conditions d'écoulement variées – ce qui conduit à son tour à une probabilité plus faible de décrochage brutal.

4. Utilisation des matériaux dans le contexte de la géométrie des profils - Indice d'efficacité des matériaux (MEI) : La conception de pales d'éoliennes n'est pas une tâche simple, car elle nécessite la prise en compte d'aspects matériels, structurels et aérodynamiques,

qui sont eux-mêmes assez complexes. Mais si nous examinons de plus près cette étude dont nous discutons : au lieu de plonger profondément dans les considérations relatives aux matériaux et aux coûts (comme le ferait n'importe quelle autre étude), ils proposent ce nouveau paramètre sophistiqué appelé indice d'efficacité des matériaux (MEI). Cela semble important, non ? Et bien ça l'est. Cet indice est essentiellement une métrique qui vous indique dans quelle mesure un profil aérodynamique utilise efficacement les matériaux en fonction de certains paramètres géométriques tels que A (la surface balayée), P (le périmètre) et t_{max} (l'épaisseur maximale).

2.2.3.2.2 Résultats des précédentes études : Dans cette étude, les trois profils les plus efficaces ont été identifiés comme suit : BW-3, E-216 et SG6041, qui ont illustré leur conformité aux normes établies. Ces profils étaient caractérisés par leur efficacité aérodynamique, leur stabilité et l'utilisation la plus efficace des matériaux, qui sont tous bénéfiques. Les en cours ont le potentiel de créer de petites éoliennes efficaces.

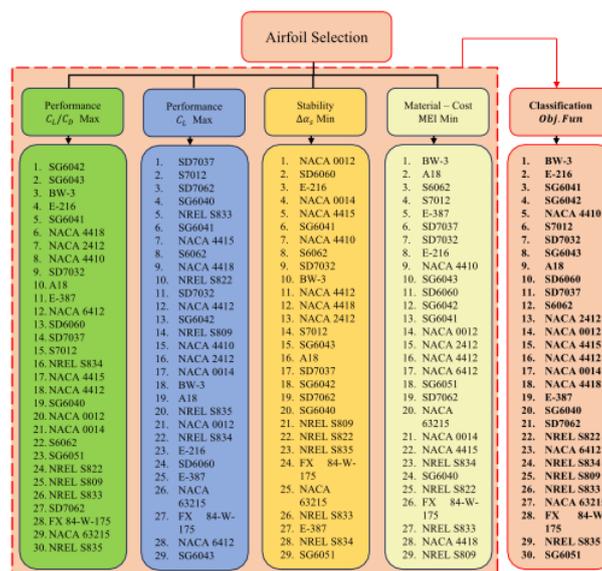


FIGURE 2.4 – Résultats de la classification des 30 profils aérodynamiques étudiés, présentés dans les colonnes de gauche à droite, basés sur : (i) Colonne 1 : Rapport de C_l/C_D maximal, (ii) Colonne 2 : Coefficient de portance maximal, (iii) Colonne 3 : Stabilité aérodynamique, (iv) Colonne 4 : Indice d'efficacité des matériaux, et (v) Colonne 5 : Utilisation de la fonction objective.

2.2.3.2.3 Analyse des profils aérodynamiques : Cette L'étude a permis d'identifier trois profils prometteurs : BW3, SG6041 et E-216. Parmi les trois profils sélectionnés, SG6041 a été retenu pour les raisons suivantes :

Structure simple : Ce profil est moins complexe dans sa conception, ce qui se traduit par un processus de fabrication moins cher et des économies par rapport au profil BW3. Malgré le fait que le profil du BW3 utilise moins de matériaux, sa structure est plus difficile à mettre en œuvre, ce qui peut entraîner des coûts de fabrication et de maintenance plus élevés. À l'inverse, bien que le profil E-216 puisse présenter des propriétés bénéfiques, telles que des performances aérodynamiques spécifiques, il peut également présenter des problèmes en termes de difficulté de fabrication et de coûts associés. De ce fait, la valeur globale du profil SG6041 a été considérée comme primordiale pour sa sélection dans le cadre de cette étude multi-objectif.

Coefficient de portance élevé : Le profil SG6041 produit une grande force qui permet

à la turbine d'avoir une plus grande puissance de sortie.

2.2.3.2.4 Analyse Des deux profils aérodynamiques SG6041,S809 : Pour authentifier notre sélection du profil SG6041 issu de l'étude de M. Bouhelal, nous avons choisi de contraster le profil S809 qui avait été sélectionné lors du projet final de l'année précédente. Le profil S809 est réputé pour son efficacité aérodynamique efficace, cela est particulièrement vrai pour sa capacité à soulever et à traîner.

La géométrie des profils aérodynamiques

Ils ont été pris a partir de site Airfoil tools [29]

SG6041 :

Épaisseur : 9,99 %

La position de l'épaisseur maximale : 34,91 % de la longueur de la corde

Cambrure : 2,00 %

Position de la cambrure : 38,51 % de la longueur de la corde.



FIGURE 2.5 – Géométrie du profil aérodynamique SG6041

S809 :

Épaisseur : 20.99 %

La position de l'épaisseur maximale : 38.3 % de la longueur de la corde

Cambrure : 0,99 %

Position de la cambrure : 82.3 % de la longueur de la corde.



FIGURE 2.6 – Géométrie du profil aérodynamique S809

2.2.3.2.5 Comparaison des Coefficients de Portance et des Rapports Portance sur Traînée entre les Profils Aérodynamiques SG6041 et S809 : logiciel Q Blade basé

sur x-foil a été utilisé pour évaluer les profils sélectionnés. un nombre de Reynolds de 168000 et des angles d'attaque (α) qui varient de - 20 à 20 par pas de 5. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures (2.7) et (2.8). Les profils sélectionnés sont comparés les uns aux autres en fonction de leur portance maximale et de leurs facteurs de rapport. portance/trainée maximale.

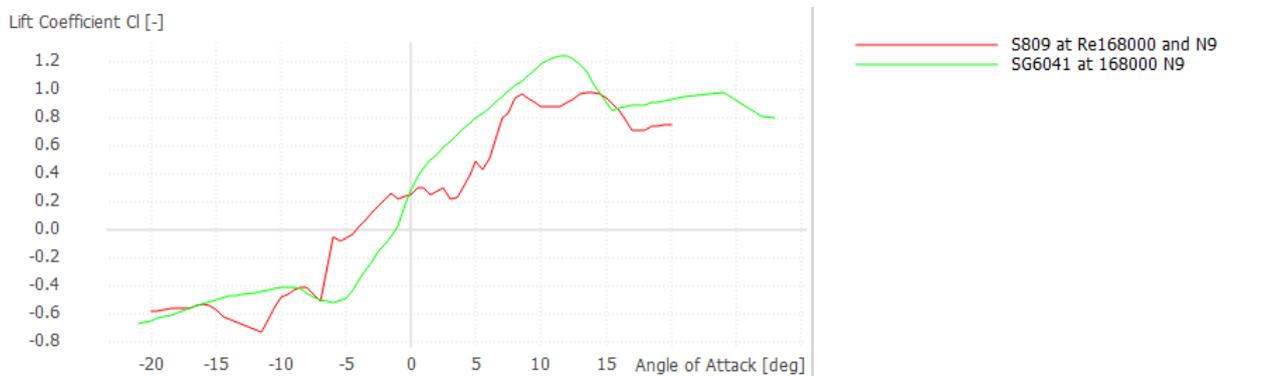


FIGURE 2.7 – Coefficient de portance pour différents profils à un nombre de Reynolds de 168000

La figure 2.7 illustre le coefficient de portance (C_l) en fonction de l'angle d'attaque des profils aérodynamiques SG6041 et S809 à un nombre de Reynolds de 168 000. L'angle d'attaque est l'angle entre la corde du profil aérodynamique et le flux entrant. Le coefficient de portance est une valeur numérique qui représente la force de portance aérienne générée par un profil aérodynamique multipliée par le produit de la pression dynamique, de la surface de référence et de la longueur de la corde.

Coefficient de portance : La génération de portance est positive pour les deux profils de profil aérodynamique sur toute la plage des angles d'attaque, ce qui implique la production de portance dans les deux directions : vers le haut et vers le bas.

Coefficient de portance maximal : Le coefficient de portance maximum du profil SG6041 est supérieur à celui du profil S809. Cela signifie que le SG6041 peut produire plus de portance à un angle d'attaque spécifié.

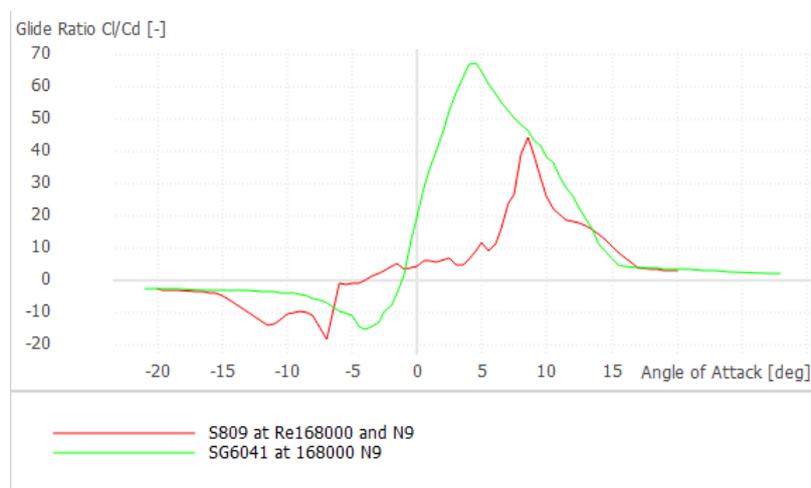


FIGURE 2.8 – rapport CL/CD pour différents profils à un nombre de Reynolds de 168000

La figure 2.8 illustre le rapport portance/trainée (CL/CD) par rapport à l'angle d'attaque des profils de profil aérodynamique SG6041 et S809 au nombre de Reynolds 168 000. Le rapport portance/trainée — indiqué par un nombre sans dimension — est le rapport entre la force de

portance qu'un profil aérodynamique peut générer et la force de traînée qui y est développée. Il caractérise l'efficacité aérodynamique d'un profil aérodynamique.

Maximum C_l/C_d :Le profil aérodynamique SG6041 a un C_l/C_d maximum plus élevé que le profil S809, ce qui indique qu'il est plus efficace aérodynamiquement sous cet angle. Dans le cas du SG6041

Angle d'attaque pour un maximum de rapport portance/traînée (C_l/C_d) :Le rapport portance/traînée maximale (C_l/C_d) est obtenu à un angle d'attaque de 4,5 degrés pour le profil de voilure SG6041 et à 9 degrés pour le profil de voilure S809. Par conséquent, le profil de voilure SG6041 est plus efficace sur le plan aérodynamique avec un angle d'attaque plus faible que le profil de voilure S809.

Dans l'ensemble, le profil d'airfoil SG6041 présente de meilleures performances aérodynamiques que le profil d'airfoil S809 en termes de coefficient de portance , Rapport C_l/C_d et d'angle de décrochage.

2.2.3.3 Angle d'attaque

L'angle d'attaque (α) est un paramètre clé dans la performance aérodynamique des pales d'éolienne. Il est défini comme l'angle entre la direction du vent relatif et la corde du profil aérodynamique de la pale. Cet angle influence directement la génération de portance et de traînée, et par conséquent, l'efficacité globale de la pale [30].

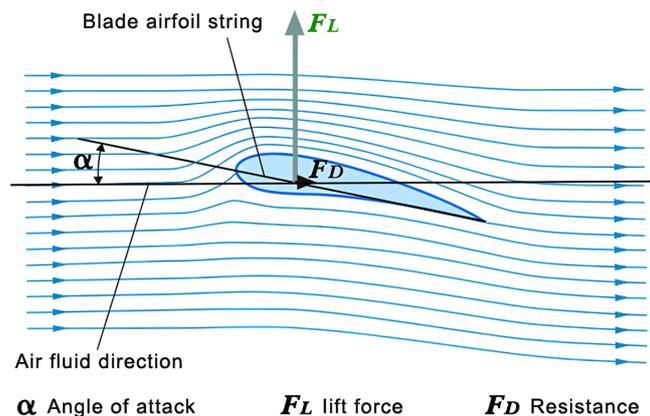


FIGURE 2.9 – Angle d'attaque et forces aérodynamiques sur une pale d'éolienne en fonctionnement[14]

Détermination de l'angle d'attaque avec QBlade :

Pour déterminer l'angle d'attaque optimal de notre pale utilisant le profil aérodynamique SG6041, nous avons utilisé le logiciel QBlade, qui offre des outils avancés de simulation et d'analyse aérodynamique. nous traçons le graphe du coefficient de portance sur coefficient de traînée (C_l/C_d) en fonction de l'angle d'attaque. Cette analyse peut être réalisée en utilisant QBlade, en définissant un intervalle d'angle d'attaque allant de -20 à 20 degrés.

La figure 2.10, générés par QBlade, montrent la variation de l'angle d'attaque en fonction de la position le long de la pale et des conditions de vent. Ces analyses permettent d'identifier les zones où l'angle d'attaque est optimal et celles où des ajustements sont nécessaires. On peut clairement observer que le rapport C_l/C_d atteint son maximum à un angle d'attaque de 4,5 degrés. Cette valeur représente l'angle d'attaque optimal pour notre profil aérodynamique,

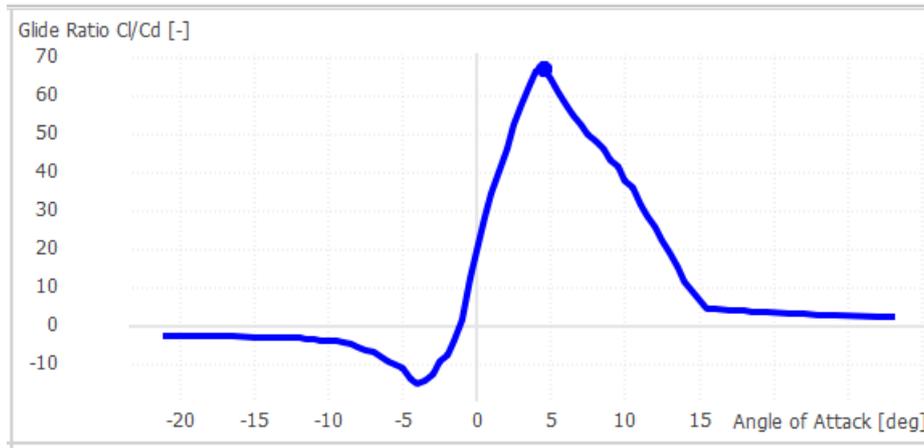


FIGURE 2.10 – rapport de Cl/Cd en fonction de AOA

maximisant ainsi l'efficacité de la pale en générant une portance maximale tout en minimisant la traînée.

2.2.3.4 Vitesse du rotor et rapport de vitesse à la pointe de pôle

Pour la plupart des petites éoliennes à 3 pales, le rapport de vitesse à la pointe de pôle (TSR) à la vitesse de vent de conception se situe entre 6 et 8 [31]. Dans cette étude de cas, nous choisissons un TSR de conception (TSR de conception) de 6 à la vitesse de vent de conception de 12 m/s, ce qui correspond à une vitesse de pointe de pôle de 72 m/s et une vitesse de rotation du rotor de 528.9 tours par minute (tr/min). En tenant compte d'une vitesse de vent de fonctionnement allant de 3 m/s à 18 m/s, le TSR (TSR réel) varie de 2,333 à 14

2.2.4 Conception de pales de rotor

Plusieurs théories existent pour prédire les performances aérodynamiques et calculer une longueur de corde idéale et une distribution optimale de l'angle de torsion. Le modèle le plus simple utilisé pour la conception des pales d'éoliennes est généralement attribué à Betz[32]. Ce modèle néglige l'effet de la turbulence et des forces de rotation sur la pointe des pales. Le calcul de la configuration idéale du rotor basé sur la méthode BEM divise la pale en un certain nombre de sections. La corde, C_i , et l'angle de torsion, θ_i , peuvent être déterminés à l'aide des équations suivantes [19] :

$$\lambda_{ri} = \lambda_{design} \cdot \left(\frac{r_i}{R}\right) \quad (2.47)$$

$$\phi_i = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{ri}}\right) \quad (2.48)$$

$$C_i = \frac{8\pi r_i}{B \cdot C_{l_{design}}} (1 - \cos \phi_i) \quad (2.49)$$

$$\theta_i = \phi_i - \alpha_{design} \quad (2.50)$$

Où i indique la i -ème section de la pale, λ_{ri} est le rapport de vitesse de la i -ème section de la pale, r_i est la distance de la i -ème section de la pale au centre du rotor, ϕ_i est l'angle du vent relatif à la i -ème section de la pale. $C_{l_{design}}$ et α_{design} sont respectivement le coefficient de portance de conception et l'angle d'attaque de conception à la i -ème section de la pale. On

peut également utiliser les équations (3.35)-(3.38) pour déterminer les distributions de la corde et de l'angle de torsion.

Dans cette étude, le processus itératif de conception des pales a été mené à l'aide du logiciel QBlade. QBlade est un outil de calcul gratuit pour les éoliennes qui facilite la conception rapide des pales en déterminant la distribution de la corde et de l'angle de torsion. Le logiciel intègre les modèles des Éléments de Pales (BEM) dans une interface utilisateur graphique XFOIL [33]. Les Figures (2.12) et (2.13) montrent la distribution de la longueur de corde et de l'angle de torsion le long de la portée des pales générées par le logiciel QBlade.

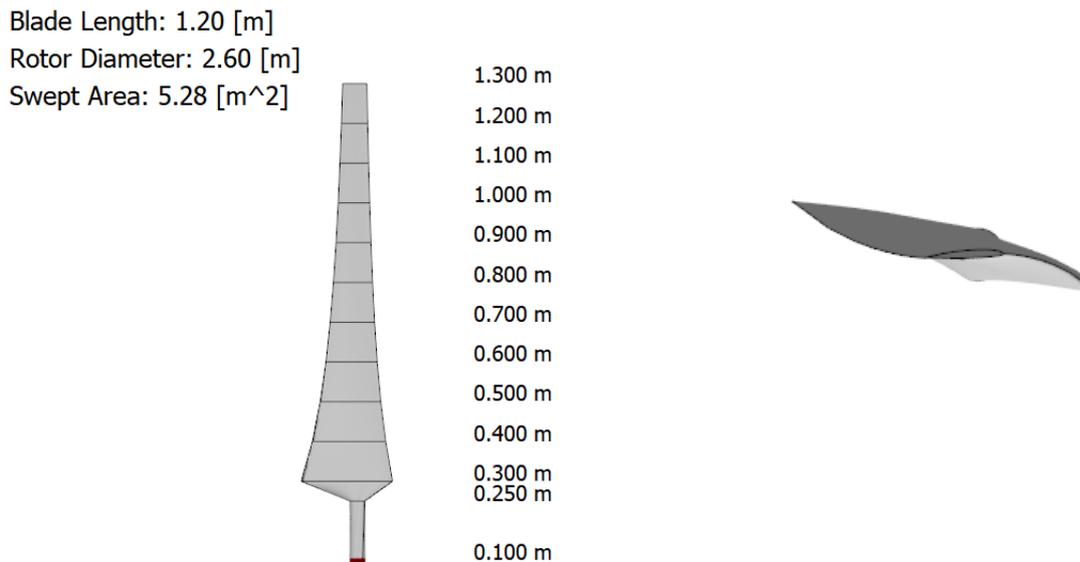


FIGURE 2.11 – Répartition de la corde et torsion d'une pale

Les Figures (2.12) et (2.13) montrent la distribution de la longueur de corde et de l'angle de torsion le long de la portée des pales générées par le logiciel QBlade.

TABLE 2.2 – Caractéristiques géométriques des sections du profil

Pos [m]	Corde [m]	Angle torsion [deg]	Profil
0.000	0.040	50.805	Circular Foil
0.150	0.040	25.518	Circular Foil
0.200	0.238	16.710	SG6041
0.300	0.187	10.855	SG6041
0.400	0.153	7.113	SG6041
0.500	0.129	4.536	SG6041
0.600	0.111	2.659	SG6041
0.700	0.098	1.235	SG6041
0.800	0.087	0.118	SG6041
0.900	0.079	-0.781	SG6041
1.000	0.072	-1.519	SG6041
1.100	0.066	-2.136	SG6041
1.200	0.061	-2.660	SG6041

Pour améliorer les performances de l'éolienne à des vitesses de vent plus faibles, il est nécessaire que la longueur de la corde soit plus grande aux sections intérieures de la pale (plus proches de la racine) et plus petite aux sections extérieures de la pale.

Les sections proches de la racine sont réglées à des angles de torsion élevés, ce qui contribue aux faibles performances de démarrage, car le grand angle de torsion permet aux sections de la racine d'avoir un angle d'attaque approprié à une faible vitesse de vent de démarrage, mais elles sont plus susceptibles de décrocher à des vitesses de vent élevées. De plus, l'angle de torsion à la pointe est faible, ce qui rend également les sections de la pointe plus susceptibles de décrocher à des vitesses de vent élevées, mais elles contribueront aux performances à basse vitesse de vent.

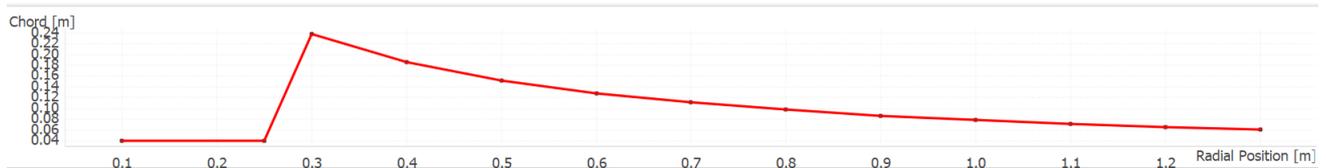


FIGURE 2.12 – Distribution de la longueur de corde de la pale



FIGURE 2.13 – Distribution de l'angle de torsion le long de la pale

La distribution de la corde a été optimisée selon la méthode de Betz . Cette méthode permet de déterminer la forme optimale de la corde pour maximiser les performances aérodynamiques de la pale. La distribution de l'angle de torsion a été ajustée afin de maintenir le rapport portance/trainée à son maximum tout au long de l'envergure de la pale. Cela garantit une efficacité aérodynamique optimale, réduisant ainsi les pertes et améliorant la performance globale de l'éolienne.

2.2.4.1 Angle de calage (Pitch Angle)

Le pitch angle, ou angle de calage, est un autre paramètre aérodynamique essentiel dans la conception et l'optimisation des éoliennes. Il correspond à l'angle de rotation de la pale autour de son axe longitudinal, influençant directement l'angle d'attaque et, par conséquent, les forces de portance et de trainée.

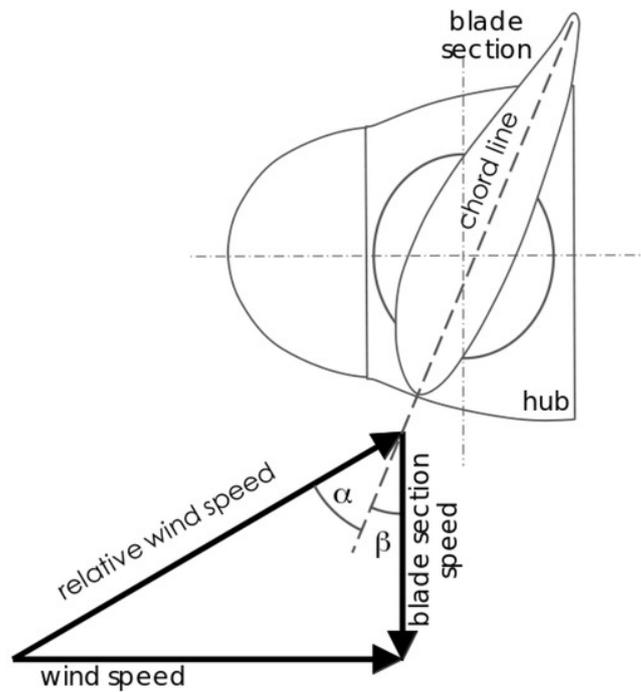


FIGURE 2.14 – Angle d'attaque α et pitch angle β pour une section de pale donnée

Détermination de l'angle de calage avec QBlade

Pour déterminer l'angle de calage optimal de notre pale d'éolienne, nous utilisons le logiciel QBlade, qui permet de simuler et d'analyser les performances aérodynamiques des pales sous différentes conditions de vent.

Configuration de la simulation : Nous fixons dans QBlade les paramètres suivants : vitesse du vent, vitesse angulaire de rotation de la pale et le rapport de vitesse de pointe (TSR - Tip Speed Ratio).

Analyse et tracé du graphique : QBlade génère un graphe de l'angle de calage (en degrés) en fonction de la vitesse du vent (en m/s). Ce graphique permet d'identifier l'angle de calage optimal pour différentes conditions de vent.

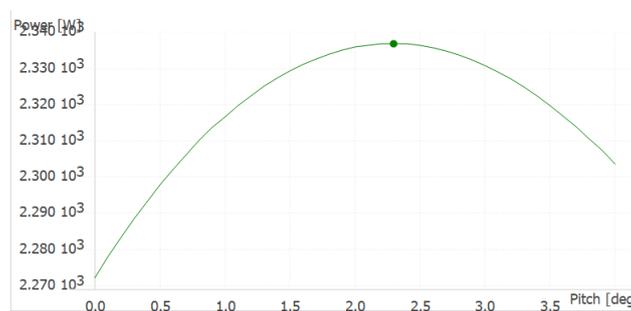


FIGURE 2.15 – Graphe de la puissance $P(KW)$ en fonction de l'angle de calage (pitch angle) β

Pour déterminer l'angle de calage optimal pour notre rotor, il faut d'abord identifier le point sur le graphe où la puissance générée est maximale. Dans ce cas, le point maximal se situe autour de 2,3 degrés. Par conséquent, l'angle de calage optimal pour notre rotor est d'environ 2,3 degrés.

2.2.5 Analyse des performances du rotor

L'analyse des performances de la pale est une étape cruciale pour évaluer l'efficacité et l'efficacité de l'éolienne. Deux méthodes principales sont utilisées pour cette analyse : la théorie BEM (Blade Element Momentum) avec Qblade et les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) avec ANSYS Fluent. Ces approches permettent de déterminer les performances aérodynamiques de la pale, notamment la puissance générée et le couple produit.

2.2.5.1 Application de la méthode BEM avec QBlade

Modélisation du rotor : Pour la modélisation de la géométrie de la pale, QBlade est utilisé afin de déterminer avec précision la distribution de la corde et l'angle de torsion. La hauteur de moyeu est fixée à 2,6 mètres, tandis que le diamètre du rotor atteint également 2,6 mètres. La figure 2.16 illustre la turbine éolienne à axe horizontal conçue à l'aide de QBlade, mettant en évidence sa conception détaillée et ses caractéristiques spécifiques.

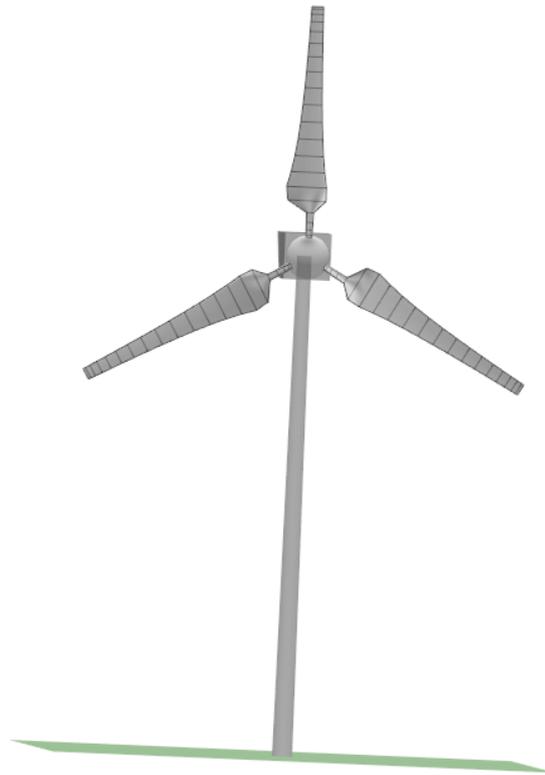


FIGURE 2.16 – Turbine éolienne à axe horizontal conçue avec QBlade

Paramètres de simulation : Définition des conditions de vent, de la vitesse de rotation de la pale et du rapport de vitesse de pointe (TSR).

Dans le cadre de notre simulation, nous avons défini les conditions de vent avec une vitesse de design de 12 m/s, ainsi que la vitesse de rotation des pales et le rapport de vitesse de pointe (TSR). Le diamètre du rotor est de 2,6 mètres.

TABLE 2.3 – Tableau des caractéristiques du rotor

Rayon de rotor	TSR	Vitesse de vent	Vitesse angulaire
1.2 m	6	12 m/s	528.9 Tr/min

2.2.5.2 Resultats Obtenu

Les figures ci-dessus représentent la puissance maximale théorique et le couple maximal que l'éolienne pourrait générer, en supposant des conditions idéales sans prendre en compte les pertes de rendement.

Coefficient de puissance C_p :

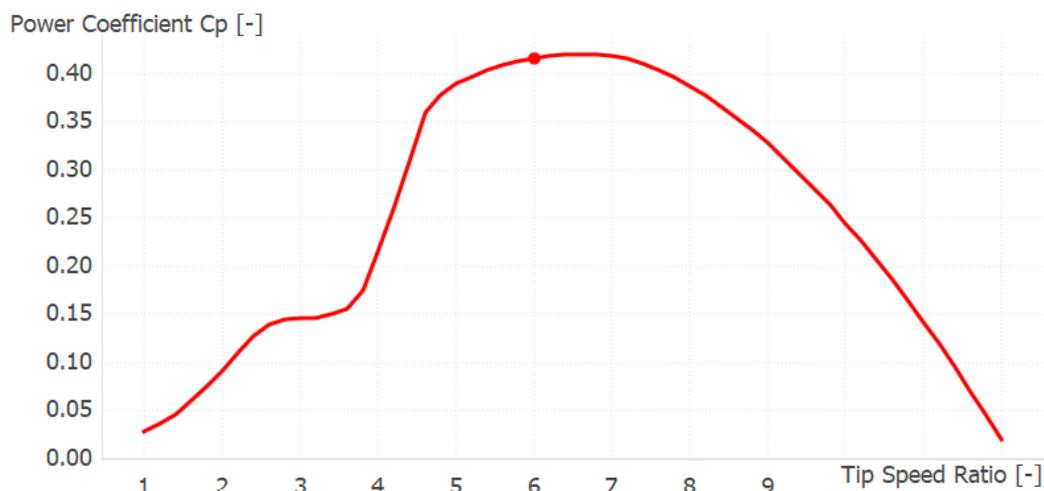


FIGURE 2.17 – Le coefficient de puissance en fonction de TSR

Puissance générée : Présentation des résultats de la simulation de puissance en fonction de la vitesse du vent.

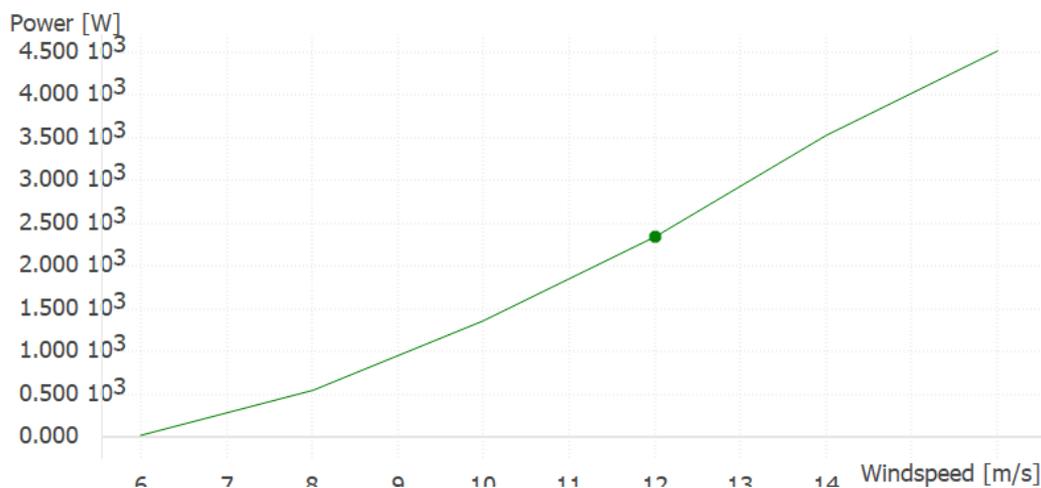


FIGURE 2.18 – La puissance générée (W) en fonction de la vitesse de vent (m/s)

Couple produit : Analyse des résultats du couple produit par la pale.

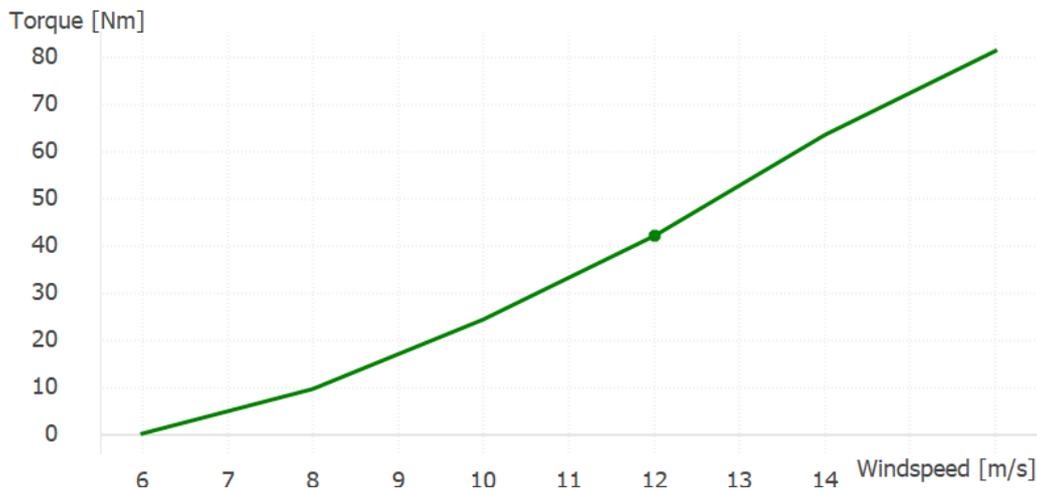


FIGURE 2.19 – Le couple produit (Nm) en fonction de la vitesse de vent (m/s)

À partir des figures 2.17, 2.18, 2.19 trois conclusions principales peuvent être tirées :

1. La production d'énergie de la turbine augmente avec la vitesse du vent. À une vitesse de conception de 12 m/s, la puissance générée par le rotor est de 2.4 kW. Cette production élevée s'explique par le fait que la simulation de la turbine a été réalisée pour des pales de rotor ayant une efficacité aérodynamique maximale atteignable ($C_p = 0,41$).
2. La vitesse de démarrage du rotor est relativement élevée (6 m/s). Cela rend la conception de la turbine éolienne peu adaptée aux zones géographiques où la vitesse moyenne du vent est très faible (la vitesse de démarrage de conception est généralement fixée à 3 m/s). Pour une conception optimale des pales du rotor, le temps de démarrage doit également être optimisé.
3. Pour optimiser la conception des pales du rotor, il est essentiel de réduire la vitesse de démarrage afin d'améliorer l'adaptabilité de la turbine à différentes conditions de vent.

Dans les conditions réelles d'exploitation des éoliennes, divers facteurs de perte influencent la performance effective de l'éolienne. Ces facteurs comprennent les pertes mécaniques, les pertes électriques, les pertes de transmission et les pertes dues au sillage $k_w, k_m, k_e, k_{e,t}, k_t$ [34]. Chacun de ces éléments contribue à réduire la puissance et le couple réellement produits par l'éolienne par rapport à ses performances théoriques idéales.

2.2.6 Analyse CFD détaillée de la pale

L'effet visqueux de l'écoulement du fluide est négligé en adoptant la méthode BEM. De plus, cette méthode est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un écoulement non visqueux. Par conséquent, elle n'est pas applicable pour simuler la séparation de l'écoulement et les vortex de bout de pale qui peuvent se générer autour des pales de la turbine. En revanche, la dynamique des fluides computationnelle (CFD) prend intrinsèquement en compte l'influence de la viscosité du fluide. Par conséquent, l'analyse CFD a été largement utilisée dans les applications de l'énergie éolienne en raison de sa grande fidélité pour prédire les performances aérodynamiques des éoliennes. Cette section discute brièvement de l'approche CFD utilisée dans la présente étude, y compris les conditions aux limites, la génération de maillage et les vérifications numériques.

2.2.6.1 Préparation du modèle :

Pour la création de la géométrie de la pale, nous avons utilisé les données de la corde fournies par Qblade. Ces données ont été intégrées dans Solidworks pour créer ou importer la géométrie de la pale. Il était crucial de s'assurer que toutes les dimensions et profils aérodynamiques étaient correctement représentés afin de garantir la précision du modèle.

Avec la géométrie donnée de la pale, nous avons commencé le processus de création de la pale pour notre modèle CFD. Bien que nous puissions simuler et analyser la pale complète à l'aide le logiciel Ansys workbench, nous avons décidé de modéliser la pale en utilisant le logiciel de CAO SolidWorks à la place. Étant donné que nous pouvons importer la géométrie directement de SolidWorks vers Ansyw workbench, cela semblait être la manière la plus efficace de gérer la création de la pale.

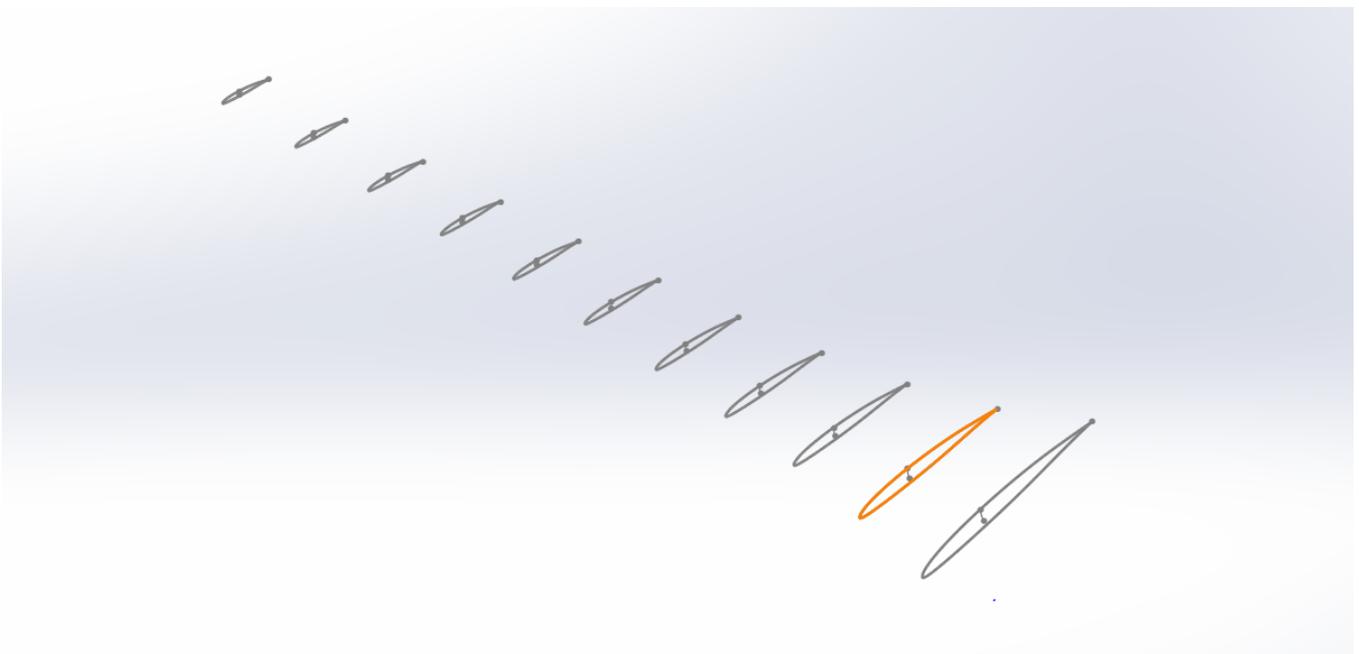


FIGURE 2.20 – Distribution de la corde

2.2.6.1.1 Conception du corps de la pale : Avec la fonction de surface loft pour connecter les profils, nous obtenons la pale. La conception de la pale est réalisée en tant que surface, ce qui permet d'utiliser cette géométrie dans ANSYS afin de pouvoir ajuster l'épaisseur de la pale.

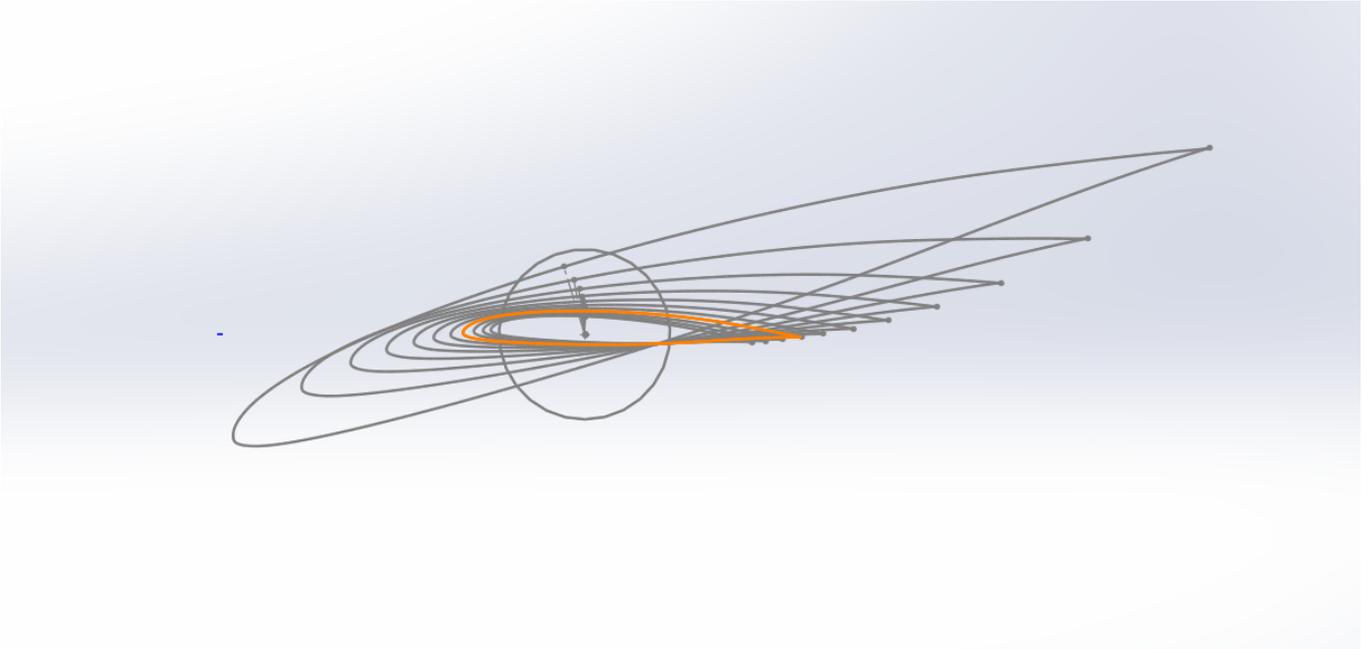


FIGURE 2.21 – Distribution de la corde et l'angle de torsion

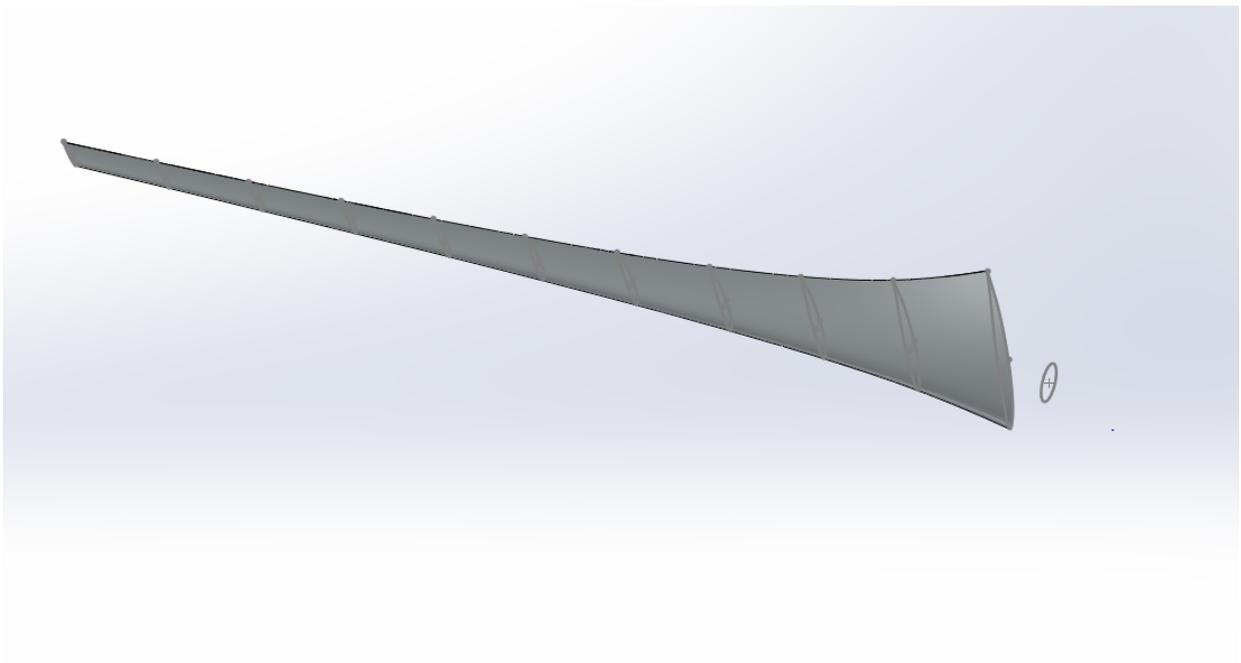


FIGURE 2.22 – corps de la pale

2.2.6.1.2 Conception du pied de la pale : Le pied de la pale est cylindrique, avec une longueur de 150 mm et un diamètre de 40 mm. En utilisant la fonction de surface loft pour connecter le profil circulaire du pied avec le premier profil de la pale, et en appliquant des contraintes de début/fin, nous obtenons un modèle optimal, minimisant ainsi les turbulences dans cette partie.

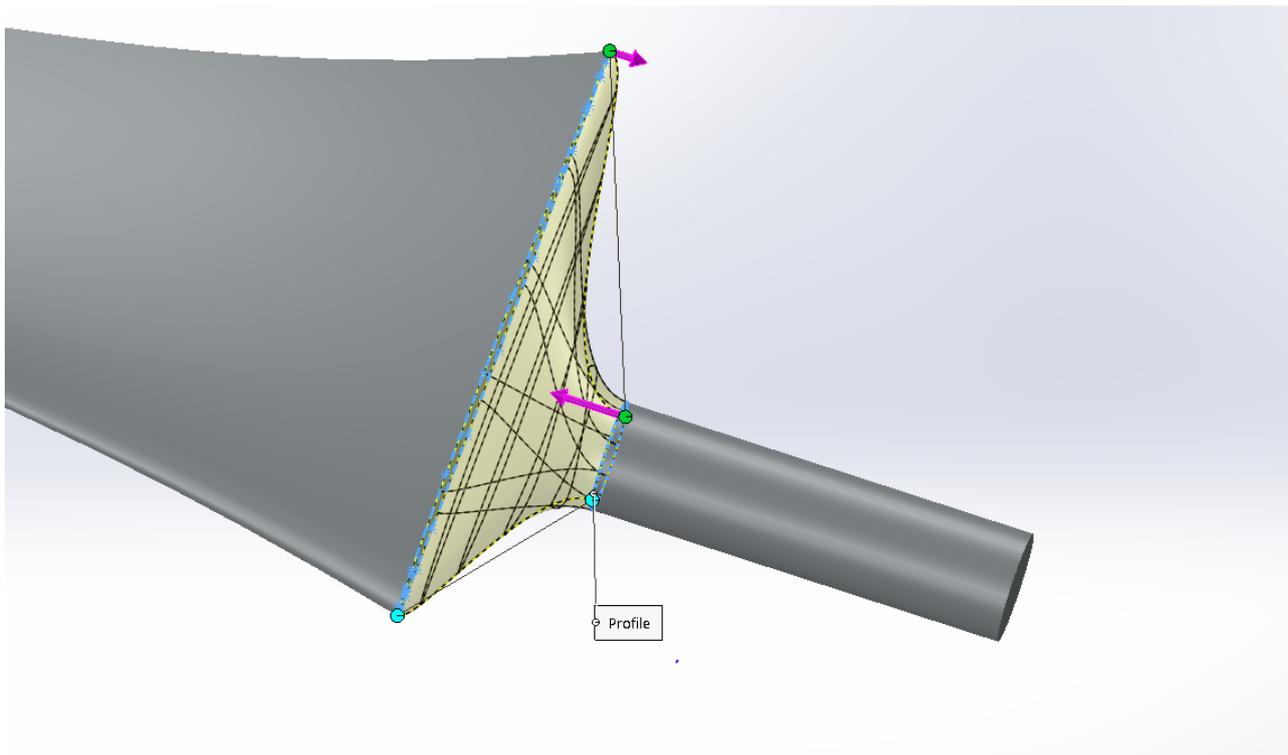


FIGURE 2.23 – Pied de la pale

2.2.6.1.3 Conception de la tête de la pale : Le problème posé est que la pale se termine par une section plane ayant une forme singulière pouvant générer beaucoup de turbulence dans cette zone. La solution est de proposer une forme aérodynamique avec une variation progressive de forme. Cette forme choisie est convexe, prenant naissance sur le contour du dernier profile. Cette tâche est réalisée par la fonction DOME

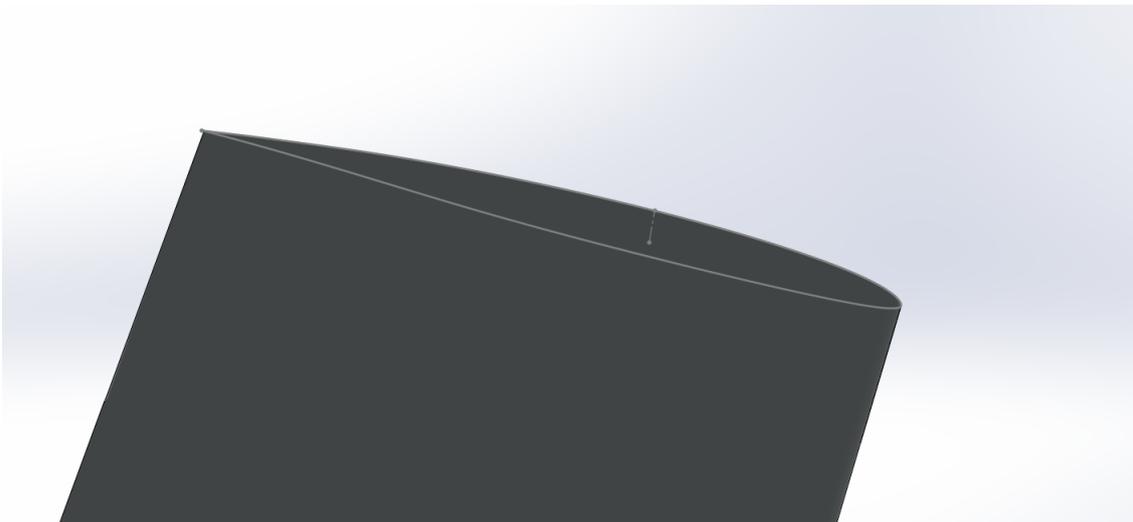


FIGURE 2.24 – Sélection de plan passant par le dernier profile

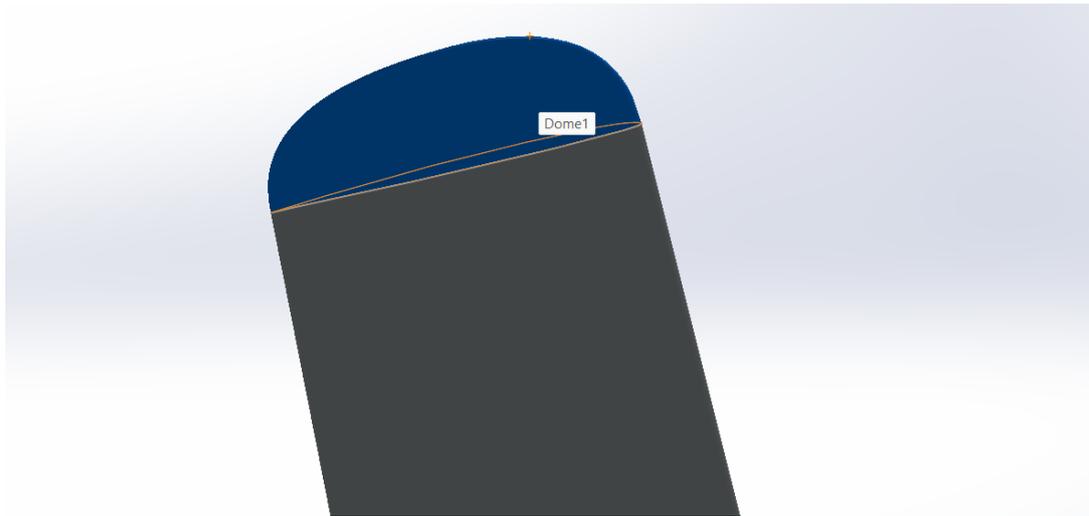


FIGURE 2.25 – La forme dome

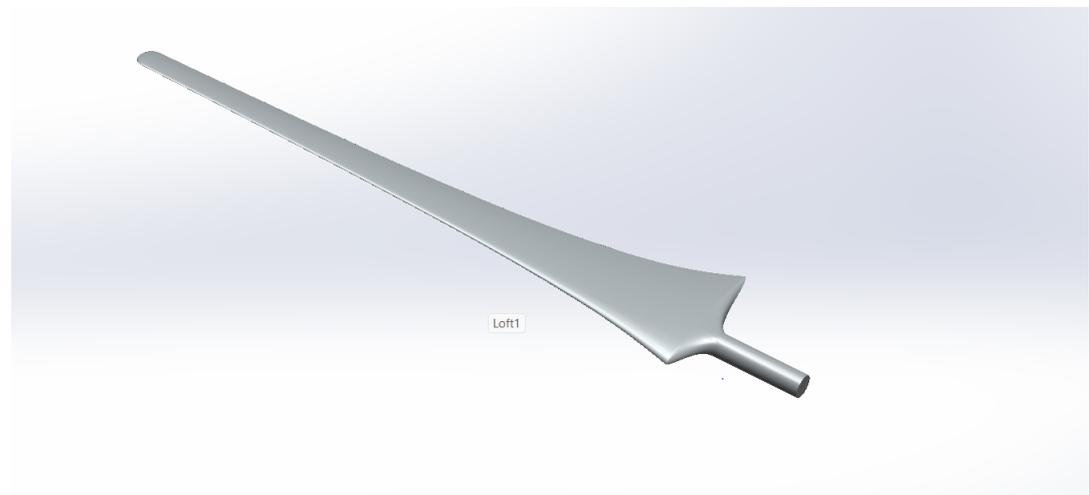


FIGURE 2.26 – La forme finale

2.2.6.2 Domain de calcul

Dans la présente étude, une simulation CFD de l'éolienne a été réalisée en utilisant le logiciel "ANSYS FLUENT 22R1". Le domaine de calcul de l'éolienne est défini par le rayon du rotor (R) comme longueur caractéristique, comme illustré à la Fig. 2.27 Il comprend deux sous-domaines, à savoir la région stationnaire, incluant les pales de la turbine, et une autre région stationnaire, qui fait référence au domaine d'écoulement global. Étant donné que les caractéristiques aérodynamiques de la pale sont fortement affectées par les vortex intenses et hélicoïdaux dans le sillage [35], le domaine d'écoulement doit avoir une longueur suffisante pour éviter les interférences aérodynamiques. Par conséquent, le domaine de calcul implique une longueur de $(5R)$ en amont du rotor de la turbine, $(10R)$ en aval du rotor, et $(5R)$ dans la direction transversale.

En tirant parti de la symétrie de 120° du domaine de calcul, une pale sur trois a été explicitement simulée, tandis que les autres sont représentées en adoptant des conditions aux limites périodiques. Cette stratégie permet de gagner du temps de calcul et de réduire les coûts en diminuant la complexité du maillage tout en conservant la précision de la simulation [36]. Une vitesse de vent constante a été appliquée comme condition aux limites d'entrée et une pression ambiante a été sélectionnée comme condition de sortie en aval du rotor de la turbine.

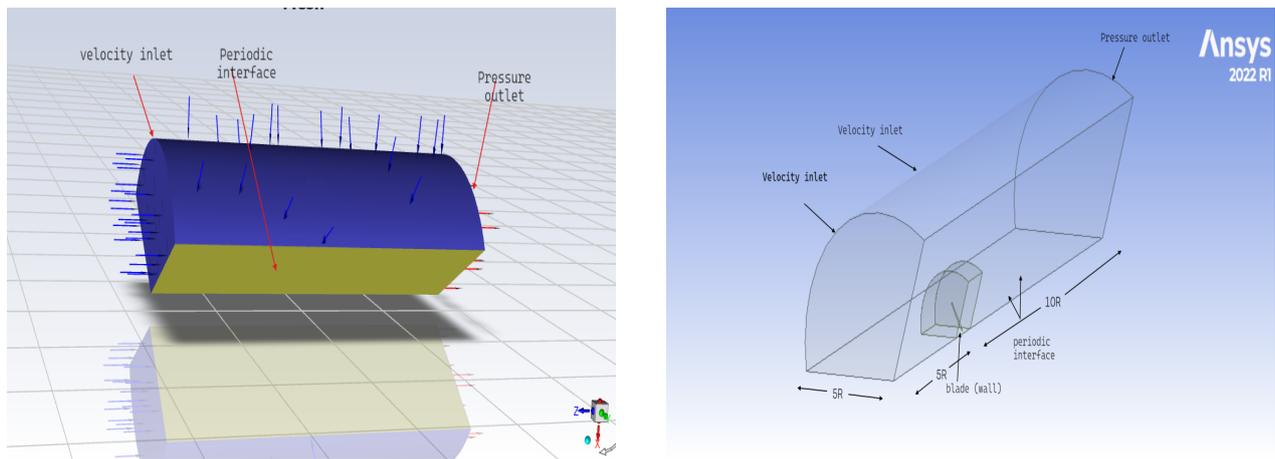


FIGURE 2.27 – Domaine de calcul et conditions aux limites pour la modélisation CFD

2.2.6.3 Génération de maillage

La (2.28) présente le maillage utilisé dans la modélisation CFD. Comme on peut le voir sur la Figure (3.229a), le domaine de calcul est maillé avec un maillage non structuré. Comme illustré sur la Figure (2.29b), des couches de gonflement prismatiques sont appliquées aux surfaces des pales pour avoir une meilleure résolution de l'écoulement de la couche limite. Trante couches de gonflement prismatiques sont utilisées, avec un taux d'expansion de 1,2.

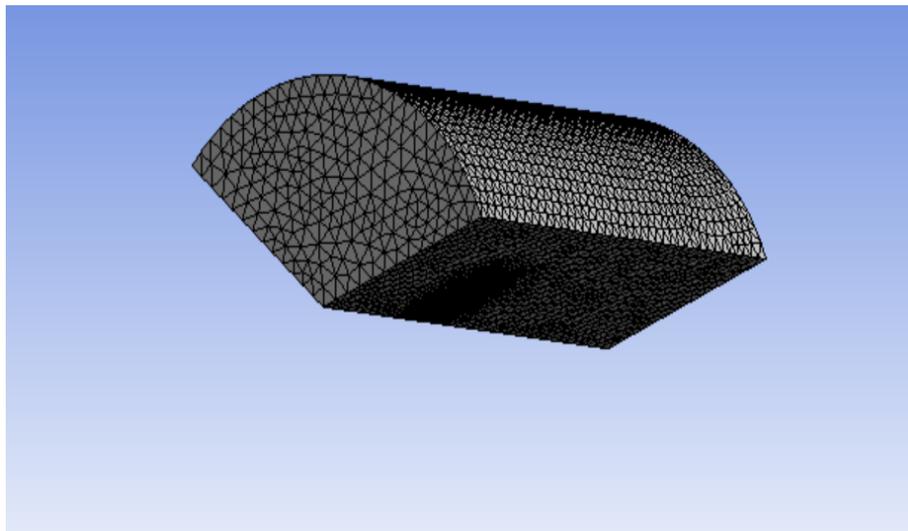


FIGURE 2.28 – Maillage du domaine de calcul

La hauteur de la première couche est de $1.9e-5m$, ce qui conduit à une valeur de y^+ faible (inférieure à 1) autour de toute la surface de la pale.

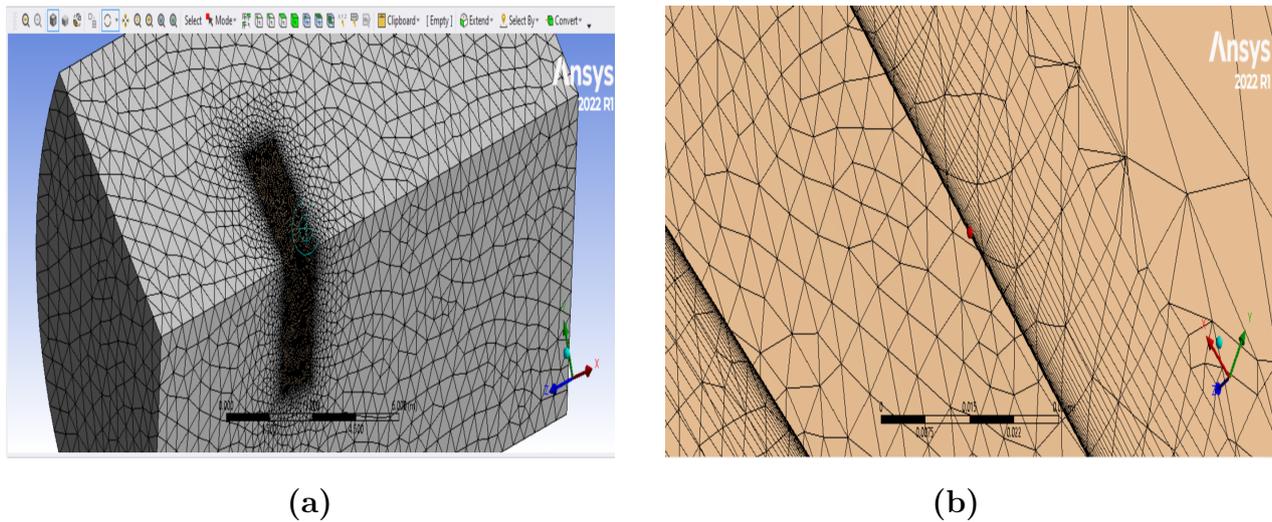


FIGURE 2.29 – Maillage CFD : (a) maillage du domaine de calcul, (b) couches prismatiques sur les surfaces des pales

y^+ est une distance sans dimension par rapport au mur, et elle est donnée par (Fluent, 2013) :

$$y^+ = \frac{u^*y}{\nu} \quad (2.51)$$

où u^* est la vitesse de frottement au niveau du mur le plus proche, y est la distance au mur le plus proche, ν est la viscosité cinématique locale du fluide. Afin de garantir une modélisation précise de la couche limite, une valeur de y^+ inférieure à 1 est recommandée [37]

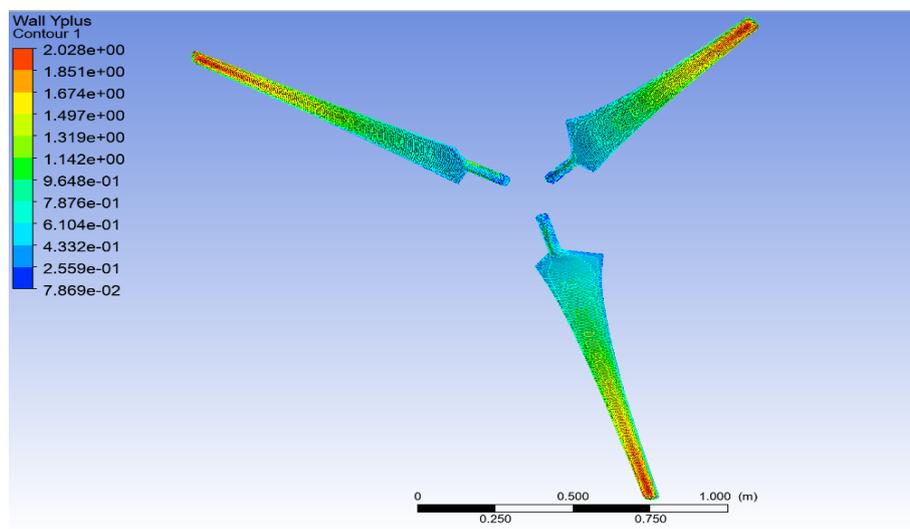


FIGURE 2.30 – Distribution de Y^+ des pales

2.2.6.4 Configuration de la Simulation CFD

Il est bien connu que les équations de Navier-Stokes (NS) ne peuvent pas être résolues directement pour aucun des cas d'intérêt pratique pour les éoliennes, et qu'une forme de modélisation de la turbulence est nécessaire. L'approche standard pour dériver des modèles de turbulence consiste à faire une moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes, ce qui donne les équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds (RANS). Plusieurs modèles différents ont été utilisés avec de bons résultats pour les applications d'éoliennes, les plus réussis

étant le modèle k-omega SST de Menter [38], le modèle de Spalart-Allmaras [39], et le modèle de Baldwin-Barth [40]. Le modèle de Baldwin-Lomax [41], souvent utilisé en relation avec les applications d'hélicoptères et d'avions à voilure fixe, n'est pas très bien adapté aux applications d'éoliennes, où des angles d'attaque relativement élevés sont très courants.

2.2.6.4.1 Modèle mathématique : Le modèle mathématique inclut les équations de continuité et de quantité de mouvement. Ces équations ont été résolues en supposant un écoulement incompressible, turbulent et stationnaire. En substance, il s'agit des équations classiques RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) pour un écoulement incompressible et stationnaire [33].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.52)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.53)$$

où le tenseur prend la forme réduite suivante :

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.54)$$

2.2.6.4.2 Modèle de turbulence : Le modèle à une équation de Spalart-Allmaras avec des fonctions de paroi standard (donc avec $y^+ < 1$) a été choisi pour la fermeture de la turbulence, car il représente un bon compromis entre précision et coûts de calcul [39]. Comme le code résout les équations d'écoulement incompressible, il n'existe pas d'équation d'état pour la pression, et l'algorithme SIMPLE a été adopté pour imposer le couplage pression-vitesse. Des schémas de discrétisation spatiale du second ordre et QUICK ont été choisis pour les équations de continuité et de quantité de mouvement.

2.2.6.4.3 Définition des Conditions aux Limites et du Mouvement de la Grille :

- Les conditions aux limites sont essentielles pour définir les interactions entre le domaine de calcul et son environnement. Pour cette étude, la vitesse du vent à l'entrée (inlet et inlet top) a été fixée à 12 m/s, correspondant à la vitesse de conception. La sortie (outlet) a été définie avec une condition de pression ambiante.

- Le domaine de calcul a été configuré avec une vitesse de rotation du rotor fixée à 55.38 rad/s, utilisant l'outil "frame motion". Le "frame motion" utilise des calculs mathématiques pour simuler les effets de rotation dans l'écoulement. Dans cette approche, les pales restent à leur position initiale et le solveur détermine comment elles influenceraient l'écoulement, sans que les pales ne bougent physiquement. Cette méthode permet de modéliser les effets de rotation sans avoir à déplacer physiquement les pales à chaque pas de temps. Le solveur CFD calcule les forces et les moments exercés par les pales sur l'écoulement en se basant sur leur géométrie et leur position fixe[42].

Material Name: air [Edit...]

Frame Motion 3D Fan Zone Source Terms
 Mesh Motion Laminar Zone Fixed Values
 Porous Zone

Reference Frame Mesh Motion Porous Zone 3D Fan Zone Embedded LES Reaction Source Terms Fixed Values

Relative Specification **UDF**
Relative To Cell Zone: absolute Zone Motion Function: none

Rotation-Axis Origin **Rotation-Axis Direction**
X [m]: 0 Y [m]: 0 Z [m]: 0 X: 0 Y: 0 Z: -1

Rotational Velocity **Translational Velocity**
Speed [rad/s]: 55.39 X [m/s]: 0 Y [m/s]: 0 Z [m/s]: 0

[Copy To Mesh Motion]

FIGURE 2.31 – Frame motion

2.2.6.4.4 Initialisation et les Paramètres de Solution

Initialisation :

- Pour notre étude, nous utilisons une initialisation hybride pour définir les conditions initiales de notre simulation CFD. L'initialisation hybride combine les avantages des méthodes d'initialisation standard et des solutions d'écoulement approximatives pour générer des conditions de départ réalistes et stables. Cette approche commence par une estimation initiale des champs de vitesse et de pression, souvent basée sur des solutions analytiques ou simplifiées. Ensuite, elle affine ces valeurs en résolvant de manière approximative les équations de Navier-Stokes sur un nombre limité d'itérations. L'initialisation hybride permet de réduire les oscillations transitoires et d'accélérer la convergence de la simulation en fournissant un état initial plus proche de la solution finale. En choisissant cette méthode, nous nous assurons que notre simulation démarre à partir de conditions initiales optimisées, ce qui améliore la précision et l'efficacité du processus de résolution numérique[43].

Critères de Convergence (Résidus des Équations de Navier-Stokes) :

- Les résidus représentent l'erreur entre les solutions numériques actuelles et les solutions exactes des équations de Navier-Stokes. Nous avons fixé des seuils stricts pour les résidus relatifs des équations de continuité, de quantité de mouvement (vitesse), et de turbulence. En général, les résidus doivent être réduits d'au moins trois ordres de grandeur par rapport à leur valeur initiale. Pour cette étude, nous avons fixé le critère de convergence des résidus à 10^{-5} pour les équations de vitesse et à 10^{-5} pour l'équation de continuité[44].

Residual	Monitor	Check Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-05
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-05
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-05
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-05
nut	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-05

[Convergence Conditions...]

FIGURE 2.32 – critere de convergence

Pour garantir la convergence des solutions, un nombre élevé d'itérations, fixé à 1500 pour cette étude, est requis. Une fois la convergence atteinte, les résultats de l'analyse CFD,

incluant les distributions de pression aérodynamique et de couple exercé sur la pale, peuvent être visualisés en utilisant les outils de post-traitement d'ANSYS FLUENT.

2.2.6.5 Dépendance du Maillage

Pour déterminer la taille appropriée des faces de cellule sur les surfaces des pales, une étude de sensibilité du maillage est réalisée. Dans ce cas, la vitesse du vent, la vitesse de rotation du rotor et l'angle de pas sont respectivement de 12 m/s, 528.9tr/min et 2,3°. Quatre tailles de faces de cellule sur les surfaces des pales sont examinées, à savoir 0,007 m, 0,005 m, 0,0041 m et 0,0037 m, tandis que la taille du maillage sur les autres surfaces de le grand volume est fixée à 0,5 m pour tous les cas. Le nombre total d'éléments associés et le couple de rotor calculé sont présentés dans le Tableau 2.4.

Dans notre étude, nous avons réalisé une analyse de sensibilité du maillage en utilisant quatre configurations différentes : 500,000 nœuds pour le maillage M1, 700,000 nœuds pour le maillage M2, 1,000,000 nœuds pour le maillage M3, et 1,717,413 nœuds pour le maillage M4. Notre objectif principal est d'étudier la dépendance du maillage et son impact sur nos résultats, en identifiant le maillage qui garantit des résultats fiables et précis.

TABLE 2.4 – Dépendance du Maillage

Maillage	Taille des éléments de la surface de la pale (m)	Taille des éléments du petit volume (m)	Taille des éléments du grand volume (m)	Nœuds	Éléments	Puissance de sortie (W)	Le couple (Nm)	Cp
M1	0.007	0.036	0.5	499260	2234226	1703.4	30.752	0.30304
M2	0.005	0.034	0.5	713045	2857671	1809.7	32.67	0.32
M3	0.0041	0.03	0.5	1029535	4034591	1886.5	34.058	0.33561
M4	0.0037	0.024	0.5	1717413	7675317	1901	34.32	0.3382

- Les résultats présentés dans le tableau reflètent une étude approfondie sur l'influence du maillage sur les performances d'une éolienne. Les paramètres évalués comprennent la taille des éléments de surface de la pale, celle des petits et grands volumes, ainsi que le nombre de nœuds et d'éléments, avec comme résultats la puissance produite, le couple et le coefficient de puissance (Cp). Les maillages M1, M2, M3, M4 ont des tailles d'éléments de surface respectives de 0.007 m, 0.005 m, 0.0041 m, 0.0037. Réduire la taille des éléments de surface améliore généralement la résolution des phénomènes aérodynamiques locaux, et donc la précision des prévisions.

La taille des grands volumes reste constante à 0.5 m pour assurer une couverture adéquate de l'environnement éloigné de la pale. Le nombre de nœuds passe de 499260 (M1) à 1717413 (M4), et le nombre d'éléments de 2234226 (M1) à 7675317 (M4), indiquant une augmentation de la finesse du maillage pour une capture plus détaillée des gradients de vitesse et de pression. La puissance produite augmente de 1703.4 W (M1) à 1901 W (M4), ce qui est logique avec un maillage plus fin captant mieux les phénomènes aérodynamiques critiques. De même, le couple passe de 30.752 Nm (M1) à 34.32 Nm (M4), montrant une meilleure conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique.

On remarque que plus le maillage est fin, plus on obtient une précision des résultats jusqu'à atteindre un bon maillage. Même si on affine davantage, les résultats restent constants, comme on peut le voir pour M3 et M4. Donc, le maillage 3 est très bon pour notre étude.

Simulation de l'écoulement autour des pales

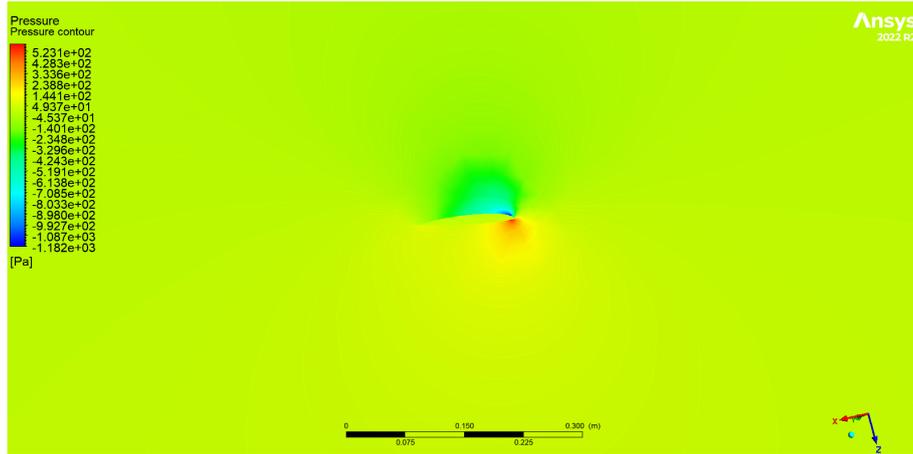


FIGURE 2.33 – Pression pour un angle d'attaque de 4,5 degrés

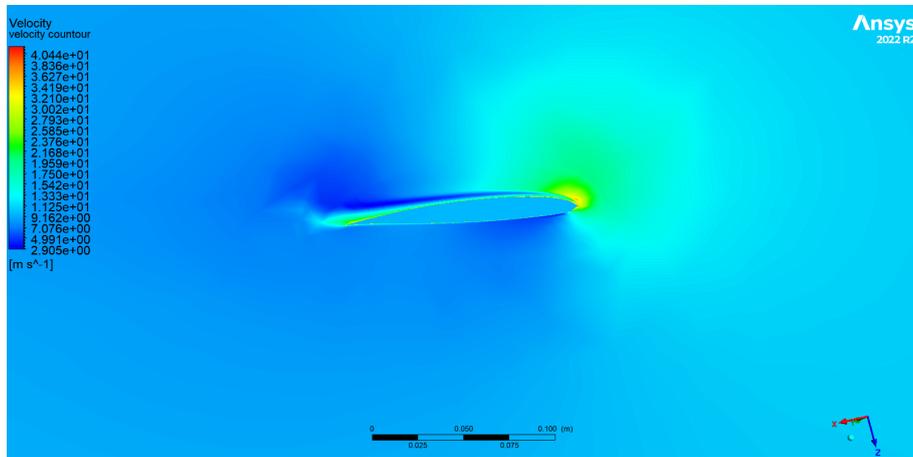


FIGURE 2.34 – Vitesse dans la couche limite

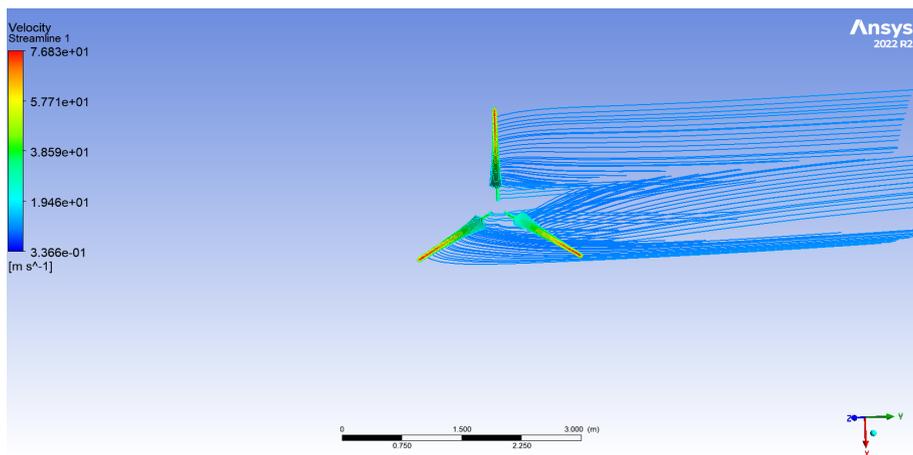


FIGURE 2.35 – Lignes de courant autour de la pale

2.2.7 Comparaison des résultats des deux méthodes

Les résultats de notre étude mettent en évidence des différences significatives entre la méthode BEM et les analyses CFD. Ces écarts sont observables sur plusieurs paramètres clés de performance de l'éolienne, notamment la puissance générée, le couple et le coefficient de puissance (C_p).

TABLE 2.5 – Résultats des deux méthodes

Méthode	vitesse de vent (m/s)	Puissance de sortie (W)	Le couple (Nm)	C_p
BEM avec Qblade	12	2300	41.54	0.41
CFD avec Ansys	12	1901	34.32	0.34

La méthode BEM, implémentée dans le logiciel QBlade, a tendance à surestimer les performances de l'éolienne par rapport aux analyses CFD. Cette surestimation se traduit par des valeurs plus élevées pour tous les paramètres étudiés :

- La puissance générée est surestimée de 21% (2300 W contre 1901 W)
- Le couple est surestimé de 21% également (41.54 Nm contre 34.32 Nm)
- Le coefficient de puissance (C_p) est surestimé de 20.6% (0.41 contre 0.34)

Les différences entre les résultats de la méthode BEM et de la CFD peuvent être expliquées par plusieurs raisons. La méthode BEM utilise des simplifications qui ne prennent pas en compte tous les phénomènes aérodynamiques complexes. Elle traite chaque partie de la pale indépendamment, ignorant les interactions entre les sections. En outre, la BEM ne modélise pas la turbulence [45] aussi précisément que la CFD, ce qui conduit à une sous-estimation de ses effets sur les performances de l'éolienne. Contrairement à la BEM, la CFD offre une modélisation tridimensionnelle complète de l'écoulement autour des pales, tandis que la BEM utilise une approche bidimensionnelle, ce qui peut surestimer les performances[46]. Enfin, la CFD évalue mieux les pertes aérodynamiques, comme les tourbillons au bout des pales que la BEM a tendance à sous-estimer ou à ignorer.

2.2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'aérodynamique des éoliennes à axe horizontal en utilisant la méthode BEM. Nous avons défini les concepts essentiels pour comprendre les forces agissant sur une pale en rotation et sélectionné le profil aérodynamique SG6041 grâce à une étude multi-objectif. Avec QBlade, nous avons déterminé l'angle d'attaque optimal, l'angle de calage, la distribution de la corde et l'angle de torsion, puis conçu la pale en CAO.

Nous avons ensuite évalué les performances du rotor en utilisant à la fois la méthode BEM et la CFD. La BEM, rapide et économique, est moins précise pour les phénomènes complexes, tandis que la CFD, plus précise mais nécessitant plus de temps et de ressources, montre que la BEM surestime les performances. En utilisant les résultats de la CFD pour le modèle FEM.

2.3 L'étude de l'aéroélasticité de la pale optimisée

2.3.1 Introduction

L'augmentation de la taille et de la flexibilité des pales des petites éoliennes domestiques entraîne des effets aéroélastiques significatifs, causés par l'interaction fluide-structure (FSI). Ces effets peuvent provoquer des instabilités aéroélastiques, telles que l'instabilité latérale et le flutter, pouvant être dévastatrices pour les pales et l'ensemble de l'éolienne. Par conséquent, il est crucial de modéliser avec précision ces interactions pour garantir la fiabilité et la durabilité des petites éoliennes domestiques.

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué une simulation CFD (dynamique des fluides computationnelle) pour analyser les charges aérodynamiques agissant sur la pale. Cette analyse nous a permis de déterminer les forces aérodynamiques qui doivent être prises en compte pour évaluer les performances et la stabilité des pales.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la simulation de l'aéroélasticité des pales en utilisant une approche de couplage unidirectionnel entre le CFD et l'analyse par éléments finis (FEA) dans le module ANSYS Static Structural. Cette méthode permet de mapper les charges aérodynamiques obtenues à partir des simulations CFD aux modèles FEA pour évaluer les réponses structurelles des pales sous l'influence de ces charges.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les déformations et les contraintes dans les pales en conditions opérationnelles. Cela inclut l'analyse des effets de traction/compression maximales et des déflexions des extrémités pour s'assurer qu'ils restent dans les limites acceptables des matériaux et des normes de conception.

2.3.2 la modélisation par éléments finis (FEA)

Un modèle par éléments finis (FEA) des pales d'éolienne en composite est établi en utilisant le module ANSYS Static Structural, qui est un logiciel de modélisation FEA largement utilisé. Le modèle FEA est ensuite appliqué à la modélisation par éléments finis des pales de notre éolienne avec un profil aérodynamique SG6041, un rayon de 1.2 m et une puissance de 1.9 kW. La géométrie, les propriétés des matériaux, les couches composites, le maillage et les conditions aux limites utilisées dans la modélisation FEA sont présentés dans cette section.

2.3.2.1 Géométrie

La géométrie de notre pale d'éolienne optimisée est créée à partir des informations sur la forme aérodynamique (c'est-à-dire la corde, l'angle de torsion et la forme du profil aérodynamique) fournies dans notre étude au première section de ce chapitre .

2.3.2.2 Propriétés des matériaux

La pale d'éolienne de profil aerodynamique SG6041 est conçue à partir de fibres naturelles, spécifiquement avec un composite Époxy renforcé de fibres de Palmier Dattier. Ce matériau offre une combinaison unique de légèreté, de résistance mécanique et de durabilité, idéale pour

les applications aéronautiques et éoliennes. Les fibres de Palmier Dattier sont choisies pour leur robustesse et leur capacité à être renforcées efficacement par la matrice Époxy, assurant une bonne adhérence et une haute résistance à la déformation sous contrainte. La figure 2.36 présente un résumé des propriétés essentielles de ce matériau[47].

Properties of Outline Row 4: bade				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1280	kg m ⁻³	
4	Orthotropic Elasticity			
5	Young's Modulus X direction	7.1757E+08	Pa	
6	Young's Modulus Y direction	7.1757E+08	Pa	
7	Young's Modulus Z direction	1.0024E+09	Pa	
8	Poisson's Ratio XY	0.61927		
9	Poisson's Ratio YZ	0.17907		
10	Poisson's Ratio XZ	0.17907		
11	Shear Modulus XY	6.1535E+08	Pa	
12	Shear Modulus YZ	2.134E+08	Pa	
13	Shear Modulus XZ	2.134E+08	Pa	

FIGURE 2.36 – Les propriétés mécaniques

2.3.2.3 Maillage FEA

La structure de la pale est maillée à l'aide d'un maillage structuré avec des éléments de coque, avec des tailles de maille de 0,002. Dans cet exercice, la pale est non tournante, et une condition limite fixe est appliquée à la racine de la pale. Le maillage créé est représenté dans la Figure 8a, et une vue rapprochée de l'extrémité de la pale est présentée dans la Figure 8b.

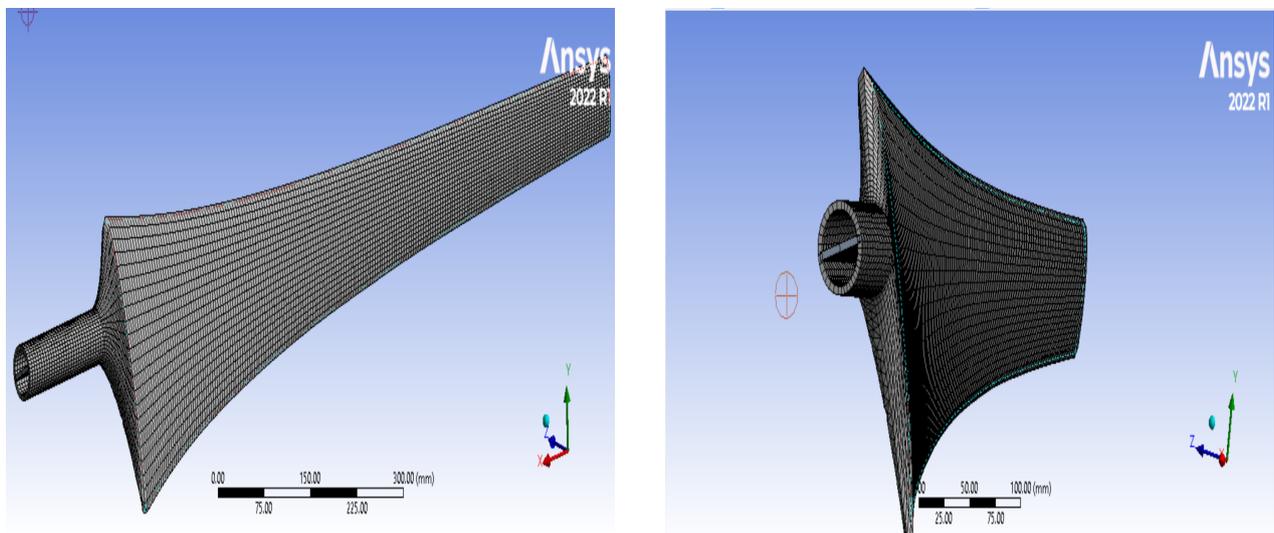


FIGURE 2.37 – Maillage de la pale

2.3.2.4 Conditions aux limites

En plus des charges aérodynamiques, il y a deux autres sources importantes de charges sur les pales, à savoir :

- 1) les charges gravitationnelles, dues à l'action de la gravité sur les pales.
- 2) les charges centrifuges, causées par la rotation des pales.

Dans cette étude, la vitesse de rotation du rotor est appliquée à la structure de la pale pour prendre en compte les charges centrifuges, et les charges gravitationnelles sont également appliquées à la structure de la pale comme charge statique. De plus, une condition limite fixe est appliquée à la racine de la pale.

2.3.2.5 Résoudre et post-traiter les résultats

Après avoir défini la géométrie de la pale, les propriétés des matériaux, les stratifiés composites, le maillage et les conditions aux limites, différents types d'analyses structurales, telles que l'analyse statique et l'analyse modale, peuvent être effectués. Les résultats de l'analyse, tels que les déformations de la pale, les distributions de contraintes et les formes modales, peuvent ensuite être tracés à l'aide des fonctions de post-traitement du logiciel ANSYS.

2.3.3 Couplage FSI unidirectionnel

La méthode de couplage du modèle FSI repose sur un couplage unidirectionnel. Le champ fluide est résolu à l'aide de la CFD jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints. Les pressions aérodynamiques sur la pale obtenues à partir du modèle CFD sont ensuite appliquées comme conditions aux limites de charge sur le modèle FEA. Ensuite, le modèle FEA est utilisé pour calculer les réponses structurales de la pale (telles que les déformations et les distributions de contraintes) soumises aux charges aérodynamiques, gravitationnelles et centrifuges. Le schéma du couplage unidirectionnel FSI est présenté dans la Figure 2.38. Les détails de la CFD et du FEA dans le modèle FSI sont présentés précédemment .



FIGURE 2.38 – L'interaction fluid-structure

2.3.4 Résultats et discussion

Sur la base du modèle FSI unidirectionnel, les distributions de pression, les déformations et les distributions de contraintes de la pale de turbine éolienne avec un profil aérodynamique SG6041 sont examinées sous des conditions opérationnelles (voir Tableau 2.6).

TABLE 2.6 – Tableau des caractéristiques du rotor

Vitesse angulaire	TSR	Vitesse de vent	Angle de calage
528.9 Tr/min	6	12 m/s	2.3°

2.3.4.1 Distributions de pression

Des contours de pression sur les faces avant (pression) et arrière (aspiration) de la pale sont produits, comme le montre les Fig. 2.39 et 2.40. Initialement, comme on peut le voir, les pressions négatives les plus élevées sont observées sur le bord d'attaque de la surface d'aspiration de la pale, et les pressions positives les plus élevées se produisent près du bord d'attaque de la surface de pression de la pale. Cependant, lorsque la pale est orientée vers le vrillage, elle devient plus parallèle (colinéaire) au flux d'air. Cela provoque le déplacement des points de stagnation sur la surface d'aspiration, entraînant des pressions négatives plus faibles à l'arrière de la pale en raison de la réduction de la vitesse de l'air. L'action de tangage entraîne également un flux d'air plus rapide sur le dessous de la pale, ce qui provoque une aspiration sur la surface de pression. Cela entraîne une inversion du signe de pression entre les deux surfaces.

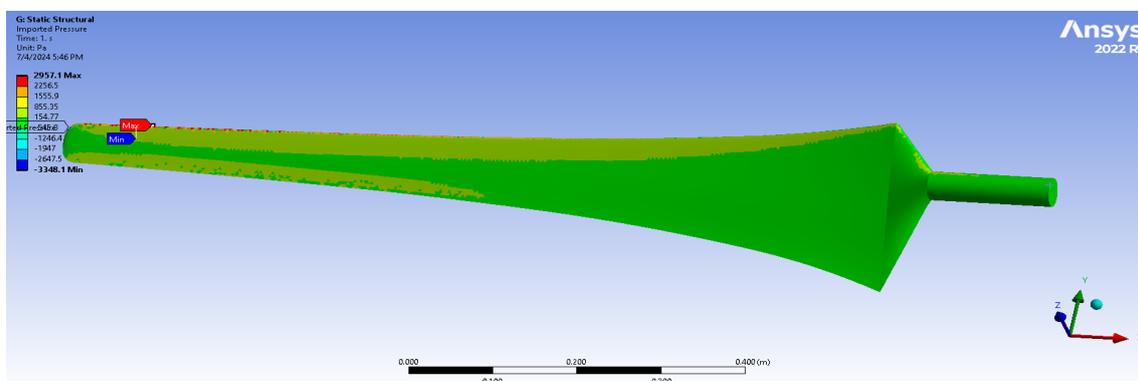


FIGURE 2.39 – distribution de la pression (face avant)

2.3.4.2 Déformations

La figure montre la déformation totale d'une pale d'éolienne sous différentes conditions, simulée avec ANSYS 2022 R1.

La déformation maximale de 6.9514 mm se produit à l'extrémité de la pale, ce qui est attendu car cette zone est soumise aux forces aérodynamiques les plus élevées et est plus flexible. La déformation minimale de 0.77238 mm se trouve près de la base de la pale, où elle est plus rigide. Les différentes couleurs, allant du bleu au rouge, indiquent une augmentation progressive de la déformation de la base vers l'extrémité. Cela montre une répartition homogène des charges

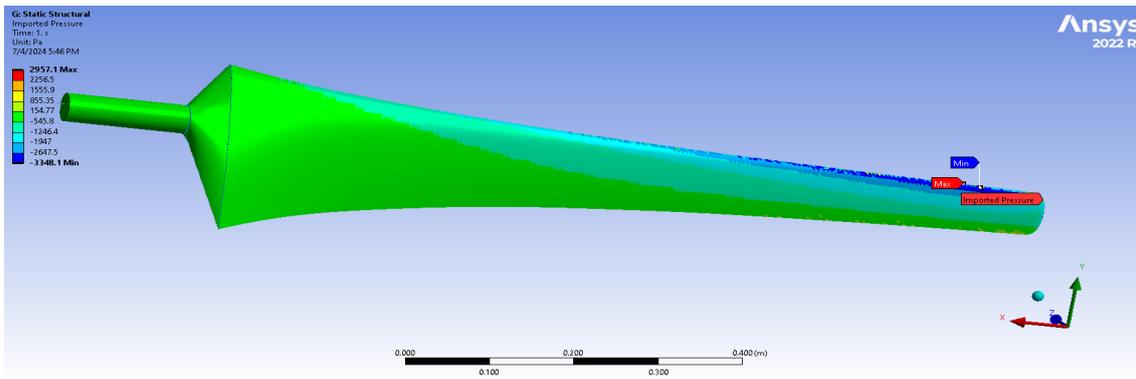


FIGURE 2.40 – distribution de la pression (face arrière)

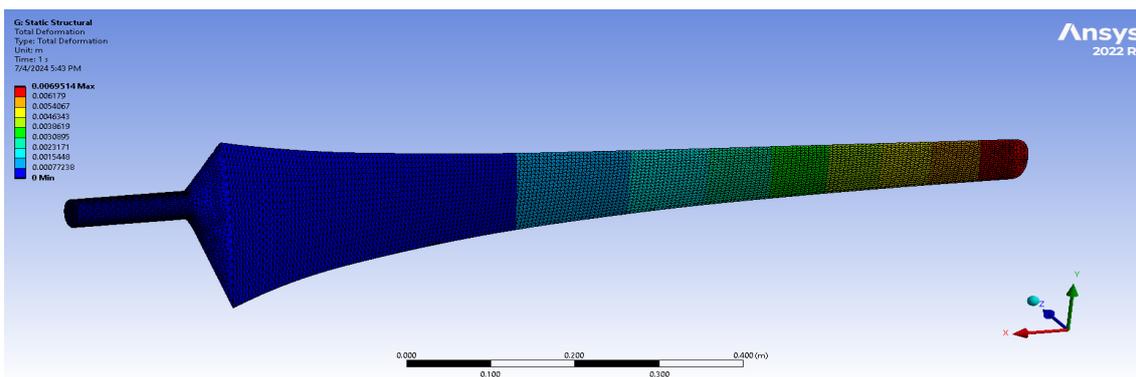


FIGURE 2.41 – Déformation de la pale

sur la pale. Les déformations relativement faibles suggèrent que la pale peut supporter les forces sans compromettre la sécurité. La déformation maximale est bien inférieure aux limites de sécurité, ce qui signifie que la pale ne risque pas de heurter la tour. Ces résultats confirment que le design actuel est efficace et offrent une base solide pour optimiser les futures pales d'éolienne, en particulier en ce qui concerne le choix des matériaux et la configuration structurelle pour minimiser les déformations tout en maximisant les performances aérodynamiques.

2.3.4.3 Distributions de contraintes

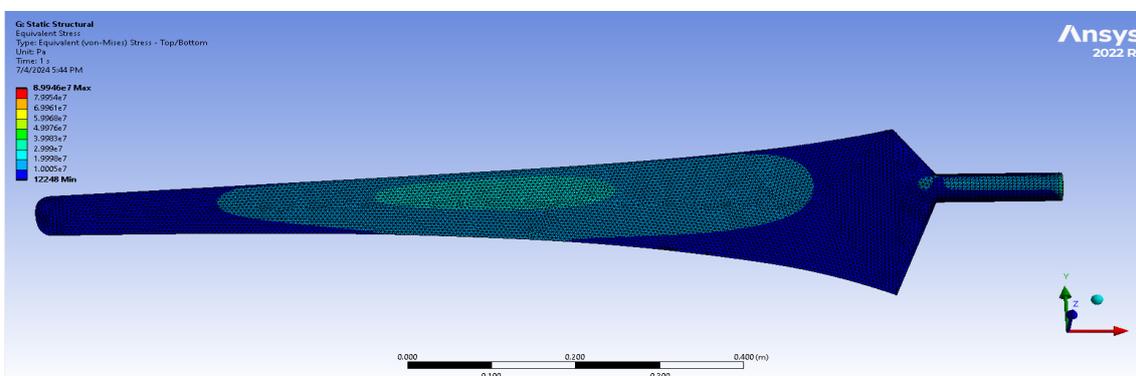


FIGURE 2.42 – distributions de contraintes (face avant)

les figures montrent comment les forces agissent sur une pale d'éolienne lorsque le vent souffle à 12 m/s. La première montre où la contrainte est la plus forte, près de la base de la pale, atteignant environ 89,946 MPa. Les contraintes diminuent ensuite progressivement vers l'extrémité de la pale, avec des valeurs plus faibles vers le bord arrière.

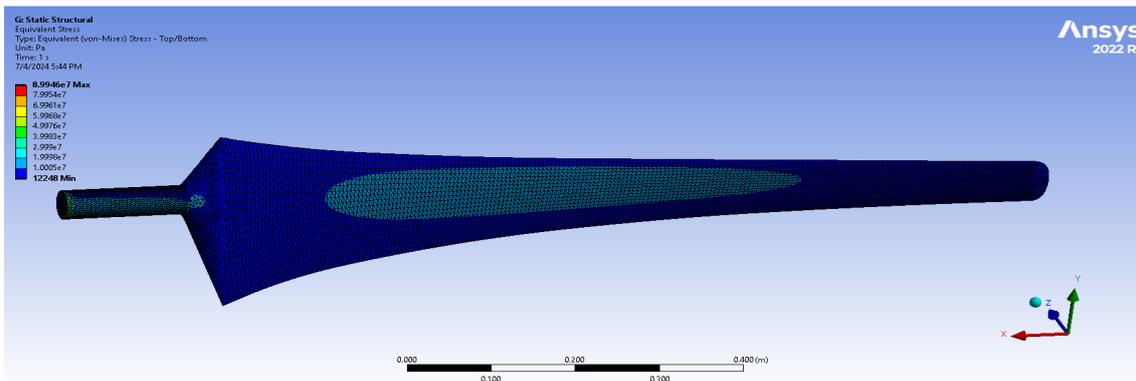


FIGURE 2.43 – distributions de contraintes (face arrière)

la figure 2.43, vue de l'arrière, confirme cette répartition, montrant des zones de contrainte élevée principalement près de la base de la pale. Cela reflète les zones où la pale subit le plus de tension mécanique.

2.3.5 Conclusion

Dans cette étude, un modèle FSI (interaction fluide-structure) pour les pales de turbines éoliennes à axe horizontal a été établi en couplant la CFD (dynamique des fluides numérique) et le FEA (analyse par éléments finis). La stratégie de couplage repose sur un couplage unidirectionnel, où les charges aérodynamiques calculées par la modélisation CFD sont transférées à la modélisation FEA comme conditions aux limites de charge. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

Les résultats montrent que les déformations maximales se produisent à l'extrémité des pales, avec des valeurs bien inférieures aux limites de sécurité, confirmant que le design est robuste et peut supporter les forces opérationnelles sans compromettre la sécurité de l'éolienne. La distribution homogène des charges et la répartition progressive des contraintes, avec des valeurs maximales près de la base des pales, attestent de l'efficacité de la configuration structurelle et du choix des matériaux.

En conclusion, cette étude valide la conception actuelle des pales optimisées en termes de performance aéroélastique et fournit une base solide pour de futures améliorations. En optimisant davantage la sélection des matériaux et la configuration structurelle, il est possible de minimiser encore les déformations tout en maximisant les performances aérodynamiques, contribuant ainsi au développement de petites éoliennes domestiques plus fiables et efficaces.

Chapitre 3

Conception et de réalisation du moule

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur le processus de conception et de fabrication du moule destiné à produire une pale creuse. La méthode employée consiste à créer un moule et un noyau en se basant sur les données de distribution de la corde obtenues via le logiciel QBlade. Ces données nous ont permis de déterminer précisément la distribution de la corde de la pale. En outre, les résultats issus de l'étude aéroélastique nous ont permis d'optimiser l'épaisseur de la pale pour garantir des performances aérodynamiques et structurelles optimales.

Ce chapitre aborde le processus de conception et de fabrication des moules en trois aspects principaux :

- Types de moules : Une présentation des différents types de moules existants, avec leurs caractéristiques et leurs applications.
- Conception de moule : Détail de la phase de conception d'un moule, incluant les considérations techniques, les outils utilisés et les étapes clés du processus, en se concentrant sur la gamme d'usinage et les techniques spécifiques employées pour la production des pales.
- Fabrication de moules Exploration la méthode de fabrication de moule.

3.2 Types de moules

Le choix du type de moule approprié dépend de plusieurs facteurs, tels que la complexité de la pièce à produire, le volume de production et les propriétés du matériau utilisé. Parmi les types de moules les plus courants, on trouve :

3.2.1 Moules d'injection :

Le moulage par injection est une technique de transformation de matériaux thermoforables, incluant les plastiques, les élastomères (comme le caoutchouc), ainsi que certains métaux et alliages ayant un point de fusion relativement bas, tels que l'aluminium, le zinc ou le laiton. Cette méthode permet de produire des pièces en grande ou très grande série.[1]

Le processus consiste à ramollir la matière, puis à l'injecter dans des moules montés sur une machine spécifique (appelée presse), composés de deux parties (une partie fixe et une partie

mobile). La matière est ensuite refroidie, puis la pièce est éjectée du moule.[1]

On trouve des composants fabriqués par moulage par injection dans une grande variété de produits manufacturés, notamment dans les secteurs de l'automobile, de l'électroménager, de l'informatique, du mobilier, etc. Pour les pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées, tandis que pour les pièces en plastique, elles peuvent varier de quelques millimètres à plusieurs mètres (comme les éléments de carrosserie automobile par exemple).[1]

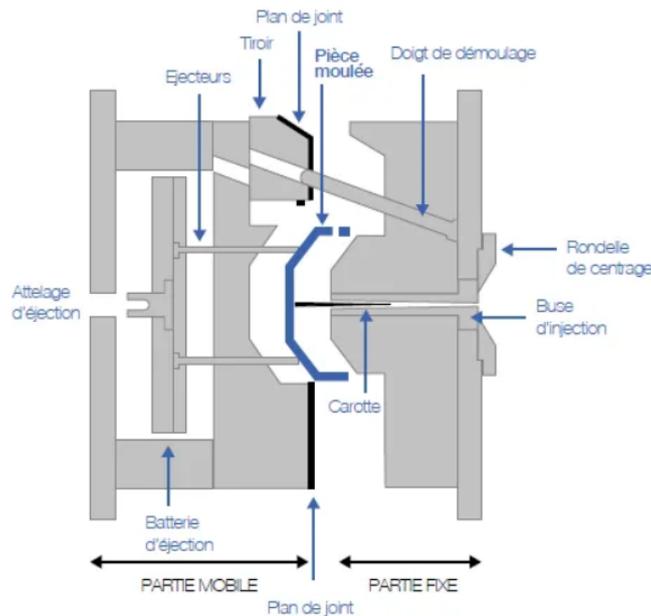


FIGURE 3.1 – Moule d'injection plastique [15]

3.2.2 Moules par compression :

Cette technique consiste à presser la matière chauffée dans un moule. La quantité de matière nécessaire est placée dans un moule ouvert, qui est ensuite fermé à l'aide d'une presse hydraulique.[1]

Sous l'effet de la chaleur et de la pression, la matière se fluidifie d'abord, prenant la forme du moule, puis subit une réaction de réticulation. Il est essentiel de maintenir la matière sous presse pendant la durée de cette réaction, appelée temps de cuisson.[1]

3.2.2.1 Cycle de moulage[1]

1. Chargement du moule
2. Fermeture du moule
3. Éventuel dégazage
4. Cuisson
5. Ouverture du moule
6. Éjection des pièces
7. Évacuation des pièces

8. Nettoyage du moule
9. Préparation du moule pour le prochain moulage

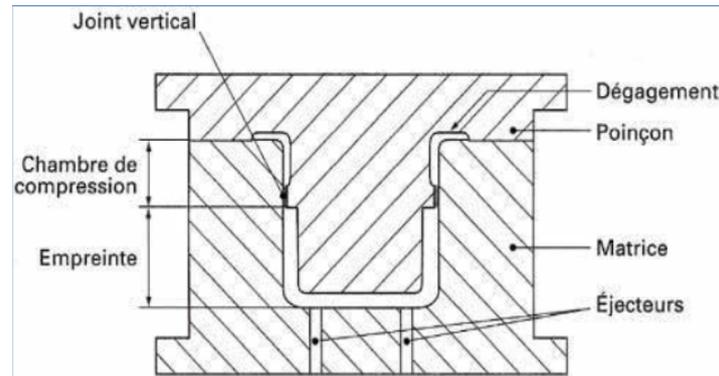


FIGURE 3.2 – Moule par compression [1]

3.2.3 Le moulage par transfert

Le moulage par transfert implique de transférer, sous pression, la matière à mouler placée dans une cavité auxiliaire appelée pot de transfert, vers les empreintes d'un moule chaud fermé. Ce transfert est possible uniquement si la viscosité de la matière est faible (ou si sa fluidité est élevée)[1].

3.2.3.1 Cycle de moulage

Dans le cas d'une presse de transfert à deux vérins, avec un vérin de transfert supérieur, le cycle de moulage se déroule comme suit [1] :

1. Fermeture du moule
2. Mise en place de la matière préchauffée dans le pot de transfert
3. Application de la pression de transfert
4. Cuisson
5. Ouverture du moule
6. Éjection des pièces
7. Évacuation des pièces
8. Nettoyage du moule
9. Préparation du moule pour le moulage suivant

3.3 Conception de moule

Pour la fabrication du moule, deux méthodes ont été proposées. La première méthode consiste en la fabrication par usinage, qui permet de créer des moules avec une grande précision et des détails complexes. La seconde méthode propose de fabriquer le moule en silicone, offrant une alternative flexible et adaptable pour des formes plus compliquées ou des productions en petite série. Ces deux approches présentent des avantages spécifiques et seront explorées en détail pour déterminer la meilleure solution en fonction des exigences du projet.

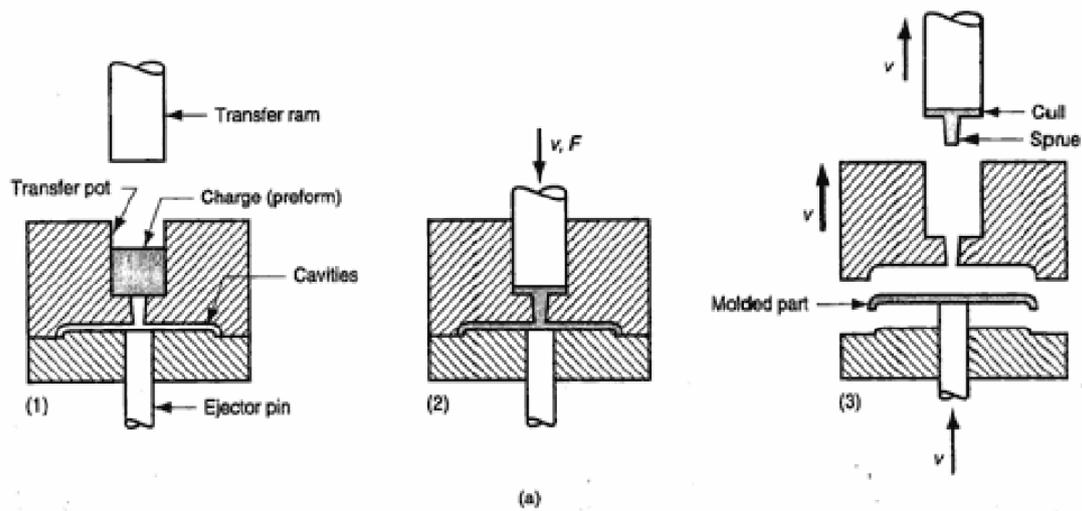


FIGURE 3.3 – Moule par transfert[1]

3.3.1 La fabrication par usinage

D'après l'analyse des types de moules, il apparaît que le moulage par compression est l'option la plus adaptée à notre projet. Cependant, étant donné que les fibres utilisées sont des fibres courtes, il est nécessaire d'injecter le mélange résine-fibre. Le moule obtenu après avoir suivi les étapes de conception décrites ci-dessous est un moule à tiroir commandé par des doigts. En utilisant la conception de la pale pour réaliser la conception du moule

3.3.1.1 Sélection du plan de moulage :

Un plan incliné par un angle par rapport au plan de face a été choisi comme plan de référence pour le moulage. Ce plan servira de base pour toutes les opérations suivantes. La pale a été orientée de manière à minimiser les contre-dépouilles et à faciliter le démoulage. Cette orientation optimisée est cruciale pour garantir l'efficacité et la qualité du processus de moulage.

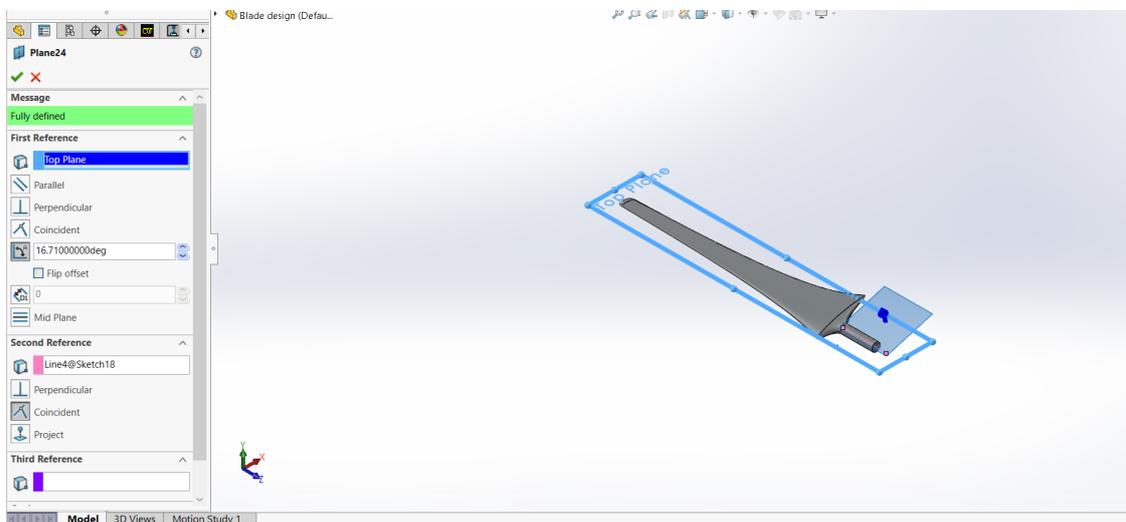


FIGURE 3.4 – Plan de joint

3.3.1.2 Analyse de dépouille :

L'outil "Draft Analysis" a été utilisé pour analyser les angles de dépouille de la pale. Cet outil colore la surface de la pièce, indiquant les zones (les zones jaune) avec des angles de dépouille positifs, négatifs et nuls. Les résultats de l'analyse ont permis d'identifier les zones où l'angle de dépouille est insuffisant, généralement inférieur à 1-3 degrés selon les tolérances de fabrication.

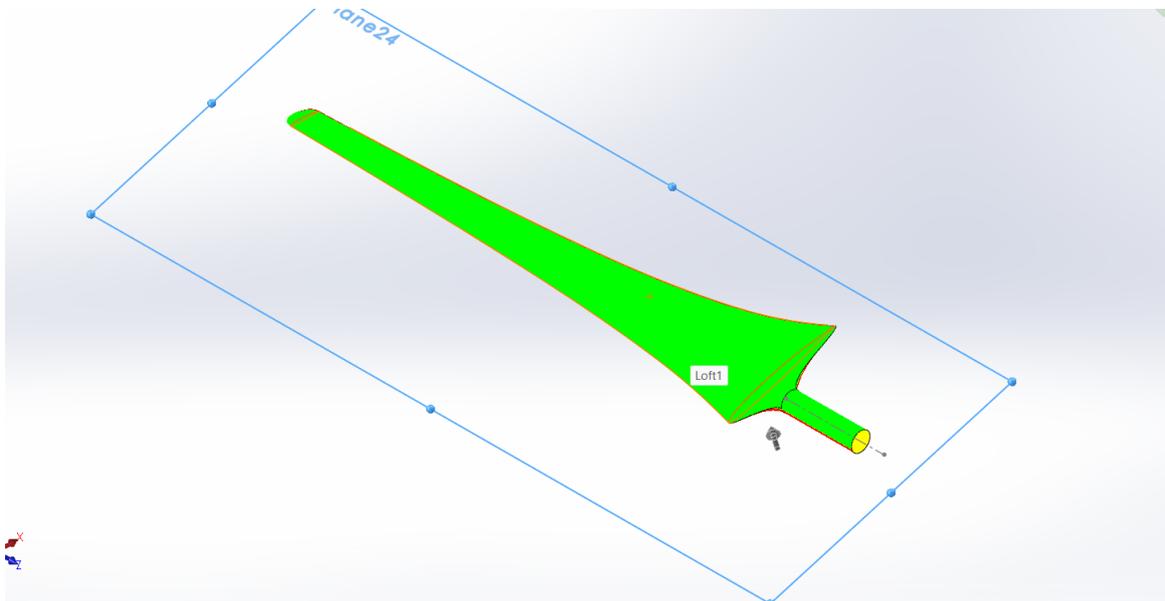


FIGURE 3.5 – Analyse de dépouille

3.3.1.3 Traitement des Contre-Dépouilles :

La commande "Draft" a été utilisée pour appliquer les angles de dépouille nécessaires. Les faces critiques ont été sélectionnées et un angle de dépouille positif a été appliqué pour faciliter le démoulage.

Pour les zones présentant des contre-dépouilles, des modifications de conception ont été envisagées ou des inserts amovibles ont été ajoutés dans le moule afin de résoudre ces problèmes. Dans notre projet on a utilisé un angle de 1 degré.

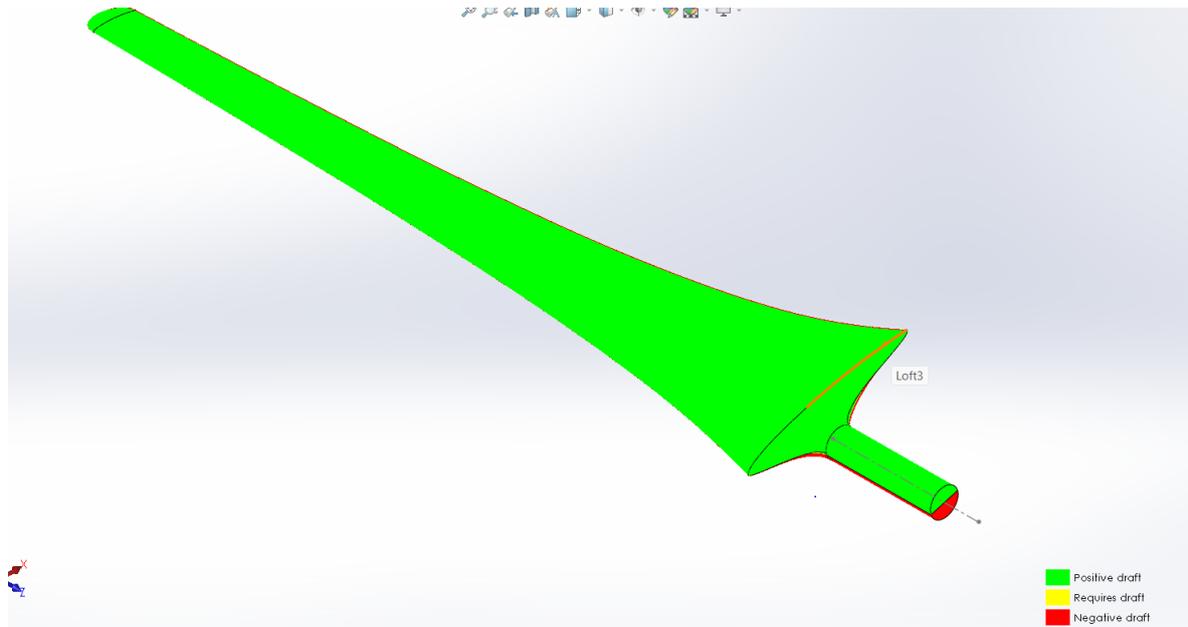


FIGURE 3.6 – Traitement des Contre-Dépouilles

3.3.1.4 Définition des lignes de joint (Parting Lines) :

La commande "Parting Lines" a été utilisée pour définir les lignes de séparation exactes sur la pale. Ces lignes suivent les contours naturels de la pale et évitent les zones complexes. Une vérification visuelle a été effectuée pour s'assurer que les lignes de joint étaient continues et bien placées, afin d'éviter des difficultés lors de l'assemblage du moule.

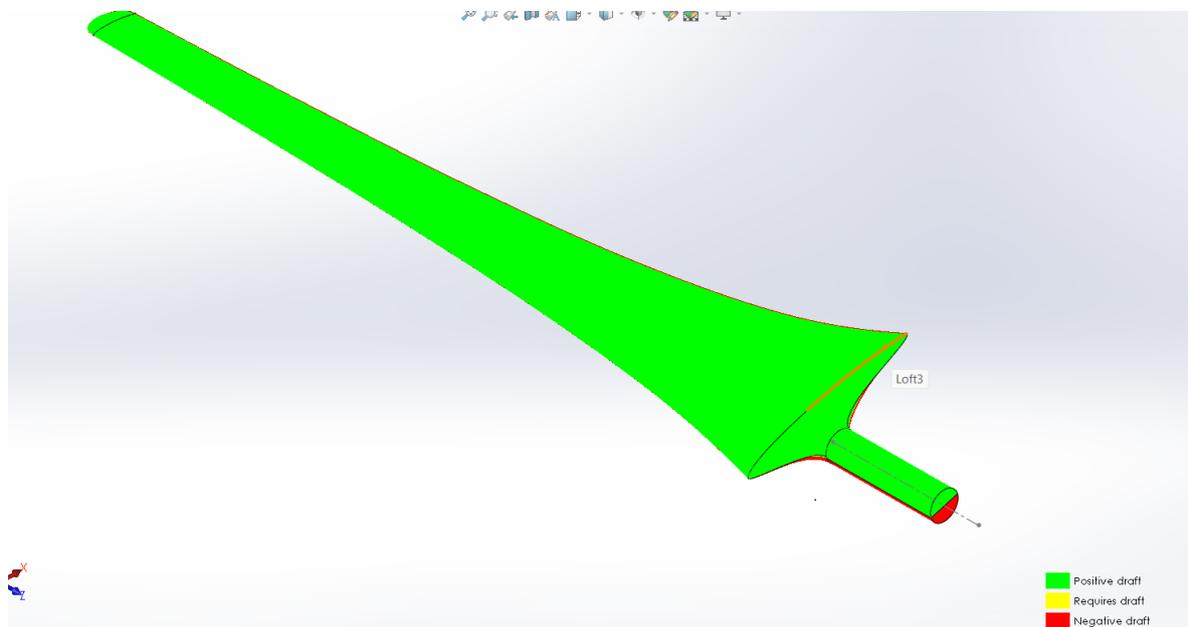


FIGURE 3.7 – Traitement des Contre-Dépouilles

3.3.1.5 Création des surfaces de joint (Parting Surfaces) :

La commande "Parting Surface" a été utilisée pour créer des surfaces de joint autour des lignes de séparation. La largeur et la direction des surfaces ont été définies pour qu'elles

s'étendent correctement autour de la pale. Nous avons vérifié que les surfaces de joint s'étendaient de manière uniforme et ne laissaient pas d'espaces ou de chevauchements, assurant ainsi une séparation propre et efficace des moitiés du moule.

3.3.1.6 Séparation des moitiés du moule (Tooling Split) :

La commande "Tooling Split" a été utilisée pour diviser le modèle de la pale en deux moitiés distinctes, formant les parties supérieure et inférieure du moule. Les paramètres de

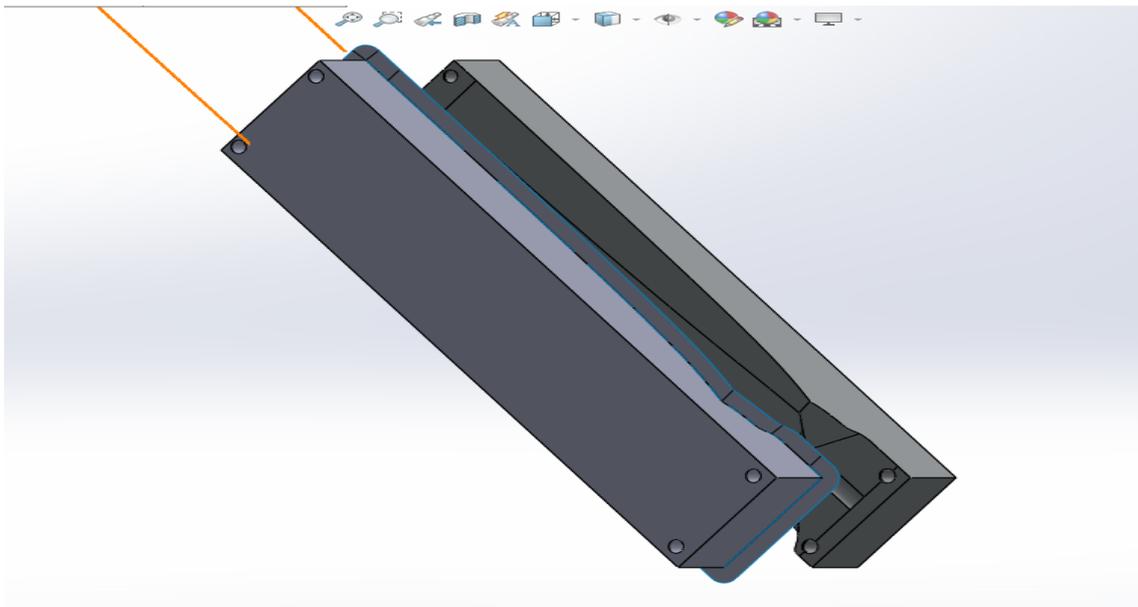


FIGURE 3.8 – Surfaces de joint et Séparation des moitiés du moule

séparation ont été définis, incluant l'orientation des moitiés et l'ajout éventuel de colonnes de guidage pour assurer la stabilité du moule ainsi que la conception de plaques semelles pour brider le moule sur la presse.

3.3.2 Les parties de moule

3.3.2.1 Plaques semelles :

Plaques semelle fournit une base solide pour d'autres composants du moule tels que l'empreinte Ainsi que des pièces structurales telles que des noyaux et des piliers de guidage.

Rôle des Plaques Semelles

Support Structurel :

En fournissant une base solide aux autres composants du moule, tels que les plaques de cavité et de noyau, les colonnes de guidage et autres éléments structuraux.

Transmission de la Force :

Les plaques semelles aide à répartir uniformément la force exercée lors de la fermeture et l'ouverture du moule et le processus d'injection du matériau.

Alignement :

Ils aident à maintenir les deux moitiés du moule alignées et à travailler ensemble. Avec poteaux de guidage pour assurer une fermeture précise et éviter les défauts de moulage.

Fonctionnement des Plaques Semelles

Placement :

Les plaques semelles sont généralement situées au fond de la moitié du moule. Une assiette L'un est fixé à la partie mobile de la presse et l'autre est fixé à la partie fixe

Matériau :

- Acier : L'acier est un choix économique et polyvalent pour les plaques semelles. Il offre une bonne résistance à la traction et à la compression, ainsi qu'une bonne dureté et une bonne résistance à l'usure. L'acier au carbone et l'acier allié sont des types d'acier couramment utilisés pour les plaques semelles.
- Acier trempé : L'acier trempé est un acier qui a subi un traitement thermique pour améliorer sa dureté et sa résistance à l'usure. Il est souvent utilisé pour les plaques semelles de moules soumis à des contraintes mécaniques élevées, comme les moules pour l'injection de plastique ou de métal.
- Fonte : La fonte est un alliage de fer, de carbone et d'autres éléments. Elle offre une bonne résistance à la compression et une bonne capacité d'amortissement des vibrations. La fonte est souvent utilisée pour les plaques semelles de moules de grande taille ou de moules utilisés pour des matériaux fragiles.
- Aluminium : L'aluminium est un matériau léger et résistant à la corrosion. Il est souvent utilisé pour les plaques semelles de moules pour des matériaux légers, comme les plastiques.
- Alliages d'aluminium : Les alliages d'aluminium peuvent être renforcés avec d'autres éléments, tels que le cuivre ou le magnésium, pour améliorer leurs propriétés mécaniques. Ils sont souvent utilisés pour les plaques semelles de moules nécessitant une combinaison de résistance et de légèreté.

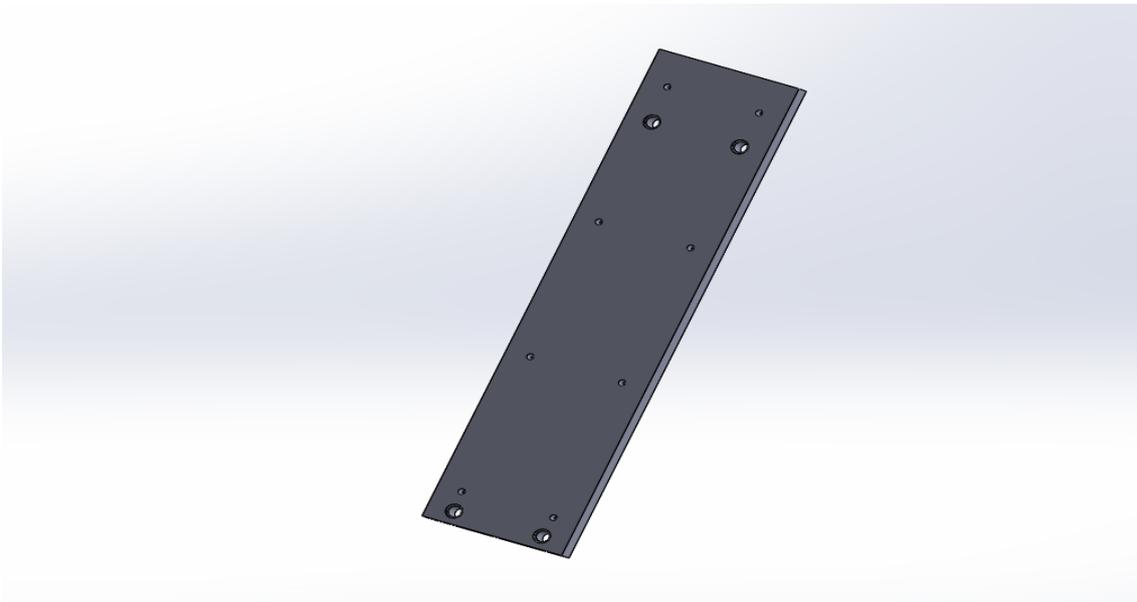


FIGURE 3.9 – La plaque semelle pour matrice supérieure

La plaque semelle est fixée par des vis à six pans creux M16 sur la matrice supérieure.

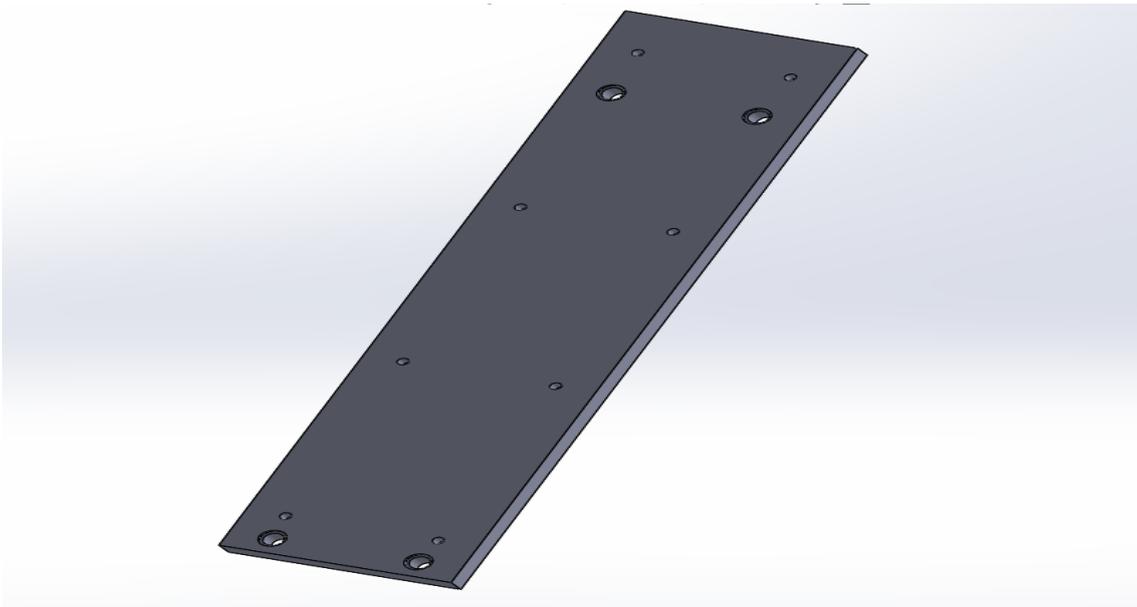


FIGURE 3.10 – La plaque semelle pour matrice inférieure

La plaque semelle est fixée par des vis à six pans creux M16 sur la matrice inférieure, où l'on peut observer un emboîtement pour les colonnes de guidage.

3.3.2.2 Colonnes de guidage.

Les colonnes de guidage sont des composants essentiels dans la conception et la fabrication moule pour assurer un alignement précis et stable des deux moitiés du moule. en voici un Description détaillée de son rôle et de son fonctionnement :

Rôle des Colonnes de Guidage

Alignement Précis :

Les colonnes de guidage sécurisent les deux moitiés du moule (côté cavité et côté noyau) Alignement parfait lors de la fermeture du moule. Ceci est crucial pour éviter tout décalage Cela peut affecter la qualité du casting.

Stabilité du Moule :

Ils offrent une stabilité supplémentaire au moule, minimisant les mouvements ou Vibration lors de l'injection de matière. Cela contribue à une production plus précise et uniforme.

Durabilité :

En répartissant uniformément les forces d'injection et de fermeture, les poteaux de guidage Réduisez l'usure et prolongez la durée de vie du moule

Fonctionnement des Colonnes de Guidage

Placement :

Les colonnes de guidage sont généralement montées sur l'une des plaques de moule (souvent la plaque de cavité) et s'insèrent dans des bagues de guidage correspondantes sur l'autre plaque (souvent la plaque de noyau).

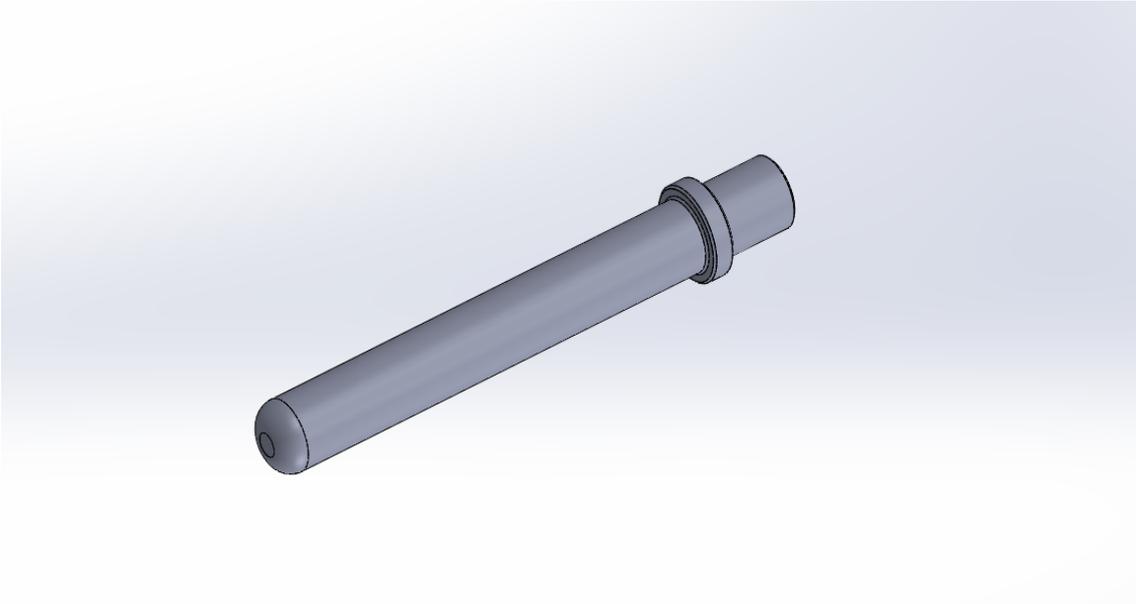


FIGURE 3.11 – Colonne de guidage

Les colonnes de guidage sont des colonnes de guidage lisses parce qu'elles permettent un alignement précis et sans frottement des pièces mobiles du moule, assurant ainsi un fonctionnement fluide .

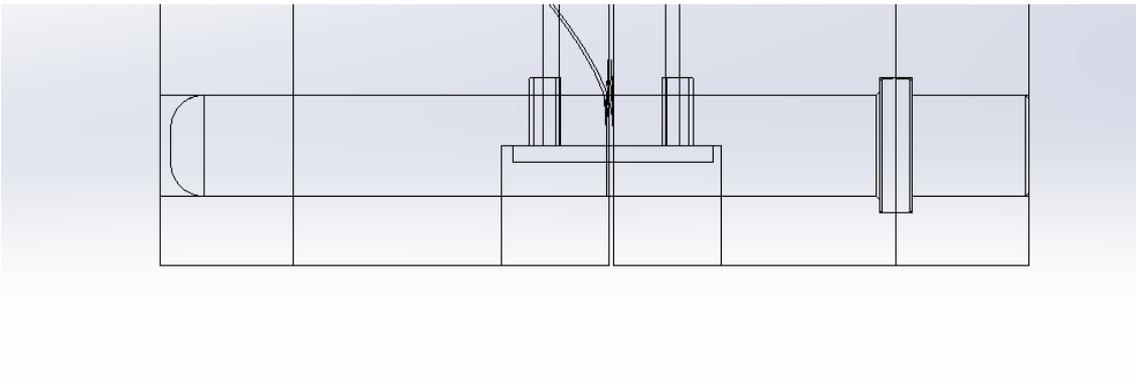


FIGURE 3.12 – Montage du colonne de guidage

3.3.2.3 Noyau

Le noyau est une partie essentielle du moule, responsable de former l'intérieur de la pièce moulée et de déterminer les cavités ou les formes internes. Il s'insère dans l'empreinte lorsque le moule est fermé, créant ainsi l'espace où le matériau fondu se solidifie. Dans notre moule, le noyau est fabriqué en fibre de carbone ou en fibre de verre et est creux. Pour obtenir une pièce creuse, le noyau reste à l'intérieur de la pièce moulée. Le moule du noyau est fabriqué en silicone.

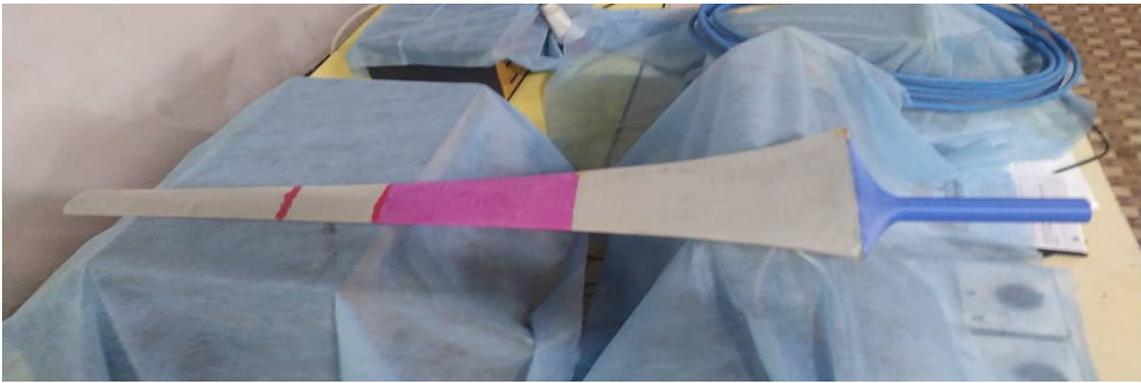


FIGURE 3.13 – Noyaux

Le noyau est posé dans le moule sur des supports pour s'assurer qu'il est correctement centré.

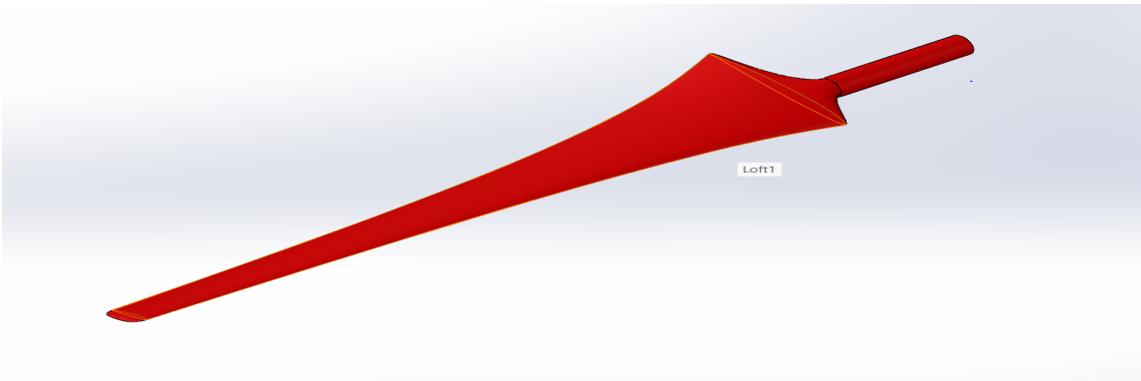


FIGURE 3.14 – Noyaux

3.3.2.4 Coulisseaux

Les coulisseaux sont des éléments mécaniques utilisés dans les moules pour créer des formes complexes et des contre-dépouilles qui ne peuvent pas être obtenues par simple démoulage. Ils permettent de déplacer certaines parties du moule pendant le processus d'éjection, ce qui libère la pièce moulée sans la déformer. Lors de la conception du moule, nous avons rencontré un problème avec le plan de joint de la pale : il y a une contre-dépouille sur le bout de la pale. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé de créer l'emprunte du dôme et de la monter sur le moule. Le problème suivant était de déterminer comment ouvrir et fermer le moule. La solution retenue a été d'utiliser un coulisseau.[48]

Le mécanisme d'actionnement utilise des doigts de guidage avec un angle de 25 degrés, ce qui assure une course suffisante pour la sortie de la pale. la base coulissante. La base coulissante est arrêtée par une vis à tête hexagonale M5. Le coin est fixé sur la matrice avec des vis à six pans creux M10.[49]

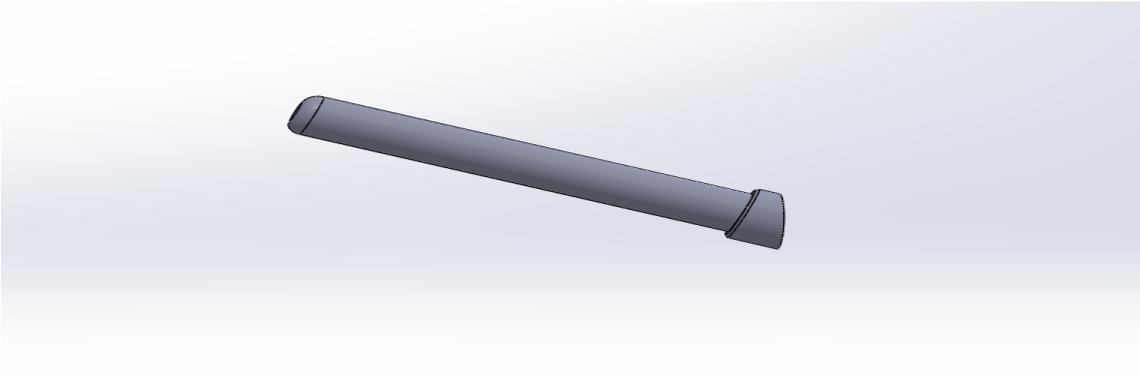


FIGURE 3.15 – Doigt de guidage

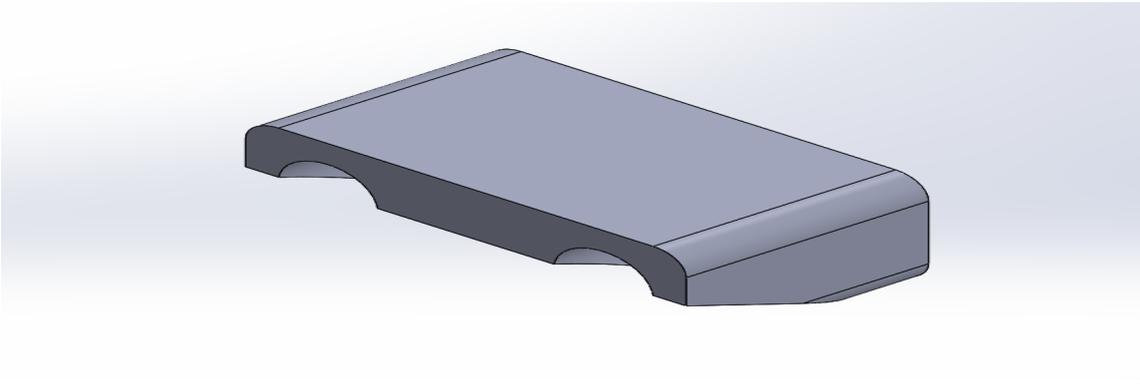


FIGURE 3.16 – Coin

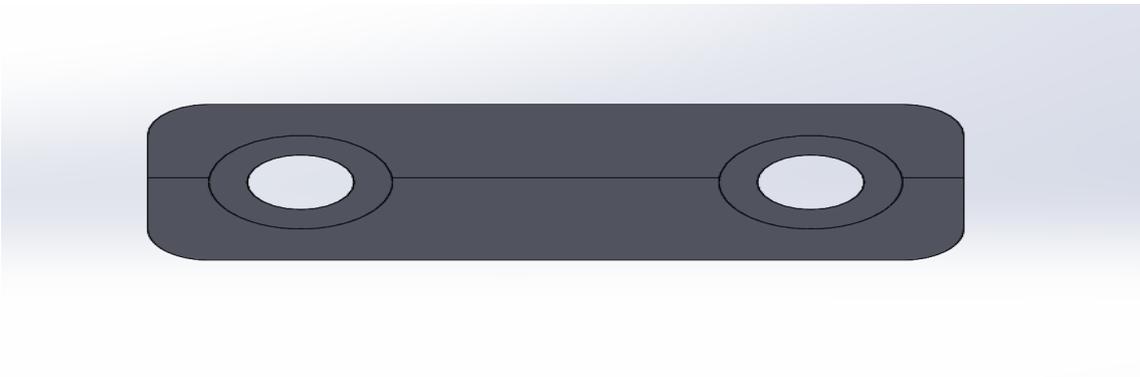


FIGURE 3.17 – Coins

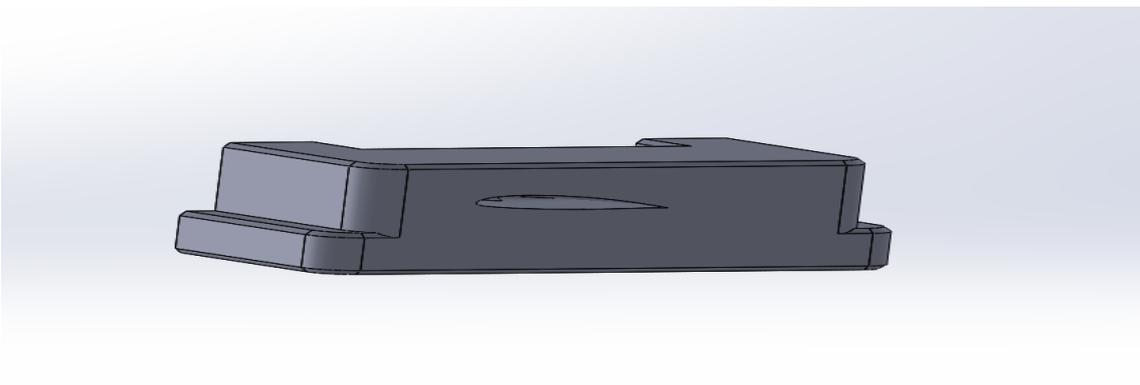


FIGURE 3.18 – Base Coulissante

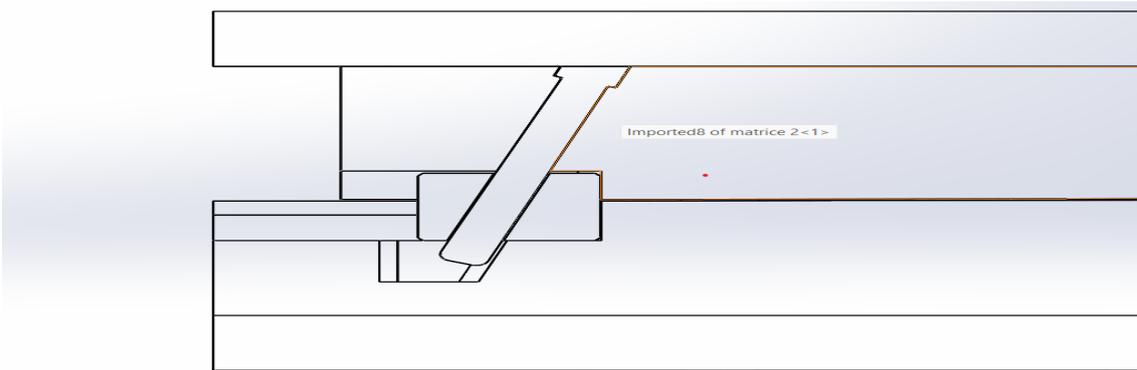


FIGURE 3.19 – Coulissex moule fermi

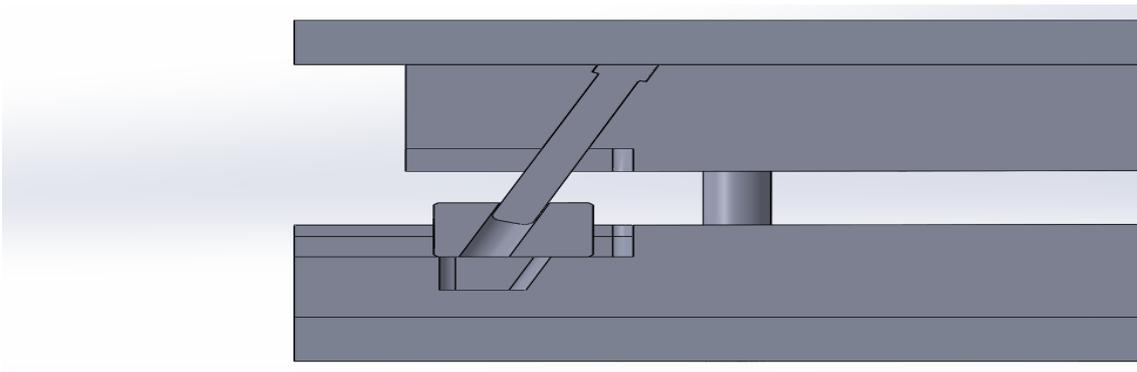


FIGURE 3.20 – Coulissex moule ouvert

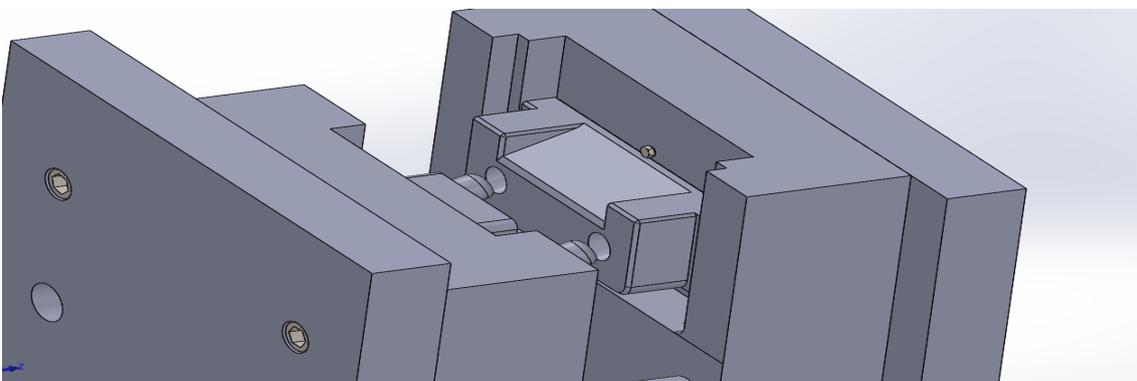


FIGURE 3.21 – Coulissex

3.3.2.5 Empreinte

L'empreinte est une partie importante du moule dans laquelle la matière en fusion est injectée. Elle forme l'œuvre finale. Voici une description détaillée des empreintes et de leur rôle dans celles-ci.

Rôle de l'Empreinte

Formation de la Pièce Finale :

Le rôle des empreintes La La cavité détermine la forme extérieure de la pièce moulée. c'est pour accommoder Le matériau est fondu et prend sa forme définitive après solidification.

Fonctionnement de l'Empreinte

Placement dans le Moule :

La cavité est située dans une ou les deux moitiés du moule (plaques d'empreinte). quand Le moule se ferme et les impressions des deux moitiés se rejoignent pour former un espace, Injecter la matière fondue.

Surfaces de Démoulage :

La surface de la matrice doit être conçue pour faciliter le démoulage de la pièce après durcissement. Cela peut inclure des angles de dépouille pour permettre un retrait facile de la pièce sans endommager la surface.

- Empreinte supérieure.

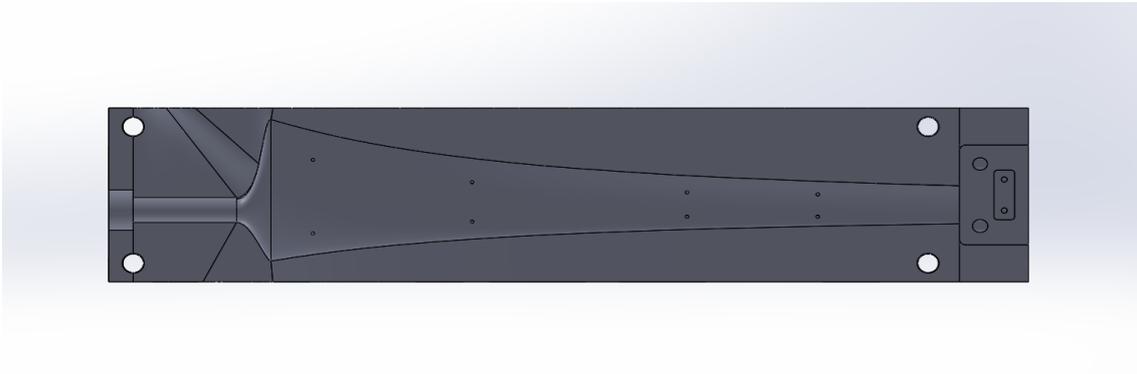


FIGURE 3.22 – Empreinte supérieure

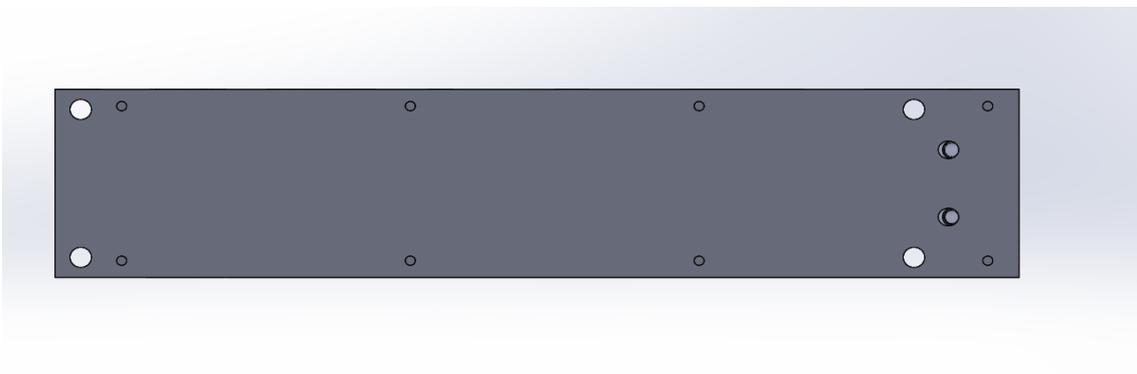


FIGURE 3.23 – Empreinte supérieure

- Empreinte inférieure.

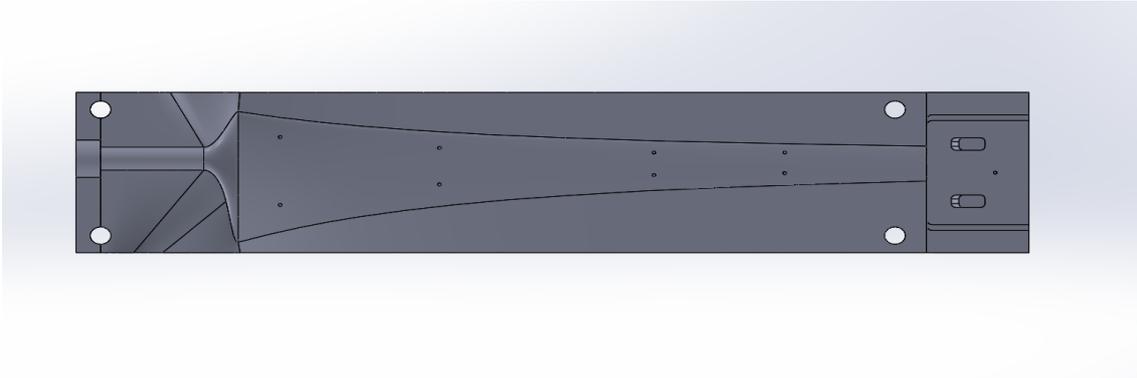


FIGURE 3.24 – Empreinte inférieure

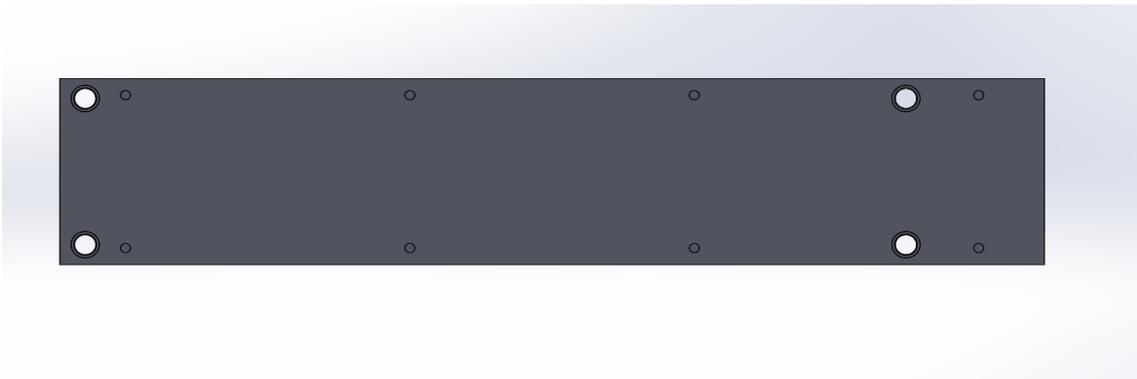


FIGURE 3.25 – Empreinte inférieure

Sur la matrice supérieure, on peut observer les supports des noyaux, les trous de colonne de guidage, ainsi que l'emplacement des coins et des doigts de coulissage. Sur la matrice inférieure, on peut voir l'emplacement de la base coulissante et la cavité des doigts de coulissage lorsque le moule est fermé.

3.3.2.6 Validation du moule :

Les parties du moule ont été assemblées virtuellement pour vérifier l'ajustement . Cette étape était essentielle pour garantir la fonctionnalité du moule.

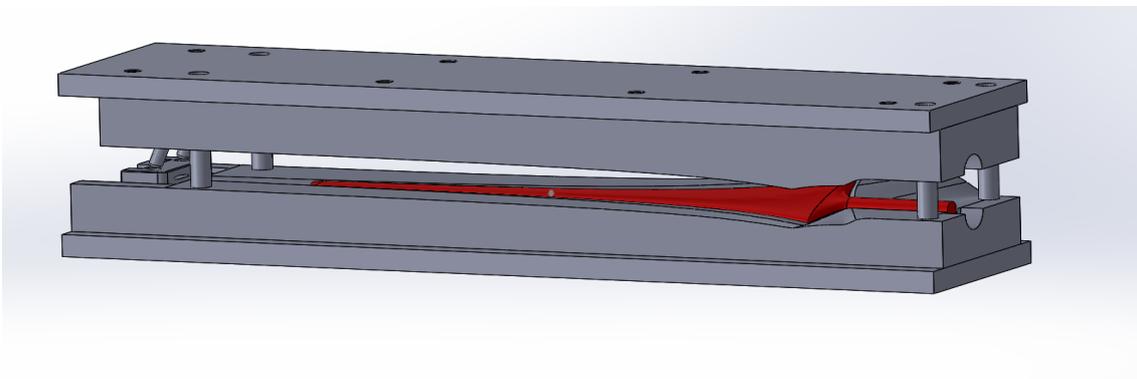


FIGURE 3.26 – moule ouvert

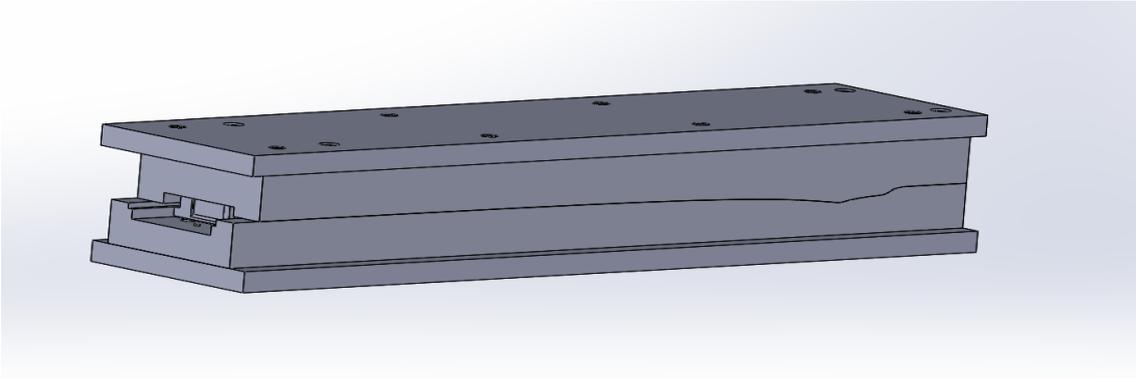


FIGURE 3.27 – moule fermé

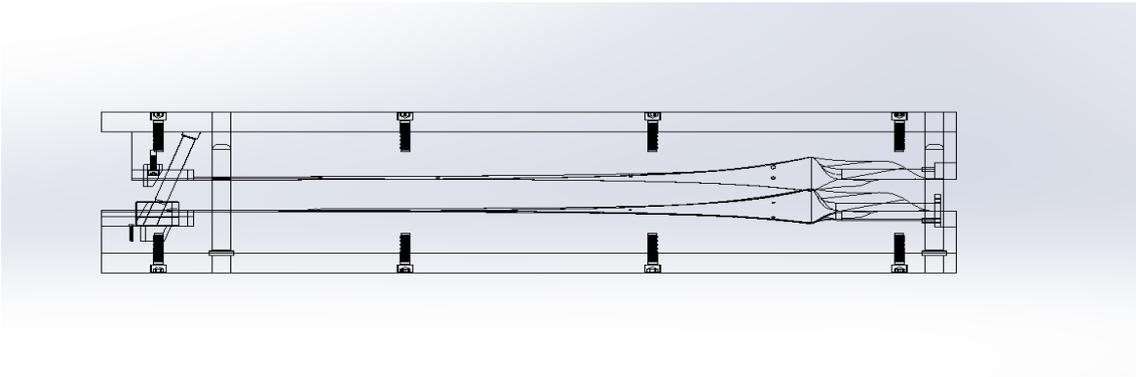


FIGURE 3.28 – moule ouvert (wireframe)

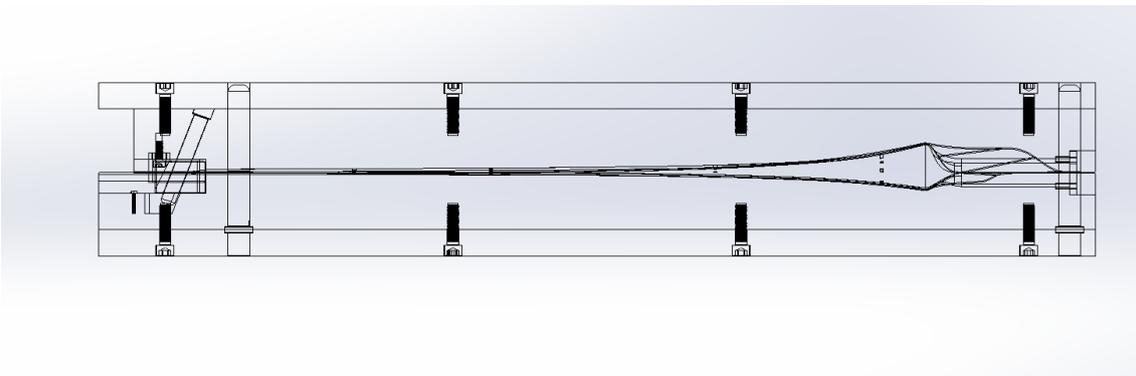


FIGURE 3.29 – Moule fermé (wireframe)

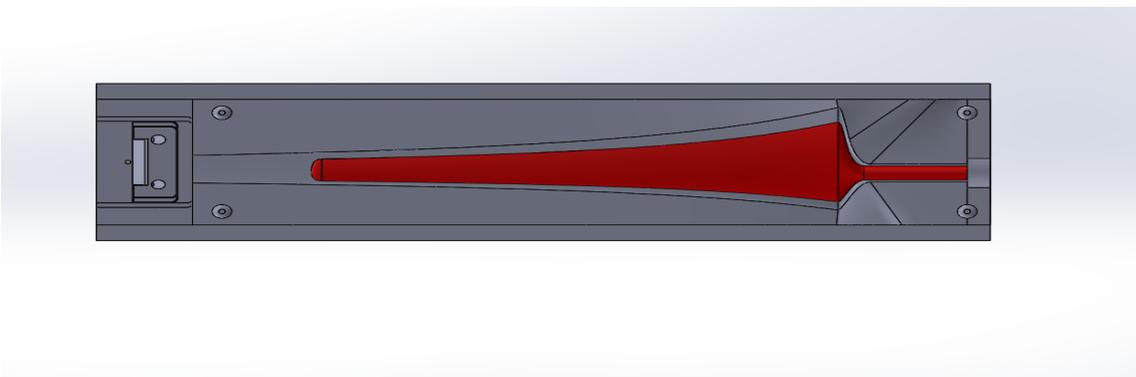


FIGURE 3.30 – Partie supérieure

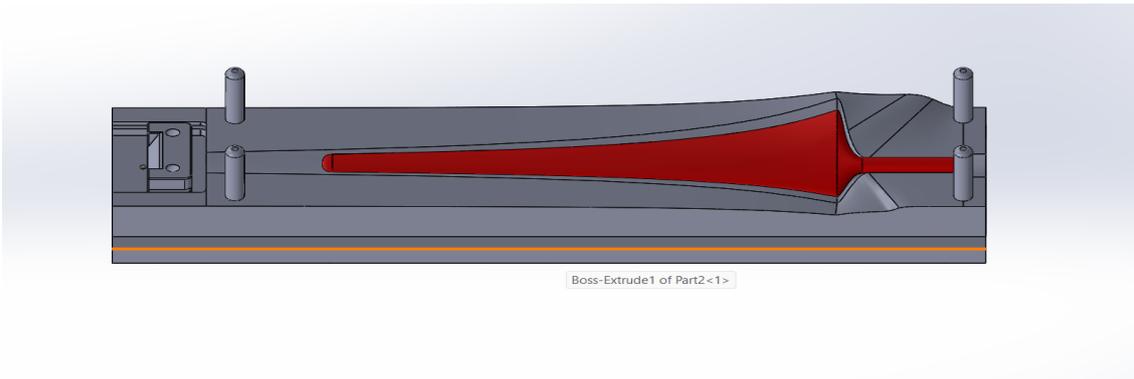


FIGURE 3.31 – Partie supérieure

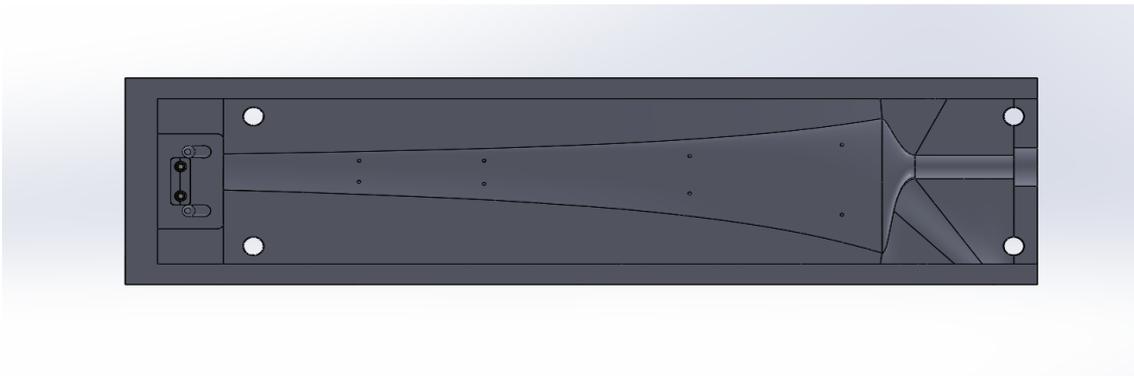


FIGURE 3.32 – Partie inférieure

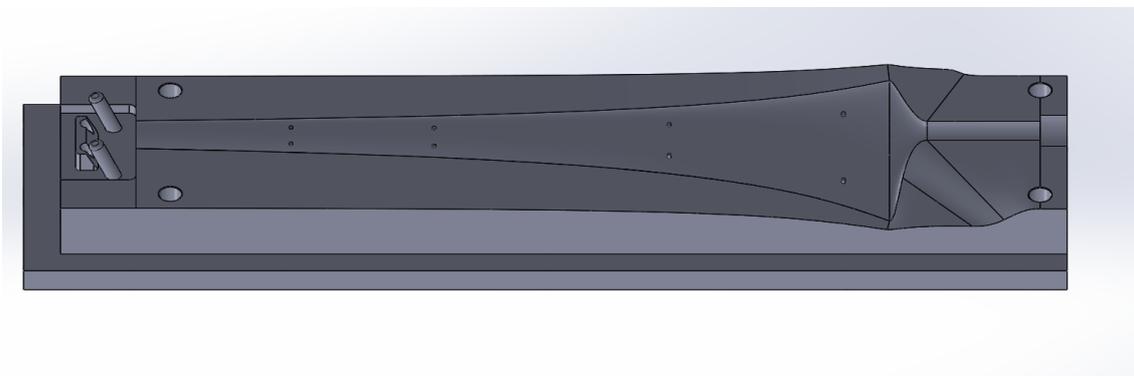


FIGURE 3.33 – partie inférieure

3.3.3 Matériaux utilisé

Dans l'industrie du moule, les choix de matériaux sont souvent limités sur le marché algérien. Un des matériaux disponibles pour la fabrication de moules est l'Acier Z200 C12. Voici ses propriétés physiques [50] :

- Densité : $7,7 \text{ g/cm}^3$
- Module d'élasticité : $210\,000 \text{ MPa}$
- Conductibilité thermique : $20 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$
- Coefficient moyen de dilatation thermique :
 - o Entre 20°C et 100°C : $10,5 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$
 - o Entre 20°C et 300°C : $11,0 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$
 - o Entre 20°C et 500°C : $12,0 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$

Pour son traitement thermique :

- Recuit : 800 – 850řC avec refroidissement lent au four. Dureté maximale : 250 HB.
- Recuit de détente : 650řC, suivi d'un refroidissement contrôlé pour supprimer les tensions internes.
- Trempe : 930 – 980řC avec différents modes de refroidissement pour atteindre une dureté de 63 – 65 HRc.
- Revenu : au-dessus de 525řC, avec un temps de maintien variable selon l'épaisseur pour ajuster les caractéristiques désirées.

Composition (% en poids) :

- Carbone : 2%
- Silicium : 0,2%
- Manganèse : 0,3%
- Chrome : 12%

3.3.3.1 Documentation et préparation pour fabrication :

- Plans techniques : Créez des plans détaillés des moitiés du moule, incluant les tolérances, les matériaux recommandés, et les instructions.

3.3.3.2 Cycle de moulage

Dans le cas d'une presse de transfert à deux vérins, avec un vérin de transfert supérieur, le cycle de moulage se déroule comme suit :

1. Mise en place des noyaux.
2. Fermeture du moule.
3. Le mélange de fibre de palmier et de résine est versé dans le moule.
4. Application de la pression de transfert.
5. Cuisson.
6. Ouverture du moule.
7. Évacuation des pièces.
8. Remplissage des trous des supports avec fibre de palmier et résine.
9. Nettoyage du moule.
10. Préparation du moule pour le moulage suivant.

3.3.4 Fabriquer le moule en silicone

La fabrication des moules en silicone est un processus essentiel dans l'industrie mécanique, permettant la création de pièces précises et complexes avec une grande flexibilité et une haute résistance. Le silicone, grâce à ses propriétés uniques telles que la résistance à la chaleur, la flexibilité et la durabilité, est devenu un matériau de choix pour la création de moules destinés à une multitude d'applications industrielles.

Les moules en silicone sont utilisés pour le moulage de pièces en plastique, en résine, en métal et autres matériaux composites. Ils permettent de reproduire avec exactitude les détails fins et les formes complexes des prototypes originaux, garantissant ainsi des produits finis de

haute qualité. Ce procédé est particulièrement apprécié pour la production de petites séries, de prototypes et de pièces personnalisées.

La fabrication des moules en silicone commence par la création d'un modèle maître, souvent réalisé par impression 3D. Ce modèle est ensuite utilisé pour créer une empreinte en silicone, un processus qui implique le mélange et le coulage de silicone liquide autour du modèle. Après le durcissement, le moule en silicone est prêt à être utilisé pour la production de pièces.

Grâce à leur flexibilité, les moules en silicone peuvent être facilement démoulés, réduisant ainsi le risque d'endommagement des pièces. De plus, leur résistance aux températures élevées et aux agents chimiques en fait un choix durable et économique pour les industries.

3.3.4.1 Processus pour fabrication des moules en silicone

1. Étapes initiales de la réalisation du modèle maître

Réalisation de la pale par impression 3D : La pale est d'abord modélisée en 3D, puis imprimée en décomposant le modèle en cinq parties distinctes pour faciliter l'impression.

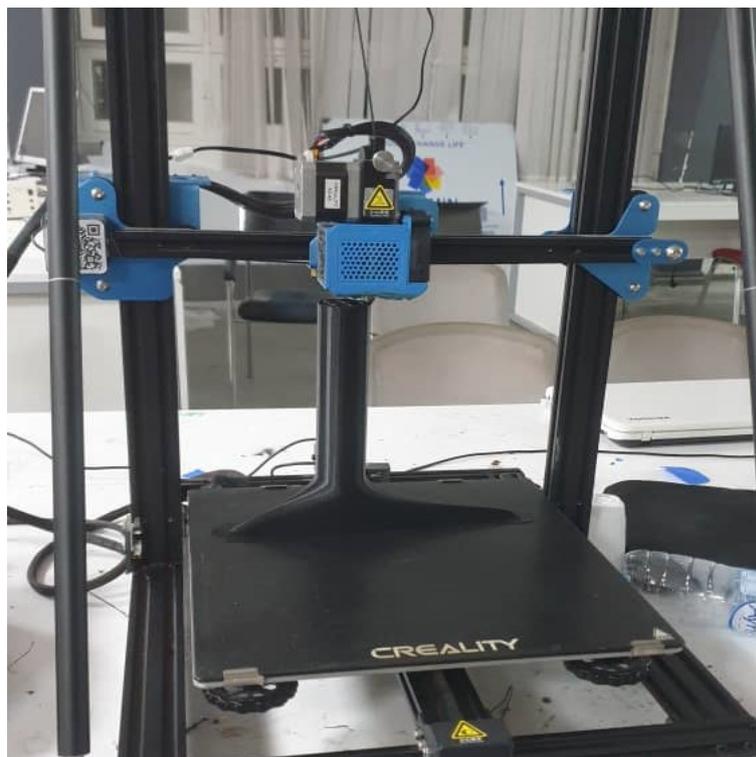


FIGURE 3.34 – l'impression 3D des parties

Assemblage des parties : Les cinq parties imprimées sont ensuite collées ensemble pour reformer la pale complète.



FIGURE 3.35 – Assemblage des parties

Application du mastic : Pour éliminer l'excès de colle dans les joints, on a poncé la pale. Ensuite, les joints entre les parties collées sont remplis avec du mastic pour assurer une continuité et éviter les défauts de surface.



FIGURE 3.36 – Application de mastic

Ponçage : Une fois le mastic sec, le modèle est poncé avec du papier abrasif pour obtenir une surface lisse et homogène. Le ponçage peut nécessiter plusieurs passages avec des papiers de grains différents (P50, P80, P300, P400, P600, P800, P1200, P1500), en commençant par un grain plus grossier et en finissant avec un grain fin pour obtenir une surface parfaitement lisse.

2. Fabrication du moule en silicone.

Préparation du modèle maître : Le modèle lisse et poncé de la pale est utilisé comme modèle maître pour la création du moule en silicone.

Construction d'une boîte de moulage : Une boîte de moulage est construite autour du modèle maître pour contenir le silicone liquide. Cette boîte doit être légèrement plus grande que le modèle pour laisser suffisamment de place pour le silicone. Elle peut être réalisée en bois, en plastique ou en carton rigide, selon les ressources disponibles.

Application d'un agent de démoulage : Un agent de démoulage est appliqué sur le modèle maître et l'intérieur de la boîte de moulage pour empêcher le silicone de coller au modèle et à la boîte. Des agents de démoulage courants incluent la vaseline, le spray démoulant ou des solutions à base de cire.

3. Création du plan de joint :

Positionnement de l'argile : De l'argile est placée autour du modèle maître pour créer un plan de joint. Cette argile sert de barrière et définit la ligne où les deux moitiés du moule en silicone se rencontreront. Marquage des repères d'alignement : Des repères ou des encoches sont ajoutés à l'argile pour aider à aligner les deux parties du moule lors de l'assemblage final. Ces repères peuvent être de simples trous ou des formes plus complexes selon les besoins.

4. Coulage de la première moitié du moule en silicone :

Mélange du silicone : Le silicone est préparé en mélangeant la base de silicone avec un catalyseur selon les instructions du fabricant. Ce mélange doit être fait soigneusement pour éviter les bulles d'air.

Versement du silicone : Le silicone mélangé est versé lentement dans la boîte de moulage, couvrant la moitié du modèle maître. Il est important de verser le silicone de manière continue et lente pour minimiser la formation de bulles d'air. Utiliser un bâton pour diriger le silicone dans les zones difficiles peut aider à éviter les bulles.

Durcissement : Le silicone est laissé à durcir pendant le temps recommandé par le fabricant, souvent entre 24 et 48 heures.

5. Préparation pour la deuxième moitié :

Retrait de l'argile : Une fois la première moitié durcie, l'argile est soigneusement retirée, laissant une moitié du modèle maître exposée dans la première matrice en silicone.

Application d'un agent de démoulage : Un agent de démoulage est à nouveau appliqué sur la surface de la première moitié du moule en silicone pour empêcher le silicone de coller à cette surface.

6. Coulage de la deuxième moitié du moule en silicone :

Versement du silicone : Le silicone mélangé est versé lentement pour couvrir la deuxième moitié du modèle maître. **Durcissement :** Le silicone est laissé à durcir pendant le temps recommandé par le fabricant.

Démoulage : Une fois le silicone durci, les deux moitiés du moule sont soigneusement séparées, et le modèle maître est retiré du moule. Les deux parties du moule en silicone doivent s'emboîter parfaitement grâce aux repères d'alignement créés précédemment.

Renforcement du moule avec de la fibre de verre

7. Préparation des couches de fibre de verre :

Découpage de la fibre de verre : Découpez des morceaux de fibre de verre adaptés à la taille des moitiés du moule en silicone. **Préparation de la résine :** Préparez la résine polyester ou époxy selon les instructions du fabricant. Assurez-vous de bien mélanger la résine avec le durcisseur pour obtenir une consistance homogène. **Application des couches de fibre de verre :**

Application de la résine : Appliquez une couche de résine sur l'extérieur de chaque moitié du moule en silicone. Utilisez un pinceau pour étaler la résine uniformément.

Pose de la fibre de verre : Posez les morceaux de fibre de verre sur la résine fraîche et appuyez pour assurer une bonne adhérence. Utilisez un rouleau débulleur pour éliminer les bulles d'air et assurer une bonne imprégnation de la résine.

Ajout de plusieurs couches : Répétez l'application de résine et de fibre de verre pour ajouter plusieurs couches, renforçant ainsi le moule. Assurez-vous que chaque couche est bien saturée de résine et exempte de bulles d'air. Généralement, trois à cinq couches sont suffisantes pour obtenir un renforcement adéquat.

Durcissement : Laissez les couches de fibre de verre durcir complètement, selon le temps recommandé par le fabricant de la résine. Ce temps peut varier entre 24 et 72 heures selon les conditions ambiantes et le type de résine utilisé.

Finition : Une fois la fibre de verre durcie, vérifiez que les deux moitiés du moule s'emboîtent correctement et qu'il n'y a pas de déformations. Effectuez des ajustements si nécessaire en ponçant les bords ou en ajoutant de la résine là où c'est nécessaire. Vous pouvez également ajouter des fermetures mécaniques comme des boulons ou des attaches pour maintenir les moitiés du moule ensemble lors du moulage des pièces.

Points supplémentaires à considérer :

Contrôle de qualité : Inspectez régulièrement le moule pour détecter toute usure ou déformation. Le silicone peut se dégrader avec le temps et l'utilisation, et il est important de maintenir le moule en bon état pour assurer la qualité des pièces produites.

Entretien du moule : Nettoyez le moule après chaque utilisation pour enlever les résidus de matériau moulé. Utilisez des solvants appropriés qui n'endommageront pas le silicone ou la fibre de verre.

3.4 Comparaison des matériaux pour la fabrication de moules

Matériau	Masse	Prix	Prix par kg	Caractéristiques
Silicone	45 kg	120 000.00 DA	~2500 DA/kg	Flexible, bonne résistance à la chaleur, facile à mouler
Acier Z200 C12	1087 kg	2 716 560.00 DA	~2500 DA/kg	Haute résistance, bonne durabilité, difficile à usiner

TABLE 3.1 – Comparaison des matériaux pour la fabrication de moules

Dans l'étude comparative des méthodes de fabrication de moules, il est évident que l'utilisation du silicone offre une approche plus accessible et économique par rapport à l'acier Z200

C12. Les moules en silicone sont facilement manipulables pour les débuts de projets, nécessitant moins de ressources et de temps comparativement à l'usinage complexe et l'utilisation de presses hydrauliques requises pour les moules en acier. Cependant, ces derniers se distinguent par leur robustesse et leur efficacité pour les productions à grande échelle.

3.5 Méthode alternative pour la fabrication des moules

Le manque de ressources financières nous oblige à trouver des méthodes alternatives pour la fabrication des moules. La première méthode est la fabrication de moules en ciment blanc. Le processus consiste à mettre du sable dans le moule, poser la pale sur le sable et définir le plan de joint, puis verser le ciment blanc à l'état liquide sur la pale et laisser sécher pendant 48 heures. Cependant, le moule en ciment blanc s'est avéré très lourd et les produits chimiques du ciment blanc ont affecté la pale, corrodant sa surface et la fissurant. Nous avons également essayé de



FIGURE 3.37 – Moule en ciment blanc

fabriquer un moule en sable et silicate de sodium. Après l'avoir laissé sécher pendant 24 heures, nous avons constaté que la section mince de la pale (le bout) présentait une grande usure et était presque cassée. Nous avons tenté de coller le modèle, mais il présentait des déformations que nous n'avons pas pu corriger.



FIGURE 3.38 – Moule en sable et silicate de sodium

La troisième méthode consiste en la fabrication de moules par un mélange de ciment blanc et de plâtre (30% plâtre et 70% ciment blanc). Le plan de joint est fabriqué avec du sable mélangé avec du silicate de sodium. Le rôle du plâtre dans ce moule est d'accélérer la réaction de séchage du ciment blanc rapidement et de réduire le poids du moule. Le problème avec ce moule est que la pale est en mauvais état après deux essais. De plus, le plâtre est exothermique, ce qui génère des bulles d'air, et ces dernières affectent l'empreinte de la pale.



FIGURE 3.39 – Le bout de la pale après le moulage en sable



FIGURE 3.40 – Le bout de la pale après le moulage en sable



FIGURE 3.41 – Moule en ciment blanc et de plâtre

3.6 Conclusion

La fabrication des moules n'a pas été réalisée en raison du manque de ressources financières pour créer des moules en silicone, ainsi que du temps considérable passé sur l'étude aérodynamique et la fabrication du modèle en impression 3D.

Les méthodes alternatives nécessitent beaucoup d'améliorations, mais malheureusement, nous n'avons pas eu le temps nécessaire pour les perfectionner.

Chapitre 4

Extraction des fibres et fabrication effective de la pale

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer le processus d'extraction des fibres de palmiers dattiers ainsi que le processus de fabrication d'une pale d'éolienne. L'extraction des fibres de palmiers dattiers est une étape fondamentale dans la fabrication des pales de rotor pour nos turbines éoliennes domestiques. Les fibres de palmiers dattiers offrent une alternative naturelle et durable aux matériaux traditionnels. Nous explorerons les techniques et les méthodes utilisées pour extraire ces fibres, ainsi que les techniques de fabrication des pales d'éolienne.

Les étapes de fabrication des pales d'éolienne sont les suivantes :

1. extraction des fibres de palmiers dattiers.
2. fabriquer le noyau.
3. fabriquer la pale.
4. Enfin, traiter la surface de la pale

4.2 Extraction des fibres de palmiers dattiers.

4.2.1 Le palmier dattier

Le palmier dattier, *Phoenix dactylifera*, se distingue comme l'un des arbres fruitiers les plus anciennement cultivés au monde, avec une histoire remontant à des millénaires. Sa résistance remarquable lui permet de s'adapter aux environnements arides les plus extrêmes de la planète, faisant de lui une source de vie vitale pour les populations sahariennes. Cette espèce emblématique trouve son berceau dans la région afro-asiatique, où sa présence contribue à façonner les paysages et les cultures locales.

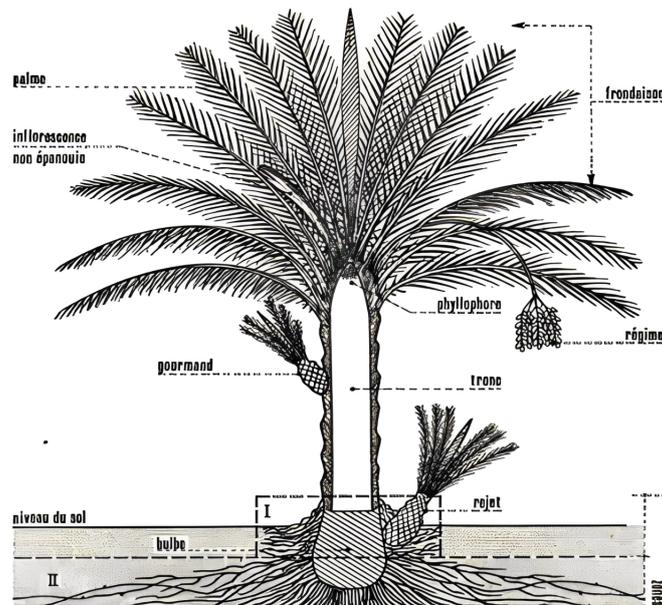


FIGURE 4.1 – Schéma du palmier dattier (Munier, 1973)

En Algérie, le palmier dattier occupe une place prépondérante dans l’agriculture et le patrimoine culturel. En 2012, les statistiques recensaient environ 18 millions de palmiers dattiers de différentes variétés répartis à travers le pays (Tableau 2.1 [44]). Cette richesse variétale témoigne de l’importance accordée à cet arbre précieux et de la diversité des utilisations qui en découlent.

Au-delà de sa production de dattes, le palmier dattier offre une multitude d’avantages à l’homme. Son feuillage dense procure une ombre salutaire dans les régions désertiques, tandis que ses fibres et son bois sont utilisés dans l’artisanat et la construction. De plus, le palmier dattier joue un rôle crucial dans la lutte contre l’érosion et la désertification, contribuant ainsi à la préservation des sols fragiles. Ces arbres sont remarquables pour leur capacité à survivre dans des conditions environnementales difficiles, notamment des températures élevées, des sols arides et une faible disponibilité d’eau. Dans le contexte de notre projet, les palmiers dattiers

TABLE 4.1 – Nombre d’arbres dattiers en Algérie par variété (2012)[4]

Variété	Dattes fines	Dattes molles	Dattes blanche	Superficie occupée (ha)
Nombre d’arbre	6 998 143	2 795 995	8 407 502	
Total en algerie	18 201 640			163 985

revêtent une importance particulière en raison de leur capacité à fournir des fibres naturelles pour la fabrication des pales de rotor des éoliennes domestiques. Ces fibres, extraites des feuilles des palmiers dattiers, offrent une alternative durable et respectueuse de l’environnement aux matériaux traditionnels comme le verre ou le carbone, contribuant ainsi à la durabilité et à l’éco-responsabilité de nos turbines éoliennes.

4.2.2 Résumé des recherches sur le palmier dattier

Les déchets de palmier dattier ont fait l’objet de nombreuses études qui ont permis de déterminer leurs propriétés mécaniques et thermiques ainsi que leur structure physico-chimique. Ces recherches ont révélé le potentiel d’incorporer ces déchets dans différentes matrices pour créer des bio-composites respectueux de l’environnement, adaptés aux secteurs de la construc-

tion et de l'isolation. La majorité de ces travaux se sont concentrés sur la caractérisation mécanique des matériaux.

H.H. Abdel-Rahman et al.[51] ont mené des essais expérimentaux pour déterminer les propriétés mécaniques des tiges de palmes de palmier dattier (rachis). Les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction de la paroi de la tige varie entre 116 et 208 N/mm², tandis que celle du cœur de rachis atteint environ la moitié de ces valeurs. Le module d'élasticité des tiges se situe entre 10 et 30 KN/mm².

Par ailleurs, **Ahmad Alawar et al.**[52] ont exploré l'effet de différents traitements chimiques sur la fibre de surface du tronc (Lif). Ils ont utilisé diverses concentrations d'alcalin (0,5%, 1%, 1,5%, 2,5% et 5%) et des traitements acides avec des solutions de 0,3, 0,9 et 1,6 N, appliqués à 100 °C pendant une heure. L'analyse des échantillons, réalisée à l'aide de techniques telles que la morphologie de surface, la gravimétrie thermique (TGA), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), les essais mécaniques et l'analyse chimique, a révélé que le traitement avec une solution alcaline à 1% confère les meilleures propriétés mécaniques. En revanche, le traitement à l'acide chlorhydrique a détérioré les propriétés mécaniques des fibres.

A. Kriker et al.[5] ont étudié les fibres de surface du palmier dattier (Lif) extraites de quatre variétés différentes. Ils ont déterminé les propriétés mécaniques et physiques de ces fibres en fonction de leur durcissement dans l'eau et dans un climat chaud et sec. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.2 .

TABLE 4.2 – Propriétés mécaniques de quelques variétés du Lif de palmier [5].

Variété	sèches			humides		
	Résistance à la rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)
Dokar	290±20	-	11±2	12±2	5.2±3	3.55±2
Elgers	88.75±20	-	11.1±2.5	12±3	3.5±1.2	3.10±1.5
Deglet-Nour	72.34±18	-	8.7±2.2	9.5±2.5	3.15±1.5	2.3±2
Deglet-Bida	71.15±16	-	7.5±2.3	8.5±2.7	2.5±1	2.10±1

Une étude précédente a révélé que les fibres utilisées ont un diamètre moyen de 0,7 mm et une longueur moyenne de 1,5 mm, donnant un rapport d'aspect L/d de 1,6. En utilisant ces résultats et le modèle de Halpin-Tsai, ils ont déterminé les propriétés du composite : $E_c = 1057$ MPa ; $G = 800$ MPa. Le coefficient de Poisson est $\nu = 0.3$ et la densité est $\rho_s = 1270$ kg/m³. Ces propriétés seront utilisées dans la prochaine partie de leur travail[53].

les trois parties essentielles du palmier dattier : la tige , les feuilles et le kornav.

1. Tiges :

Les pétioles des feuilles de palmier dattier sont des structures allongées et étroites, souvent désignées sous le nom de "tiges". Elles peuvent s'étendre jusqu'à une longueur impressionnante de 4 mètres tout en ne mesurant que quelques centimètres de largeur. Ces pétioles sont munis de pointes acérées et robustes, mesurant parfois jusqu'à 30 centimètres de longueur, qui servent de protection contre les herbivores tels que les chameaux et les moutons, évitant ainsi les dommages causés par leur mastication. Ces pétioles renferment également des fibres qui contribuent à soutenir la palme et à faciliter son déploiement dans la couronne de l'arbre. Leur solidité et leur résistance sont remarquables, leur permettant de supporter le poids des feuilles et des fruits sans se rompre.

2. Feuilles :

Les feuilles de palmier ont également été étudiées pour leur potentiel d'utilisation dans



FIGURE 4.2 – Des tiges de palmiers dattiers

les composites. Leur légèreté, leur résistance et leur faible densité en font des candidats attrayants pour l'incorporation dans des matériaux composites. Ces fibres de feuilles de palmier ont été intégrées en tant que renfort dans divers composites, comme les panneaux de particules, les tôles composites et les composites polymères. De plus, elles peuvent être soumises à un traitement pour éliminer la résine, améliorer l'adhérence et renforcer les propriétés mécaniques des fibres.



FIGURE 4.3 – les feuilles

3. Kornav :

La partie pétiole du palmier dattier revêt une importance particulière au sein de la feuille de cet arbre. Elle constitue le lien entre la palme, qui ressemble à une grande feuille, et le stipe, qui représente le tronc du palmier. Cette section comprend une zone de transition où la palme se connecte au stipe, ainsi que des fibres et des tissus contribuant au soutien de la palme.



FIGURE 4.4 – kornav

4.3 Techniques d'extraction des fibres et des particules

L'extraction des fibres et des particules de palmier dattier est une étape essentielle dans la préparation des matériaux composites. Cette étape revêt une importance particulière car la qualité et les propriétés des fibres extraites influencent directement les performances et la durabilité du matériau composite final. Différentes méthodes sont utilisées pour extraire ces fibres, en fonction des besoins spécifiques de l'application visée.

Pour notre projet, nous avons choisi d'employer la méthode mécanique pour cette extraction.

4.3.1 Méthode mécanique

L'extraction mécanique représente une méthode largement adoptée pour extraire les fibres et les particules du palmier dattier de manière plus efficace et à une échelle plus importante. Elle fait appel à l'utilisation de machines et d'équipements spécialisés pour faciliter le processus d'extraction. Pour notre projet, nous avons choisi d'utiliser un broyeur ainsi que trois tamisiers de différentes tailles (800, 500 et 160 μm) pour l'extraction mécanique des fibres et particules du palmier dattier. Cette décision a été motivée par la disponibilité de ces équipements au sein de notre école et par leur efficacité démontrée dans le processus d'extraction.

Nous avons employé un broyeur pour réduire en petits morceaux les fibres, les tiges et les bases pétioles du palmier dattier. Ce dispositif fonctionne en appliquant des forces mécaniques

pour écraser les matériaux, les décomposant ainsi en particules de taille souhaitée. Notre choix s'est porté sur cette méthode en raison de sa capacité à produire des particules de taille uniforme, facilitant ainsi leur utilisation ultérieure dans la fabrication de composites.

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé une variété de broyeurs pour mener à bien le processus d'extraction des fibres et des particules du palmier dattier. Voici les différents types de broyeurs que nous avons sélectionnés, ainsi que leurs utilisations respectives :

1. Broyeur :

Nous avons employé un broyeur pour réduire en petits morceaux les fibres, les tiges et les bases pétioles du palmier dattier. Ce dispositif fonctionne en appliquant des forces mécaniques pour écraser les matériaux, les décomposant ainsi en particules de taille souhaitée. Notre choix s'est porté sur cette méthode en raison de sa capacité à produire des particules de taille uniforme, facilitant ainsi leur utilisation ultérieure dans la fabrication de composites.

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé une variété de broyeurs pour mener à bien le processus d'extraction des fibres et des particules du palmier dattier. Voici les différents types de broyeurs que nous avons sélectionnés, ainsi que leurs utilisations respectives :

Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL :

Le GHE 150 STIHL est un puissant broyeur de végétaux électrique, doté d'une puissance de 2500 W. Il est spécialement conçu pour découper des branches d'un diamètre d'environ 35 mm. Ce broyeur offre divers avantages, notamment sa compacité et sa facilité de déplacement grâce à ses deux roues et à son poids réduit.



FIGURE 4.5 – Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL

Après avoir utilisé le broyeur GHE 150 de STIHL pour découper les tiges de palmiers dattiers en petits morceaux, voici les résultats obtenus. Les morceaux de tiges découpés

illustrent clairement l'efficacité de ce broyeur. Il a réussi à transformer les grandes tiges en fragments facilement gérables, démontrant ainsi sa capacité à traiter efficacement ce type de matériau.



FIGURE 4.6 – Échantillons de morceaux après utilisation du broyeur GHE 150 STIHL

Broyeur kitchef grinder :

Après avoir effectué le broyage initial avec le broyeur GHE 150 STIHL, nous avons intégré un autre outil crucial pour optimiser davantage nos résultats : le broyeur Kitchef Grinder. Ce broyeur polyvalent, initialement conçu pour le broyage d'épices, s'est révélé être d'une grande utilité dans notre processus d'extraction des fibres et des particules du palmier dattier.

Le Kitchef Grinder est spécifiquement conçu pour broyer de manière efficace et précise une gamme variée d'ingrédients, incluant les épices, les grains et les herbes. Sa conception robuste ainsi que ses lames tranchantes nous ont permis de réduire les morceaux de palmier dattier obtenus du premier broyeur en particules plus fines et homogènes.



FIGURE 4.7 – Broyeur kitchef grinder

2. Tamisage :

Après un broyage initial des tiges de palmiers dattiers en morceaux d'environ 30 mm avec le "Broyeur de végétaux GHE 150 STIHL", hacher finement les morceaux obtenus à l'aide du "Broyeur Kitchef Grinder" pour obtenir une poudre fine destinée à la fabrication des fibres de palmiers dattiers .

Le tamisage est une technique minutieuse de séparation des particules en fonction de leur taille, essentielle dans le traitement des fibres de palmier dattier. Pour cette tâche, une série de tamis dotés de mailles de diverses dimensions est employée. Les fibres les plus épaisses sont retenues par le premier tamis, tandis que celles de taille plus fine traversent successivement les tamis jusqu'à être collectées au fond. Cette méthode permet d'obtenir des fibres courtes de longueurs variées, adaptées à différents usages artisanaux et industriels.



FIGURE 4.8 – les tamiseurs

Une fois le tamisage terminé, nous avons obtenu différentes fractions de particules de tiges avec des diamètres allant de 1 mm à 6 mm. Ces fractions ont ensuite été collectées et stockées pour une utilisation ultérieure dans la fabrication de notre pale d'éolienne.

Le tamisage nous a permis d'obtenir des particules de taille précise, ce qui est crucial pour garantir une distribution homogène des particules dans les matériaux composites à base de fibres de palmier dattier. Cette méthode de tamisage nous permet aussi d'ajuster la composition granulométrique des particules selon les besoins spécifiques du matériau composite que nous voulons fabriquer.

4.4 Les matériaux utilisés dans la fabrication de la pale

- Tissu fibre de carbone biaxial
- Fibre de palmier
- Résine époxy
- Bâtonnets de mélange
- Récipients de mélange

- Rouleaux
- Pinceaux
- Agent de démoulage pour résine époxy
- Chambre à vide : Pour éliminer les bulles d'air lors de l'imprégnation de la résine dans la fibre.
- Pompe à vide : Pour créer le vide nécessaire dans la chambre à vide.

4.4.1 Préparation de Résine époxy

La température minimale pour l'application de la résine époxy est de +15°C. Les meilleurs résultats sont obtenus en appliquant à une température comprise entre 20 et 25°C. L'humidité relative de l'air ne doit pas dépasser 70%.

4.4.1.1 La proportion du mélange des composants :

Composants	Parties en poids (g)	Parties en volume (l)
Résine	100	100
Durcisseur	44	50

4.5 Fabrication de noyau

4.5.1 Fabrication de sheer web

1. Posez un tissu de fibre de carbone biaxial de longueur 1 mètre sur une surface lisse et plane.
2. Appliquez un agent de démoulage sur la surface.
3. Étalez la première couche de fibre de carbone.
4. Versez la résine époxy sur cette première couche et utilisez un rouleau pour bien distribuer la résine et éliminer les bulles d'air.
5. Ajoutez une autre couche de fibre de carbone en orientant les fibres à un angle de 45 degrés par rapport à la première couche pour obtenir une épaisseur totale de 6 millimètres.
6. Laissez sécher le matériau.
7. Découpez ensuite la forme désirée avec une découpe laser, en fonction de la forme du sheer web.

4.5.2 Fabrication de noyaux

1. prépare l'empreinte inférieure du noyau et applique un agent de démoulage.
2. pose le tissu de fibre de carbone sur l'empreinte et trace la forme du noyau.

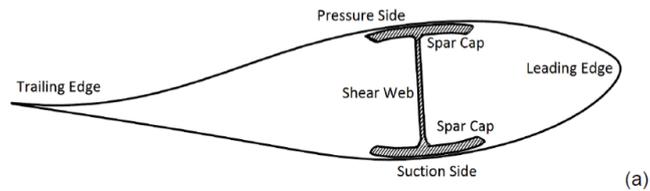


FIGURE 4.9 – Sheer web[16]

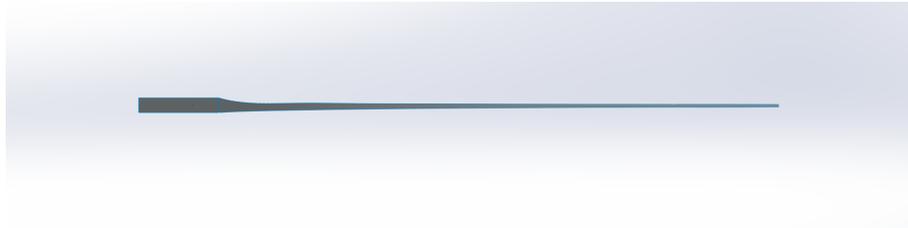


FIGURE 4.10 – Sheer web

3. découpe les fibres selon la forme du noyau.
4. applique la résine époxy sur les fibres découpées et élimine les bulles d'air à l'aide d'un rouleau.
5. ajoute une deuxième couche de fibre de carbone pour obtenir une épaisseur de 2 millimètres.
6. répète les mêmes étapes pour l'empreinte supérieure.
7. place les matrices dans une chambre à vide pour éliminer les bulles d'air lors de l'imprégnation de la résine dans les fibres.
8. démoule les deux parties et place le sheer web dans l'empreinte du noyau. 9. laisse sécher.
10. Enfin, il colle les parties ensemble et nettoie les bavures de colle sur les joints.

4.6 Fabrication de la pale

Pour la fabrication, il est nécessaire de déterminer la quantité de fibre à mélanger avec la résine époxy pour obtenir les meilleurs résultats. Cela peut être visualisé dans le graphique suivant.

Fraction massique wf (%)	0	4	7	10
Désignation des plaques en Lif-époxy	EPL00	EPL04	EPL07	EPL10

TABLE 4.3 – Fraction massique de la fibre Lif et désignation des plaques en Lif-époxy

. Les courbes présentent les deux phases d'une courbe de traction classique :

Une partie linéaire élastique : avec une pente indiquant que l'ajout du renfort a rigidifié la matrice polymère époxy.

Une partie non-linéaire : cette partie s'étend jusqu'à la rupture du matériau.

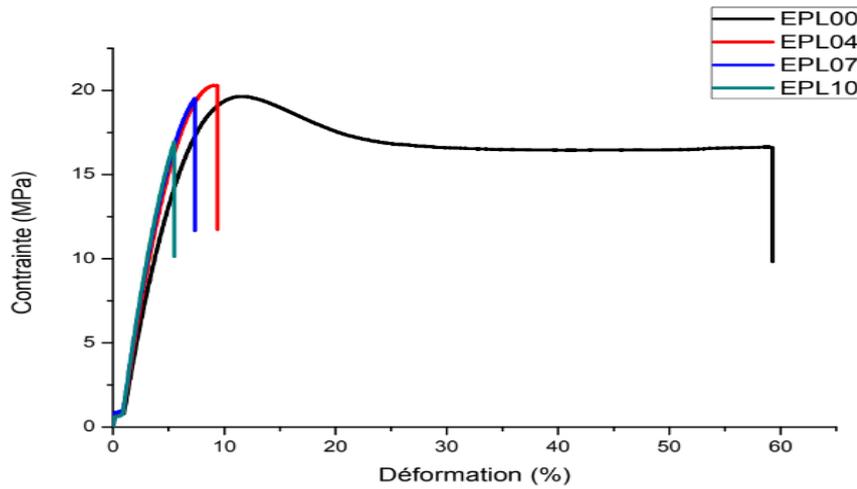


FIGURE 4.11 – Courbe contrainte-déformation pour le composite Lif-Epoxy

À partir de ces courbes, on détermine le taux de déformation à la rupture, la contrainte à la rupture et le module d'élasticité. La détermination du module d'élasticité E se fait en mesurant la pente de la partie linéaire élastique de la courbe contrainte-déformation. Le tableau récapitule les résultats de l'essai de traction pour l'époxy.[54]

Eprouvettes	Fraction massique (%)	Propriétés Mécaniques		
		E (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ_r (%)
EPL00	0	365,167±44,283	16,734±0,422	42,2±18,5
EPL04	4	447,70±88,337	19,243±0,961	9,6±0,4
EPL07	7	502,267±16,810	19,211±0,365	7,6±0,6
EPL10	10	537,9±18,95	16,957±0,023	5,7±0,3

FIGURE 4.12 – Résultats des essais de traction (Lif-époxy)

le tableau représente respectivement le module d'élasticité, la contrainte à la rupture et la déformation à la rupture en fonction du pourcentage de fibres de Lif dans le composite. Il semble que la meilleure fraction massique de fibre Lif soit de 4%. [54]

pose le noyau sur l'empreinte de la pale avec un support cylindrique fabriqué en impression 3D, collé sur les deux empreintes de la pale. Ensuite, il met l'empreinte supérieure en place, fabrique le boîtier en fibre de verre, verse le composite de fibre de palmier à base d'époxy dans le moule, puis place le moule dans une chambre à vide pour éliminer les bulles d'air lors de l'imprégnation de la résine dans les fibres. Il laisse sécher et démoule à la fin.

4.7 Traiter la surface de la pale

Il remplit les trous de support du noyau avec un composite de fibre de palmier époxy, puis ponce avec :

- Un ensemble de papiers abrasifs à grain fin (par exemple, 1500, 2000, 2500, 3000, 5000 + grains) montés si possible.
- Un chiffon doux ou un tampon à polir.
- Une perceuse électrique ou un outil rotatif (réglable).
- Un composé spécialement conçu pour le polissage de l'époxy et du plastique dur.
- Des lunettes de protection.
- Une bouteille d'eau ou un vaporisateur pour mouiller la surface.

Pour commencer, mouillez la surface et utilisez du papier de verre grain 1000 pour poncer. Ensuite, passez au papier de verre grain 1500 tout en ajoutant de l'eau, en effectuant des mouvements circulaires jusqu'à ce que la surface soit lisse. Poursuivez avec du papier de verre grain 2000, puis avec du grain 2500. Après avoir essuyé la surface avec un chiffon doux pour enlever la poussière et les débris, utilisez une perceuse électrique ou un outil rotatif avec un tampon de polissage. Appliquez une petite quantité de composé de polissage sur la surface et polissez en effectuant des mouvements circulaires. Ensuite, essuyez la surface avec un chiffon propre pour éliminer l'excès de composé. Répétez le processus de polissage jusqu'à obtenir le niveau de brillance souhaité.[55]

4.8 Conclusion

Ce chapitre a détaillé l'importance du palmier dattier en résumant les techniques d'extraction des fibres. Nous avons d'abord utilisé un broyeur pour fragmenter les tiges en petits morceaux, puis les avons réduites en poudre fine. Ensuite, nous avons procédé au tamisage avec des tamis de différentes tailles (800, 500 et 160 μm) pour séparer les particules selon leur granulométrie. Cette approche mécanique nous a permis d'obtenir des particules de taille uniforme, un élément crucial pour garantir une distribution homogène dans les matériaux composites à base de fibres de palmier dattier.

La fabrication des pales nécessite beaucoup de temps et l'utilisation de matériaux spécifiques. Sous ces contraintes, le processus de fabrication devient complexe et exigeant, ce qui limite notre capacité à produire les pales.

Conclusion générale

Notre projet a couvert plusieurs aspects clés, notamment l'analyse aérodynamique, les simulations de dynamique des fluides computationnelle (CFD), l'analyse de l'interaction fluide-structure (FSI) et la conception et la fabrication de moules.

L'analyse aérodynamique a commencé par la détermination des paramètres de conception du rotor de l'éolienne à l'aide du logiciel QBlade. l'angle de calage a été fixé à $2,3^\circ$, la vitesse de vent de conception à 12 m/s, le rapport de vitesse en bout de pale à 6 et le rayon à 1,2 m. Après avoir examiné les recherches antérieures sur la sélection des profils aérodynamiques, le profil SG6041 a été choisi pour son rapport favorable portance/traînée. En utilisant la théorie de la quantité de mouvement des éléments de pale (BEM) dans QBlade, les performances du rotor ont été calculées, estimant une puissance de sortie de 2300 W, un couple de 41 Nm et un coefficient de puissance (C_p) de 0,41.

Les simulations CFD ont été effectuées à l'aide d'ANSYS Fluent, en utilisant le modèle de turbulence de Spalart-Allmaras et en menant une étude de dépendance au maillage pour déterminer le maillage approprié pour l'analyse. Les résultats CFD ont montré une puissance de sortie de 1901 W, un couple de 34,2 Nm et un C_p de 0,339, qui différaient des résultats BEM de QBlade en raison de sa non-prise en compte des effets de turbulence.

S'appuyant sur l'analyse CFD, l'(FSI) a effectué une analyse structurelle statique de la pale d'éolienne, en utilisant la distribution de pression des résultats CFD comme conditions aux limites. En considérant l'utilisation de fibre de dattier comme matériau de pale, la déformation, la contrainte équivalente et la déformation équivalente ont été calculées. La déformation maximale a été trouvée à 6 mm, indiquant la capacité de la pale à résister aux charges structurelles.

Le moule pour la pale d'éolienne a été conçu à l'aide de SW, en explorant deux méthodes de fabrication : l'usinage en acier et le moulage en silicone. Après avoir comparé les coûts et les délais, l'approche de moulage en silicone a été choisie. Cependant, en raison du manque de matériaux et de financement nécessaires, la fabrication réelle du moule n'a pas été possible. Nous avons essayé de fabriquer le moule avec des méthodes alternatives, mais le temps était contre nous pour trouver des solutions aux problèmes auxquels nous étions confrontés.

Ce projet a démontré une approche complète de la conception et de l'analyse d'un système d'éolienne, couvrant les performances aérodynamiques, l'intégrité structurelle et la conception et la fabrication du moule de pale. La combinaison de simulations numériques, de sélection de matériaux et de conception de moules met en évidence la compréhension de la nature multidisciplinaire du développement des éoliennes. Bien que la fabrication réelle du moule n'ait pas été possible, les idées acquises à partir des travaux conceptuels et analytiques fournissent une base solide pour une mise en œuvre pratique future.

Nous envisageons les perspectives suivantes :

- La fabrication de moules par usinage.
- La fabrication de tissus en fibre de palmier pour fabriquer une pale creuse composée à 100% de fibre de palmier.

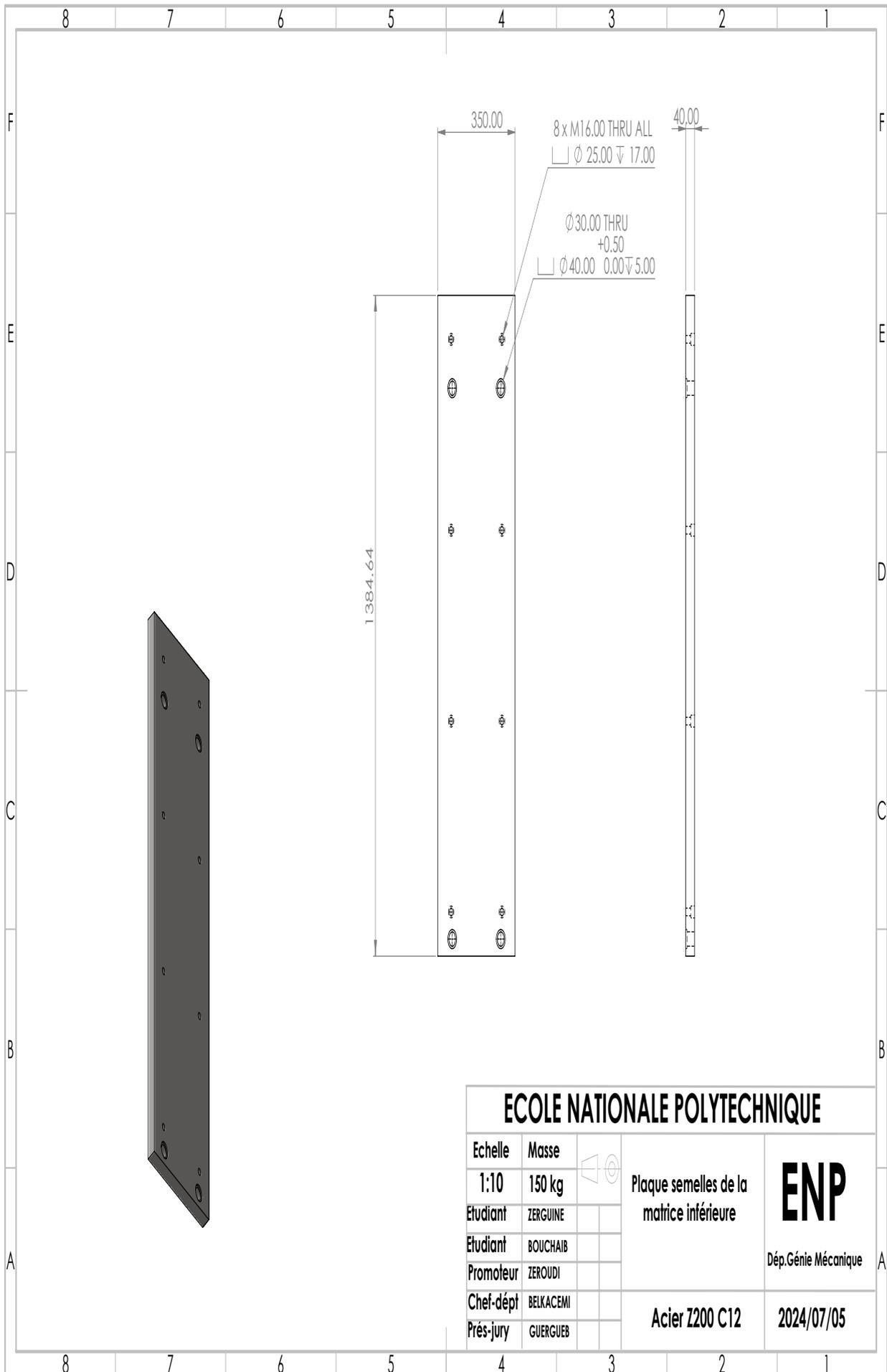
Bibliographie

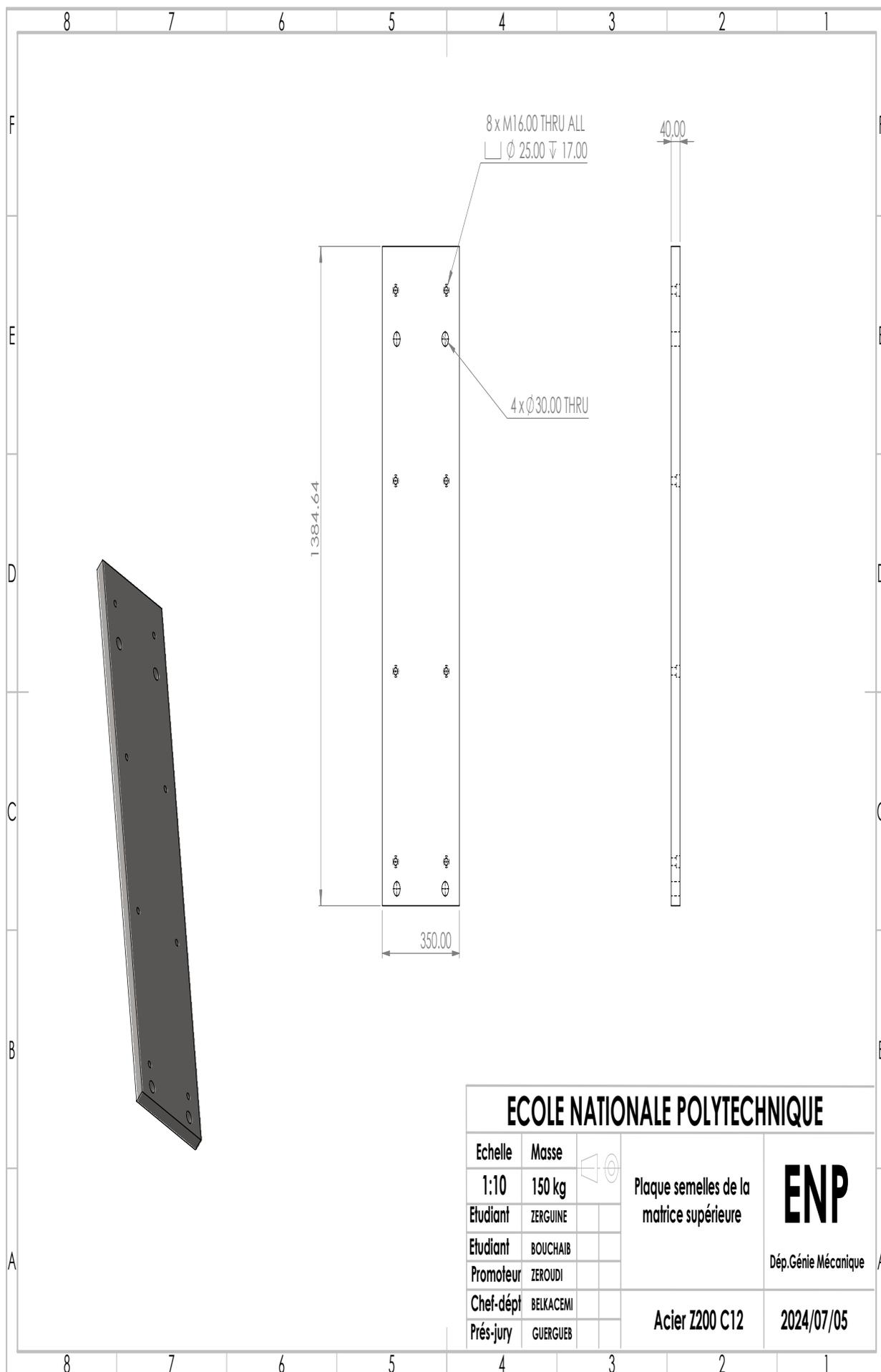
- [1] Université de M'Sila. Moules et moulage des polymères, 2024. Consulté le 12 juillet 2024.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. B. Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, and C. Nichita. Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques. Technical report, École Normale Supérieure de Cachan, France, May 2002.
- [3] International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-2. Wind Turbines—Part 2 : Small Wind Turbines*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2013.
- [4] A. Benhizia. *Optimisation du comportement mécanique en domaine non linéaire des matériaux composites par technique d'homogénéisation*. Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2015.
- [5] Abdelouahed Kriker, Gilles Debicki, Ahmed Bali, Mustapha Khenfer, and Michel Chabannet. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites*, 27 :554–564, 2005.
- [6] C. Masson. *Wind Technology*. SYS84. Department of Mechanical Engineering, École de technologies supérieure, 2011.
- [7] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024, 2024. Consulté le : 11 juillet 2024.
- [8] 5kw horizontal wind turbine generator. Rx Generators, consulté en 2024. Consulté le 5 juillet 2024.
- [9] Énergie Plus. Éoliennes. <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>. Accessed : <date>.
- [10] H. Fatmaoui. Eléments de base de l'aérodynamique des pâles d'éoliennes, année.
- [11] Automaxx Windmill. Dimensionner les petites éoliennes. <https://automaxxwindmill.com/fr/dimensionner-les-petites-eoliennes-2/>. Accessed : <date>.
- [12] Jacob Riglin. Design, modeling, and prototyping of a hydrokinetic turbine unit for river application. 2016.
- [13] Jur Mourits. Bem theory and cfd for wind turbine aerodynamics, 2016.
- [14] Pengky. Aerodynamic of blade. <https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/04-aerodynamic-of-blade/aerodynamic-of-blade.html>. Accessed : 2024-07-11.
- [15] Plastisem. Guide injection plastique, 2024.
- [16] Automated Inspection and Repair of Turbine Blades (AIRTuB) - WP1. A literature survey on remote inspection of offshore wind turbine blades, 2019.
- [17] C.W. Pereira. L'énergie éolienne : Principe de fonctionnement. Développement Viable, Mai 2006.
- [18] M. B. Pascal. Une analyse des enjeux de la filière industrielle de l'éolien en matière d'innovation, de compétitivité et d'emploi. Institut pour l'Innovation et la Compétitivité, mai 2013.
- [19] Axenne. *Petit éolien : Usages raccordés au réseau*. Conseil Général des Landes, 2008.
- [20] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Le petit éolien, September 2006. France.
- [21] B. Jean-Marie. *Matériaux composites*. Lavoisier, 5 edition, 2012.

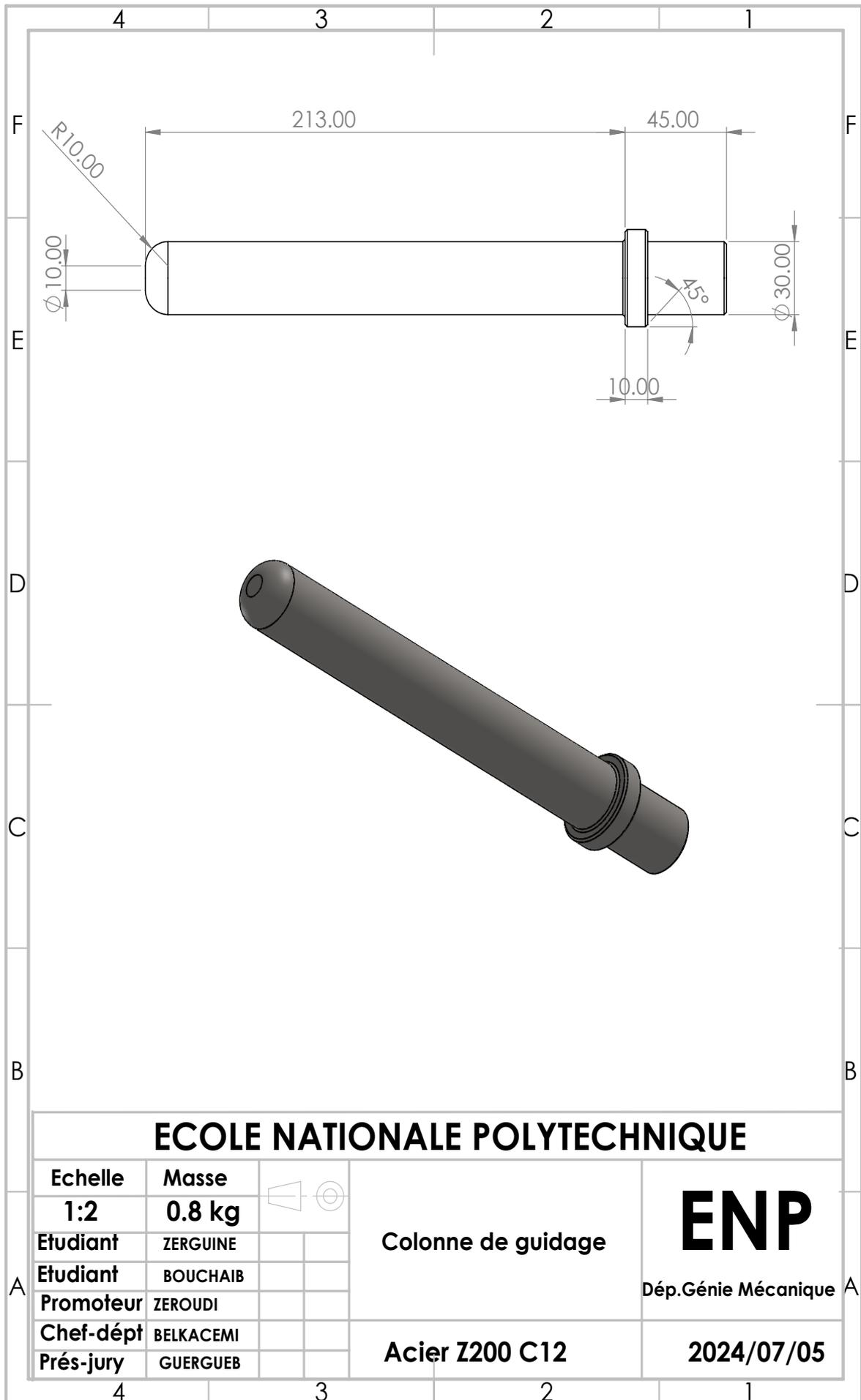
- [22] Chalothorn Thumthae. Optimum blade profiles for a variable-speed wind turbine in low wind area. *Energy Procedia*, 75 :651–657, 2015. Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future : The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015).
- [23] L. Tenghiri et al. Title of the paper. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 161 :012008, 2018.
- [24] David Wood. *Small Wind Turbines : Analysis, Design, and Application*. Springer-Verlag, London, 2011.
- [25] Ronit K. Singh and M. Rafiuddin Ahmed. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50 :812–819, 2013.
- [26] Philippe Giguere and Michael S. Selig. New airfoils for small horizontal axis wind turbines. Technical Report, 1998.
- [27] James L. Tangier and Dan M. Somers. Nrel airfoil families for hawts. Technical Report NREL/TP-442-7109, National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [28] S. Jebarose Juliyana, J. Udaya Prakash, K. Karthik, P. Pallavi, and M. Saleem. Design and analysis of naca4420 wind turbine aero-foil using cfd. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(6) :403–410, 2017.
- [29] Airfoil Tools. Sg6041 airfoil details. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=sg6041-il>. Accessed : 2024-07-03.
- [30] F4JR. Étude théorique des éoliennes. Consulté le 4 juillet 2024.
- [31] A. Tabesh and R. Iravani. Small-signal dynamic model and analysis of a fixed-speed wind farm - a frequency response approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(2) :778–787, 2006.
- [32] Ludwig Prandtl and Albert Betz. *Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik (Flüssigkeit mit kleiner Reibung; Tragflügeltheorie, I. und II. Mitteilung; Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust)*. Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Germany, 1927.
- [33] QBlade Documentation. Aerodynamics, n.d. Accessed : 2024-07-03.
- [34] Omni Calculator. Wind turbine calculator, 2024. Accessed : 2024-07-05.
- [35] J. Mo, A. Choudhry, M. Arjomandi, and Y. Lee. Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112 :11–24, 2013.
- [36] J. Mo and Y. Lee. Cfd investigation on the aerodynamic characteristics of a small sized wind turbine of nrel phase vi operating with a stall-regulated method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 :81–92, 2012.
- [37] M.O.L. Hansen, J.N. Sørensen, S. Voutsinas, N. Sørensen, and H.Aa. Madsen. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity. *Progress in Aerospace Sciences*, 42(4) :285–330, 2006.
- [38] F. M. Menter. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. In *AIAA-paper-932906*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
- [39] Philippe R. Spalart and Sanghoon R. Allmaras. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Journal*, 30(11) :306–312, 1992.
- [40] B. S. Baldwin and T. J. Barth. A one-equation turbulence transport model for high reynolds number wall-bounded flows. In *AIAA 91-0610*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991.
- [41] B. S. Baldwin and H. Lomax. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flow. In *AIAA 16th Aerospace Sciences Meeting*, Huntsville, Alabama, 1978. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [42] CFD Online. Difference between frame motion and mesh motion in fluent, 2014. Accessed : 2024-07-04.

-
- [43] ResearchGate. Initialization in fluent : Hybrid initialization or standard initialization ? https://www.researchgate.net/post/Initialization_in_Fluent_Hybrid_initialization_or_Standard_initialization.
- [44] M.M. Yelmule and Eswararao Anjuri. Cfd predictions of nrel phase vi rotor experiments in nasa/ames wind tunnel. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3 :261–269, 01 2013.
- [45] Abdelhamid Bouhelal, Arezki Smaïli, Ouahiba Guerri, and Christian Masson. Comparison of bem and full navier-stokes cfd methods for prediction of aerodynamics performance of hawt rotors. 12 2017.
- [46] Jur Mourits. Bem theory and cfd for wind turbine aerodynamics, 2014.
- [47] Meriem Benkhellat. Étude et analyse par éléments finis d’un composite renforcé par des fibres de palmier dattier.
- [48] FirstMold. What is an Injection Mold Slider ?, 2024.
- [49] André Chevalier. Guide du dessinateur industriel, 2004.
- [50] Fabrication galet.
- [51] H. Abdel-Rahman, R. Al-Juruf, F. Ahmad, and I. Alam. Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10 :175–181, 1988.
- [52] A. M. Hamed A. Alawar and K. Al-Kaabi. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B : Engineering*, 40 :601–606, 2009.
- [53] Mouna Mahfoud ; Abdelhamid Bouhelal ; Arezki Smaili ; Said Rechak ; Yacine Belkacemi ; Samir Ouchene. Development of rotor blades based on date palm fibers for wind turbines : A feasibility study. May 2023.
- [54] Youcef Djebloun. *Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales*. PhD thesis, University of Biskra.
- [55] Chill Epoxy. Comment polir de la résine époxy, 2024.

Annexes

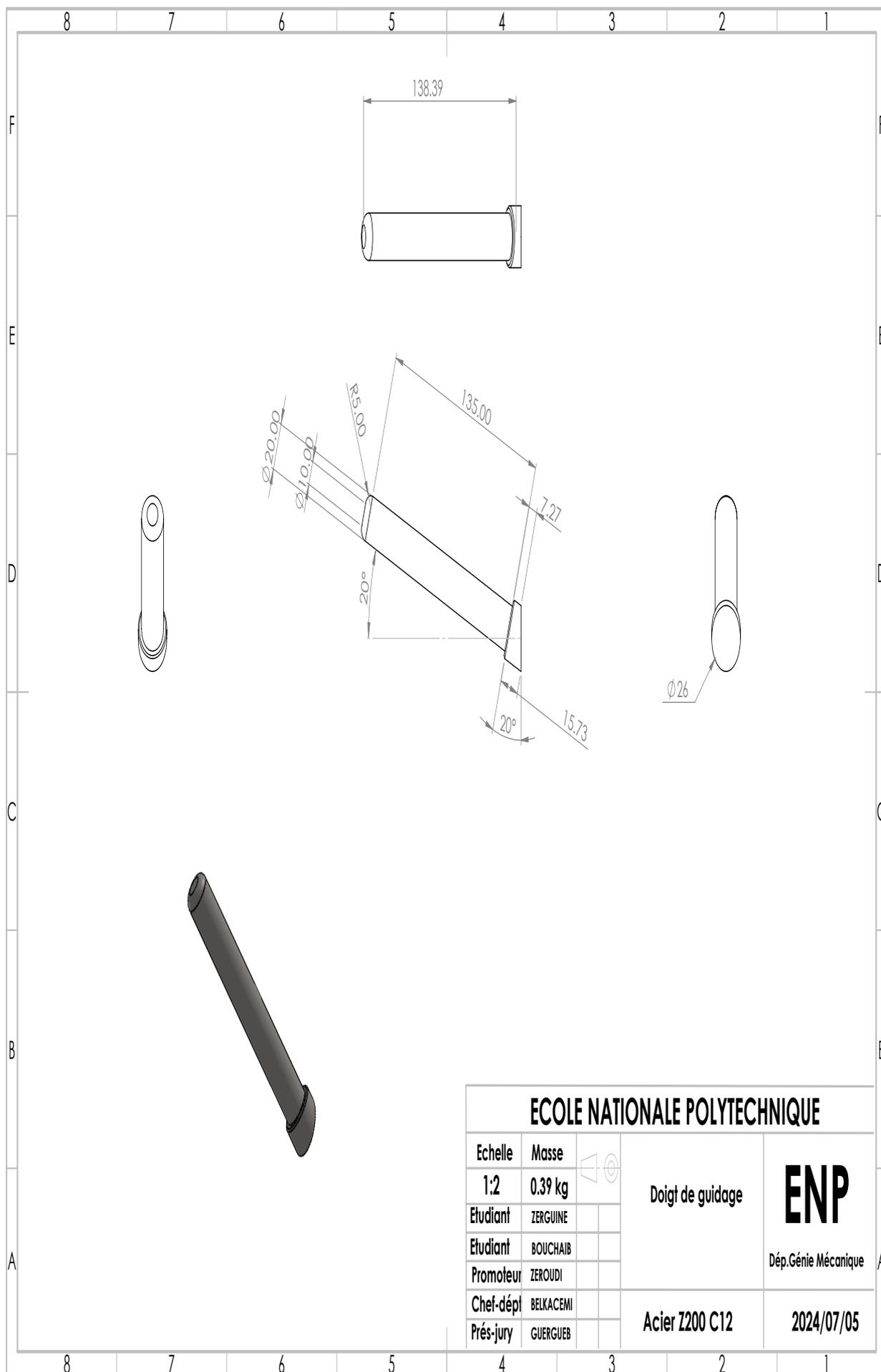




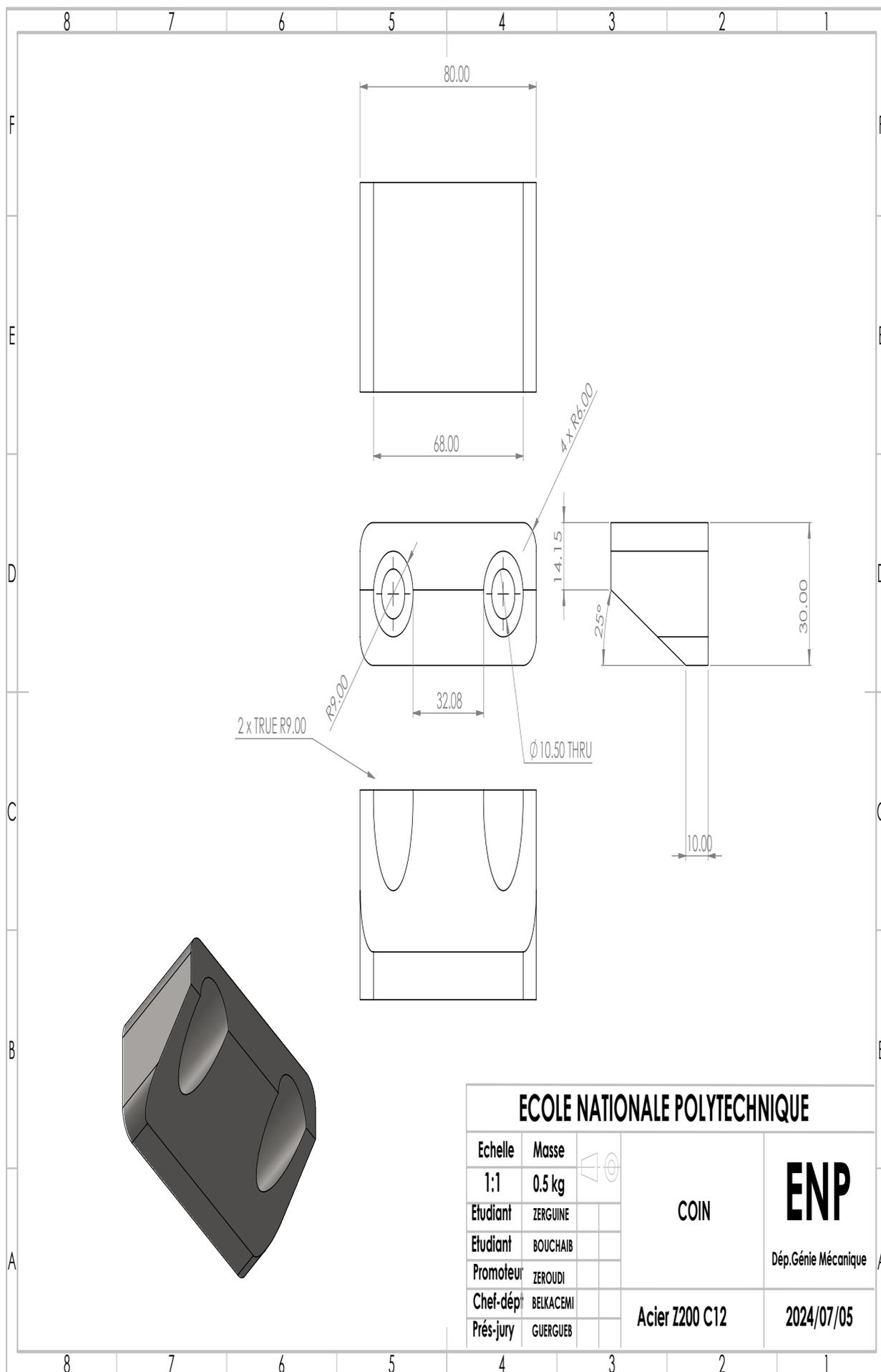


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

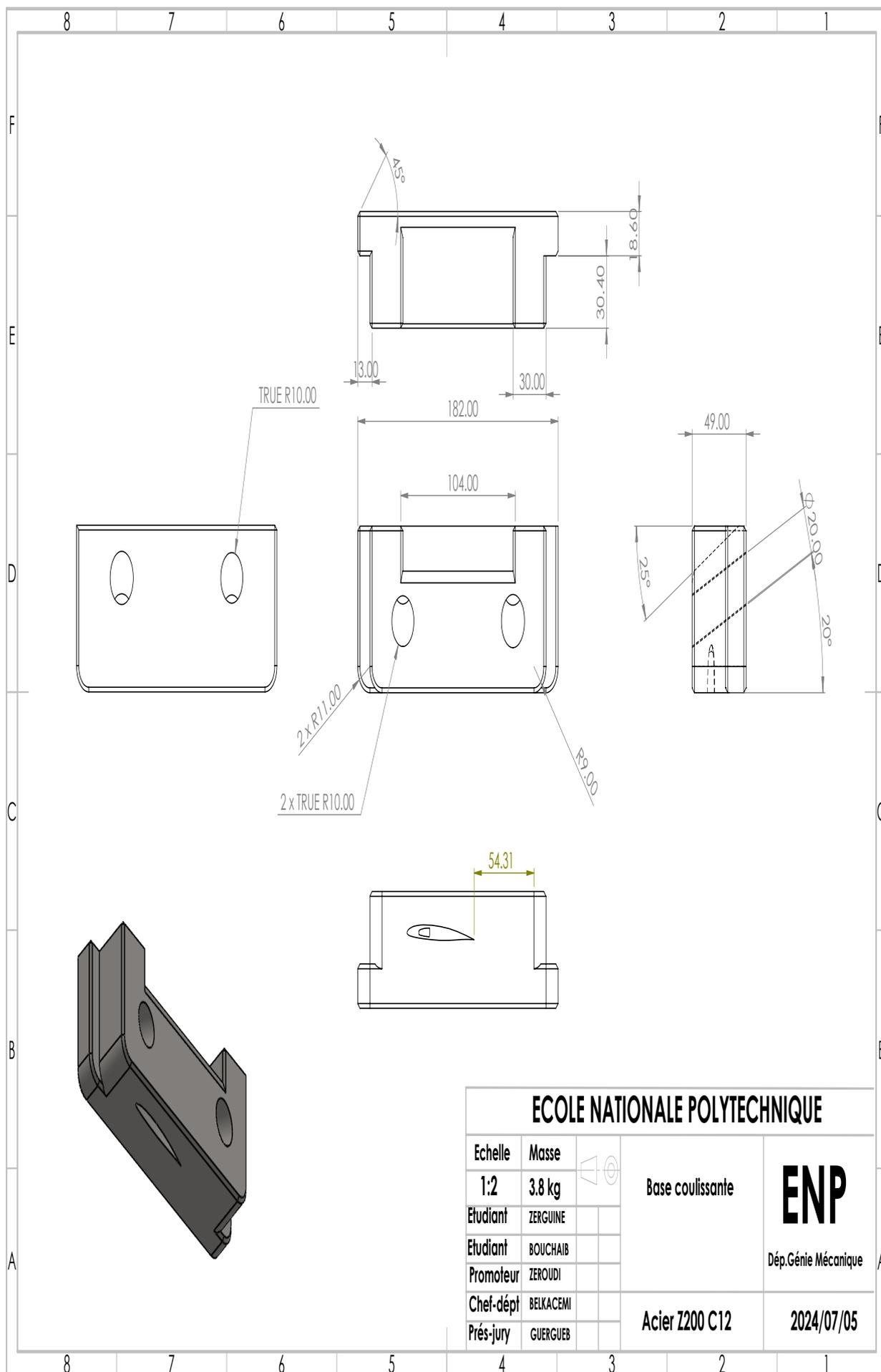
Echelle	Masse		Colonne de guidage	ENP
1:2	0.8 kg			
Etudiant	ZERGUINE			
Etudiant	BOUCHAIB			
Promoteur	ZEROUDI			
Chef-dépt	BELKACEMI			
Prés-jury	GUERGUEB			
			Acier Z200 C12	2024/07/05



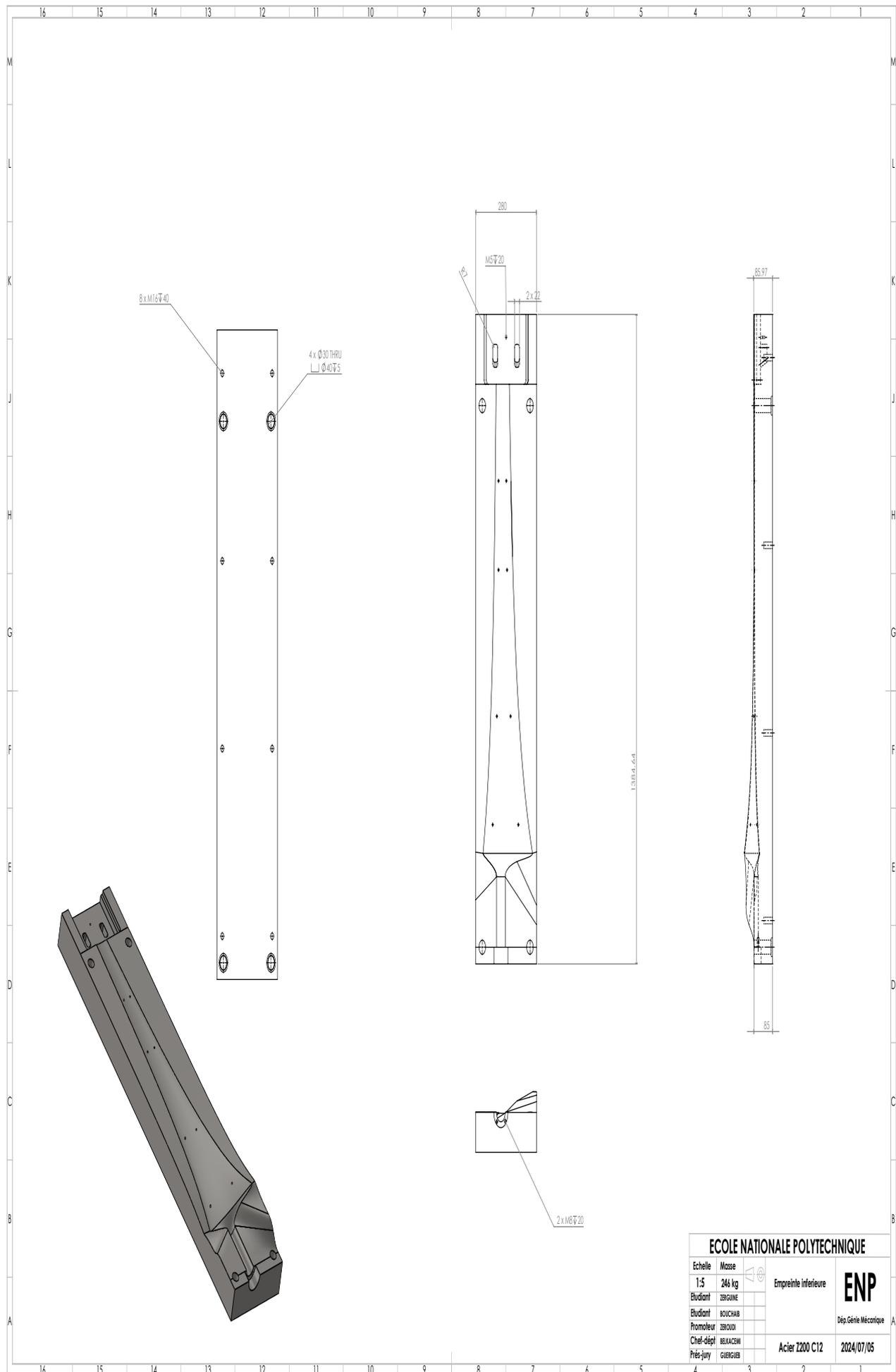
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse		Doigt de guidage
1:2	0.39 kg		
Etudiant	ZERGUINE		
Etudiant	BOUCHAIB		
Promoteur	ZEROUDI		Dép.Génie Mécanique
Chef-dépt	BELKACEMI		Acier Z200 C12
Prés-jury	GUERGUEB		
			2024/07/05



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse		COIN
1:1	0.5 kg		
Etudiant	ZERGUINE		
Etudiant	BOUCHAIB		
Promoteur	ZEROUDI		Dép.Génie Mécanique
Chef-dép	BELKACEMI		Acier Z200 C12
Prés-jury	GUERGUEB		



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse		Base coulissante Dép.Génie Mécanique
1:2	3.8 kg		
Etudiant	ZERGUINE		
Etudiant	BOUCHAIB		
Promoteur	ZEROUDI		
Chef-dépt	BELKACEMI		
Prés-jury	GUERGUEB		
		Acier Z200 C12	2024/07/05



Echelle		Masse		Empreinte inférieure		ENP
1:5		246 kg				
Étudiant	BERGANE					
Étudiant	BOUCHAB					
Promoteur	BEROUX					
Chef-dépt	BERNARDINI					
Prés-jury	GUENGUES					
				Acier Z200 C12		2024/07/05

