

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**



Université Saad Dahlab De Blida

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Département des Constructions Avions

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Structure aéronautique

THEME

***Étude théorique, numérique et expérimentale d'une éolienne HAWT : de
la modélisation BEM à la simulation CFD***

Proposé et dirigé par :

Dr. ALLOUCHE Rachid

Dr. RENANE Rachid

Réalisé par :

TAMADARTAZA Amayes

LOUAZANI Mustapha Younes

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude la plus sincère à toutes les personnes qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours de recherche et de la préparation de notre mémoire de Master. Un merci particulier à nos encadrants M. ALLOUCHE Rachid et M. RENANE Rachid pour leur encadrement précieux, leur disponibilité et leurs conseils éclairés. Nous remercions également les membres du jury pour leur temps et l'évaluation minutieuse de notre travail. Enfin, notre reconnaissance s'adresse à nos parents, amis et professeurs de l'institut pour leur soutien moral et leurs encouragements constants durant cette période intense. Votre contribution a été déterminante dans la réussite de ce mémoire. Merci infiniment à toutes et à tous !

Dédicaces

Je tiens à dédier mon mémoire de Master à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et à sa réussite. Tout d'abord, Je commence par exprimer ma gratitude à Allah, Le Tout-Puissant, pour Ses bienfaits, Sa guidance et la force qu'Il m'a donnée tout au long de ce parcours. Sans sa bénédiction, rien de tout cela n'aurait été possible. Je tiens à remercier mes chers parents, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices innombrables et le soutien indéfectible ont été les fondations sur lesquelles j'ai bâti chaque étape de ma vie. Vous demeurez mes modèles et mes sources d'inspiration. Je n'oublie pas ma sœur Sarah, pour sa présence et son soutien tout au long de cette aventure. Mes sincères remerciements vont aussi à tous mes amis Yacine, Sahbi, Amine, Tassadit et Mastan pour leur camaraderie et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Enfin, je dédie une pensée spéciale à celle dont la présence, tel un astre inébranlable, n'a jamais cessé d'illuminer mon chemin, et dont le soutien infaillible continue de porter chaque étape de mon parcours, ton dévouement et ton affection ont guidé chacun de nos pas, faisant de notre réussite un accomplissement partagé. À vous tous, architectes silencieux de cette œuvre, merci d'avoir cru en moi et de m'avoir soutenue. Ce projet n'est pas mien seul, il est le vibrant reflet de votre amour, de vos espoirs et de vos prières.

AMAYES

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

A mes parents, mon père AHMED et ma mère MATTALAH HAYET qui ne cessent de m'encourager et me soutenir tous les jours. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

A tous les membres de ma famille,

A tous mes collègues et mes chers amis : FADI, YACINE, SLENDER, ZAKAREA, TIDJANI qui étaient toujours avec moi

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu pendant ma formation, par leur assistance.

YOUNES

الموجز :

تتناول هذه المذكرة تصميم وتحسين الأداء الديناميكي الهوائي لتوربينات الرياح ذات المحور الأفقي المكثفة مع الظروف الرياحية في الجزائر. لقد تم اعتماد نهج متعدد المراحل، شمل نمذجة نظرية باستخدام طريقة عناصر الشفرة والزخم وتحسيناً للتصميم باستخدام برنامج متخصص في تصميم وتحليل التوربينات، بالإضافة إلى تحقق رقمي عبر محاكاة ديناميكيات الموائع الحسابية باستخدام أحد برامج المحاكاة التجارية الرائدة. وقد أتاح هذا التحليل اختيار مقطع هوائي عالي الأداء، وتحسين هندسة الشفرات (من حيث الوتر والالتواء)، وتقييم الأداء تحت ظروف رياح وزوايا سقوط مختلفة تمت مقارنة نتائج محاكاة ديناميكيات الموائع الحسابية بنتائج محاكاة طريقة عناصر الشفرة والزخم، وتم التحقق منها جزئياً بواسطة بيانات تجريبية. يسلط هذا العمل الضوء على أهمية التحليل البارامتري وجودة الشبكة (التجزئة الشبكية) في ضمان دقة التنبؤات الرقمية. وفي الختام، تم اقتراح توصيات تصميمية تهدف إلى تحسين الأداء الكلي للتوربينة، **الكلمات المفتاحية:** توربينات الرياح ذات المحور الأفقي، طريقة عناصر الشفرة والزخم، ديناميكيات الموائع الحسابية، ديناميكا هوائية، تصميم الشفرات

Résumé :

Ce mémoire traite de la conception et de l'optimisation aérodynamique d'une éolienne à axe horizontal adaptée aux conditions venteuses en Algérie. Une approche multi-étape a été adoptée, comprenant une modélisation théorique par la méthode des éléments de pales (BEM), une optimisation sous QBlade, et une validation numérique par simulation CFD sous ANSYS Fluent. L'analyse a permis de sélectionner un profil aérodynamique performant (S803), d'optimiser la géométrie des pales (corde, vrillage) et d'évaluer les performances sous différentes conditions de vent et d'angle d'incidence. Les résultats CFD ont été comparés aux simulations BEM, et validés partiellement par des données expérimentales. Le travail met en évidence l'importance de l'analyse paramétrique et de la qualité du maillage sur la précision des prédictions numériques. Des recommandations de conception sont proposées pour améliorer les performances globales.

Mots-clés : éolienne à axe horizontal, BEM, QBlade, CFD, ANSYS Fluent, aérodynamique, profil S803.

Abstract :

This thesis focuses on the design and aerodynamic optimization of a horizontal-axis wind turbine (HAWT) tailored to Algeria's high-wind conditions. A multi-stage methodology integrates theoretical Blade Element Momentum (BEM) modeling, parametric optimization via QBlade, and numerical validation through CFD simulations in ANSYS Fluent. Key outcomes include the selection of the high-performance S803 airfoil, optimization of blade chord and twist distribution, and performance assessment under variable wind/angle-of-attack conditions. CFD results were cross verified against BEM predictions and partially validated with experimental data, highlighting the critical roles of parametric sensitivity analysis and mesh quality in simulation accuracy. Design recommendations for enhanced performance are proposed based on aerodynamic insights.

Keywords: Horizontal-axis wind turbine, BEM, QBlade, CFD, ANSYS Fluent, aerodynamics, S803 airfoil.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	12
CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL ET ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE	15
I.1. INTRODUCTION	16
I.2. L'ENERGIE EOLIENNE	16
I.2.1. Historique	16
I.2.2. Éoliennes à axe vertical (VAWT)	17
I.2.2.1. Le rotor de SAVONIUS	18
I.2.2.2. Le rotor de DARRIEUS	18
I.2.2.3. Caractéristiques	19
I.2.3. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)	19
I.2.3.1. Éoliennes à axe horizontal amont	19
I.2.3.2. Éoliennes à axe horizontal aval	19
I.2.3.3. Classification selon la vitesse de fonctionnement	20
I.2.3.4. Classification selon la taille	20
I.2.3.5. Composants d'une éolienne HAWT :	22
I.2.4. Principe de fonctionnement :	23
I.2.5. Principes aérodynamiques d'une pale :	23
I.2.6. Théorie de Betz :	24
I.2.7. Domaine de fonctionnement d'une éolienne :	28
I.2.8. Application des éoliennes :	28
I.2.9. Avantages et inconvénients :	29
I.3. L'EOLIEN EN ALGERIE :	29
I.3.1. Gisement éolien en Algérie :	30
I.4. TRAVAUX ANTERIEURS :	31
I.5. CONCLUSION	32
CHAPITRE 2 : MODELISATION AERODYNAMIQUE DE L'EOLIENNE PAR LA METHODE BEM ...	33
II.1. INTRODUCTION	34
II.2. PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA THEORIE BEM	34
II.2.1. Introduction à la Théorie BEM	34
II.2.2. Principe de la BEM	34
II.3. MODELISATION MATHEMATIQUE :	35
II.4. CALCUL DES PARAMETRES AERODYNAMIQUES	40
II.4.1. Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale	40
II.4.2. Calcul de la forme optimale de la pale	42
II.4.3. Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor	43
II.5. CARACTERISTIQUES DE NOTRE EOLIENNE	45
II.5.1. Géométrie :	45
II.5.2. Vitesse du vent : $V_0 = 6 \text{ m/s}$	45
II.5.3. Densité de l'air : $\rho = 1.1836 \text{ kg/m}^3$	45
II.5.4. Vitesse de rotation du rotor : $\Omega = 15,71 \text{ rad/s}$	46
II.6. INTEGRATION DU LOGICIEL QBLADE :	46
II.6.1. Présentation du logiciel QBlade	46
II.6.2. Objectifs de L'utilisation de QBlade	47
II.6.3. Intégration dans le domaine de l'aérodynamique	47
II.6.4. Implémentation de la méthode BEM dans QBlade	47
II.6.5. Avantages de QBlade	48

II.6.6. Inconvénients de QBlade	48
II.7. CHOIX DES PROFILS AERODYNAMIQUES	49
II.7.1. Comparaison des profils aérodynamiques.....	50
II.7.2. Analyse Xfoil :	51
II.7.3. Analyse BEM rotor :	54
II.8. CONCLUSION	56
CHAPITRE 3 : SIMULATION NUMERIQUE CFD SOUS ANSYS FLUENT ET ANALYSE	
PARAMETRIQUE	58
III.1. INTRODUCTION.....	59
III.2. MODELE MATHEMATIQUE UTILISE	59
III.2.1. Équations de Navier-Stokes	59
III.2.2. Modèles de turbulence	60
III.3. HYPOTHESES DE MODELISATION	61
III.4. MODELE DE TURBULENCE	61
III.4.1. Solveur utilisé	62
III.5. SIMULATION 2D	62
III.5.1. Géométrie 2D	62
III.5.2. Maillage 2D.....	63
III.5.3. Conditions aux limites.....	65
III.5.4. Étude paramétrique	65
III.5.5. Résultats	65
III.6. SIMULATION 3D	70
III.6.1. Géométrie 3D	70
III.6.2. Maillage 3D.....	72
III.6.3. Conditions aux limites.....	73
III.6.4. Simulation et convergence.....	73
III.6.5. Post-traitement des résultats	74
III.6.6. Discussion des résultats de simulation 3D	76
III.7. CONCLUSION	77
CHAPITRE 4 : VALIDATION EXPERIMENTALE ET COMPARAISON AVEC LES RESULTATS	
NUMERIQUES	78
IV.1. INTRODUCTION.....	79
IV.2. IMPRIMANTE 3D UTILISEE : RAISE3D PRO2 PLUS	79
IV.2.1. Caractéristiques techniques principales	79
IV.2.2. Matériau utilisé : PLA (Acide Polylactique).....	79
IV.2.3. Principe de similitude et réduction d'échelle	80
IV.2.4. Déroulement de l'impression	80
IV.2.5. Problèmes rencontrés et modifications apportées	81
IV.3. INSTALLATION EXPERIMENTALE EN SOUFFLERIE.....	81
IV.3.1. Présentation de la soufflerie utilisée.....	81
IV.3.2. Caractéristiques principales	82
IV.3.3. Montage de la pale et configuration des essais	82
IV.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX	83
IV.4.1. Discussion des résultats expérimentaux.....	85
IV.4.2. Difficultés expérimentales et facteurs d'erreur affectant les mesures	86
IV.5. CONCLUSION	87
CHAPITRE 5 : ANALYSE COMPARATIVE GLOBALE ET PERSPECTIVES.....	88

V.1. INTRODUCTION.....	89
V.2. RESULTATS XFOIL / SIMULATION ANSYS 2D	89
V.2.1. <i>Présentation des résultats</i>	89
V.2.2. <i>Analyse du coefficient de portance CL</i>	90
V.2.3. <i>Analyse du coefficient de traînée CD</i>	91
V.2.4. <i>Analyse du rapport CL/CD</i>	91
V.2.5. <i>Conclusion locale</i>	91
V.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX / SIMULATION ANSYS 3D	91
V.3.1. <i>Présentation des résultats</i>	92
V.3.2. <i>Analyse des Coefficient de portance CL</i>	93
V.3.3. <i>Analyse coefficient de traînée CD</i>	94
V.4. RESULTATS DES PERFORMANCES DE L'EOLIENNE	96
V.5. DISCUSSION GENERALE DES ECARTS ET VALIDATION.....	98
V.5.1. <i>Apports de chaque méthode</i>	98
V.5.2. <i>Interprétation des écarts</i>	99
V.6. RECOMMANDATIONS DE CONCEPTION FINALE	99
V.7. PERSPECTIVES	100
V.8. CONCLUSION	100
CONCLUSION GENERALE	102
BIBLIOGRAPHIE	105
ANNEXES.....	108

Liste des figures

FIGURE I.1 MOULINS FRANÇAIS.....	17
FIGURE I.2 PREMIERE EOLIENNE CREEE PAR CHARLES ET BRUSH	17
FIGURE I.3 EOLIENNE DE SAVONIUS.....	18
FIGURE I.4 EOLIENNE DE DARRIEUS.....	18
FIGURE I.5 SCHEMA D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL.....	20
FIGURE I.6 DIFFERENT PROCESSUS DE CONVERSION D'ENERGIE [8]	23
FIGURE I.7 MODELISATION DU ROTOR EOLIEN PAR UN DISQUE ACTUATEUR [9]	25
FIGURE I.8 COURBE LIMITE DE BET	27
FIGURE I.9 ZONES DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE	28
FIGURE I.10 ATLAS VENT DE L'ALGERIE A 10 M DU SOL [13].....	30
FIGURE II.1 VARIATION DE LA VITESSE ANGULAIRE DE L'AIR EN AVAL DU ROTOR.	35
FIGURE II.2 DECOMPOSITION DES FORCES AERODYNAMIQUES SUR UN ELEMENT DE PALE	37
FIGURE II.3 ORGANIGRAMME DES ETAPES DE CALCUL	45
FIGURE II.4 L'INTERFACE DU QBLADE	46
FIGURE II.5 VISUALISATION 3D DU ROTOR DANS QBLADE.....	48
FIGURE II.6 GRAPHE DU COEFFICIENT DE PORTANCE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE	51
FIGURE II.7 GRAPHE DU COEFFICIENT DE TRAINEE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE	52
FIGURE II.8 GRAPHE DE LA FINESSE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE	52
FIGURE II.9 GRAPHE DES COEFFICIENT DE PUISSANCE CP EN FONCTION DU TSR	54
FIGURE II.10 GRAPHE DES PUISSANCES EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT	55
FIGURE III.1 GEOMETRIE DU PROFIL AERODYNAMIQUE S803 IMPORTEE DANS ANSYS DESIGNMODELER.....	63
FIGURE III.2 MAILLAGE HYBRIDE STRUCTURE/NON STRUCTURE GENERE AUTOUR DU PROFIL	64
FIGURE III.3 CONTOURS DE LA VITESSE (M/S) AUTOUR DU PROFIL S803 A L'AIDE DE LA SIMULATION CFD	66
FIGURE III.4 DEFINITION DES PARAMETRES D'ENTREE ET DE SORTIE POUR LE CALCUL DES COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES	67
FIGURE III.5 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PORTANCE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE	69
FIGURE III.6 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE TRAINEE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE	69
FIGURE III.7 GEOMETRIE DE LA PALE SUR SOLIDWORKS	71
FIGURE III.8 GEOMETRIE DE LA PALE DONS LE DOMAINE D'ETUDE	72
FIGURE III.9 MAILLAGE 3D NON STRUCTURE GENERER DE LA PALE.....	73
FIGURE III.10 AFFICHAGE DU CONTOUR DE PRESSION SUR LA SURFACE DU PROFIL	74
FIGURE III.11 RESUME DES COEFFICIENTS EXTRAITS (CL, CD) DIRECTEMENT DEPUIS LE SOLVEUR FLUENT..	75
FIGURE III.12 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PORTANCE CL EN FONCTION DE L'ANGLE D'ATTAQUE A	76
FIGURE III.13 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE TRAINEE CD EN FONCTION DE L'ANGLE D'ATTAQUE A	76
FIGURE IV.1 IMPRESSION DE LA PALE EN COURS SUR L'IMPRIMANTE RAISE3D PRO2 PLUS.....	81
FIGURE IV.2 SOUFFLERIE SUBSONIQUE TECQUIPMENT AF1600 UTILISEE POUR L'ESSAI EXPERIMENTAL	82
FIGURE IV.3 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PORTANCE CL EN FONCTION DE L'ANGLE D'ATTAQUE A	84
FIGURE IV.4 ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE TRAINEE CD EN FONCTION DE L'ANGLE D'ATTAQUE A	85
FIGURE IV.5 FLEXION DE LA PALE PENDANT LE TEST DE SOUFFLERIE	87
FIGURE V.1 COMPARAISON XFOIL/ANSYS 2D DES COEFFICIENTS CL	89
FIGURE V.2 COMPARAISON XFOIL/ANSYS 2D DES COEFFICIENTS CD.....	90
FIGURE V.3 COMPARAISON XFOIL/ANSYS 2D DES COEFFICIENTS CL/CD	90
FIGURE V.4 COMPARAISON EXPERIMENTAL / ANSYS 3D DES COEFFICIENTS CL.....	92
FIGURE V.5 COMPARAISON EXPERIMENTAL / ANSYS 3D DES COEFFICIENTS CD	92
FIGURE V.6 COEFFICIENT DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION.....	96
FIGURE V.7 VARIATION DE LA PUISSANCE EXTRAITE EN FONCTION DE LA VITESSE SPECIFIQUE	97

Liste des tableaux

TABLEAU I.1 CLASSIFICATION DES EOLIENNES SUIVANT LA TAILLE ET ORDRE DE GRANDEUR ASSOCIE [7].....	21
TABLEAU I.2 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES EOLIENNES [11]	29
TABLEAU II.1 COMPARAISON DE CERTAINS PROFILS.....	50
TABLEAU II.2 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES AERODYNAMIQUES DES PROFILS	53
TABLEAU II.3 RESULTATS COMPARATIFS DES PERFORMANCES SIMULEES SOUS QBLADE	55
TABLEAU II.4 RESULTATS COMPARATIFS DE LA PUISSANCE EXTRAITE POUR UNE VITESSE DE VENT DE 6M/S SIMULEE SOUS QBLADE	56
TABLEAU III.1 RESULTATS L'ETUDE DE SENSIBILITE DU MAILLAGE	64
TABLEAU III.2 COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES OBTENUS POUR CHAQUE ANGLE D'INCIDENCE (CL, CD).....	68
TABLEAU III.3 RESULTATS DE LA SIMULATION 3D DES COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES	75
TABLEAU IV.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX DES COEFFICIENTS AERODYNAMIQUES EN FONCTION DE L'ANGLE D'ATTAQUE	84
TABLEAU V.1 RECAPITULATIF DE L'ANALYSE DES PERFORMANCES DE L'EOLIENNE	97
TABLEAU V.2 RECAPITULATIF DES POINTS FORTS ET LIMITES DES APPROCHES	99

Listes des abréviations et des symboles

Liste des abréviations

CFD	Computational Fluid Dynamics
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
BEM	Blade Element Momentum
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
SST	Shear Stress Transport
TSR	Tip Speed Ratio

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
C_L	Coefficient de portance	-
C_D	Coefficient de traînée	-
C_p	Coefficient de puissance	-
D	Force de traînée	N
L	Force de portance	N
T	Poussée ou effort axial	N
F_x	Force tangentielle	N
F_y	Force axiale	N
Re	Nombre de Reynolds	-
a	Facteur d'interférence axial	-
a'	Facteur d'interférence tangentiel	-
α	Angle d'incidence	° (degré)
β	Angle de vrillage	° (degré)
φ	Angle d'écoulement	° (degré)
C	Corde du profil	m
ρ	Densité de l'air	kg/m ³
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
μ	Viscosité dynamique	Pa·s ou kg/(m·s)
λ	Vitesse spécifique	-
P	Puissance extraite	W (Watt)
Q	Couple mécanique	N·m
Ω	Vitesse angulaire du rotor	rad/s
V	Vitesse du vent libre	m/s
V_0	Vitesse du vent en amont	m/s
V_1	Vitesse du vent en aval	m/s

Introduction générale

Ces dernières années, le besoin croissant de produire de l'énergie de manière durable a poussé au développement de nombreuses technologies innovantes. En effet, l'épuisement progressif des combustibles fossiles prévu dans les prochaines décennies, associé aux problèmes environnementaux causés par les méthodes classiques de production d'électricité, a créé une situation critique. Cette situation a obligé tous les acteurs du domaine énergétique à chercher de nouvelles solutions pour produire de l'énergie. Ils se sont donc tournés principalement vers les énergies renouvelables, en particulier le solaire et l'éolien, notamment les éoliennes à axe horizontal (HAWT) qui se sont imposées comme une pierre angulaire de la transition énergétique mondiale. Leur efficacité aérodynamique, leur maturité technologique et leur capacité à exploiter les ressources éoliennes à grande échelle en font des acteurs incontournables dans la lutte contre le changement climatique et la diversification des mix énergétiques.

En Algérie, où un Plan national de développement des énergies renouvelables (EnR) est adopté en 2011 et révisé en 2015 visant une production de 5010 MW des éoliennes en 2030, les HAWT représentent une solution stratégique pour réduire la dépendance aux hydrocarbures et répondre à une demande croissante en électricité. Cependant, optimiser leur conception, notamment la géométrie des pales, reste un défi scientifique majeur, nécessitant des approches intégrées combinant modélisation théorique, simulation numérique et validation expérimentale.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en proposant une méthodologie complète pour la conception et l'optimisation d'une pale d'éolienne HAWT. Repartie en cinq chapitres, une introduction et une conclusion.

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter brièvement l'énergie éolienne en générale, en parlant sur les éoliennes à a axe vertical VAWT et axe horizontal HAWT en suite nous avons expliqué les principes physiques régissant les HAWT (théorie de Betz, Zones de fonctionnement), enfin exploration du potentiel éolien et le gisement en Algérie sera mené.

- Dans le deuxième chapitre, Nous débuterons par une introduction approfondie à la Théorie des Éléments de Pale et de la Quantité de Mouvement (BEM), que nous avons choisie pour son équilibre entre précision et efficacité de calcul. Ensuite, nous passerons aux équations fondamentales de la BEM, en définissant les paramètres clés comme les facteurs d'interférence et les angles, justifiant le choix des profils aérodynamiques et calculant la corde et le vrillage optimaux pour maximiser la puissance. Enfin nous procéderons à une analyse comparative des profils aérodynamiques via XFOIL et des simulations BEM avec QBlade, ce qui nous permettra de conclure sur le choix optimal du profil pour notre projet.

- Dans le troisième chapitre, nous proposerons une étude numérique du profil aérodynamique choisi en utilisant des simulations CFD sous ANSYS Fluent dans des conditions réalistes, modélisant l'écoulement de l'air en utilisant les équations de Navier-Stokes et le modèle de turbulence k- ω SST. Ensuite, nous réaliserons des simulations 2D et 3D détaillées, incluant une étude paramétrique des angles d'incidence et l'intégration du vrillage de la pale. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus, tels que les coefficients de portance et de traînée.

- Dans le quatrième chapitre, nous procéderons à une campagne d'essais expérimentaux afin de valider nos simulations numériques CFD tridimensionnelles par confrontation avec des données expérimentales obtenues en veine d'essais aérodynamiques.

Pour ce faire, nous réaliserons une maquette de pale d'éolienne à échelle réduite par fabrication additive utilisant du filament PLA, en ajustant les paramètres d'écoulement pour assurer le respect de la similitude de Reynolds. Nous déterminerons expérimentalement les coefficients aérodynamiques de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence sur une plage angulaire définie.

- Pour le dernier chapitre, nous allons réaliser une comparaison approfondie des résultats aérodynamiques obtenus par XFOIL, les simulations ANSYS 2D et 3D, et des essais expérimentaux en soufflerie, en observant les écarts des coefficients de portance et de traînée obtenus de chaque méthode. Cette approche multiméthodes nous permettra de valider globalement le comportement de la pale et de confirmer la fiabilité de la simulation CFD 3D comme outil prédictif.

Chapitre 1 : Contexte général et état de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

Sur le plan thermodynamique, l'énergie se définit comme la capacité d'un système physique à effectuer un travail. Les sources énergétiques exploitées par l'Homme constituent un pilier fondamental de son développement anthropique et technologique. Historiquement, la maîtrise de ces ressources a engendré des transformations sociétales majeures, depuis l'utilisation primitive du feu jusqu'aux systèmes énergétiques complexes contemporains.

Ce chapitre propose une revue chronologique des avancées scientifiques et techniques liées aux énergies renouvelables, analysant leur évolution depuis les civilisations antiques (émergence des premiers convertisseurs hydrauliques et éoliens) jusqu'à la diversification de ses modalités d'exploitation au XXI^e siècle. L'objectif est d'établir un cadre épistémologique reliant les innovations technologiques aux enjeux socio-environnementaux, tout en soulignant les ruptures et continuités dans l'optimisation de ces systèmes durables.

I.2. L'énergie éolienne

I.2.1. Historique

L'histoire de l'énergie éolienne, bien qu'ancrée dans les civilisations antiques (Perse, Chine, Égypte), n'a vu son application à la production d'électricité devenir significative qu'après la crise pétrolière de 1974. Cette période a catalysé un essor, illustré par le "Wind-rush" californien des années 1980 et l'expansion rapide du marché des systèmes connectés au réseau en Europe, aux États-Unis, en Asie et en Afrique du Nord à la fin des années 1980 [1]. Tandis que les premiers moulins du IX^e siècle transformaient le vent en travail mécanique et que Charles F. Brush créait la première éolienne génératrice d'électricité en 1888, des complications techniques et la baisse du coût du pétrole ont entraîné un déclin au début du XX^e siècle. Le choc pétrolier de 1973 a ravivé l'industrie, menant à des stratégies de développement divergentes entre l'Europe du Nord (R&D progressive) et les États-Unis/Allemagne (grands projets comme le MOD 2). Actuellement, le secteur se distingue entre un petit éolien au marché limité et un grand éolien [2], ce dernier ayant connu une croissance exponentielle depuis les années 1990 (atteignant 10 MW offshore). Cette dynamique est portée par la fluctuation des coûts des fossiles, la demande énergétique croissante et la prise de conscience environnementale, appuyée par des avancées technologiques (nouveaux matériaux) malgré les défis logistiques. Le grand éolien, y compris l'offshore aux vents plus constants, domine le secteur mondial et attire de nouveaux acteurs majeurs comme la Chine et l'Inde [2].



Figure I.1 Moulins français

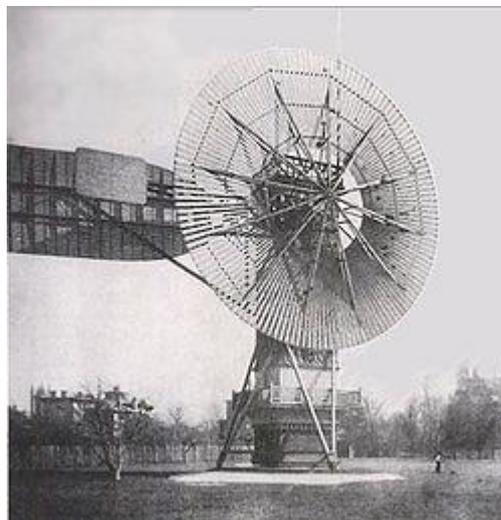


Figure I.2 Première éolienne créée par Charles et Brush

I.2.2. Éoliennes à axe vertical (VAWT)

Elles ont constitué les premières installations employées pour la génération d'électricité. Plusieurs versions ont été créées, mais peu ont réussi à parvenir au niveau de l'industrialisation. L'usage de ce modèle d'éolienne a progressivement diminué en raison des divers désavantages qu'il a engendrés. L'abandon en faveur des éoliennes à axe horizontal a été motivé par les problèmes d'aéroélasticité et l'importante utilisation du sol. Ils sont catégorisés en deux groupes selon leur caractéristique aérodynamique : [3]

I.2.2.1. Le rotor de SAVONIUS

Le rotor de SAVONIUS, du nom de son créateur et protégé en 1925, est conçu sur la base du principe de « traînée différentielle ». Ce genre d'aérogénérateur exploite la traînée et se compose de sections cylindriques qui s'opposent. Un couple se forme, ce qui met alors en mouvement le générateur. Le démarrage de ces appareils se fait à une vitesse plutôt lente, environ 2 m/s. [4]

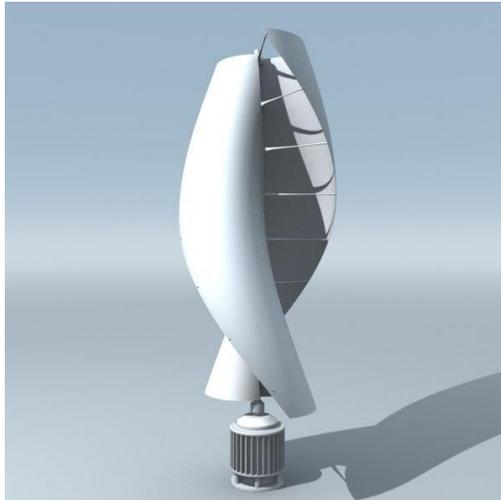


Figure I.3 Eolienne de Savonius

I.2.2.2. Le rotor de DARRIEUS

La turbine Darrieus, brevetée par l'ingénieur français Georges Jean Marie Darrieus en 1926, se distingue par sa forme de "fouet à œufs" et fonctionne sur le principe des forces de portance variables. Son principal inconvénient réside dans son incapacité à s'auto-démarrer à faible vitesse de vent, exigeant un vent relativement élevé pour son déclenchement. Bien qu'elle puisse atteindre des puissances significatives (comme l'unité de 4 MW au Canada en 1987), son développement a été freiné par la délicatesse et la maîtrise insuffisante de son mécanisme. Malgré ces défis historiques, le potentiel de production énergétique élevé de la Darrieus en fait un sujet toujours pertinent pour la recherche future. [4]



Figure I.4 Eolienne de Darrieus

I.2.2.3. Caractéristiques

Les éoliennes à axe vertical (VAWT), telles que les types Savonius et Darrieus, sont confrontées à plusieurs défis techniques. Leur principale lacune est leur incapacité à s'auto-démarrer ; cela nécessite des solutions d'assistance comme la superposition décalée de rotors pour les Savonius, ou l'ajout d'une petite éolienne Savonius de démarrage ou l'utilisation du générateur en mode moteur pour les Darrieus. Un inconvénient majeur réside également dans leur implantation au ras du sol, les exposant à des vitesses de vent plus faibles et à des turbulences accrues dues aux irrégularités du terrain, ce qui dégrade significativement leur efficacité. Par ailleurs, leur principe de fonctionnement induit des variations constantes des charges aérodynamiques sur les pales, rendant ces machines très sensibles aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour les VAWT de grande capacité, l'haubanage requiert un espace au sol considérable.

I.2.3. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Ces turbines éoliennes sont les héritières directes des moulins à vent, où les pales, généralement en bois et composées de voiles rigides, ont été par la suite transformées en éléments qui ressemblent fortement à des ailes d'avion. Ces ailes, positionnées dans le vent, ne font pas ici office de soutien pour un avion, mais elles ont pour fonction de produire un couple moteur ascendant qui entraîne des agencements mécaniques tels qu'une génératrice électrique, une pompe, etc. [5]

I.2.3.1. Éoliennes à axe horizontal amont

Le vent se déverse sur l'avant des pales et s'oriente vers la nacelle. La formule « amont » requiert des pales rigides pour ne pas risquer de heurter la tour, ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure, de plus l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour, aussi l'éolienne doit être munie d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours tourné face au vent [5]

I.2.3.2. Éoliennes à axe horizontal aval

Ces dispositifs sont les plus simples puisqu'ils positionnent naturellement le rotor (derrière la nacelle) et ils offrent également de meilleures performances pour les puissances élevées : pas de besoin de gouverne, les efforts de manœuvre sont moindres et une stabilité supérieure. L'éolienne « en aval » possède théoriquement une capacité d'auto-orientation, cependant, il est nécessaire de mettre en place un mécanisme d'orientation pour le détritage des câbles. Un des bénéfices majeurs de la configuration « aval » est la flexibilité accrue des pales du rotor qui permet une construction plus légère et une réduction également du diamètre du pylône. Cependant, on remarque d'importantes vibrations dues à la présence des pales derrière le mât. De plus, lorsque la pale traverse l'ombre du pylône, elle subit une variation intense, ce qui accroît le risque de rupture de la pale. C'est pour cette raison que les éoliennes de cette catégorie sont relativement peu communes. [5]

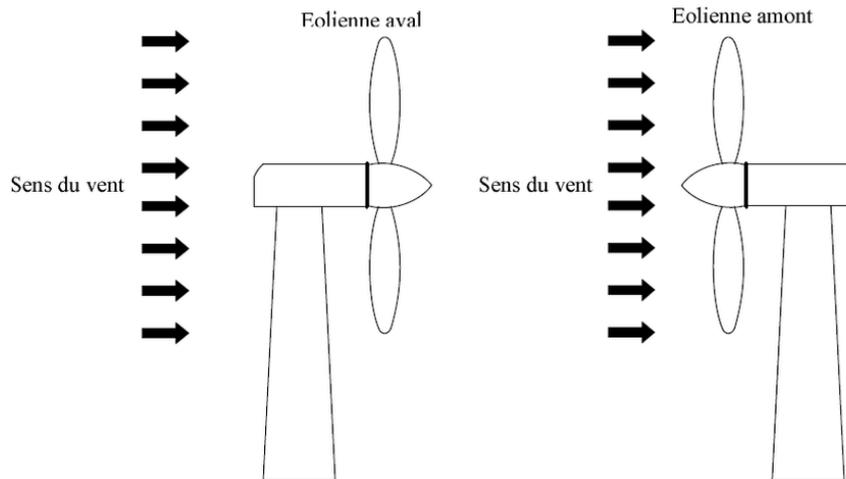


Figure I.5 Schéma d'une éolienne à axe horizontal

I.2.3.3. Classification selon la vitesse de fonctionnement

a- Les éoliennes à rotation lentes

Les éoliennes à axe horizontal à rotation lente sont des machines multipales (20 à 40) de petit diamètre (jusqu'à 10 m), historiquement répandues en zones rurales pour le pompage d'eau en raison de leur masse et faible vitesse de rotation. Plus récemment, elles sont utilisées pour la production d'électricité sur des embarcations. Elles démarrent à de faibles vitesses de vent (2 à 3 m/s), avec un couple de démarrage proportionnel au nombre et diamètre des pales. Cependant, leur coefficient de puissance, après avoir atteint rapidement un maximum, chute tout aussi vite, ce qui les rend moins efficaces par rapport à la limite de Betz due à leur faible vitesse finale. [6]

b- Les éoliennes à rotation rapide

Les éoliennes à rotation rapide sont la catégorie dominante actuelle pour la production d'électricité, appréciées pour leur haute efficacité, leur légèreté et leur coût réduit par rapport aux modèles plus lents. Généralement dotées d'une à trois pales (parfois de 60 m pour les grandes puissances), les éoliennes tri pales sont les plus répandues, offrant le meilleur compromis entre la maîtrise des vibrations et un prix acceptable. Leur coefficient de puissance est élevé, bien qu'il diminue avec la vitesse, et leur rendement est faible en dessous de 3 m/s. Elles se caractérisent par des vitesses de rotation nettement supérieures aux machines plus anciennes, d'autant plus importantes que le nombre de pales est limité. [6]

I.2.3.4. Classification selon la taille

La classification des éoliennes repose sur des catégories de taille qui sont principalement définies par leur puissance. Il est important de noter que la puissance d'une éolienne est directement liée à la surface balayée par son rotor (dépendante du diamètre du rotor), et non directement à la hauteur de son mât. Cependant, pour les

éoliennes de grande taille, une pratique courante recommande que la hauteur du mât (L) soit égale au diamètre du rotor (D), établissant ainsi un lien indirect entre hauteur et puissance. Le texte indique qu'un tableau (non fourni ici) présente ces dénominations de taille et les puissances associées, mais il s'agit toujours d'ordres de grandeur. Il est crucial de comprendre que la puissance d'une éolienne n'est pertinente que si la vitesse du vent à laquelle elle est délivrée est également spécifiée. [7]

Tableau I.1 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé [7]

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Aire balayée (m ²)	Puissance (kW)
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

- **Micro-éoliennes** : Conçues pour des besoins énergétiques très limités et des applications isolées ou mobiles (ex: embarcations de plaisance, caravanes, stations de surveillance autonomes).
- **Mini-éoliennes** : Utilisées principalement pour la recharge de batteries sur des sites non raccordés au réseau. Les modèles les plus puissants de cette catégorie peuvent également assurer une alimentation domestique autonome (ex: habitations isolées).
- **Éoliennes domestiques** : Couvrent un large éventail de diamètres de rotor, généralement entre 3 et 10 mètres. Elles sont spécifiquement conçues pour les particuliers ou les petites installations résidentielles.

- **Éoliennes petites commerciales** : Destinées à l'alimentation électrique de petites entreprises ou d'exploitations agricoles. Cette gamme représente actuellement une part relativement faible du marché en termes de modèles produits.
- **Éoliennes moyennes commerciales** : Typiquement déployées pour des applications commerciales et industrielles, telles que l'alimentation de fermes, d'usines, ou comme premières unités dans de petits parcs éoliens.
- **Éoliennes grandes commerciales (Utility-Scale)** : Correspondent aux machines de très grande puissance installées dans les parcs éoliens modernes, contribuant significativement à la production d'électricité à l'échelle du réseau national et caractérisées par leur efficacité élevée.

1.2.3.5. Composants d'une éolienne HAWT :

- a. **Les pâles** : elles sont capteurs de l'énergie cinétique et la transmettent au rotor.
- b. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pâles pour réguler la vitesse de rotation.
- c. **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pâles au multiplicateur
- d. **Multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- e. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice .il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents
- f. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif).
- g. **L'alternateur** est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- h. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pâles.
- i. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- j. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

- k. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- l. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

I.2.4. Principe de fonctionnement :

Les pales aérodynamiques de l'éolienne se chargent de capter l'énergie cinétique du vent, freinant ainsi son mouvement. Effectivement, les pales de l'éolienne sont exposées à un système de pressions qui entraîne la rotation du rotor en freinant le vent par-dessus et par-dessous. Ce mouvement génère une énergie mécanique qui est ensuite transmise à l'arbre de la génératrice pour produire de l'électricité exploitable. Un arbre de transmission couplé à un système d'engrenage, qui agit comme une boîte de vitesses, se situe entre le rotor et la génératrice.

De ce fait, cet équipement amplifie la vitesse de rotation en cas de vent léger et la ralentit lors de vents forts afin de maintenir une vitesse stable et prévenir la destruction de l'éolienne. Les éoliennes de faible puissance (inférieure à 10 kW) ne sont généralement pas équipées d'un mécanisme d'engrenage. La génératrice et le rotor sont fixés l'un à l'autre, ce qui signifie qu'ils tournent à la même vitesse. [8]

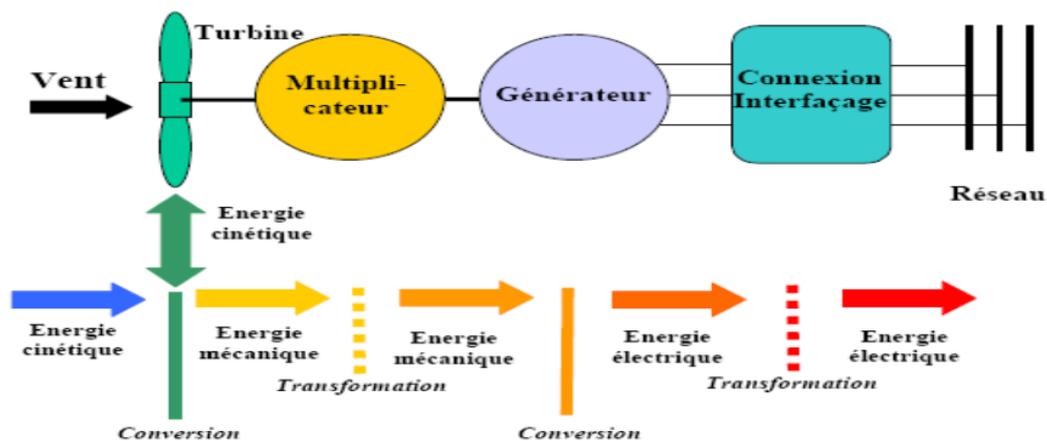


Figure I.6 Différent processus de conversion d'énergie [8]

I.2.5. Principes aérodynamiques d'une pale :

- **Vitesse de démarrage** : Vitesse de vent pour laquelle le rotor commence à tourner
- **Vitesse Nominale** : Vitesse de vent à laquelle l'éolienne fournit sa puissance nominale
- **Vitesse d'arrêt** : Vitesse de vent à laquelle l'éolienne est arrêtée pour cause de vent trop fort
- **Emplanture** : Extrémité de la pale en contact avec le rotor
- **Extrados** : Surface supérieure de la pale

- **Intrados** : Surface inférieure de la pale
- **Bord d'attaque** : le point à l'avant du profil aérodynamique
- **Bord de fuite** : le point à l'arrière du profil aérodynamique.
- **Corde du profil** : la ligne droite reliant les bords d'attaque et de fuite. La longueur de la corde ou tout simplement la corde notée c est la dimension de référence de la section de profil
- **Angle d'incidence** : Angle formé par la corde du profil de la pale et le vent relatif
- **Angle d'attaque** : Synonyme d'angle d'incidence
- **Angle de calage** : Angle formé par le plan de rotation et la corde de la pale
- **Gauchissement géométrique** : Angle entre la ligne de corde à l'emplanture et la ligne de corde au bout de la pale
- **Plan de rotation** : Plan dans lequel le rotor tourne
- **Vent relatif** : Direction du vent tel que la pale le « voit » lors de sa rotation
- **Portance** : Force aérodynamique perpendiculaire à la corde du profil de l'aile et orientée vers l'extrados, perpendiculaire à la direction du vent relatif et le coefficient de portance C_L .
- **Traînée** : Force aérodynamique constituant une résistance au mouvement de la pale, la traînée dans la même direction que le vent relatif et le coefficient de traînée C_D nommé coefficient de pénétration dans l'air.
- **Finesse** : Rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée
- **Vitesse spécifique** : Rapport entre la vitesse tangentielle due à la rotation de la pale et la vitesse du vent.

1.2.6. Théorie de Betz :

La théorie élémentaire de Betz (1929) [1], basée sur le modèle du disque actuateur, constitue l'un des fondements théoriques essentiels dans la conception des rotors éoliens. Cette approche permet de déterminer, pour une éolienne idéalisée, la poussée générée par l'action du vent ainsi que l'influence du rotor sur la dynamique de l'écoulement incident.

Le modèle du disque actuateur se définit, en mécanique des fluides, comme une surface de discontinuité où s'exercent des forces surfaciques sur l'écoulement. [9] Cette représentation extrêmement simplifiée s'appuie sur les hypothèses fondamentales suivantes :

- Fluide considéré comme homogène et incompressible ;
- La géométrie complexe du rotor est négligée et remplacée par un disque de diamètre D sans épaisseur ;
- Écoulement en régime stationnaire et irrotationnel ;
- Répartition uniforme de la poussée sur l'ensemble de la surface du disque rotor ;
- Égalité des pressions statiques entre l'amont lointain, l'aval lointain et la pression atmosphérique ambiante ;
- Disque actuateur sans rotation propre.

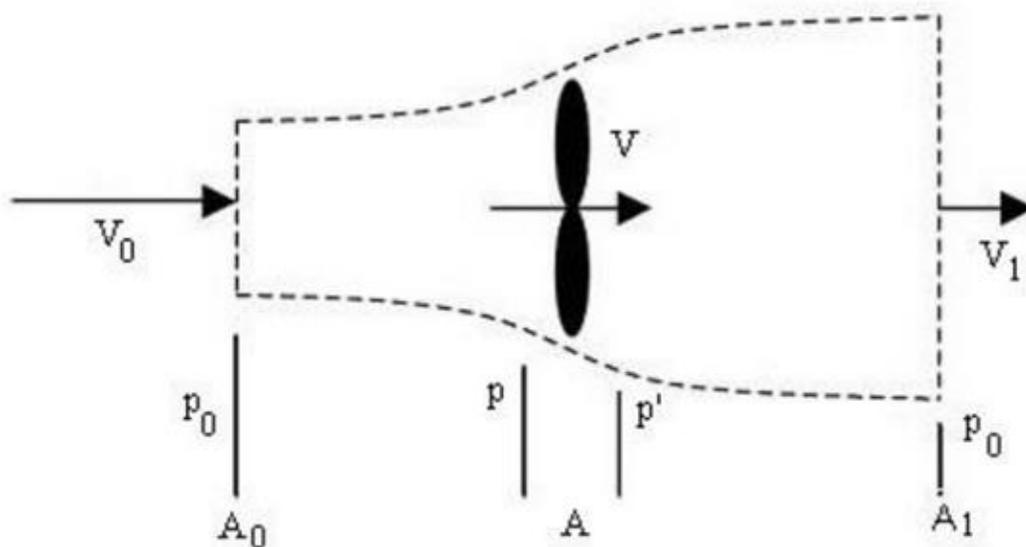


Figure I.7 Modélisation du rotor éolien par un disque actuateur [9]

En appliquant le principe de conservation de la masse à cet écoulement, on établit que le débit massique reste constant à travers les différentes sections du flux, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$V^0 A^0 = V A = V^1 A^1 = V_i A_i \quad (I.1)$$

Où \mathbf{V} représente la vitesse du vent et \mathbf{A} la surface de la section correspondante, aux différentes positions avant, au niveau, et après le rotor.

Aussi en appliquant le théorème de variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = m(V_0 - V_1) = \rho A V(V_0 - V_1) \quad (I.2)$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (I.3)$$

Et celle en aval :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (I.4)$$

En combinant (I.3) et (I.4), on obtient :

$$p - p' = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (I.5)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A(p - p') \\ T &= \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (I.6)$$

Les deux équations (I.2) et (I.6) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (I.7)$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la moyenne des deux vitesses celle en amont et celle en aval du rotor ; La puissance extraite du vent est

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - V_1^2) V = \frac{1}{2} \rho A V (V_0^2 - V_1^2) \quad (I.8)$$

Le coefficient de puissance C_p est défini comme le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite :

$$C_p = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_0^3 A} \quad (I.9)$$

Introduisant le facteur d'interférence axial "a" défini comme la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor :

$$V = (1 - a)V_0 \quad (I.10)$$

En utilisant l'équation (I.7) :

$$V_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (I.11)$$

En substituant V_1 et V dans (I.6), on obtient :

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \rho A V_0^2 4 a(1 - a) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4 a(1 - a)^2 \end{aligned} \quad (I.12)$$

L'expression de C_p devient :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (I.13)$$

La valeur maximale de théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom de limite de Betz, peut être obtenue en prenant la dérivée de C_p par rapport à a égal à zéro :

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1 - 3a^2) \text{ et } \frac{\partial C_p}{\partial a} = 0 \quad (I.14)$$

$a = 1/3$ Cela donne :

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0,59259$$

La limite théorique de Betz établit que le rendement maximal d'une éolienne idéale atteint 59,3 %, valeur inatteignable en pratique en raison des pertes aérodynamiques, de la rotation du sillage et des imperfections géométriques. Bien que ce modèle unidimensionnel simplifié ne modélise pas l'écoulement rotationnel de l'air, il constitue un cadre conceptuel fondamental pour comprendre l'extraction d'énergie. Pour qu'une hélice convertisse l'énergie cinétique du vent, une décélération de ce dernier est nécessaire lors de sa traversée du rotor ; dans le cas idéal, cette réduction correspond aux 2/3 de la vitesse amont. L'équation de continuité démontre que cette décélération s'accompagne d'une contraction du tube de flux : la section amont représente 2/3 de la surface balayée par le rotor, tandis que la section aval en double la taille, illustrant le compromis entre conservation du débit massique et récupération d'énergie. Ces contraintes physiques, combinées aux effets dissipatifs réels (turbulence, traînée de pression, pertes de bout de pale), limitent strictement le rendement des éoliennes modernes à environ 45 % dans des conditions opérationnelles optimales. [10]

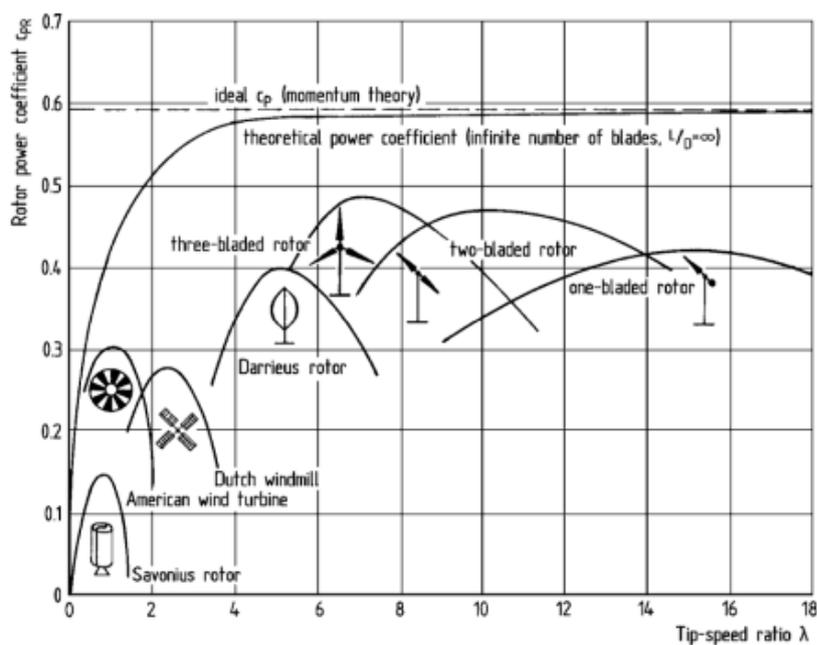


Figure I.8 Courbe limite de Bet

I.2.7. Domaine de fonctionnement d'une éolienne :

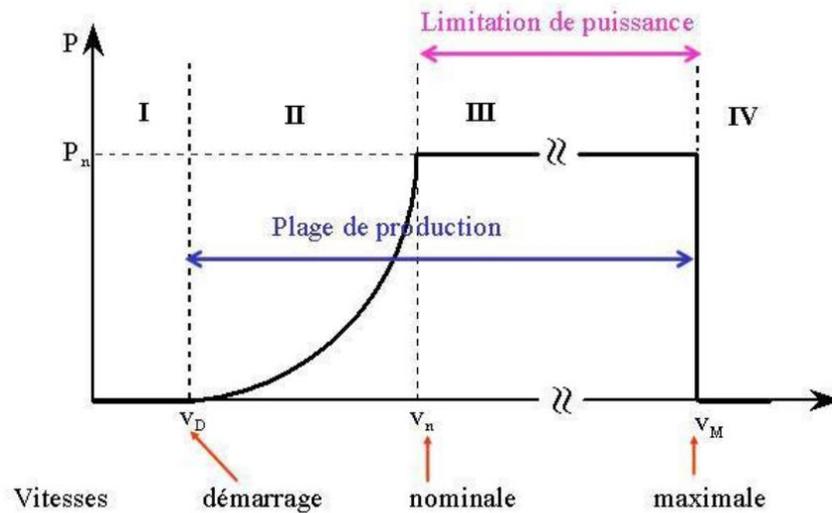


Figure I.9 Zones de fonctionnement d'une éolienne

Zone I : Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse minimale du vent de démarrage, la turbine s'arrête.

Zone II : Dans cette zone, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Zone III : A partir du régime nominal, la puissance est maintenue constante par des moyens mécaniques de limitation de la vitesse de la turbine.

Zone IV : Une fois la vitesse maximale atteinte, il est dangereux de faire tourner l'éolienne et l'éolienne doit être complètement arrêtée. [11]

I.2.8. Application des éoliennes :

Les gens s'intéressent aux éoliennes en raison de leur capacité à récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est convertie en énergie mécanique de rotation en tenant également en compte des performances de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée de deux manières principales [11]:

- Entraînement direct, par exemple pompe à eau.
- Générateur d'entraînement.

Dans le cas de la production d'énergie électrique, deux types de configurations peuvent être distingués :

- L'énergie est emmagasinée dans la batterie afin de l'utiliser ultérieurement.
- L'énergie est utilisée directement en étant injectée dans le réseau de distribution.

De là, nous voyons l'application électrique de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec des méthodes de production traditionnelles, telles que les centrales thermiques ou nucléaires conventionnelles et les barrages dans les zones dotées d'infrastructures existantes. En revanche, la production peut avoir lieu dans des lieux non connectés aux réseaux de distribution traditionnels. L'accent mis sur les possibilités offertes par l'énergie éolienne dans les zones urbanisées moins ouvertes et son application dans les pays en développement est particulièrement intéressant. Quant à la fourniture d'unités de dessalement, d'unités de cogénération diesel et de panneaux photovoltaïques

I.2.9. Avantages et inconvénients :

Tableau I.2 Avantages et inconvénients des éoliennes [11]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le vent est gratuit et inépuisable ➤ La souplesse d'utilisation ➤ L'éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton) ➤ La simplicité de sa technologie ➤ Les éoliennes permettent l'électrification en site isolé ➤ Possibilité de réduire les factures d'électricité ➤ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Risques causés par vents forts ➤ La production d'énergie a lieu en fonction du vent ➤ La nuisance sonore et visuelle ➤ La création de turbulences de l'air six fois le diamètre du rotor derrière elle ➤ La perturbation de la réception des ondes électromagnétiques ➤ La production d'énergie a lieu en fonction du vent

I.3. L'éolien en Algérie :

Le Plan national de développement des énergies renouvelables (EnR), adopté en 2011 et révisé en 2015, vise un total de 22 000 mégawatts (MW) d'électricité pour la seule consommation locale d'ici 2030. À cette fin, il prévoit de mettre en œuvre un large éventail de domaines technologiques, le photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne représentant la plus grande part, avec respectivement 13 575 MW et 5 010 MW, le reste étant réparti entre l'énergie solaire thermique (CSP), la biomasse, la production combinée de chaleur et d'électricité et l'énergie géothermique. Après la révision du plan national en 2015, la part de l'énergie éolienne est passée de 2 000 MW à 5 010

MW, se classant actuellement au deuxième rang derrière le photovoltaïque et loin devant les autres domaines. [12]

I.3.1. Gisement éolien en Algérie :

Pour la première fois, la vitesse moyenne du vent en Algérie a été déterminée grâce à une recherche initiale basée sur les informations satellitaires du Laboratoire d'Énergie Éolienne du CDER. Cette carte illustrant la vitesse a deux buts principaux : le premier consiste à repérer les larges zones offrant de prometteuses opportunités pour l'exploitation de l'énergie éolienne. Il est également important de noter la diversité relative des ressources présentes dans le pays. Le sud enregistre des vitesses plus importantes que le nord, notamment le sud-ouest où les vitesses excèdent 4 m/s et atteignent même plus de 6 m/s dans la zone d'Adrar.

Pour ce qui est du nord, la vitesse moyenne a généralement tendance à être faible. Cependant, on note l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Béjaïa et Annaba, ainsi que sur les hauts plateaux de Tiaret et dans la région restreinte allant du nord de Béjaïa au sud de Biskra. Il est toutefois important de noter que la vitesse du vent fluctue selon les saisons, surtout dans le cadre de l'installation de systèmes de transformation de l'énergie éolienne. Un graphique saisonnier a clairement montré que l'automne et l'hiver sont moins venteux. Toutefois, il convient de souligner que la région de Tiaret est une exception où la vitesse est plus basse en été qu'en hiver comparée à celle de l'Adrar. [13]

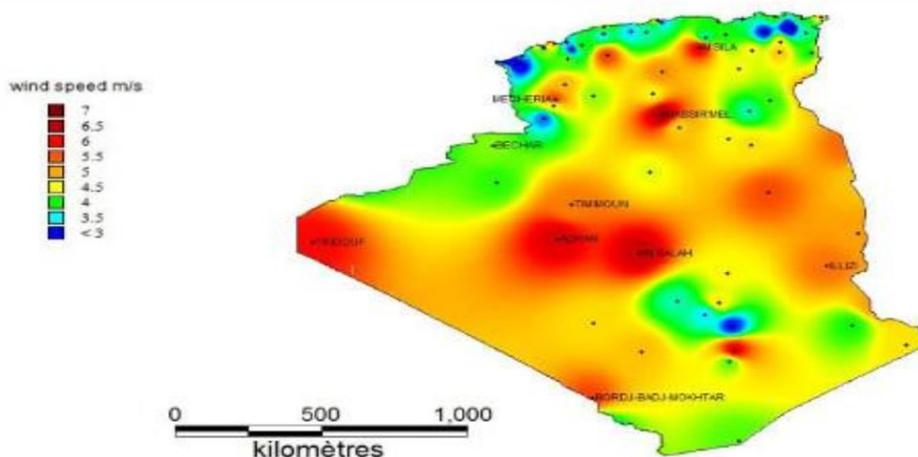


Figure I.10 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol [13]

I.4. Travaux antérieurs :

Bien que moins prédominantes sur le marché, les éoliennes à axe vertical (VAWT) font l'objet de recherches significatives pour surmonter leurs défis inhérents. Les Sandia National Labs (années 1970-1990) ont jeté les bases des VAWT industrielles, découvrant le décrochage dynamique et fournissant des bases de données essentielles aux modèles modernes. Sur le plan théorique, les travaux d'Islam et al. (2008) ont permis d'affiner la compréhension des modèles aérodynamiques des VAWT Darrieus. Plus récemment, des projets comme VERTICLIMB (Canada, 2020) explorent l'intégration urbaine avec des VAWT modulaires à pales hélicoïdales, tandis qu'Aerogenerator X (Royaume-Uni, 2022) propose un design offshore en V inversé pour une stabilité et un rendement amélioré. La durabilité est également au cœur des préoccupations, illustrée par la thèse de Dubois (2023) sur les pales VAWT en composites recyclables avec une réduction de CO₂ de 40%. Enfin, le projet FLOATECH (UE, 2023) utilise l'IA et le contrôle actif pour optimiser les VAWT flottantes, améliorant la production et réduisant les oscillations, ce qui témoigne des efforts continus pour maximiser leur potentiel.

En revanche, l'évolution des éoliennes à axe horizontale est jalonnée de contributions majeures, de la compréhension théorique à l'innovation technologique. La limite de Betz (1919) a posé la première pierre en établissant un plafond physique de conversion de 59,3%, un principe fondamental qui rappelle les contraintes intrinsèques de l'extraction d'énergie éolienne. Les années 1970-1980 ont vu la série MOD de la NASA (1975-1987) valider les premiers rotors modernes, dont le MOD-2 de 2,5 MW, fournissant des données cruciales pour les codes de simulation et résolvant des problèmes comme le flottement des pales. L'ouvrage de Hansen (2008), "Aerodynamics of Wind Turbines", est devenu une référence pour la synthèse des principes aéroélastiques, essentielle à la conception des grandes éoliennes. Plus récemment, le développement a été accéléré par des projets clés : le modèle de référence NREL 5MW de Jonkman et al. (2009) est devenu un benchmark mondial pour la R&D, permettant la validation de nombreux outils de simulation. Le projet européen UPWIND (2006-2011) a poussé les frontières de la conception avec des pales de 10-20MW et des modèles de charges extrêmes pour l'éolien offshore profond, intégrant de nouveaux composites et le contrôle actif. L'innovation se tourne désormais vers la durabilité et l'intégration : le projet ZEBRA (2023) a développé la première pale 100% recyclable, réduisant son empreinte carbone, tandis que l'initiative WindBoost (USA, 2023) explore des générateurs à supraconducteurs pour des éoliennes de 20MW+, promettant légèreté et rendement accru. Enfin, le projet ABC4Wind (Danemark, 2024) utilise l'IA et le CFD pour optimiser les profils de pales et réduire le bruit aérodynamique, un facteur crucial pour l'acceptation sociale. L'ensemble de ces avancées, de la théorie fondamentale aux solutions de pointe, a collectivement propulsé l'éolien vers sa position actuelle de source d'énergie majeur.

I.5. Conclusion

Ce chapitre fondateur a retracé l'évolution historique et technique de l'énergie éolienne, des premiers moulins antiques aux turbines multi-mégawatts contemporaines, établissant la dominance des configurations à axe horizontal (HAWT) par leur efficacité aérodynamique remarquable près de la limite de Betz et leur fiabilité structurelle avérée, tout en détaillant leur architecture complexe (système de pales, multiplicateur, générateur), leurs mécanismes de conversion énergétique, leurs domaines opératoires et leur classification selon la puissance et la vitesse de rotation. L'analyse du potentiel éolien algérien, caractérisé par des gisements ventés supérieurs à 6 m/s dans le Sud-Ouest et un objectif national ambitieux de 5 010 MW d'ici 2030, confirme le positionnement stratégique de cette technologie dans la transition énergétique nationale face aux défis climatiques et à la raréfaction des ressources fossiles, constituant ainsi le socle théorique indispensable aux développements d'optimisation aérodynamique et de validation expérimentale qui structureront les chapitres suivants.

Chapitre 2 : Modélisation aérodynamique de l'éolienne par la méthode BEM

II.1. Introduction

La conception et l'optimisation des éoliennes nécessitent une compréhension approfondie de leur aérodynamique. Ce chapitre est dédié à l'étude théorique des performances du rotor, en utilisant la Théorie des Éléments de Pale et de la Quantité de Mouvement (BEM). Cette méthode est choisie pour son compromis entre précision et efficacité de calcul, essentiel pour évaluer l'impact des choix de conception. Nous y dériverons les équations BEM, définirons les paramètres clés (facteurs d'interférence, angles), justifierons les profils aérodynamiques sélectionnés, et détaillerons le calcul de la corde et du vrillage optimaux. Le chapitre se conclura par la validation des résultats théoriques et une discussion des limites du modèle BEM, offrant ainsi une base solide pour l'analyse aérodynamique.

II.2. Principes Fondamentaux de la Théorie BEM

II.2.1. Introduction à la Théorie BEM

La théorie de l'élément de pale (BET) complète la théorie de l'écoulement axial en tenant compte de la rotation de l'air induite par le mouvement des pales. Contrairement à la théorie axiale qui suppose un écoulement purement axial, la BET intègre les effets tridimensionnels dus à la rotation, ce qui permet une modélisation plus réaliste des efforts aérodynamiques en adoptant les hypothèses suivantes : [14]

- **Écoulement axial en amont** : Loin du rotor, l'écoulement est purement axial (pas de rotation).
- **Rotation de l'air au niveau du rotor** : L'air acquiert une vitesse angulaire ω due à la rotation des pales.
- **Symétrie axiale** : L'écoulement est symétrique autour de l'axe du rotor.
- **Absence d'interférences entre éléments** : Les éléments de pale sont traités indépendamment (approche bidimensionnelle).

II.2.2. Principe de la BEM

La méthode fondamentale repose sur la segmentation des pales en éléments indépendants, chaque segment étant modélisé comme un profil aérodynamique discret soumis aux lois de la dynamique des fluides. À l'instar d'une aile d'avion, chaque élément génère localement une portance L (perpendiculaire au vent relatif) et une traînée D (parallèle à l'écoulement), dont les contributions combinées régissent la conversion d'énergie cinétique en couple mécanique. L'écoulement autour d'un élément est caractérisé par la vitesse relative du vent, l'angle d'incidence entre la corde du profil et le flux, ainsi que les coefficients aérodynamiques spécifiques C_L et C_D . Les forces résultantes sont décomposées dans le référentiel rotor en : une composante axiale F_y (induisant des contraintes structurales parallèles au vent), et une composante tangentielle F_x (génératrice du couple de rotation). L'intégration de ces grandeurs le long de la pale permet de quantifier le couple total sur l'arbre, la puissance

mécanique extraite $P = \omega \cdot \Gamma$, et les efforts structuraux critiques pour le dimensionnement, formant ainsi la base de la Théorie de l'Élément de Pale (BEM) appliquée à l'optimisation du coefficient de puissance C_p . [15]

II.3. Modélisation mathématique :

Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué aux pales peuvent être obtenues par une analyse de l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire infinitésimal. Cet élément, de rayon r , d'épaisseur dr et de section dA

$$dA = 2\pi r dr \quad (II.1)$$

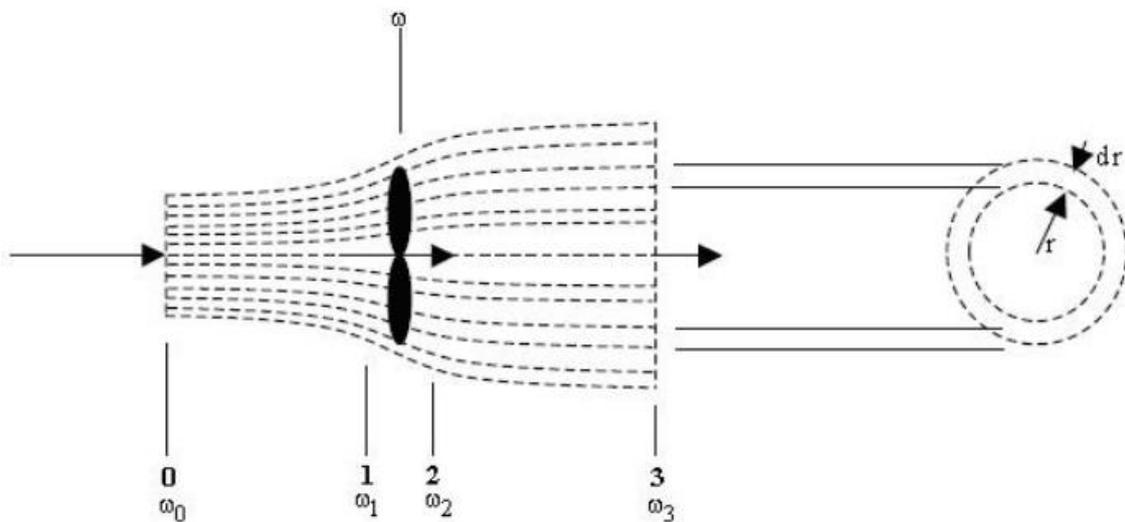


Figure II.1 Variation de la vitesse angulaire de l'air en aval du rotor.

La variation de la quantité de mouvement de l'air dans la direction tangentielle, donne la force tangentielle qui s'exerce sur la pale :

$$dF_t = m dV_t = \rho V dA \omega r \quad (II.2)$$

$$dF_t = 2\pi \rho V \omega r^2 dr \quad (II.3)$$

La force axiale générée dans la section annulaire est

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \quad (II.4)$$

Le couple généré dans la section annulaire est

$$dQ = 2\pi \rho V \omega r^3 dr \quad (II.5)$$

Puisque la puissance est :

$$P = Q \Omega \quad (II.6)$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est

$$dP = 2\pi \rho \Omega V \omega r^3 dr \quad (II.7)$$

Où : ω est la vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air dans le plan du rotor

Le couple total et la puissance totale deviennent

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (II.8)$$

$$P = 2\pi\rho\Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (II.9)$$

Pour pouvoir calculer la puissance et le couple (P et Q), il faut déterminer ω . Pour cela on introduit le facteur d'interférence tangentiel a' , défini comme suit :

$$\omega = a'\Omega \quad (II.10)$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a « $\omega_0 = 0$ »

En appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 0 et la section 1, située juste avant le plan du rotor, on obtient :

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (II.11)$$

Cela implique que : $\omega_1 = 0$.

On peut conclure que la vitesse angulaire de l'écoulement de l'air subit une discontinuité au niveau du plan du rotor, cela est dû au couple exercé sur le rotor.

La valeur de la vitesse angulaire de l'air au niveau du plan du rotor est la moyenne de celles situées juste avant et derrière le rotor

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (II.12)$$

Donc :

$$\omega_2 = 2\Omega a' \quad (II.13)$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre les sections respectives 2 et 3, on obtient :

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (II.14)$$

Etant donné que : $r_1 \approx r_2 \approx r$

L'équation (II.14) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (II.15)$$

Donc :

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (II.16)$$

$$\omega_3 = 2 \Omega a' \left(\frac{r}{r_3} \right)^2$$

Puisque le rayon du sillage s'élargit en s'éloignant du rotor en aval, l'équation (II.16) démontre une diminution corrélative et plus rapide de la vitesse de rotation de l'air dans cette même direction. Ce phénomène confirme le comportement précédemment supposé concernant la dissipation de l'énergie de rotation dans le sillage.

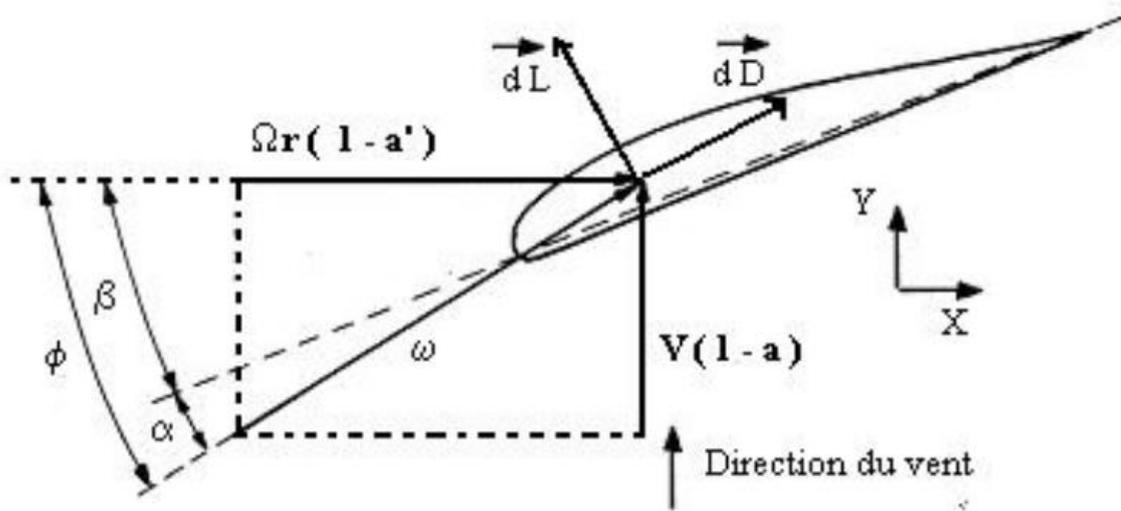


Figure II.2 Décomposition des forces aérodynamiques sur un élément de pale

Soit W est la vitesse relative de l'air

$$dq = \frac{1}{2} \rho W^2 dA \quad (II.17)$$

On a:

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (II.18)$$

$$C_D = \frac{dD}{dq}$$

L : La force de portance

D : La force de traînée

C_L : Le coefficient de portance

C_D : Le coefficient de traînée

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (II.19)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq}$$

dF_x est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale

dF_y la force axiale élémentaire qui s'exerce également sur une seule pale

D'après la figure II.2, on peut écrire :

$$C_y = C_L \cos\phi + C_D \sin\phi \quad (II.20)$$

$$C_r = C_L \sin\phi - C_D \cos\phi \quad (II.21)$$

On a :

$$dF_t = B \cdot dF_x \quad (II.22)$$

$$dT = B \cdot dF_y \quad (II.23)$$

Où B est le nombre de pales.

D'après la figure II.2, on a :

$$\alpha = \phi - \beta \quad (II.24)$$

$$\tan\phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r} \quad (II.25)$$

Où α est l'angle d'attaque (d'incidence) et β est l'angle de vrillage

La force axiale et le couple pour un élément de la pale sont :

$$dT = BC_y dq = BC_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (II.26)$$

$$dQ = BC_x dq r = BC_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr \quad (II.27)$$

L'égalité de l'équation (II.4) avec (II.26) et celle de l'équation (II.5) avec (II.27) donne:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{c B C_y}{8 \pi r \sin^2 \phi} \quad (II.28)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{c B C_x}{8 \pi r \sin\phi \cos\phi} \quad (II.29)$$

D'après la figure II.2, on a :

$$W = \frac{V}{\sin\phi} = \frac{V_0 (1 - a)}{\sin\phi} \quad (II.30)$$

Aussi :

$$W = \frac{\Omega r(1 + a')}{\cos\phi} \quad (II.31)$$

Le coefficient de plénitude local (local solidity) est défini comme suit [5] :

$$\sigma = \frac{c B}{2 \pi r} \quad (II.32)$$

La résolution des deux équations (II.28) et (II.29), donne les expressions de a et de a' respectivement :

$$a = \frac{1}{\frac{4\sin^2\phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (II.33)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4\sin\phi\cos\phi}{\sigma C_r} - 1}$$

Remarque :

Plusieurs auteurs [16] [17] [18] soutiennent que le coefficient de traînée doit être exclu (II.20) et (II.21). Cette approche se justifie par le fait que certains paramètres, notamment la force axiale et la puissance, ont été déterminés selon la théorie axiale sans considération des effets de frottement. L'égalité entre les expressions issues des deux théories impose donc de négliger ce coefficient.

À l'inverse, d'autres chercheurs [19] maintiennent l'inclusion du terme de traînée dans leurs formulations. Cette divergence s'explique par le fait qu'avec un nombre fini de pales, l'hypothèse de symétrie rotationnelle de l'écoulement n'est manifestement plus valide.

Cette limitation théorique impacte directement les performances énergétiques de l'éolienne, générant des pertes de rendement particulièrement marquées au niveau des extrémités libres des pales. Ces phénomènes de dégradation sont communément désignés sous le terme de "pertes en bout de pale" (tip losses).

Ce phénomène est quantifié par le facteur de réduction de la circulation proposé par Prandtl et défini par la formule suivante :

$$F = \frac{B \Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi a r \cos(e^{-f})} \quad (II.34)$$

Avec :

$$f = \frac{\left(\frac{B}{2}\right) (R - r)}{r \sin \phi} \quad (II.35)$$

Γ est la circulation effective de la pale au rayon r . Γ_∞ est la circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pale. Les facteurs d'interférence axial a et tangentiels a' de la vitesse du vent deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (II.36)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1}$$

Dans la pratique, cette correction a très peu d'influence sur la prévision de la performance de l'éolienne et elle est souvent négligée [3]

II.4. Calcul des paramètres aérodynamiques

II.4.1. Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

Pour un anneau élémentaire de fluide situé à la distance radiale r du moyeu et présentant une épaisseur dr , l'application du théorème de Bernoulli permet d'établir le saut de pression élémentaire généré par le passage à travers le disque rotor. Cette analyse prend en compte le fait que la traversée de l'hélice induit une modification de la vitesse angulaire relative du fluide (passant de Ω à $\Omega + \omega_2$) sans altérer sa vitesse axiale.

$$p + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 = p' + \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega_2)^2 r^2 \quad (II.37)$$

$$p - p' = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \quad (II.38)$$

La force axiale sur l'élément annulaire du rotor est

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2 \pi r dr \quad (II.39)$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel a , dont l'expression est donnée par l'équation (II.13) :

$$a' = \frac{\omega_2}{2 \Omega} \quad (II.40)$$

L'expression de la force axiale sur l'élément annulaire, peut s'écrire comme suit :

$$dT = 4a'(1+a')\rho\Omega^2r^2\pi r dr \quad (II.41)$$

La division des deux équations (II.4) et (II.41) peut donner :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (II.42)$$

Prenant la vitesse spécifique (tip speed ratio) comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0} \quad (II.43)$$

Et la vitesse spécifique locale comme [5] :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0} \quad (II.44)$$

L'Equation (II.42) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (II.45)$$

L'expression de la puissance peut s'écrire :

$$P = 2 \pi \rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (II.46)$$

Ou bien:

$$P = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_0^3 \frac{4 \lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (II.47)$$

Le coefficient de puissance C_p est formulé comme suit

$$C_p = \frac{4 \lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (II.48)$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur K, tel que

$$K = a'(1-a) \quad (II.49)$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale $C_{p \max}$ si l'expression K est maximale.

On peut exprimer K en fonction de a ; Le maximum de K est atteint si on prend

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (II.50)$$

Cela implique

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (II.51)$$

L'égalité des deux équations (II.45) et (II.51) permet d'écrire :

$$a' = \frac{(1 - 3a)}{(4a - 1)} \quad (II.52)$$

Cette dernière formule donne la relation entre a et a' afin que le coefficient de puissance soit maximal $C_{p \max}$, cela implique que la puissance extraite par le rotor dans ce cas soit maximale.

II.4.2. Calcul de la forme optimale de la pale

La conception optimale du profil de pale d'une hélice nécessite que la relation finale (II.52), qui correspond à l'extraction de puissance maximale, soit respectée. En adoptant l'hypothèse de négligence des forces de frottement dans la direction axiale et en posant $C_D = 0$, l'expression du facteur d'induction axiale a de l'équation (II.33) se simplifie comme suit [15] :

$$a = \frac{1}{\frac{4\sin^2\phi}{\sigma C_L \cos\phi} + 1} \quad (II.53)$$

Aussi, l'expression de a' devient :

$$a' = \frac{1}{\frac{4\cos\phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (II.54)$$

Où C_L est la valeur optimale du coefficient de portance

Si on substitue l'expression (II.52) dans cette dernière l'équation, On obtient :

$$a = \frac{4\cos\phi}{\sigma C_L + 12\cos\phi} \quad (II.55)$$

L'égalité des deux expressions de a dans les équations (II.53) et (II.55) donne l'équation quadratique suivante, dont l'inconnue est σC_L :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos\phi \sigma C_L - 16 \sin^2\phi = 0 \quad (II.56)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma C_L = -4(\cos\phi + 1) \quad (II.57)$$

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos\phi) \quad (II.58)$$

La première racine n'est pas acceptable, car $\sigma C_L < 0$. La deuxième racine donne l'expression optimale de la corde, le long de la pale

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos\phi) \quad (II.59)$$

Pour déterminer l'angle optimal ϕ et par conséquent l'angle optimal de vrillage β , des transformations similaires sont à envisager. On peut écrire :

$$\tan\phi = \frac{(1-a)}{(1+a')}\frac{1}{\lambda_r} \quad (II.60)$$

Si on substitue l'expression (II.52) dans cette dernière l'équation, on obtient

$$\lambda_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a}\frac{1}{\tan\phi} \quad (II.61)$$

La substitution de l'équation (II.53) dans (II.61) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2\cos\phi-1)(1+\cos\phi)}{(1+2\cos\phi)\sin\phi} \quad (II.62)$$

Cette équation est simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos\phi + \cos 2\phi}{\sin\phi + \sin 2\phi} \quad (II.63)$$

D'où:

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan\frac{3}{2}\phi} \quad (II.64)$$

On aboutit finalement a:

$$\phi = \frac{2}{3}\tan^{-1}\frac{1}{\lambda_r} \quad (II.65)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage β de l'équation (II.24) :

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (II.66)$$

Où α_{opt} est l'angle d'attaque optimale, qui donne $(C_L/C_D)_{max}$

II.4.3. Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor

Une fois la géométrie optimale des pales établie selon les méthodes précédemment décrites, il devient possible d'évaluer les efforts, moments et puissance générés par l'éolienne.

Afin d'effectuer cette analyse, on considère que les données suivantes sont disponibles :

- Paramètres géométriques : rayon de l'hélice R et nombre de pales B
- Conditions de fonctionnement : vitesse spécifique λ
- Caractéristiques aérodynamiques : coefficients de portance $C_L(\alpha)$ et de traînée $C_D(\alpha)$ du profil

Également les données suivantes sont calculées par la méthode décrite précédemment :

- Distribution radiale de la corde $c(r)$
- Répartition de l'angle de vrillage $\beta(r)$

La méthode employée vise à déterminer les facteurs d'induction axial (a) et tangentiel (a') pour chaque station radiale r de la pale. En l'absence de solutions analytiques directes pour ces paramètres, un processus itératif est mis en œuvre, structuré selon les étapes ci-après

1. Définir la valeur de r correspondant à la station radiale considérée sur la pale, mesurée depuis le centre du rotor.
2. Attribuer des valeurs initiales appropriées aux facteurs d'induction a et a' (par exemple : $a = 1/3$ et $a' = 0$).
3. Déterminer l'angle d'écoulement φ à l'aide de l'équation (II.25).
4. Évaluer l'angle d'incidence α en utilisant la relation $\alpha = \varphi - \beta$ de l'équation (II.24).
5. Extraire les coefficients $CL(\alpha)$ et $CD(\alpha)$ correspondant à l'angle d'incidence calculé α , par interpolation dans les données caractéristiques du profil aérodynamique.
6. Recalculer les nouveaux facteurs d'induction a et a' en utilisant les formules (II.36).
7. Vérifier la convergence en comparant les nouvelles valeurs de a et a' avec celles de l'itération précédente. Répéter les étapes 3 à 6 jusqu'à obtention de la précision requise. La stabilisation de a et a' confirme la cohérence entre les résultats des deux approches théoriques.
8. Évaluer les contributions locales dC_p , dQ , dT et dP pour la station considérée.
9. Répéter cette procédure pour l'ensemble des positions radiales r le long de la pale, puis intégrer numériquement les contributions locales pour obtenir les valeurs totales de C_p , Q , P et T .

La prise en compte des effets de bout de pale nécessite l'emploi des relations corrigées appropriées. De plus, pour certaines valeurs de l'angle d'attaque α conduisant au phénomène de décrochage, l'existence de solutions multiples est possible.

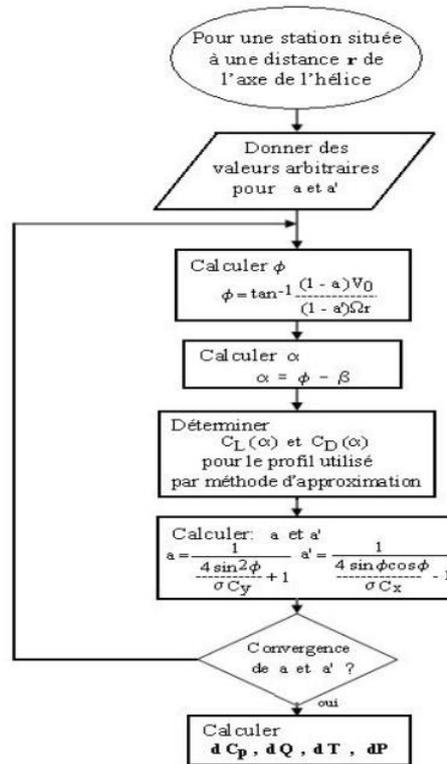


Figure II.3 Organigramme des étapes de calcul

II.5. Caractéristiques de notre éolienne

II.5.1. Géométrie :

L'éolienne conçue est une machine à axe horizontal (HAWT) tripale dotée d'un rotor de 5 m de diamètre, offrant une surface balayée de 19.63 m². Chaque pale présente une longueur effective de 2.3 m depuis la périphérie du moyeu central, ce dernier ayant un rayon de 0.2 m. Le ratio diamétral moyeu/rotor de 0.08 et la disposition angulaire symétrique à 120° confèrent une homogénéité aérodynamique, tandis que la finesse architecturale (longueur de pale/rayon rotor = 0.92) positionne ce design dans la catégorie des éoliennes de moyenne puissance pour sites terrestres à vent modéré.

II.5.2. Vitesse du vent : $V_0 = 6$ m/s

La vitesse amont, définie comme la vitesse du vent non perturbé en amont du rotor, constitue le paramètre fondamental pour caractériser l'écoulement incident. Dans notre modélisation, cette vitesse détermine la vitesse relative de l'air sur les pales et calculer la puissance extraite du vent, elle est fixée à 6m/s vu que la vitesse de vent typique dans l'Algérie se situe entre 4 et 7 m/s.

II.5.3. Densité de l'air : $\rho = 1.1836$ kg/m³

La densité de l'air (ρ), paramètre fondamental gouvernant l'énergie extractible, est fixée à 1.1836 kg/m³ dans notre étude. Cette valeur correspond aux conditions d'exploitation algériennes typiques : température moyenne de 25°C et pression atmosphérique 1013 hPa au niveau de la mer, comme validé par les données

climatologiques de l'Office National de la Météorologie (ONM, 2023). Ce choix reflète le contexte climatique caractérisant l'Algérie où les températures estivales dépassent fréquemment 30°C, induisant une réduction de 3.3% par rapport à la norme ISO ($\rho_{\text{std}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ à 15°C).

II.5.4. Vitesse de rotation du rotor : $\Omega=15,71 \text{ rad/s}$

La vitesse angulaire du rotor, notée Ω (rad/s), caractérise la vitesse de rotation des pales autour de l'axe principal. Elle est liée à la vitesse de rotation N (en tr/min) par la relation fondamentale $\Omega = \frac{2\pi N}{60}$. Dans notre configuration, une vitesse nominale de 150 tr/min a été sélectionnée, ce qui correspond à $\Omega \approx 15.71 \text{ rad/s}$ après calcul. Cette valeur représente un compromis optimal entre l'efficacité énergétique et la durabilité structurale : si une vitesse angulaire élevée améliore l'extraction d'énergie en augmentant la vitesse relative sur les profils (et donc le coefficient de puissance C_p), elle génère simultanément une croissance quadratique des forces de traînée et des contraintes de fatigue, particulièrement critiques aux extrémités de pale.

II.6. Intégration du logiciel Qblade :

II.6.1. Présentation du logiciel QBlade

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons choisi d'utiliser le logiciel QBlade pour la phase de l'étude préliminaire. QBlade est un outil open-source développé à l'Université Technique de Berlin, spécifiquement conçu pour la modélisation, la simulation et l'analyse des performances aérodynamiques des turbines éoliennes. Il s'intègre dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée à l'énergie éolienne, en permettant une étude précise du comportement des pales via la théorie BEM (Blade Element Momentum).

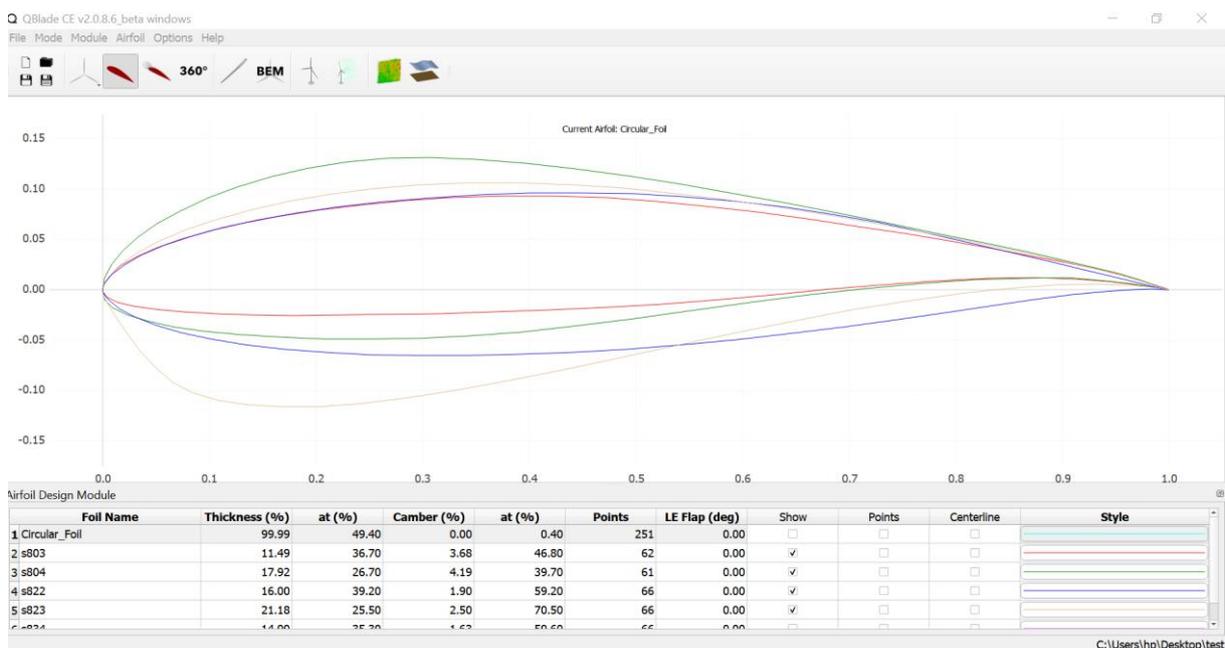


Figure II.4 L'interface du QBlade

II.6.2. Objectifs de L'utilisation de QBlade

Dans ce mémoire, le logiciel QBlade (développé par l'Université Technique de Berlin et validé par le NREL) est mobilisé comme outil central pour la conception et l'optimisation aérodynamique de l'éolienne. Son implémentation couvre : l'importation et l'analyse des caractéristiques de portance/traînée des profils NACA et NREL_S, la synthèse géométrique de pales adaptées aux conditions éoliennes algériennes ($v = 6$ m/s, $\rho = 1.184$ kg/m³), et la simulation haute-fidélité via la méthode BEM corrigée. Ce processus permet de quantifier les performances globales (puissance, coefficient de performance C_p , rendement η), d'extraire les distributions radiales des efforts aérodynamiques (dF/dr , dM/dr), et des coefficients locaux (C_L , C_D), et d'optimiser itérativement la corde et le vrillage pour maximiser $C_p(\lambda)$ sous contraintes structurelles.

II.6.3. Intégration dans le domaine de l'aérodynamique

QBlade est particulièrement pertinent dans le domaine de l'aéronautique et des structures, notamment pour les étudiants en ingénierie aéronautique, car il permet de visualiser concrètement les effets aérodynamiques sur des profils utilisés également dans l'aviation (profils NACA, etc.). Il fait le lien entre la théorie des forces aérodynamiques, moment, vortex et leur application pratique dans une turbine à vent. [13]

II.6.4. Implémentation de la méthode BEM dans QBlade

La méthode BEM, déjà décrite précédemment, est utilisée par QBlade comme cœur de son moteur de simulation aérodynamique. Son implémentation dans le logiciel se fait à travers les étapes suivantes :

- Définition du rotor : l'utilisateur saisit les caractéristiques géométriques de la pale (longueur, corde, vrillage, nombre de pales) ainsi que le profil aérodynamique sélectionné.
- Discrétisation de la pale : QBlade divise la pale en plusieurs éléments, chacun traité indépendamment à l'aide de la théorie des éléments de pale.
- Calcul des efforts aérodynamiques : pour chaque élément, les forces de portance et de traînée sont évaluées en fonction des données du profil (C_L et C_D), de l'angle d'attaque, de la vitesse du vent et de la rotation du rotor.
- Résolution itérative des facteurs d'induction : QBlade applique une méthode itérative pour estimer les facteurs d'induction axiale et tangentielle, assurant la cohérence entre les forces générées et la modification du flux d'air.
- Calcul des performances globales : une fois les efforts locaux déterminés, QBlade intègre les résultats pour obtenir la puissance produite, le couple, le moment de flexion et le coefficient de performance global C_p .

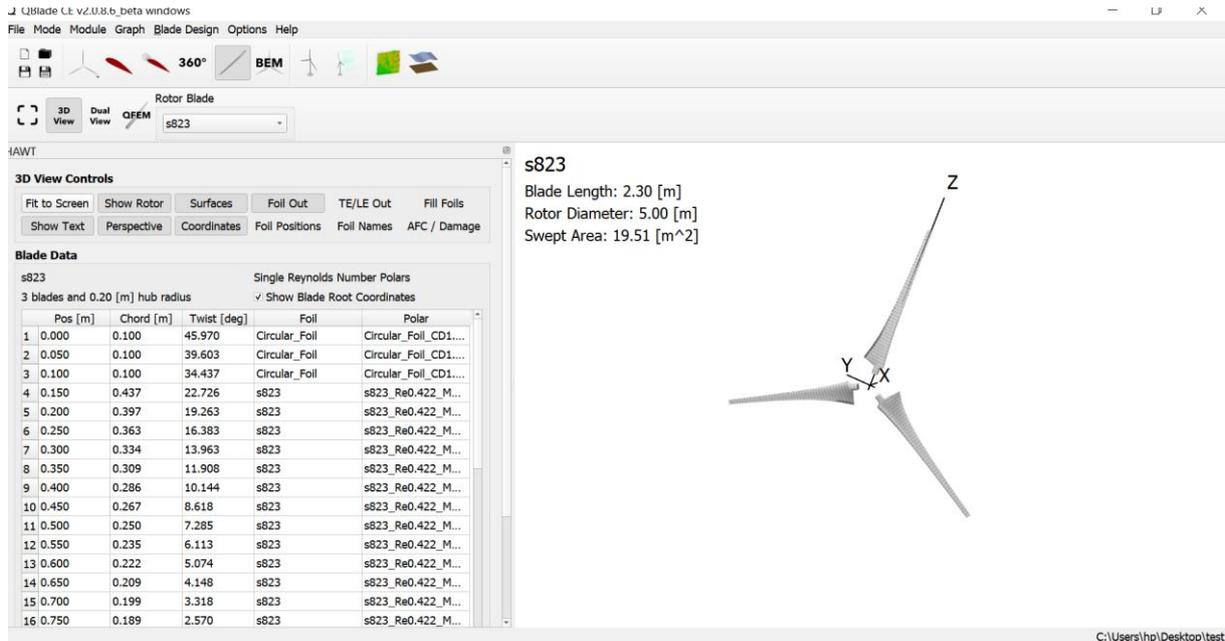


Figure II.5 Visualisation 3D du rotor dans QBlade

L'interface permet aussi de visualiser les distributions radiales (corde, angle de vrillage, CL, CD, vitesses induites), offrant une compréhension fine du comportement de chaque pale.

II.6.5. Avantages de QBlade

- Gratuit et open-source, accessible à tous.
- Interface graphique intuitive, avec visualisation en temps réel.
- Support natif des profils NACA et des profils personnalisés.
- Simulation rapide et précise basée sur la théorie BEM.
- Permet d'analyser et d'optimiser les pales, en lien direct avec la performance énergétique.
- Export des résultats détaillés (Cp, forces, moments, vitesses induites, etc.).

II.6.6. Inconvénients de QBlade

- Basé sur des hypothèses simplificatrices (écoulement stationnaire, pas de turbulence réelle),
- La précision dépend fortement de la qualité des données du profil (CL, CD),
- Limitations pour les simulations non conventionnelles (effets d'interaction multi-éoliennes, turbulence urbaine, etc.). [14]

II.7. Choix des profils aérodynamiques

Le choix du profil aérodynamique constitue une étape cruciale dans la conception d'une éolienne à axe horizontal, car il influence directement les performances aérodynamiques, la production d'énergie et la stabilité structurelle de la turbine. Plusieurs critères doivent être pris en compte afin de sélectionner un profil optimal adapté au fonctionnement en régime éolien [20] :

- **Coefficient de portance élevé CL** Un profil efficace doit générer une portance importante afin de maximiser la force axiale responsable du couple moteur transmis à l'arbre de l'éolienne. [21]
- **Faible coefficient de traînée CD** Il est essentiel de minimiser la traînée aérodynamique afin de réduire les pertes d'énergie et d'optimiser le rendement global du système. [21]
- **Rapport portance/traînée optimal CL/CD** Ce rapport est un indicateur clé de performance aérodynamique. Plus il est élevé, plus le profil est performant en termes de conversion d'énergie. [21]
- **Comportement stable à incidence variable** Le profil choisi doit présenter une bonne tenue aux incidences élevées afin de retarder le décrochage, notamment dans des conditions de vent instables ou lors de variations de la vitesse de rotation.
- **Coefficient de puissance élevé Cp** Le coefficient de puissance représente l'efficacité de l'éolienne à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il dépend fortement du profil utilisé, de la distribution du vrillage, de la corde, ainsi que du rapport de vitesse de rotation λ . La limite théorique du Cp est donnée par la loi de Betz.
- **Compatibilité avec la fabrication** Le profil aérodynamique doit être facilement réalisable avec les techniques de fabrication choisies (Impression 3D, composites, moulage, usinage, etc.), tout en garantissant une bonne tenue mécanique. [19]
- **Comportement performant aux faibles nombres de Reynolds** Dans le cas des petites et moyennes éoliennes, les profils opèrent souvent dans des régimes à nombre de Reynolds faibles à modérés (de l'ordre de 10^5 à 10^6). Le profil doit offrir de bonnes performances dans cette plage de fonctionnement. [22]
- **Épaisseur relative suffisante** Une certaine épaisseur est requise pour assurer la rigidité et la résistance structurelle de la pale, tout en limitant la masse ajoutée.

II.7.1. Comparaison des profils aérodynamiques

Dans le cadre de ce projet, plusieurs profils aérodynamiques ont été testés afin d'évaluer leur performance en conditions réelles de fonctionnement. La sélection stratégique du profil NACA 4412 comme référence et des profils NREL S803, S804, S822, S823 s'appuie sur leur supériorité démontrée face au défi critique de la dégradation des performances sous contamination du bord d'attaque - un phénomène responsable de 20-30% de pertes énergétiques annuelles dans les rotors conventionnels (NACA 44XX, NASA LS). Comme l'ont établi les travaux fondateurs du NREL, ces profils spécialisés pour éoliennes à axe horizontal (HAWT) réduisent de moitié ces pertes grâce à leurs conceptions optimisées pour maintenir des coefficients de portances élevés et des polaires stables sous différentes conditions environnementales. [22]

Tableau II.1 Comparaison de certains profils

Profils	Épaisseur	Avantages	Inconvénients
NACA 4412	12% à 0,3C	Bon comportement à faible nombre de Reynolds. Facile à fabriquer. Bien documenté.	Performances aérodynamiques moyennes comparées aux profils plus récents
S803	11,5% à 0,375C	Très bon rendement en faibles vitesses. Conçu pour minimiser le bruit et les pertes de traînée.	Moins robuste structurellement que des profils plus épais
S804	17,9% à 0,267C	Meilleure tenue mécanique (épaisseur plus importante). Conception adaptée pour les pales courtes et rigides	Faible performance aérodynamique. Sensible au décrochage à basse incidence
S822	16% à 0,392C	Stabilité à faible incidence. Simplicité de fabrication.	Moins performant que les profils S803 ou S823 en termes de C_p .
S823	21.2% à 0,243C	Bon rapport CL/CD. Conception robuste.	Moins performant en bout de pales que les profils mince

II.7.2. Analyse Xfoil :

Cette section présente la visualisation des polaires aérodynamiques générées par l'étude numérique réalisée sous XFOIL. Nous examinerons spécifiquement les courbes représentant l'évolution du coefficient de portance (C_L), du coefficient de traînée (C_D) et de la finesse aérodynamique (C_L/C_D), toutes en fonction de l'incidence (α). Une analyse comparative de ces résultats, mettant en lumière les caractéristiques clés et les points de fonctionnement remarquables, sera ensuite menée pour conclure.

a. $C_L(\alpha)$

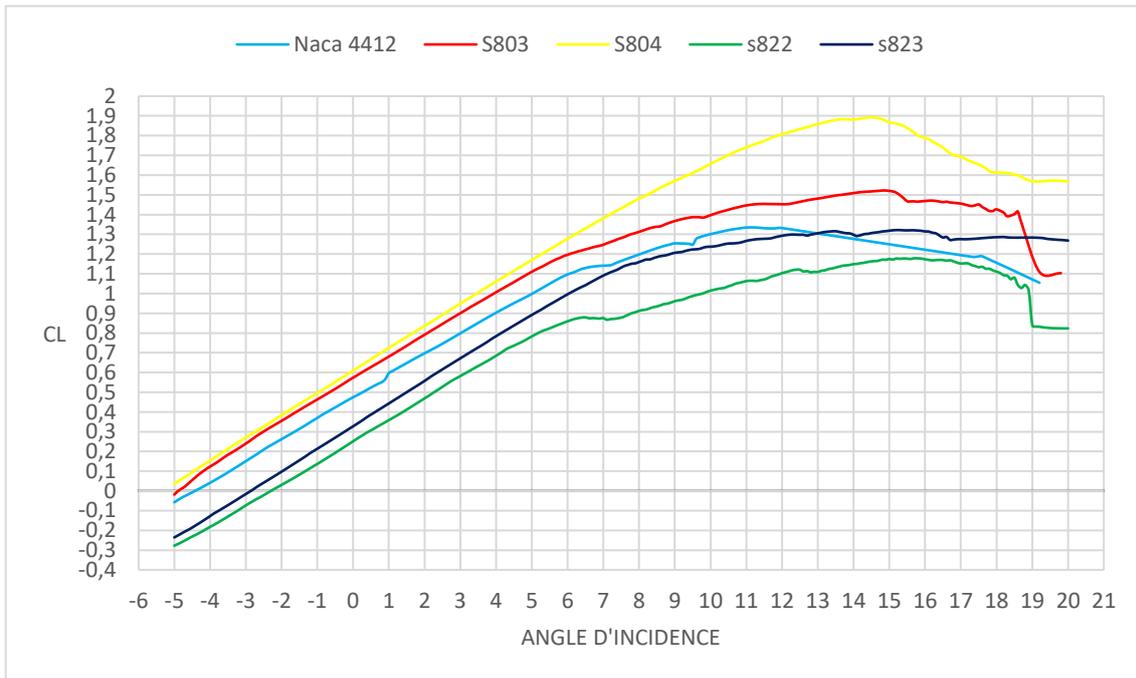


Figure II.6 Graphe du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence

b. $C_d(\alpha)$

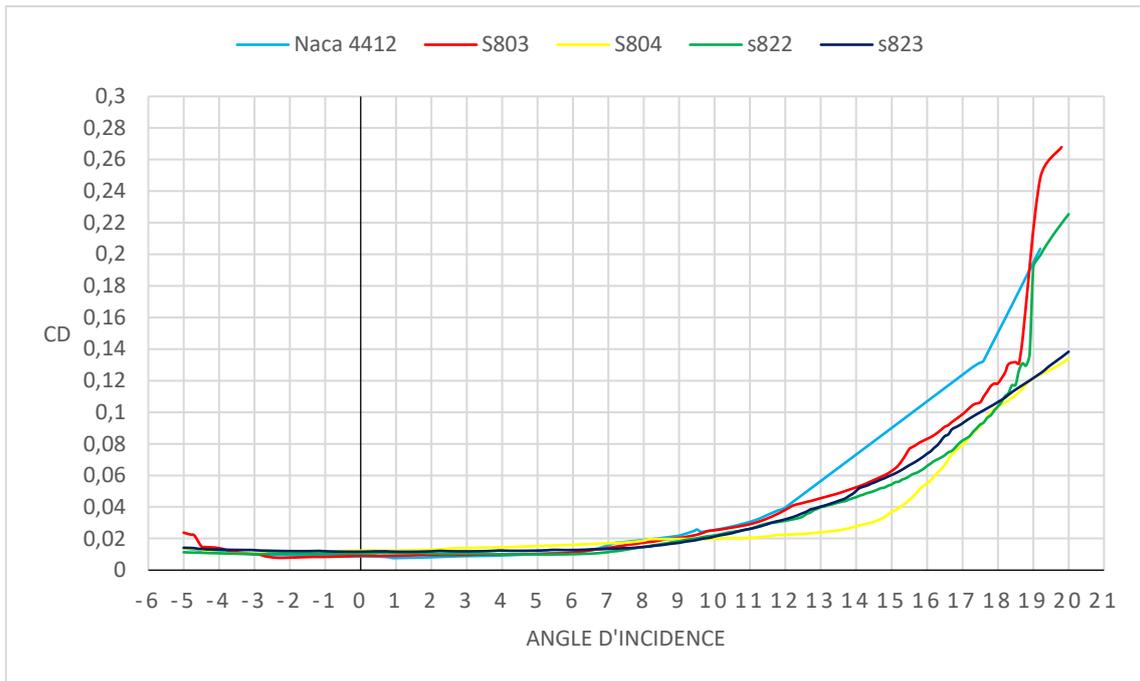


Figure II.7 Graphe du coefficient de traînée en fonction de l'angle d'incidence

c. CL/CD (α)

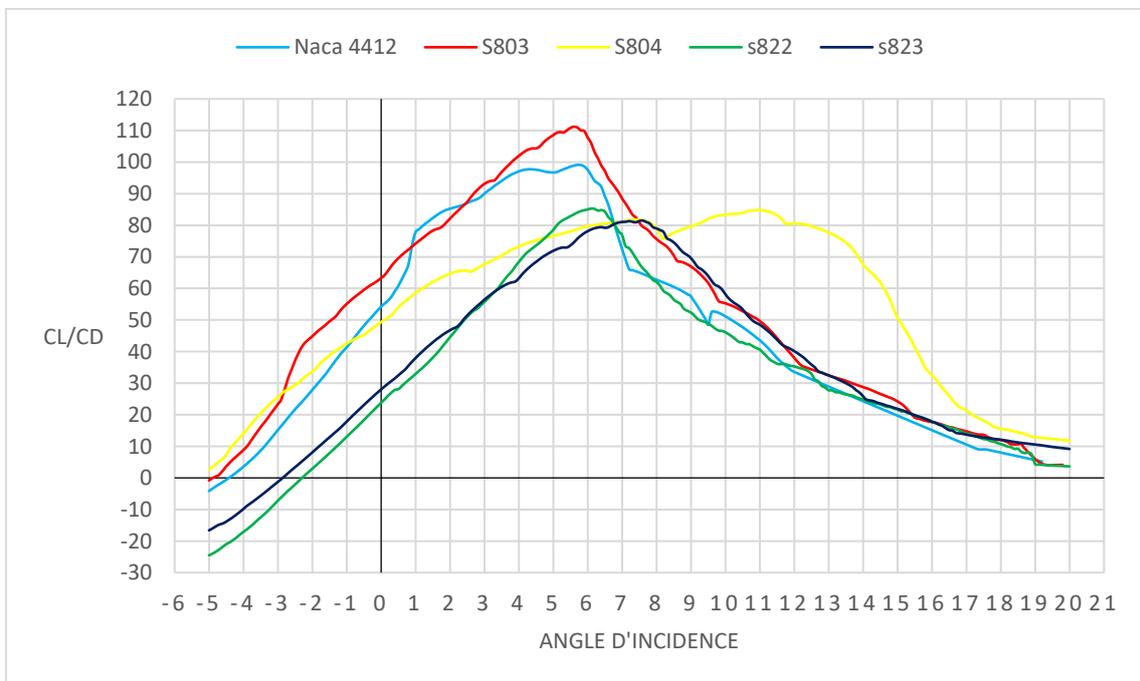


Figure II.8 Graphe de la finesse en fonction de l'angle d'incidence

d. Discussion des résultats :

Tableau II.2 Principales Caractéristiques Aérodynamiques des Profils

PROFIL	$C_{L\ max}$	$C_{D\ min}$	Incidence décrochage (α)	$(C_L/C_D)_{max}$	$\alpha_{finessemax}$
NACA 4412	1,3354	0,00767	11,2	99,10185185	5,7
S803	1,5224	0,00777	14,9	111,2297426	5,6
S804	1,8931	0,0104	14,5	84,78324403	11
S822	1,1767	0,0099	15,7	85,31034483	6,1
S823	1,3207	0,01162	15,2	81,48677627	7,6

La conception d'une éolienne à axe horizontal repose fondamentalement sur le choix judicieux des profils de pale, ceux-ci dictant l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en puissance mécanique. Dans cette optique, une analyse comparative approfondie a été menée sur cinq profils (NACA 4412, S803, S804, S822, S823) au nombre de Reynolds de 386 598, représentatif des conditions de fonctionnement des sections intermédiaires de la pale. Les résultats, issus de simulations XFOIL, ont révélé des performances distinctes pour chaque profil selon des métriques clés telles que le coefficient de portance maximal (C_{Lmax}), le coefficient de traînée minimal (C_{Dmin}), l'angle de décrochage, la finesse aérodynamique maximale ($(C_L/C_D)_{max}$) et son angle d'incidence associé ($\alpha_{finessemax}$). Cette étude préliminaire a permis de mettre en évidence l'équilibre délicat entre la capacité à générer une portance élevée pour capter l'énergie et la nécessité de minimiser la traînée pour optimiser le rendement.

L'analyse comparative a clairement positionné le profil S803 comme le choix prépondérant pour l'optimisation énergétique de la pale. Avec une finesse aérodynamique remarquable de 111.23, le S803 surpasse significativement les autres profils, garantissant une conversion supérieure de l'énergie du vent en couple utile. Sa capacité à générer une portance élevée ($C_{Lmax}=1.5224$) combinée à un angle de décrochage favorable (14.9°) assure à la fois une capture d'énergie efficace et une robustesse opérationnelle. Néanmoins, on peut considérer des alternatives pour la robustesse de la conception et la facilité de fabrication. À cet égard, le NACA 4412 se présente comme une option tout à fait viable. Bien que sa finesse maximale (99.10) soit légèrement inférieure à celle du S803, elle demeure excellente. Son avantage réside dans sa simplicité géométrique et sa robustesse prouvée, des caractéristiques

qui peuvent simplifier considérablement les processus de fabrication et de maintenance de la pale, tout en offrant des performances aérodynamiques très compétitives pour la majeure partie de l'envergure. Ce profil, reconnu pour sa fiabilité et sa prévisibilité, représente donc une alternative sérieuse garantissant un compromis pertinent entre performance et constructibilité.

II.7.3. Analyse BEM rotor :

Le choix optimal d'un profil de pale d'éolienne nécessite une analyse tridimensionnelle complète dépassant les simples polaires 2D obtenues via XFOIL, car la performance globale d'un rotor dépend de l'intégration des profils dans une géométrie optimisée incluant vrillage et variation de corde. Cette phase d'étude évalue donc les profils candidats (NACA 4412, S803, S804, S822, S823) et leurs configurations mixtes (S804/S803 et S823/S803) comme constituants de pales complètes optimisées sous QBlade, analysant leurs performances via le modèle Rotor BEM pour extraire le coefficient de puissance (CP) en fonction de la vitesse spécifique (TSR) dans des conditions standardisées (vent à 6 m/s, $\rho=1.183634 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0.00001552 \text{ m}^2/\text{s}$). Cette approche tridimensionnelle permettra également d'étudier la puissance extraite (W) en fonction de la vitesse du vent, offrant une métrique de performance globale plus réaliste pour le choix définitif du profil optimal et une évaluation complète du rendement énergétique du rotor dans diverses conditions opérationnelles.

a. Coefficient de puissance Cp en fonction du TSR

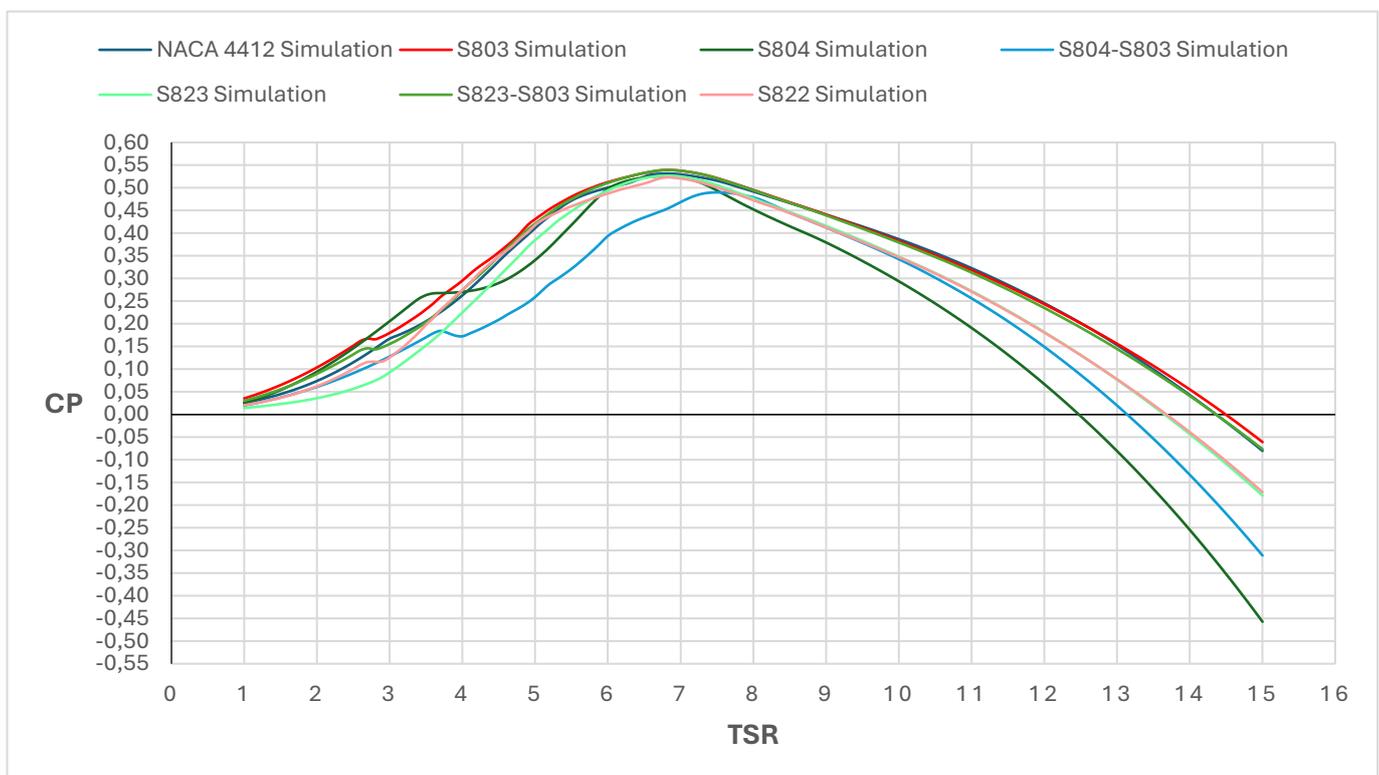


Figure II.9 Graphe des Coefficient de puissance Cp en fonction du TSR

b. Puissance en fonction de la vitesse du vent

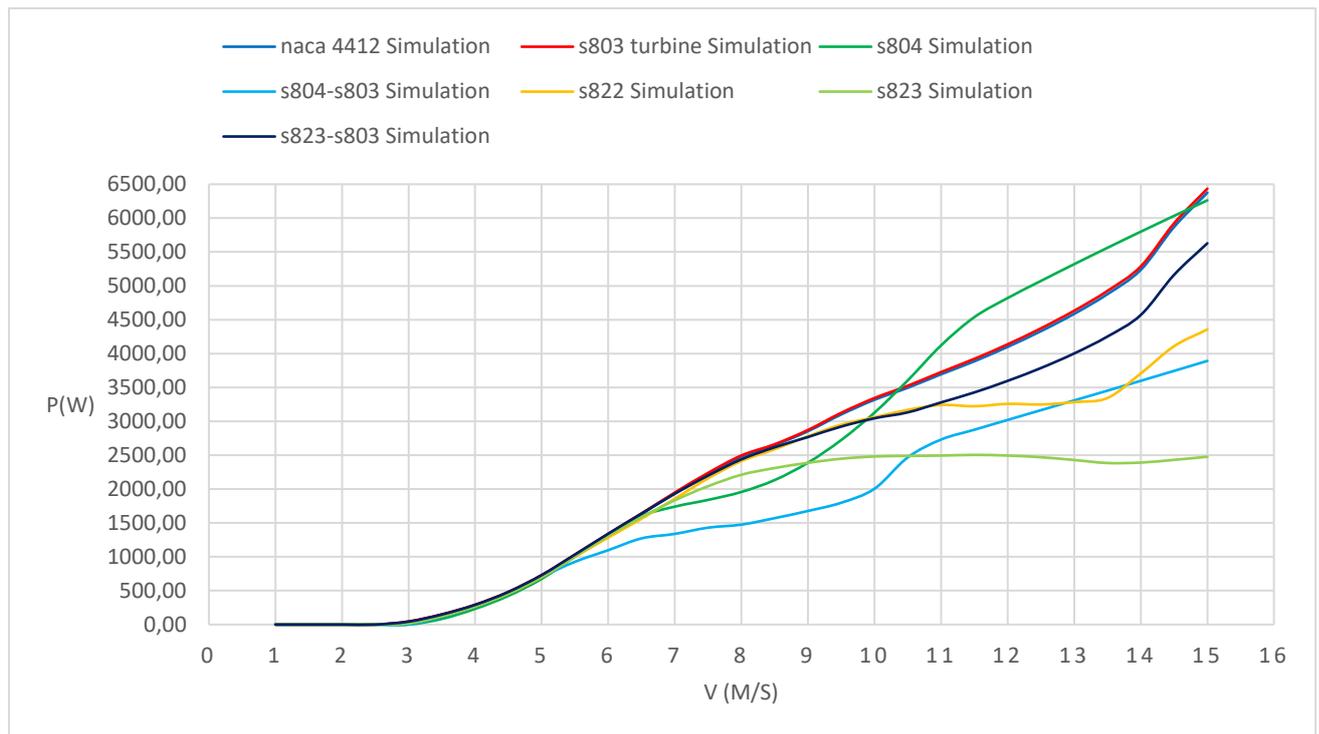


Figure II.10 Graphe des puissances en fonction de la vitesse du vent

c. Discussion des résultats :

Tableau II.3 Résultats comparatifs des performances simulées sous Qblade

Pale	Cp max	TSR
NACA 4412	0,53151	6,8
S803	0,53926	6,8
S804	0,52623	6,8
S804-S803	0,48978	7,5
S822	0,52307	6,8
S823	0,52640	6,8
S823-S803	0,53935	6,8

Tableau II.4 Résultats comparatifs de la puissance extraite pour une vitesse de vent de 6m/s simulée sous Qblade

Profils utilisés	Puissance extraite (W)
NACA 4412	1332,40
S803	1340,09
S804	1314,05
S804-S803	1097,90
S822	1284,04
S823	1311,30
S823-S803	1340,72

L'analyse BEM réalisée sous QBlade révèle des performances différenciées entre les configurations étudiées, tant en termes de coefficient de puissance et de puissance extraite à un angle de 0. La pale mono-profil S803 se distingue avec un C_{Pmax} de 0.53926 (TSR=6.8) et une puissance extraite de 1340.09 W, confirmant sa supériorité identifiée en analyse 2D. Le NACA 4412 présente également d'excellentes performances avec un C_{Pmax} de 0.53151 et 1332.40 W de puissance extraite, démontrant sa robustesse historique. En revanche, le S804 affiche des résultats plus modestes (C_{Pmax} =0.52623, P=1314.05 W) malgré son fort C_{Lmax} en 2D, probablement pénalisé par une traînée accrue en configuration 3D. Les profils S822 (C_{Pmax} =0.52307, P=1284.04 W) et S823 (C_{Pmax} =0.52640, P=1311.30 W) montrent des performances acceptables, le S823 révélant même un gain inattendu par rapport à ses caractéristiques 2D.

Concernant les configurations mixtes, la pale S804-S803 produit les résultats les plus faibles (C_{Pmax} =0.48978 à TSR=7.5, P=1097.90 W), suggérant des problèmes de transition entre profils nécessitant une investigation approfondie. À l'inverse, la combinaison S823-S803 atteint les meilleures performances globales avec un C_{Pmax} record de 0.53935 (TSR=6.8) et une puissance extraite maximale de 1340.72 W, révélant une synergie optimale entre les profils au sein de la géométrie de pale optimisée, positionnant cette configuration comme la plus prometteuse pour maximiser la conversion énergétique.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une analyse aérodynamique combinée 2D (XFOIL) et 3D rotor (QBlade-BEM) qui a établi la supériorité du profil S803, caractérisé

par une finesse exceptionnelle de 111.23, un CL_{max} de 1.5224 et un décrochage prédictible à 14.9° , conduisant à un coefficient de puissance optimal de 0.53926 à $TSR=6.8$ et une puissance extraite de 1340.09 W en configuration mono-profil. Bien qu'une pale à profils mixtes S823-S803 présente un CP_{max} et une puissance extraite marginalement supérieurs, 0.53935 et 1340.72 W, l'écart négligeable de 0.63W ne justifie pas les complexités de conception multi-profils, positionnant ainsi le S803 comme choix optimal offrant le meilleur compromis entre efficacité énergétique de pointe, simplicité de réalisation et fiabilité opérationnelle pour notre projet d'éolienne

Chapitre 3 : Simulation numérique CFD sous ANSYS Fluent et analyse paramétrique

III.1. Introduction

Ce chapitre finalise la démarche de conception en validant numériquement les performances aérodynamiques du profil S803, sélectionné comme optimal au Chapitre 2, par une simulation CFD sous ANSYS Fluent dans des conditions réalistes (vent à 6 m/s, $\rho=1.184 \text{ kg/m}^3$). S'appuyant sur les fondements théoriques préalablement établis et l'optimisation géométrique BEM sous QBlade, cette analyse tridimensionnelle intègre le vrillage de la pale et les effets de turbulence via le modèle k- ω SST pour valider expérimentalement les coefficients CL et CD prédits théoriquement, révéler les écarts entre modèles 2D et 3D et garantir la robustesse du design face aux variations d'incidence typiques des sites algériens. En combinant maillage adaptatif (2M+ éléments), protocole SIMPLE, et étude paramétrique ($\alpha=-5^\circ$ à $+19^\circ$), cette approche établit un lien crucial entre optimisation théorique et validation physique, déterminant pour la viabilité du rotor final. [23]

III.2. Modèle mathématique utilisé

Dans cette simulation CFD sous ANSYS Fluent, nous avons utilisé les équations de Navier-Stokes stationnaires pour modéliser l'écoulement de l'air autour du profil aérodynamique S803.

III.2.1. Équations de Navier-Stokes

L'écoulement de l'air autour du profil S803 est régi par les équations de Navier-Stokes, qui traduisent les lois de conservation fondamentales de la mécanique des fluides [24] :

- **Conservation de la masse (continuité) :**

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (III.1)$$

Cela exprime que le fluide est incompressible : le débit entrant est égal au débit sortant localement.

- **Conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes incompressibles) :**

$$\rho \left(\frac{d\vec{u}}{dx} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f} \quad (III.2)$$

Où :

- \vec{u} est le vecteur vitesse du fluide,
- p est la pression,
- ρ est la densité de l'air,
- μ est la viscosité dynamique,
- \vec{f} représente les forces volumiques externes (ici négligées).

Dans cette étude, on considère un régime stationnaire $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ et incompressible. Le solveur résout ces équations couplées à l'aide d'un schéma implicite et d'un couplage pression-vitesse (méthode SIMPLE).

III.2.2. Modèles de turbulence

a. Modèle k- ε (k-epsilon)

Équation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (III.3)$$

Équation de transport du taux de dissipation ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (III.4)$$

Viscosité turbulente :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (III.5)$$

b. Modèle k- ω (k-oméga)

Équation de transport de k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (III.6)$$

Équation de transport de ω :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (III.7)$$

Viscosité turbulente :

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (III.8)$$

c. Modèle k- ω SST (Shear Stress Transport)

Le modèle k- ω SST combine les deux précédents par l'intermédiaire de fonctions de transition.

Équation de k (identique au modèle k- ω) :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (III.9)$$

Équation de ω modifiée SST :

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (III.10)$$

Viscosité turbulente modifiée :

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \cdot \max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{a_1}{\Omega F_2}\right) \quad (III.11)$$

III.3. Hypothèses de modélisation

Les hypothèses suivantes ont été retenues afin d'assurer un bon compromis entre réalisme physique et simplicité numérique :

- Écoulement laminaire : le nombre de Reynolds calculé en fonction de la vitesse du vent ($U^\infty=6$ m/s), de la corde du profil (c), et des propriétés de l'air (viscosité cinématique $\nu=15,52 \cdot 10^{-6}$ m²/s) donne une valeur de $Re=386\,598$. Cette valeur, bien qu'élevée, reste dans un régime où l'écoulement peut rester laminaire sur une grande partie du profil, notamment si l'on néglige la rugosité de surface et les perturbations externes.
- Écoulement incompressible : la vitesse étant faible, les effets compressibles sont négligeables ($Ma < 0.1$).
- Écoulement isotherme : les échanges thermiques n'ont pas été pris en compte car on travaille à température ambiante constante.
- Surface du profil considérée comme lisse : aucun effet de rugosité ou de perturbation de couche limite n'a été modélisé. Cela favorise le maintien d'un écoulement laminaire plus longtemps sur l'extrados/intrados. [25]

III.4. Modèle de turbulence

Le modèle de turbulence utilisé dans cette simulation est le $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), un modèle hybride avancé proposé par Menter. En combinant les avantages de deux formulations classiques : [26]

- Le modèle $k-\omega$ de Wilcox, qui offre une excellente précision dans les zones proches des parois, grâce à sa capacité à capturer correctement les gradients de vitesse élevés
- Le modèle $k-\varepsilon$, mieux adapté aux zones éloignées des parois et aux écoulements en régime pleinement développé.

Le $k-\omega$ SST utilise une fonction de transition qui permet de basculer de manière fluide entre les deux modèles en fonction de la distance à la paroi. Cela permet d'assurer à la fois précision près des surfaces solides, à titre d'exemple un profil d'aile, et stabilité numérique dans les zones loin du corps, où le maillage est souvent plus grossier.

Il prend également en compte le transport du cisaillement turbulent, ce qui améliore la prédiction des phénomènes de séparation de couche limite, très fréquents aux angles d'incidence élevés.

Ce modèle est donc particulièrement adapté aux écoulements aérodynamiques stationnaires autour de profils, où la précision du calcul de la portance et de la traînée dépend fortement de la modélisation correcte des zones proches des parois.

Dans notre cas, le maillage raffiné près du profil ($y^+ < 1$) permet de capturer efficacement la sous-couche visqueuse sans recours à des lois de paroi, tirant ainsi pleinement parti des capacités du modèle $k-\omega$ SST. [26]

III.4.1. Solveur utilisé

Le solveur utilisé est de type Pressure-Based, bien adapté aux régimes incompressibles. Le couplage pression-vitesse est assuré par le schéma SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). [27]

Cette configuration a été choisie pour les raisons suivantes :

- Le régime est faiblement compressible (6 m/s), ce qui ne nécessite pas un solveur de type density-based.
- La méthode SIMPLE est stable, efficace et largement validée dans la littérature pour les écoulements stationnaires.

III.5. Simulation 2D

III.5.1. Géométrie 2D

Dans cette étude, nous avons choisi de simuler un profil aérodynamique 2D de type S803, utilisé couramment dans les petites éoliennes pour ses bonnes performances à faibles vitesses de vent.

a. Importation du profil

Le contour du profil S803 a été généré à partir de données tabulées de coordonnées (x,y) importées dans le logiciel ANSYS DesignModeler. Ces coordonnées définissent précisément l'extrados et l'intrados du profil.

b. Fermeture du contour

Le contour du profil a été fermé manuellement afin de garantir une géométrie parfaitement étanche, condition essentielle pour un maillage de qualité. Cette opération a été réalisée en reliant les points de bord d'attaque et de bord de fuite avec une tolérance géométrique fine.

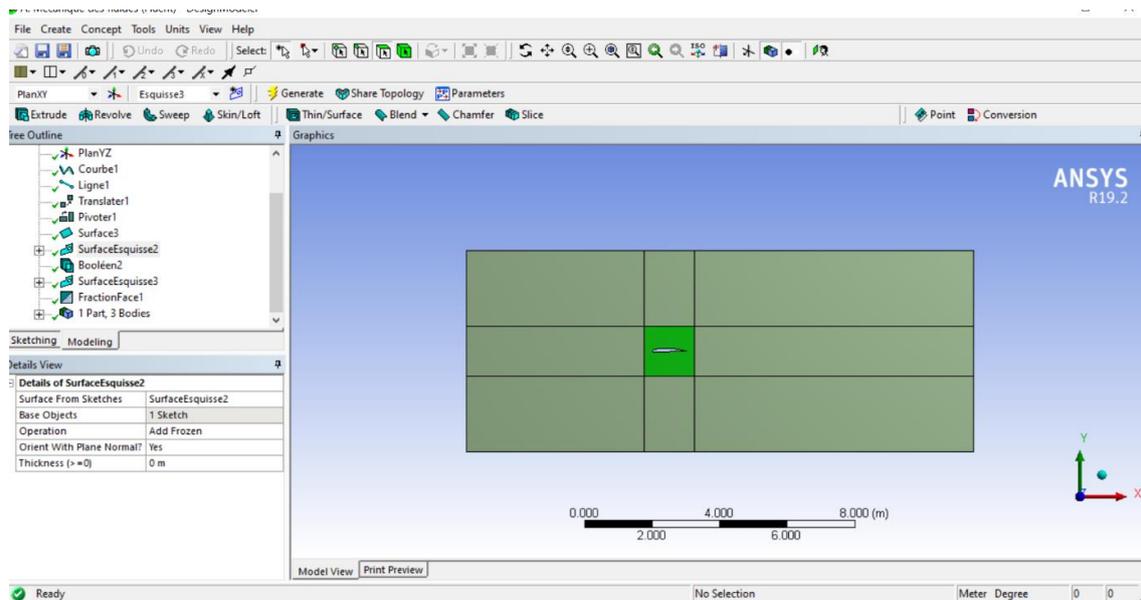


Figure III.1 Géométrie du profil aérodynamique S803 importée dans ANSYS DesignModeler

c. Définition du domaine fluide

Deux zones ont été définies autour du profil :

- Domaine proche : zone rectangulaire de 4 à 6 fois la corde en amont et en aval, et environ 5 fois la corde verticalement. Ce domaine contrôle les effets de proximité autour du profil.
- Domaine étendu : utilisé pour éviter les perturbations dues aux conditions limites. Il permet d'assurer une meilleure représentation de l'écoulement libre.

d. Variation de l'angle d'incidence

Pour étudier l'effet de l'angle d'attaque sur les performances aérodynamiques, le profil a été pivoté par rotation autour de son quart de corde (axe habituel de référence) selon des angles allant de -5 à $+15$, par incréments réguliers. Chaque rotation a été sauvegardée comme un cas indépendant pour l'analyse paramétrique.

III.5.2. Maillage 2D

Le maillage du domaine fluide a été réalisé à l'aide de ANSYS Meshing, en combinant deux approches complémentaires, formant un maillage hybride : [28]

- Maillage structuré quadrilatéral dans les zones éloignées du profil, permettant une excellente qualité et régularité des cellules.
- Maillage non structuré triangulaire avec un raffinement local autour du profil, optimisant la résolution des gradients de pression et de vitesse près des parois.

a. Méthode de génération

Le maillage a été généré via la méthode Patch Conforming, avec application d'une boîte d'influence centrée sur le profil pour assurer une concentration des éléments dans les zones critiques (bord d'attaque, extrados, intrados).

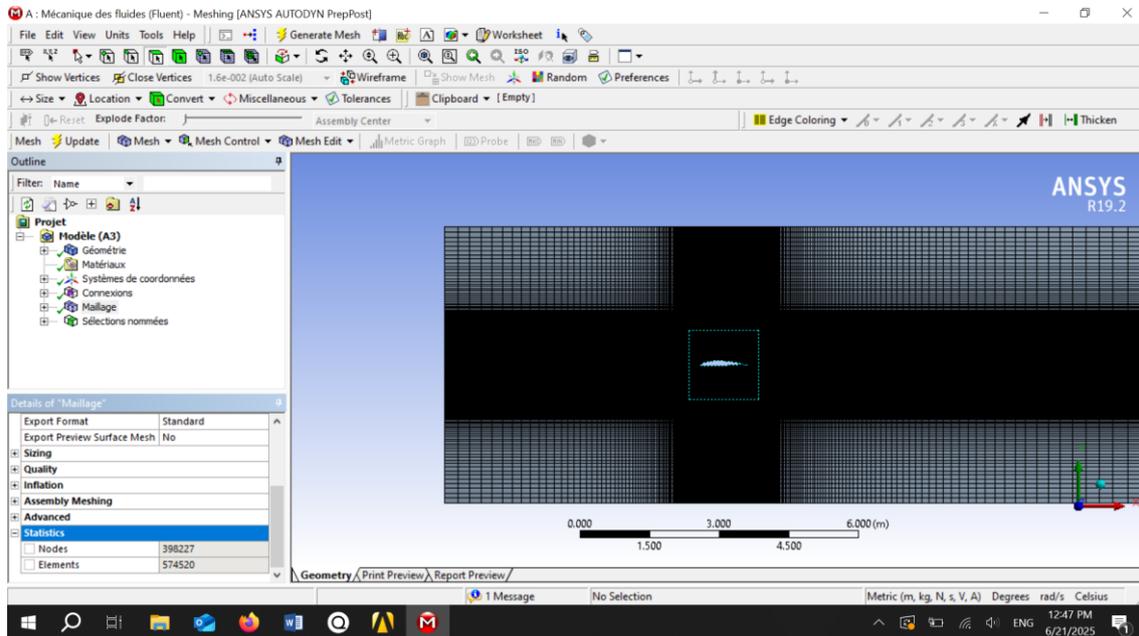


Figure III.2 Maillage hybride structuré/non structuré généré autour du profil

- Nombre total d'éléments : 398227
- Nombre de nœuds : 574520
- Longueur minimale de maille : $3.5477e-5$ m

b. Étude de sensibilité du maillage

Dans le cadre de la simulation CFD du profil aérodynamique S803, une étude de sensibilité au maillage a été conduite afin d'évaluer l'impact du raffinement du maillage sur les résultats aérodynamiques, notamment les coefficients de portance (CL) et de traînée (CD). Trois configurations de maillage ont été testées, allant du maillage grossier au maillage raffiné, avec des niveaux de densité croissante autour du profil.

Tableau III.1 Résultats l'étude de sensibilité du maillage

Maillage	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Temps de simulation	CL	CD
Maillage 1 (raffiné)	983 619	1 562 809	~4h	0.5733	0.00909
Maillage 2 (intermédiaire)	398 227	574 520	~2h15min	0.5730	0.00910
Maillage 3 (grossier)	267 987	429 310	~40 min	0.5610	0.01000

On observe que pour le maillage grossier (Maillage 3), les résultats présentent un écart significatif, notamment une sous-estimation du coefficient de portance et une surestimation du coefficient de traînée. En revanche, les deux maillages les plus fins (Maillage 1 et Maillage 2) donnent des résultats très proches, indiquant une convergence numérique satisfaisante.

Le maillage intermédiaire (Maillage 2) a été retenu pour l'ensemble des simulations de ce mémoire. Il représente un compromis optimal entre précision des résultats et temps de calcul raisonnable, garantissant ainsi la fiabilité des prédictions aérodynamiques sans coût numérique excessif.

c. Qualité du maillage

La qualité du maillage est jugée satisfaisante, avec des cellules orthogonales, bien réparties et sans distorsion excessive. Aucun problème de mauvaise qualité (éléments inversés ou très aplatis) n'a été observé.

III.5.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites appliquées à la simulation 2D ont été définies tout en tenant compte des spécificités géométriques du domaine. Elles sont indispensables pour garantir une simulation stable, réaliste et cohérente avec le fonctionnement réel du profil.

- Entrée (Inlet) : vitesse uniforme de 6 m/s.
- Sortie (Outlet) : pression relative nulle (0 Pa).
- Surface du profil : paroi rigide avec condition de non-glissement (*no-slip*).
- Parois latérales, haut et bas : considérées comme plans symétriques.

III.5.4. Étude paramétrique

Suite à la validation de la simulation pour un angle d'incidence de 0° , une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier l'angle d'incidence de l'écoulement de -5° à $+19^\circ$ par pas de 2° , chaque configuration étant générée automatiquement dans Workbench par duplication du point de référence afin d'assurer une variation contrôlée du seul paramètre d'incidence tout en préservant l'identité du maillage, des conditions aux limites et des paramètres numériques, garantissant ainsi la comparabilité directe des résultats entre les différentes configurations simulées.

III.5.5. Résultats

Une fois le maillage validé et les conditions aux limites correctement définies, la simulation a été lancée dans ANSYS Fluent à l'aide du solveur Pressure-Based avec le couplage SIMPLE, bien adapté aux écoulements incompressibles et stationnaires.

a. Convergence de la solution

- Le nombre d'itérations maximal a été fixé à 500, mais la solution convergeait systématiquement avant ce seuil, ce qui indique une bonne stabilité numérique.
- Les résidus ont été surveillés pour toutes les équations (continuité, quantité de mouvement, turbulence), et la valeur cible de convergence a été fixée à 10^{-5} (soit 0,00001).
- En complément, les forces aérodynamiques de traînée et de portance ont été suivies en temps réel, et ont montré une stabilisation rapide sans oscillations, validant ainsi la convergence de la solution.

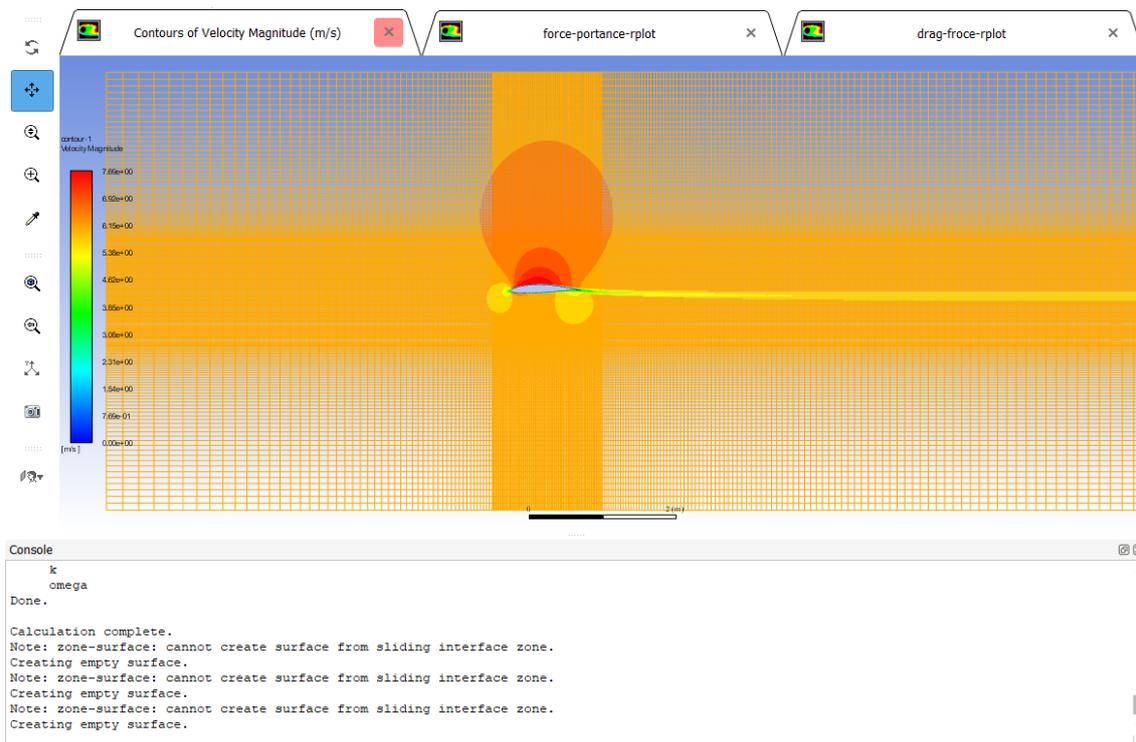


Figure III.3 Contours de la vitesse (m/s) autour du profil S803 à l'aide de la simulation CFD

b. Calcul des coefficients aérodynamiques

Pour chaque cas simulé, les forces de traînée (drag force) et de portance (lift force) ont été extraites automatiquement depuis le solveur. À partir de ces forces, les coefficients aérodynamiques ont été calculés à l'aide des expressions suivantes, directement introduites dans Workbench : [29]

$$C_D = \frac{F_d}{0.5 * \rho * s * U^2} \quad (III.12)$$

$$C_L = \frac{F_l}{0.5 * \rho * s * U^2} \quad (III.13)$$

Avec :

- $\rho=1,1836 \text{ kg/m}^3$: densité de l'air,
- $U=6 \text{ m/s}$: vitesse d'entrée,
- $S=1 \cdot 1=1 \text{ m}^2$: surface de référence, correspondant à une corde de 1 mètre et une profondeur unitaire pour le cas 2D.

	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Mécanique des fluides (Fluent) (A1)			
4	P1	incidence	0	degree
5	P2	deniste	1.1836	kg m^-3
6	P3	vitessentree	6	m s^-1
*	New input parameter	New name	New expression	
8	Output Parameters			
9	Mécanique des fluides (Fluent) (A1)			
10	P4	drag-froce-op	0.19387	N
11	P5	force-portance-op	12.207	N
12	P6	CD	0.0091	m^2
13	P7	CL	0.573	m^2
*	New output parameter		New expression	
15	Charts			

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Expression	$P4/(0.5*P2*1*P3**2)$
4	Usage	Expression Output
5	Description	
6	Error Message	
7	Expression Type	Derived
8	Quantity Name	Area

Figure III.4 Définition des paramètres d'entrée et de sortie pour le calcul des coefficients aérodynamiques

e. Post-traitement des résultats et discussion

L'analyse des résultats obtenus à partir de la simulation CFD a permis de dégager une tendance claire du comportement aérodynamique du profil S803 en fonction de l'angle d'incidence.

Tableau III.2 Coefficients aérodynamiques obtenus pour chaque angle d'incidence (CL, CD)

α (°)	CL	CD
-5	-0.0181	0.0235
-3	0.2395	0.01021
-1	0.464	0.0084
0	0.573	0.0091
1	0.6807	0.00914
3	0.9	0.00962
5	1.1111	0.01026
7	1.247	0.0139
9	1.3684	0.02038
11	1.4465	0.02921
13	1.482	0.04561
15	1.51	0.0653
17	1.4626	0.0991
19	1.3146	0.1682

- **Evolution de la portance**

Le coefficient de portance CL augmente de manière quasi linéaire entre -5 degré et 19 degré, avec une pente relativement constante. Cette évolution confirme un bon comportement linéaire du profil dans cette plage d'incidence, ce qui est typique d'un écoulement attaché. On note un léger aplatissement de la courbe à $\alpha=15$, suggérant le début d'un décrochage progressif, sans rupture brutale.

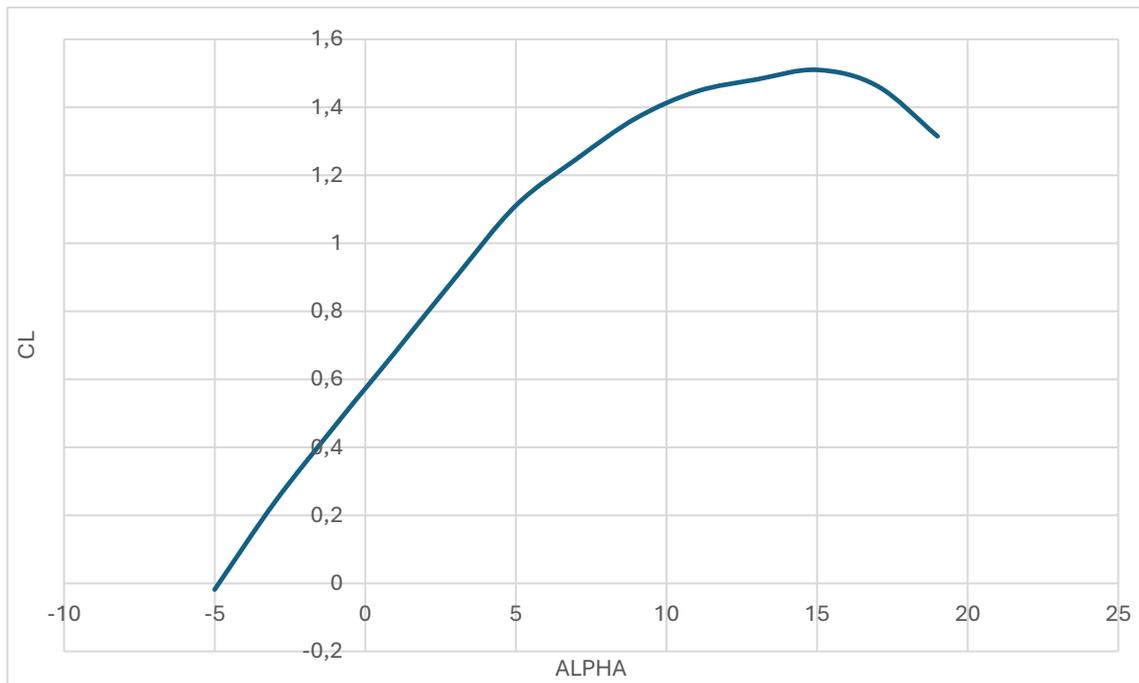


Figure III.5 Évolution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence

○ **Comportement de la traînée**

Le coefficient de traînée C_D reste relativement faible et stable pour les faibles angles d'incidence (proche de 0,009 jusqu'à $\alpha=5$), ce qui indique un écoulement globalement laminaire et peu perturbé. En revanche, à partir de $\alpha=7$, la traînée augmente rapidement, traduisant une dégradation de la qualité de l'écoulement (apparition de zones de séparation sur l'extrados).

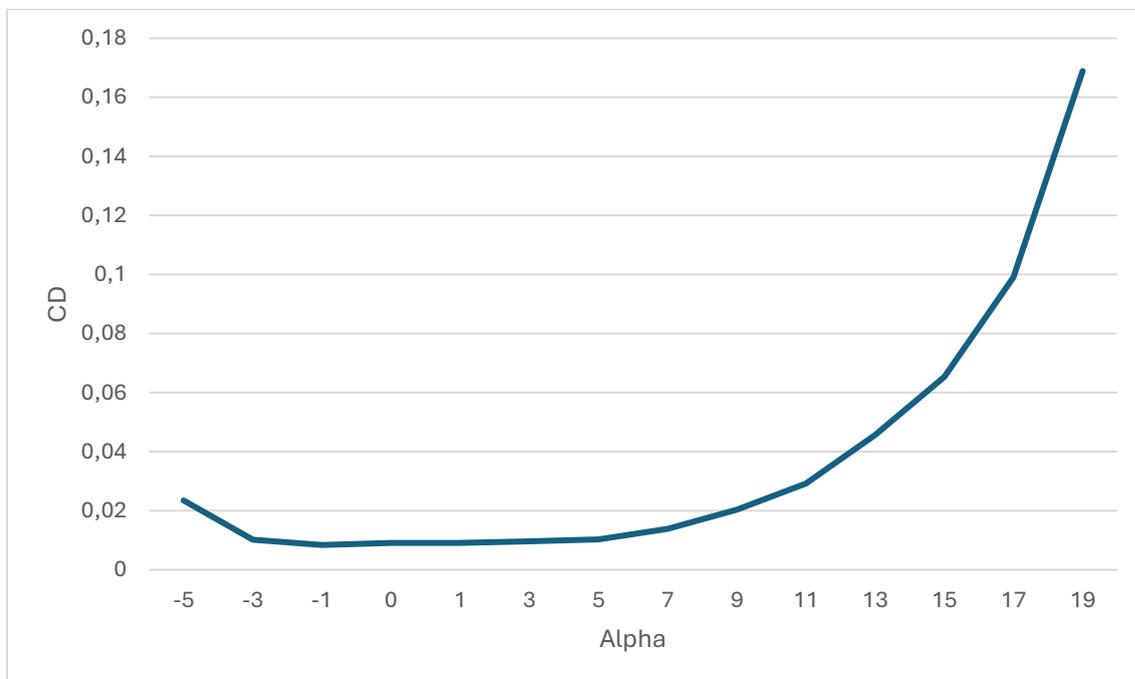


Figure III.6 Évolution du coefficient de traînée en fonction de l'angle d'incidence

- **Interprétation globale**

- Le profil S803 montre une excellente portance jusqu'à $\alpha \approx 11$, tout en maintenant une traînée modérée.
- Le comportement observé est cohérent avec les attentes pour un profil à bord d'attaque épais, conçu pour maintenir un écoulement stable à des angles relativement élevés.
- Les résultats obtenus traduisent un bon équilibre entre efficacité aérodynamique (rapport CL/CD) et tolérance au décrochage.

- **Remarque**

L'évolution douce de CL et la montée contrôlée de CD plaident en faveur d'un profil robuste, adapté à des applications à vitesse modérée, comme les petites éoliennes ou avions légers.

III.6. Simulation 3D

Dans le cadre de cette étude, une première analyse a été menée en deux dimensions (2D) afin d'évaluer les performances aérodynamiques du profil S803 à l'aide de la simulation numérique. Bien que cette approche permette d'obtenir des résultats intéressants, elle repose sur l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel, ce qui ne prend pas en compte les effets tridimensionnels réels présents dans la majorité des applications pratiques.

Afin d'améliorer la précision des résultats et d'approcher davantage le comportement réel de l'écoulement autour du profil, une extension de l'étude a été réalisée en trois dimensions (3D). Cette démarche permet de prendre en compte les effets liés à la profondeur du profil, tels que les vortex d'extrémité, les gradients transversaux, et les perturbations induites par la géométrie spatiale.

L'objectif principal de cette section est donc de simuler l'écoulement tridimensionnel autour du profil S803 tout en conservant les mêmes équations fondamentales, conditions aux limites, et modèle de turbulence que dans le cas 2D. Les résultats obtenus seront ensuite analysés afin de mettre en évidence les différences notables entre les deux approches, et de mieux comprendre l'impact des effets tridimensionnels sur les performances aérodynamiques.

III.6.1. Géométrie 3D

La géométrie tridimensionnelle du profil S803 a été construite à l'aide du logiciel SolidWorks, à partir des coordonnées (x, y) utilisées dans l'analyse 2D. Ces coordonnées définissent la forme exacte de l'extrados et de l'intrados du profil, et ont été extrudées selon une profondeur définie afin de générer une pale tridimensionnelle.

Afin de reproduire les conditions réelles de fonctionnement d'une pale d'éolienne, un angle de vrillage a été introduit le long de la profondeur du profil. Cette inclinaison

progressive respecte les conditions étudiées précédemment lors de la phase BEM (Blade Element Momentum), ce qui permet de simuler plus fidèlement l'incidence locale de l'écoulement sur chaque section de la pale.

L'étape de modélisation a été réalisée dans SolidWorks comme suit :

- Importation des profils 2D par coordonnées (x, y) à différentes positions axiales.
- Application d'un vrillage progressif en fonction de la position le long de la pale.
- Génération de la surface externe de la pale en reliant les sections par loft.
- Fermeture des extrémités et définition d'un solide étanche pour garantir l'étanchéité numérique nécessaire à la simulation.



Figure III.7 Géométrie de la pale sur SolidWorks

Une fois la géométrie 3D finalisée, elle a été exportée au format STEP puis importée dans ANSYS Fluent via DesignModeler pour la suite du processus de maillage et de simulation. Cette méthode permet d'assurer la compatibilité géométrique avec l'environnement de simulation, tout en maintenant une fidélité élevée par rapport à la forme réelle de la pale.

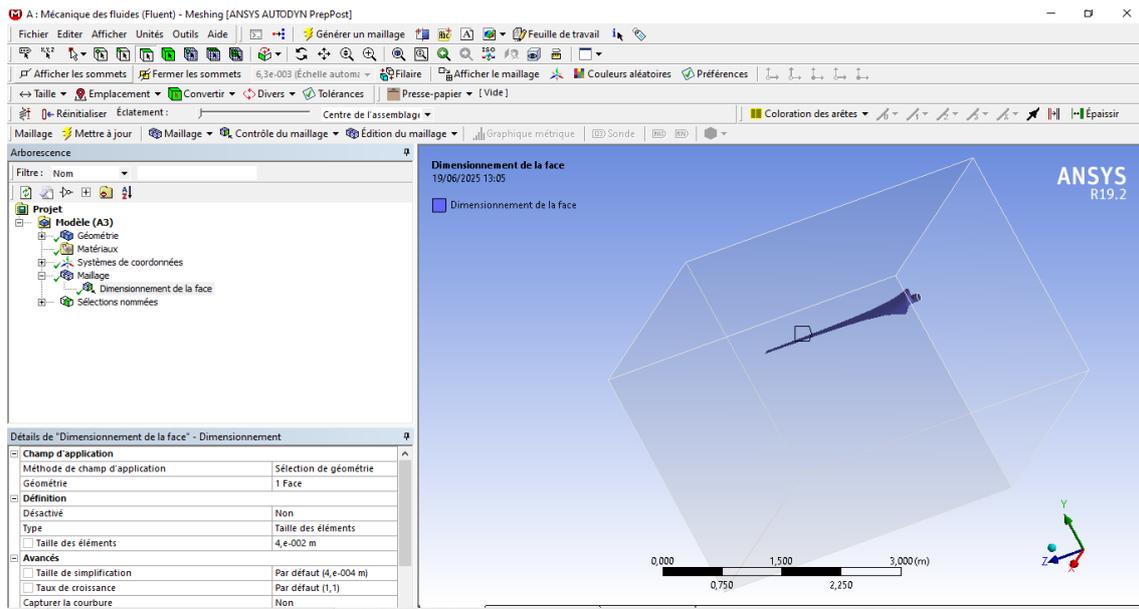


Figure III.8 Géométrie de la pale dans le domaine d'étude

III.6.2. Maillage 3D

Le maillage du domaine fluide autour de la géométrie 3D a été réalisé à l'aide d'un maillage non structuré. Ce choix est justifié par la complexité de la géométrie, notamment la présence de vrillage le long de la pale, qui rend difficile l'application d'un maillage structuré sans compromettre la qualité ou introduire des distorsions.

Le maillage non structuré permet une plus grande flexibilité dans la définition des volumes et facilite l'adaptation locale autour des zones critiques. En particulier, un raffinement local a été appliqué autour du profil, notamment au niveau de l'extrados, de l'intrados, du bord d'attaque et du bord de fuite, afin d'améliorer la résolution des gradients de vitesse et de pression. [30]

Les caractéristiques globales du maillage sont les suivantes :

- Nombre total d'éléments : 2 023 536
- Nombre de nœuds : 11 750 608

La qualité du maillage a été vérifiée à l'aide des critères classiques tels que l'orthogonalité, l'aspect ratio, et l'absence de cellules inversées. Les résultats montrent un maillage de bonne qualité, avec une distribution régulière des éléments et aucun défaut majeur détecté. Les zones de transition entre raffinement et grossissement progressif sont bien maîtrisées, ce qui permet d'assurer une bonne stabilité numérique lors de la simulation. [30]

Ce maillage garantit ainsi un compromis satisfaisant entre précision des résultats et coût de calcul, tout en respectant les exigences du modèle de turbulence $k-\omega$ SST utilisé.

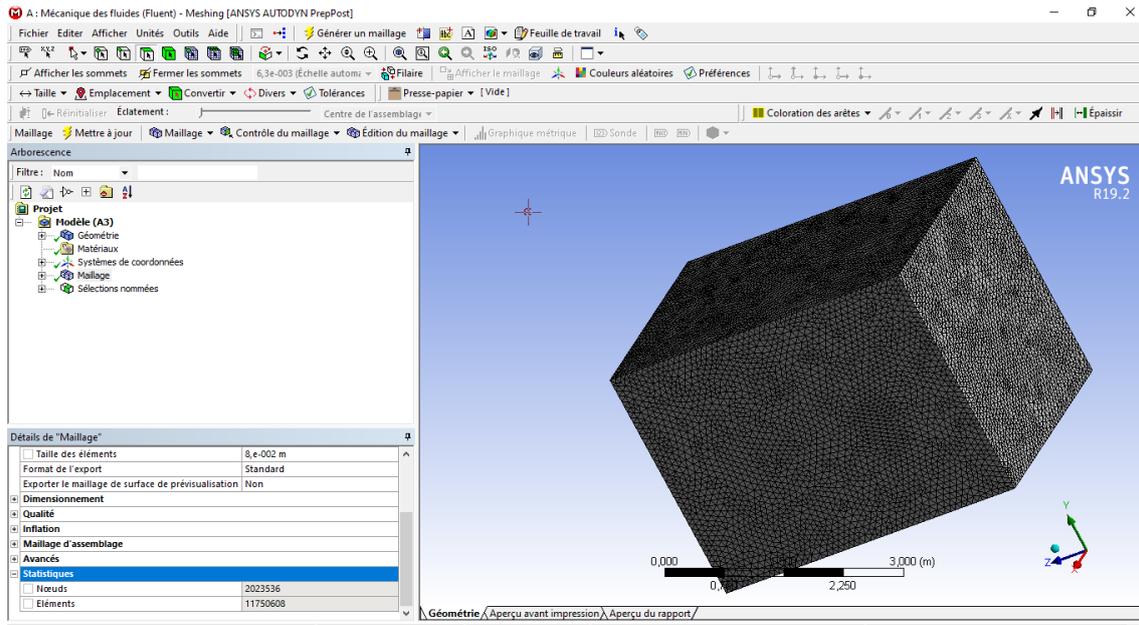


Figure III.9 Maillage 3d non structuré générer de la pale

III.6.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites appliquées à la simulation 3D ont été définies de manière à reproduire les mêmes hypothèses physiques que dans le cas 2D, tout en tenant compte des spécificités géométriques du domaine tridimensionnel. Elles sont indispensables pour garantir une simulation stable, réaliste et cohérente avec le fonctionnement réel du profil.

- Entrée (Inlet) : vitesse uniforme de 3m/s, 6m/s et 9m/s direction parallèle à l'axe de la pale.
- Sortie (Outlet) : pression relative nulle (0 Pa).
- Surface du profil : paroi rigide avec condition de non-glissement (*no-slip*).
- Parois latérales, haut et bas : considérées comme plans symétriques ou murs lisses.
- Angle d'incidence : intégré directement dans la géométrie via le vrillage défini sous SolidWorks.

III.6.4. Simulation et convergence

La simulation tridimensionnelle a été lancée dans ANSYS Fluent en conservant le solveur de type Pressure-Based et le schéma de couplage SIMPLE, comme dans la version 2D. Le modèle de turbulence $k-\omega$ SST a également été maintenu, assurant une bonne résolution des phénomènes proches des parois. [31]

La convergence a été suivie via les résidus des équations de continuité, quantité de mouvement et turbulence, avec un critère de convergence fixé à 10^{-5} . Et que la solution a convergeait de manière stable avant 500 itérations. Les forces de portance

et de traînée ont été extraites uniquement pour une section correspondant à la corde moyenne de la pale. Cette approche permet de comparer les résultats 3D avec ceux obtenus en 2D de manière cohérente.

Les courbes obtenues montrent une bonne stabilisation des forces, validant ainsi la convergence physique de la simulation pour cette section.

III.6.5. Post-traitement des résultats

L'analyse post-simulation a porté sur l'extraction des forces aérodynamiques agissant sur la section de corde moyenne de la pale, considérée comme représentative de la performance globale du profil en régime stable.

À partir de ces forces, les coefficients aérodynamiques ont été calculés automatiquement dans ANSYS Fluent à l'aide des expressions définies dans l'environnement paramétrique. Les résultats obtenus indiquent une bonne cohérence avec les attentes théoriques :

- Coefficient de portance C_L : 0.5567
- Coefficient de traînée C_D : 0.00072

Ces valeurs traduisent une excellente performance aérodynamique du profil à la corde moyenne, avec une portance significative et une traînée extrêmement faible, confirmant la qualité du profil S803 dans une configuration de faible incidence en écoulement laminaire.

Les figures ci-dessous illustrent visuellement ces résultats, notamment :

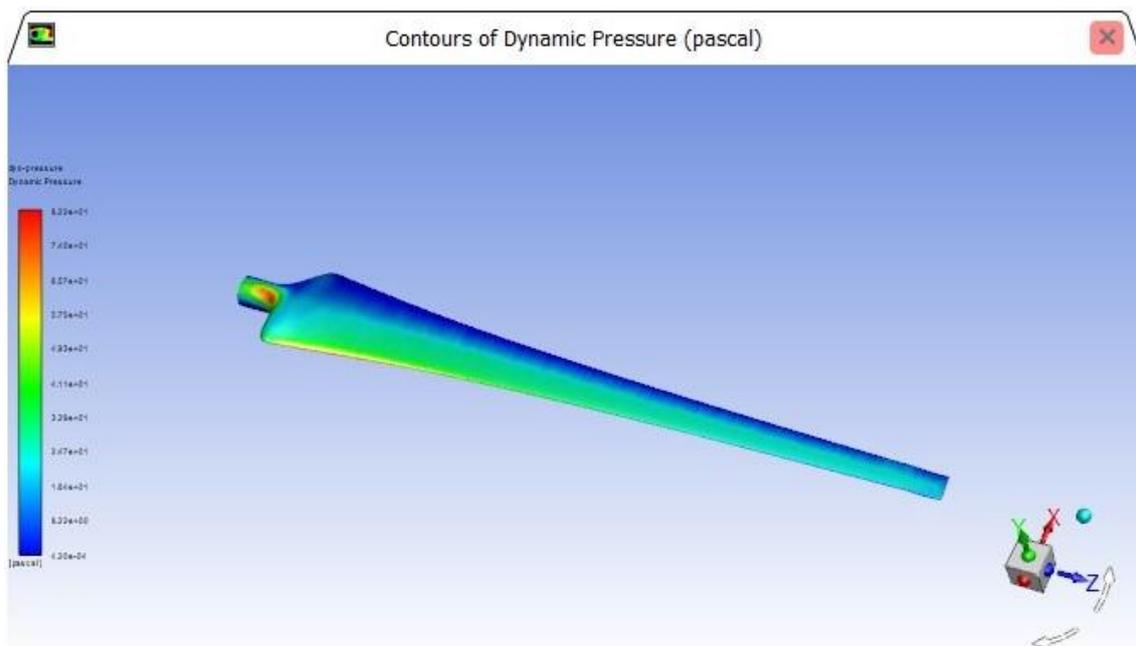


Figure III.10 Affichage du contour de pression sur la surface du profil

The screenshot shows a window titled 'Arborescence de Tous les paramètres'. It contains a table with the following data:

	A	B	C	D
1	ID	Nom du paramètre	Valeur	Unité
2	Paramètres d'entrée			
*	Nouveau paramètre d'entrée	Nouveau nom	Nouvelle expression	
4	Paramètres de sortie			
5	Mécanique des fluides (Fluent) (A1)			
6	P1	fd-op	0,153	N
7	P3	cd-op	0,00072	
8	P4	fl-op	11,85	N
9	P5	cl-op	0,5567	
10	P6	m-op	11,52	J
11	P7	cm-op	0,5385	
*	Nouveau paramètre de sortie		Nouvelle expression	
13	Diagrammes			

Figure III.11 Résumé des coefficients extraits (CL, CD) directement depuis le solveur Fluent.

Afin de compléter l'analyse aérodynamique menée à 0° , la simulation 3D a été étendue à plusieurs angles d'incidence et plusieurs vitesses du vent supplémentaires, en ajustant l'orientation du vecteur vitesse d'entrée tout en conservant la géométrie et le maillage inchangés. Cette méthode permet de simuler différentes conditions de fonctionnement de la pale sans altérer la configuration initiale.

Chaque simulation nécessitant un temps de calcul moyen de cinq heures, seuls quelques angles représentatifs ont été étudiés, à savoir : -4 , -2 , 0 , 2 , 4 , 6 , 8 degrés. Les résultats obtenus pour chaque cas sont regroupés dans le tableau ci-dessous, et illustrés ensuite par des courbes $CL(\alpha)$, $CD(\alpha)$, permettant d'analyser l'évolution du comportement aérodynamique de la pale sur la plage angulaire étudiée.

Tableau III.3 Résultats de la simulation 3D des coefficients aérodynamiques

Degré	3 m/s		6 m/s		9 m/s	
	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D
-4	-0.03657	0.005789	-0.4726	0.0095	-0.35165	0.050655
-2	-0.03924	0.005665	-0.2178	0.0085	-0.15822	0.04929
0	0.041974	0.005434	0.5567	0.0072	0.6023	0.047478
2	0.144244	0.005301	0.8991	0.0082	0.92713	0.048464
4	0.16694	0.005054	1.0034	0.0095	1.24954	0.050196
6	0.278905	0.00478	1.1777	0.0112	1.47156	0.051818
8	0.351048	0.004435	1.3101	0.0138	1.69276	0.053668

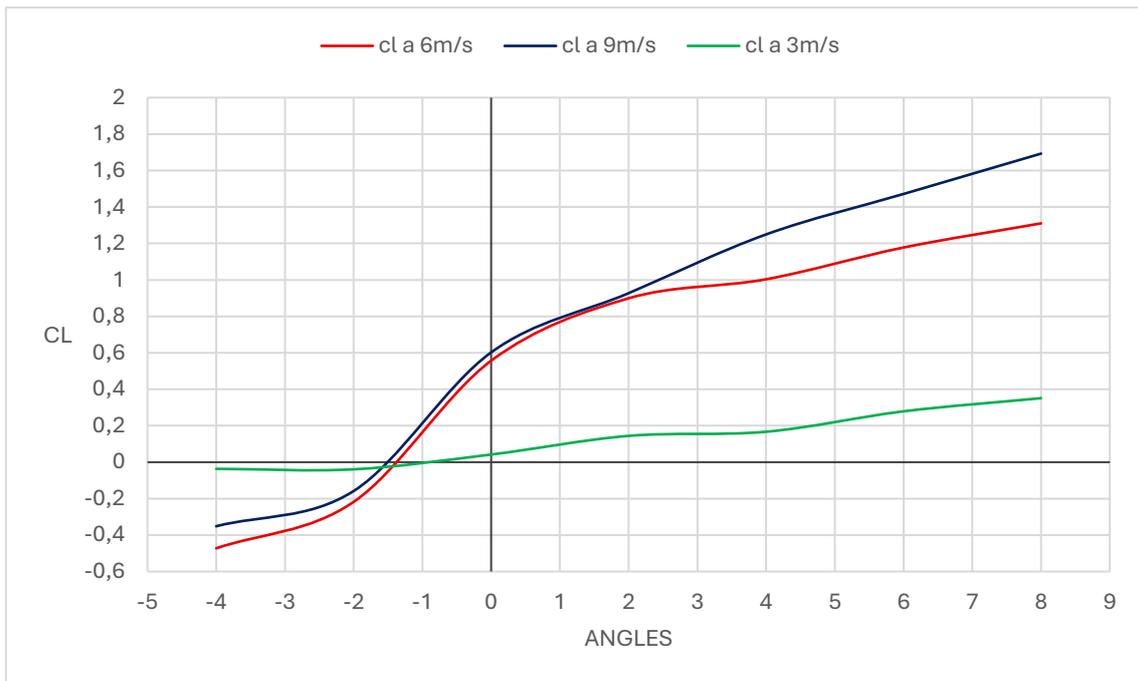


Figure III.12 Évolution du coefficient de portance CL en fonction de l'angle d'attaque α

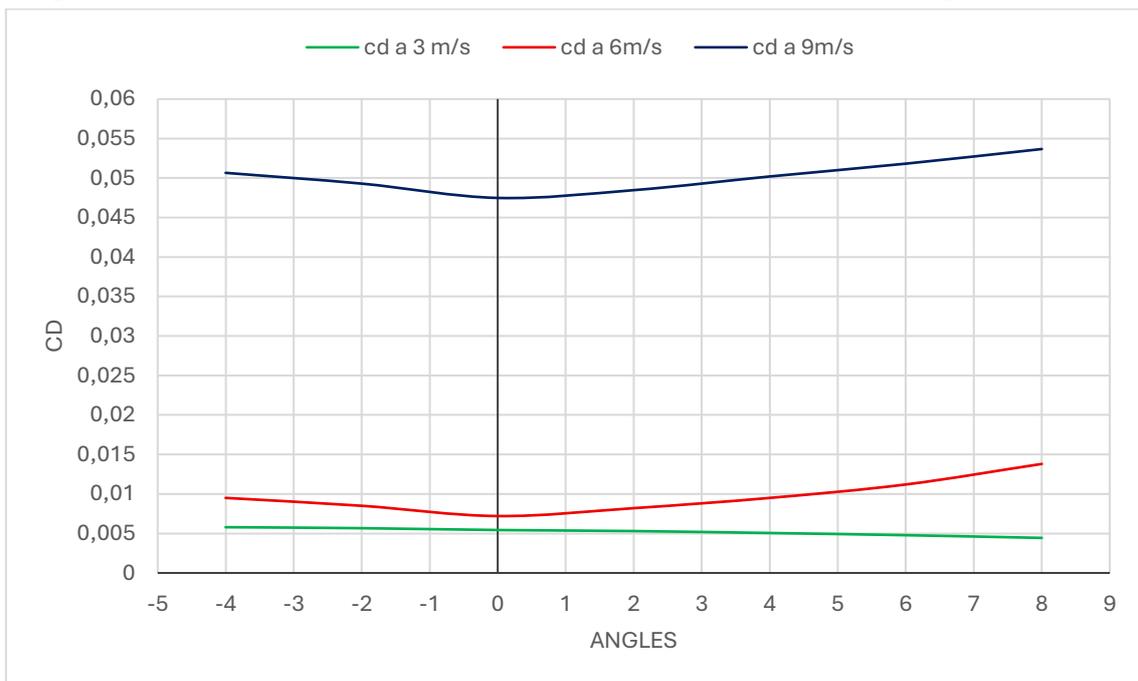


Figure III.13 Évolution du coefficient de traînée CD en fonction de l'angle d'attaque α

III.6.6. Discussion des résultats de simulation 3D

Les graphiques ci-dessus montrent l'évolution du coefficient de portance CL et du coefficient de traînée CD en fonction de l'angle d'attaque pour les trois vitesses étudiées.

- ✓ À 3 m/s, le CL reste relativement faible sur toute la plage d'angles, atteignant une valeur maximale d'environ 0.35 à 8° ; et le CD reste faible et relativement constant, oscillant autour de 0.005.
- ✓ À 6 m/s, le CL augmente sensiblement avec l'angle, atteignant un maximum de 1.31 à 8° ; et une légère augmentation du CD est observée, atteignant 0.0138 à 8°.
- ✓ À 9 m/s, la pale développe un CL encore plus élevé, culminant à 1.69 ; ainsi que le CD devient plus significatif, allant jusqu'à 0.0536.

Ces simulations 3D menées sous ANSYS Fluent ont mis en lumière le comportement aérodynamique optimisé de la pale. L'analyse des coefficients de portance (CL) et de traînée (CD) en fonction de l'angle d'incidence a révélé une évolution cohérente : à 6m/s le CL augmente de manière quasi linéaire jusqu'à 1.31 à 8°, sans signe de décrochage prématuré, tandis que le CD reste faible aux faibles incidences, augmentant progressivement. Ce comportement linéaire et stable est en accord avec une pale bien conçue opérant en régime pré-décrochage. L'étude en fonction de la vitesse du vent a par ailleurs démontré des performances notables à partir de 6 m/s, où l'efficacité aérodynamique est optimale, confirmant l'adaptation idéale de la pale aux vitesses de vent modérées, malgré une hausse du CD à 9 m/s réduisant légèrement cette efficacité.

Ces observations confirment la pertinence du profil aérodynamique choisi et valident la géométrie de la pale conçue, en garantissant un fonctionnement performant dans des conditions de vent courantes.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier numériquement les performances aérodynamiques du profil S803 à travers une simulation CFD rigoureuse sous ANSYS Fluent, intégrant les effets tridimensionnels, le vrillage de la pale et un modèle de turbulence avancé. Les résultats obtenus, à la fois en 2D et en 3D, révèlent un comportement aérodynamique stable, une montée progressive du coefficient de portance et une traînée modérée, même à des angles d'incidence élevés. Cette simulation confirme la robustesse du profil choisi et constitue un maillon essentiel entre l'optimisation théorique et l'expérimentation physique menée ultérieurement.

Chapitre 4 : Validation expérimentale et comparaison avec les résultats numériques

IV.1. Introduction

Ce chapitre vise à valider les résultats de simulation CFD 3D par comparaison avec des données expérimentales obtenues en soufflerie, permettant d'évaluer la fiabilité du modèle numérique et de confirmer sa capacité à reproduire le comportement aérodynamique réel de la pale. Une maquette à échelle réduite (1:5) de la pale, fabriquée par impression 3D en PLA sur imprimante Raise3D Pro2 Plus, a été testée dans une soufflerie subsonique TecQuipment AF1600 avec adaptation de la vitesse d'écoulement pour conserver la similitude de Reynolds. Les forces aérodynamiques mesurées pour différents angles d'incidence ont permis de déterminer les coefficients de portance (CL) et de traînée (CD), directement comparés aux prédictions CFD afin d'identifier les écarts, d'en comprendre les origines et de valider la pertinence du modèle numérique pour la prédiction des performances aérodynamiques.

IV.2. Imprimante 3D utilisée : Raise3D Pro2 Plus

La fabrication de la pale aérodynamique a été réalisée à l'aide de l'imprimante Raise3D Pro2 Plus, une imprimante 3D de haute précision appartenant à la catégorie professionnelle. Elle fonctionne selon la technologie FDM (Fused Deposition Modeling), également appelée dépôt de fil fondu, qui consiste à extruder un filament thermoplastique chauffé à travers une buse mobile, couche par couche, jusqu'à obtention de la pièce finale. [32]

IV.2.1. Caractéristiques techniques principales

- Technologie : FDM
- Volume d'impression : 305 × 305 × 605 mm
- Double extrudeur : permet l'impression en double matériau ou avec un support soluble
- Précision de positionnement : 0,78125 µm sur l'axe X/Y ; 0,078125 µm sur l'axe Z
- Épaisseur de couche : ajustable entre 0,01 mm et 0,25 mm selon la qualité souhaitée
- Diamètre de buse standard : 0,4 mm (remplaçable)

IV.2.2. Matériau utilisé : PLA (Acide Polylactique)

Le matériau choisi pour l'impression est le PLA, un polymère biodégradable dérivé de ressources naturelles comme l'amidon de maïs. Il est largement utilisé en impression 3D pour sa facilité d'impression, sa stabilité dimensionnelle et sa bonne rigidité.

- Température d'extrusion : 190–220 °C
- Température du plateau : 0–60 °C (optionnel pour PLA)

- Avantages : faible déformation, bon rendu de surface, écologique
- Inconvénients : moins résistant à la chaleur et aux chocs que d'autres matériaux (ex : ABS)

L'utilisation du PLA a permis de produire une pale légère, rigide et aux dimensions précises, tout en assurant un bon compromis entre qualité d'impression et contraintes mécaniques pour les essais en soufflerie.

IV.2.3. Principe de similitude et réduction d'échelle

Afin de réussir cette étude expérimentale, la pale a été imprimée en échelle réduite 1:5 par rapport à la géométrie réelle simulée numériquement. Cette réduction a été motivée par les contraintes de dimensions de la veine d'essai de la soufflerie, ainsi que par les capacités de l'imprimante 3D.

Afin de garantir que les phénomènes aérodynamiques observés sur la maquette soient représentatifs de ceux qui se produisent à l'échelle réelle, le théorème de Buckingham π (ou théorème du π) a été appliqué. Celui-ci stipule que pour assurer une similitude dynamique entre deux écoulements (réel et réduit), les nombres sans dimension gouvernant le problème doivent être conservés, en particulier le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (IV.1)$$

- U : vitesse de l'écoulement
- L : longueur caractéristique (ici la corde de la pale)
- ν : viscosité cinématique de l'air

Comme la longueur a été divisée par 5 ($L_{modele} = \frac{1}{5}L_{reel}$), nous avons compensé cette réduction par une augmentation de la vitesse du vent dans la soufflerie selon le facteur inverse, afin de maintenir le même nombre de Reynolds :

$$U_{model} = 5 * U_{reel} = 5 * 6 = 30 \text{ m/s}$$

Ce choix permet de reproduire à l'échelle réduite des conditions aérodynamiques équivalentes à celles de la simulation numérique 3D effectuée à 6 m/s. Ainsi, les résultats obtenus en soufflerie sont comparables en termes de portance, traînée et comportement global de l'écoulement.

IV.2.4. Déroulement de l'impression

L'impression de la pale à l'échelle réduite a duré environ 8 heures et 30 minutes, en utilisant une résolution moyenne pour optimiser le temps de fabrication tout en conservant une bonne fidélité géométrique. La pièce a été imprimée en une seule fois, verticalement, afin d'optimiser la résistance mécanique selon l'axe de sollicitation principale et de limiter les supports.

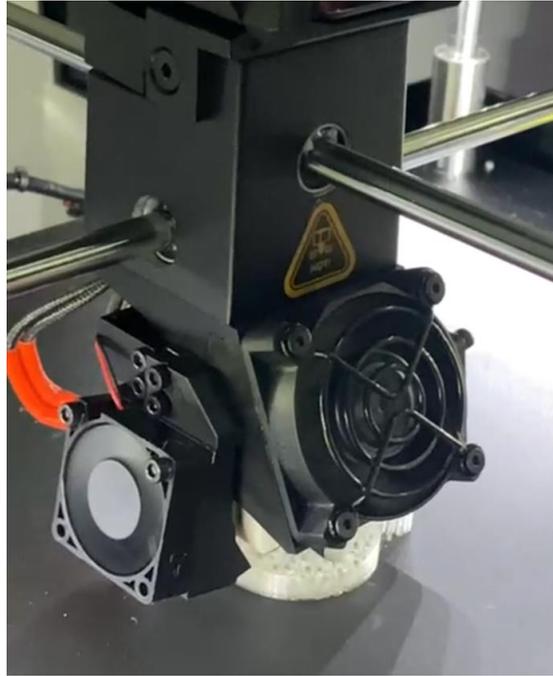


Figure IV.1 Impression de la pale en cours sur l'imprimante Raise3D Pro2 Plus

IV.2.5. Problèmes rencontrés et modifications apportées

Lors de l'installation de la pale imprimée sur le dispositif de soufflerie, un problème d'ajustement a été constaté. La partie cylindrique à la base de la pale, conçue pour l'insertion dans le moyeu, s'est révélée trop courte et petite pour permettre une fixation stable.

Pour corriger ce problème sans modifier le profil aérodynamique lui-même, une extension cylindrique de 4 cm de rayon et de longueur a été ajoutée à l'extrémité de la pale afin d'assurer une fixation rigide dans le système de soufflerie.

Bien que cette modification n'affecte que la zone de raccordement, elle pourrait introduire une légère perturbation locale du champ de vitesse autour de la base de la pale. Cette incertitude expérimentale sera prise en compte dans la discussion des résultats.

IV.3. Installation expérimentale en soufflerie

IV.3.1. Présentation de la soufflerie utilisée

Les essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide de la soufflerie subsonique TecQuipment AF1600, une soufflerie de type circuit ouvert conçue pour l'enseignement avancé et les recherches en aérodynamique. Il s'agit du plus grand modèle proposé par TecQuipment dans cette gamme, offrant une veine d'essai de dimensions généreuses, permettant une visualisation claire et des mesures précises. [33]

IV.3.2. Caractéristiques principales

- Type : soufflerie subsonique à circuit ouvert
- Dimensions de la veine d'essai : 600 mm × 600 mm × 1250 mm (longueur)
- Vitesse maximale de l'air : jusqu'à 40 m/s
- Qualité du flux : faible turbulence, profil de vitesse homogène
- Applications : étude de profils d'aile, forces aérodynamiques, traînée/portance, visualisation des écoulements

Grâce à ses dimensions importantes, cette soufflerie permet d'atteindre des nombres de Reynolds réalistes, tout en réduisant les effets de paroi sur les objets de taille modérée comme notre pale imprimée en 3D.

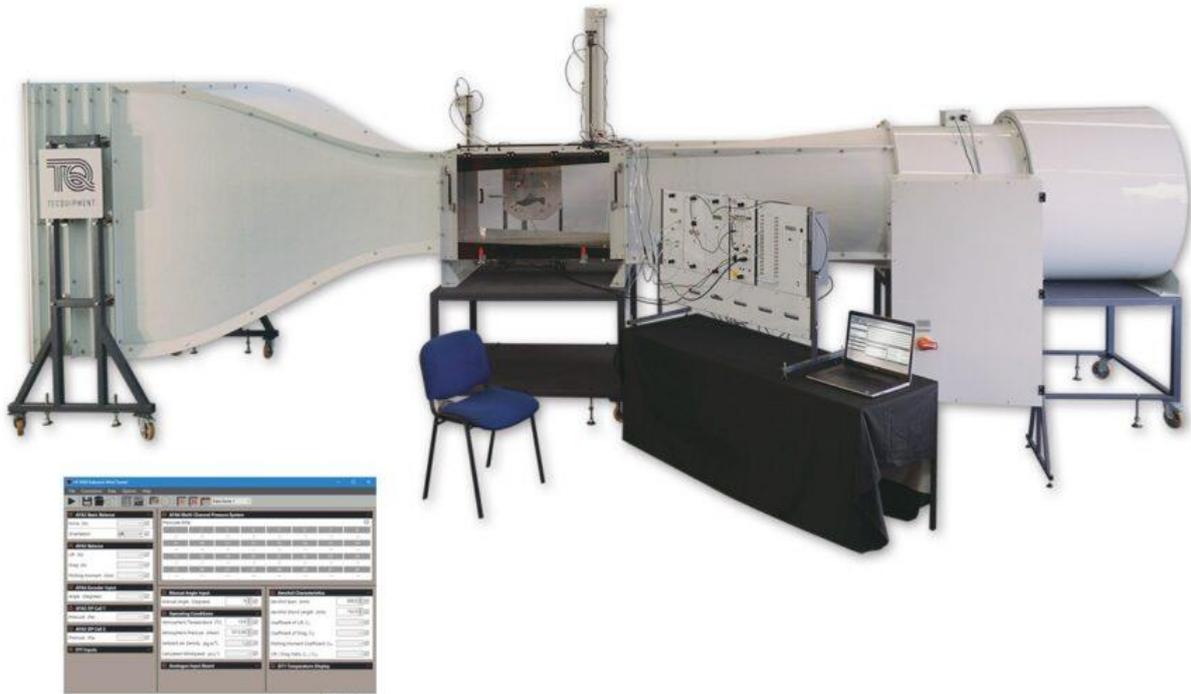


Figure IV.2 Soufflerie subsonique TecQuipment AF1600 utilisée pour l'essai expérimental

IV.3.3. Montage de la pale et configuration des essais

La pale imprimée en 3D a été montée face au flux d'air, dans la veine d'essai, à l'aide d'un dispositif de fixation rigide conçu pour maintenir son orientation. Le montage a été réalisé de manière à minimiser les mouvements parasites et à garantir une répétabilité correcte des mesures.

Bien que la soufflerie soit équipée de modules complémentaires pour la visualisation ou l'analyse de pression, seule la mesure des forces aérodynamiques globales (portance et traînée) a été considérée ici. Ces forces peuvent être mesurées de différentes façons dans ce type d'installation, typiquement via :

- Une balance aérodynamique intégrée à 2 ou 3 axes (forces horizontales et verticales),
- Des capteurs de force fixés directement sur le support (type cellule de charge).

Dans notre cas, l'objectif principal étant d'extraire les coefficients C_L et C_D , les forces mesurées sont directement exploitées dans les formules classiques de l'aérodynamique :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (IV.2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (IV.3)$$

où :

- F_L : force de portance,
- F_D : force de traînée,
- ρ : densité de l'air,
- U : vitesse de l'écoulement,
- S : surface de référence.

L'angle d'incidence a été ajusté manuellement à chaque essai en réorientant la pale autour de son axe de fixation.

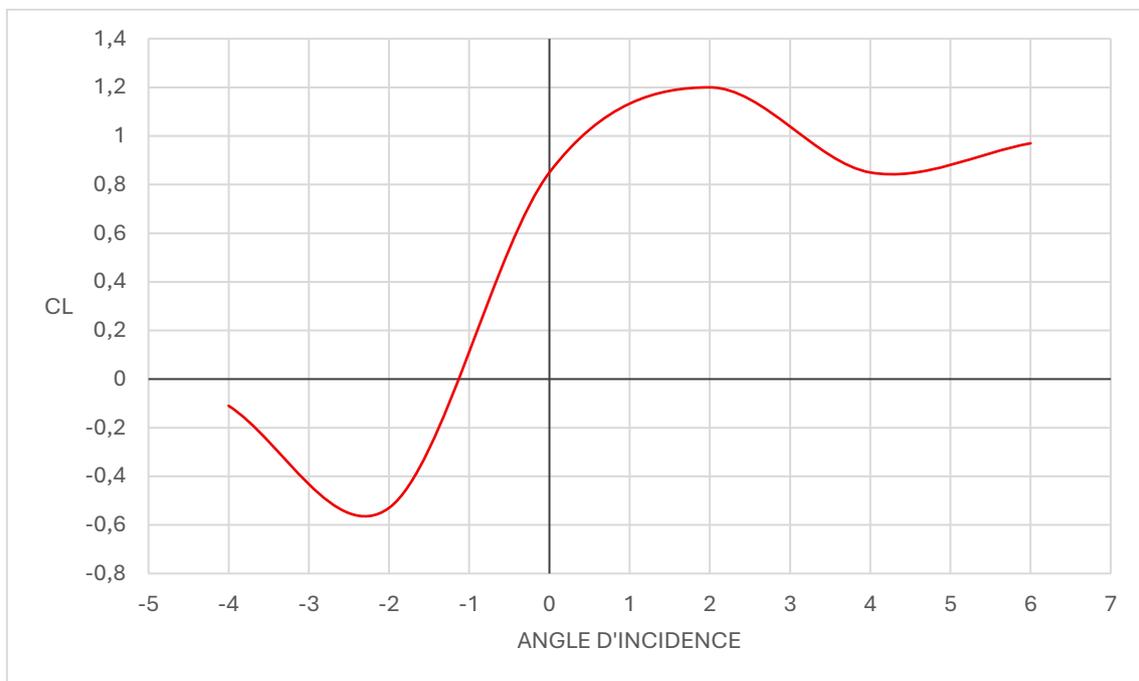
IV.4. Résultats expérimentaux

Après environ 3 heures d'essais en soufflerie, menés sous la supervision de nos enseignants encadrants, nous avons pu collecter les valeurs de portance (C_L) et de traînée (C_D) pour différents angles d'incidence. Les mesures ont été effectuées avec soin en maintenant des conditions expérimentales constantes, notamment une vitesse d'écoulement de 30 m/s et un angle d'incidence réglé manuellement à chaque essai.

Le tableau ci-dessous présente un résumé des résultats expérimentaux, regroupant les valeurs mesurées des coefficients aérodynamiques pour chaque angle d'attaque testé. À partir de ces données, les courbes $C_L(\alpha)$ et $C_D(\alpha)$ ont été tracées afin d'analyser visuellement le comportement aérodynamique du profil en conditions réelles.

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux des coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque

Alpha (°)	CL mesure	CD mesure
-4	-0.11	0.13
-2	-0.53	0.45
0	0.85	0.34
2	0.120	0.42
4	0.85	0.32
6	0.97	0.41

**Figure IV.3** Évolution du coefficient de portance CL en fonction de l'angle d'attaque α

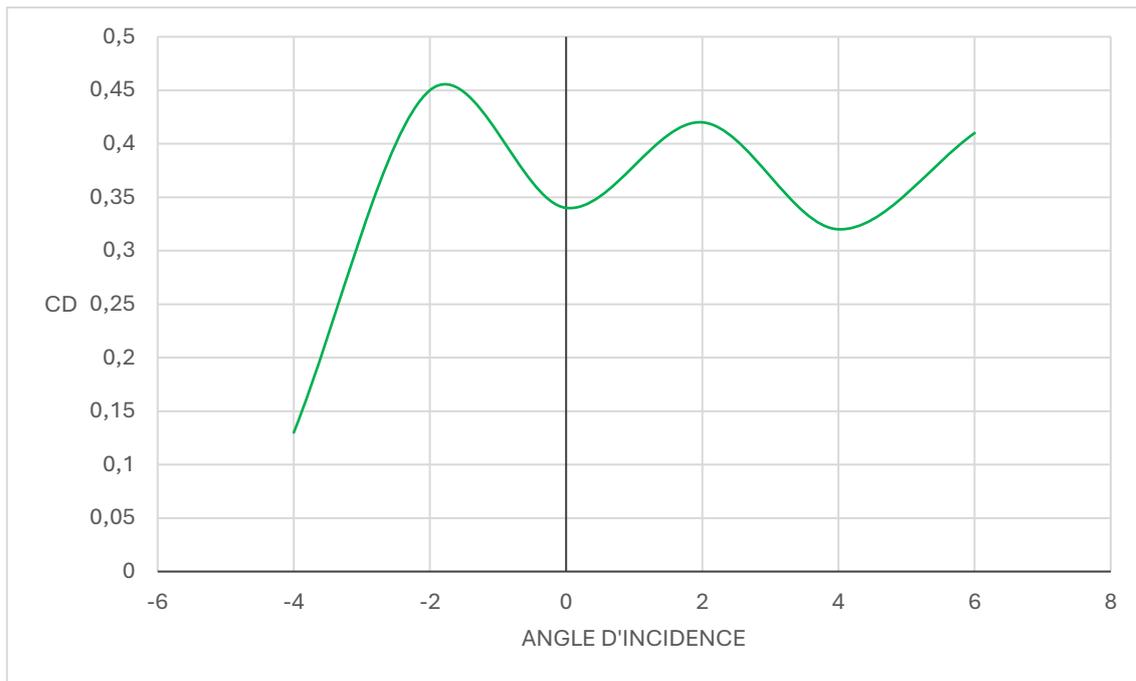


Figure IV.4 Évolution du coefficient de traînée CD en fonction de l'angle d'attaque α

IV.4.1. Discussion des résultats expérimentaux

L'analyse des résultats expérimentaux présentés dans le Tableau 1, ainsi que sur les figures 3 et 4, permet de mieux comprendre le comportement aérodynamique de la pale testée en soufflerie. On constate tout d'abord que pour l'angle d'attaque de -4° , les valeurs mesurées du coefficient de portance $CL = -0.11$ et du coefficient de traînée $CD = 0.13$ sont peu représentatives. Cela s'explique par un flottement important observé lors de cet essai, accompagné de vibrations importantes de l'extrémité non fixée de la pale. Ce phénomène a fortement perturbé la lecture des forces sur la balance, rendant la mesure incertaine.

À partir de -2° , les valeurs deviennent plus cohérentes et suivent une évolution logique. Le maximum de portance est observé à $\alpha = 2^\circ$ avec $CL = 1.20$, ce qui indique que c'est l'angle d'incidence optimal pour notre pale dans ces conditions expérimentales. Au-delà de cet angle, la portance diminue progressivement ($CL \approx 0.85$ à 4° et 0.97 à 6°), suggérant un début de décrochage progressif ou une perte d'efficacité aérodynamique, potentiellement liée aux limites géométriques ou matérielles de la maquette imprimée.

En ce qui concerne la traînée CD, les valeurs restent relativement élevées sur l'ensemble des essais, avec un pic notable à -2° ($CD = 0.45$). Cela pourrait s'expliquer par un déséquilibre ou une mauvaise calibration de la balance aérodynamique, qui affecte particulièrement la composante horizontale de la force (donc la traînée). Les irrégularités observées dans l'évolution de CD sont également influencées par la rugosité de la surface imprimée, l'effet de parois, ainsi que par l'influence de l'extrémité modifiée pour la fixation de la pale.

Globalement, malgré les limitations expérimentales identifiées, les résultats obtenus permettent de dégager des tendances cohérentes avec les principes aérodynamiques de base. Ces résultats serviront de base pour la comparaison avec la simulation numérique 3D, afin d'en évaluer la précision.

IV.4.2. Difficultés expérimentales et facteurs d'erreur affectant les mesures

Malgré un protocole expérimental soigneusement mis en place, plusieurs limitations ont été observées lors des essais en soufflerie. Il s'est avéré difficile, voire dangereux, de mesurer les performances aérodynamiques de la pale pour des angles d'incidence supérieurs à 6° et inférieurs à -4° . En effet, une flexion marquée a été constatée au niveau de l'extrémité libre non fixée de la pale comme montrant dans la figure 5, en raison de la faible épaisseur de paroi dans cette zone (épaisseur inférieure à 1 mm). Cette zone, trop fine pour résister aux efforts aérodynamiques, entraine rapidement en vibration (flottement), menaçant la stabilité du montage et risquant une rupture de la pale.

De plus, les résultats obtenus comportent une marge d'erreur expérimentale imputable à plusieurs facteurs :

- Effets de parois dans la veine d'essai, pouvant perturber le champ d'écoulement autour de la pale ;
- Rugosité et finition de surface de la pièce imprimée, qui restent éloignées d'une surface parfaitement lisse comme en simulation ;
- Influence de l'extrémité modifiée (partie cylindrique ajoutée pour la fixation), qui altère localement l'écoulement ;
- Rigidité globale du système pale-support, limitée par la nature du PLA et le mode de fixation ;
- Et une balance aérodynamique non parfaitement calibrée, surtout concernant la mesure de la traînée CD, pouvant introduire des incertitudes supplémentaires.

Ces facteurs seront pris en compte lors de la comparaison avec les résultats numériques 3D, afin d'identifier de manière précise les causes possibles des écarts observés.



Figure IV.5 Flexion de la pale pendant le test de soufflerie

IV.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier expérimentalement les résultats issus de la simulation numérique 3D de la pale aérodynamique. Grâce à la fabrication d'une maquette à échelle réduite et à des essais en soufflerie rigoureusement menés, les coefficients de portance et de traînée ont pu être mesurés et comparés aux prédictions numériques. Malgré certaines limitations expérimentales, les résultats obtenus montrent une cohérence globale avec les comportements attendus, confirmant la pertinence du modèle CFD utilisé. Cette démarche renforce la crédibilité de l'approche numérique tout en mettant en lumière les facteurs expérimentaux à maîtriser pour des validations plus précises.

Chapitre 5 : Analyse comparative globale et perspectives

V.1. Introduction

L'objectif de cette section est de comparer les résultats aérodynamiques obtenus par simulation numérique 2D sous ANSYS Fluent avec ceux fournis par le logiciel XFOIL pour le profil S803. Cette comparaison permet de vérifier la cohérence entre une méthode de calcul analytique rapide et une modélisation plus précise fondée sur les équations de Navier-Stokes, tout en identifiant les limites de chaque approche. Les courbes des coefficients aérodynamiques CL , CD et du ratio CL/CD ont été superposées afin de visualiser les écarts sur toute la plage angulaire.

V.2. Résultats Xfoil / Simulation ANSYS 2D

V.2.1. Présentation des résultats

La figure suivante montre les résultats obtenus :

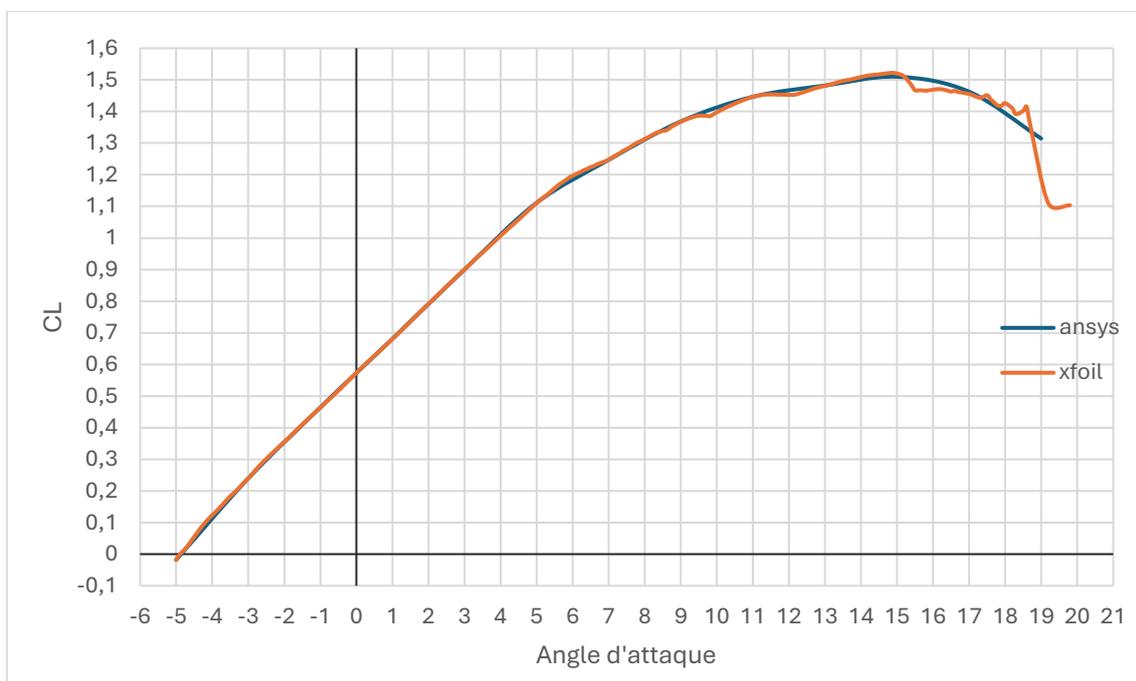


Figure V.1 Comparaison XFOIL/ANSYS 2D des coefficients CL

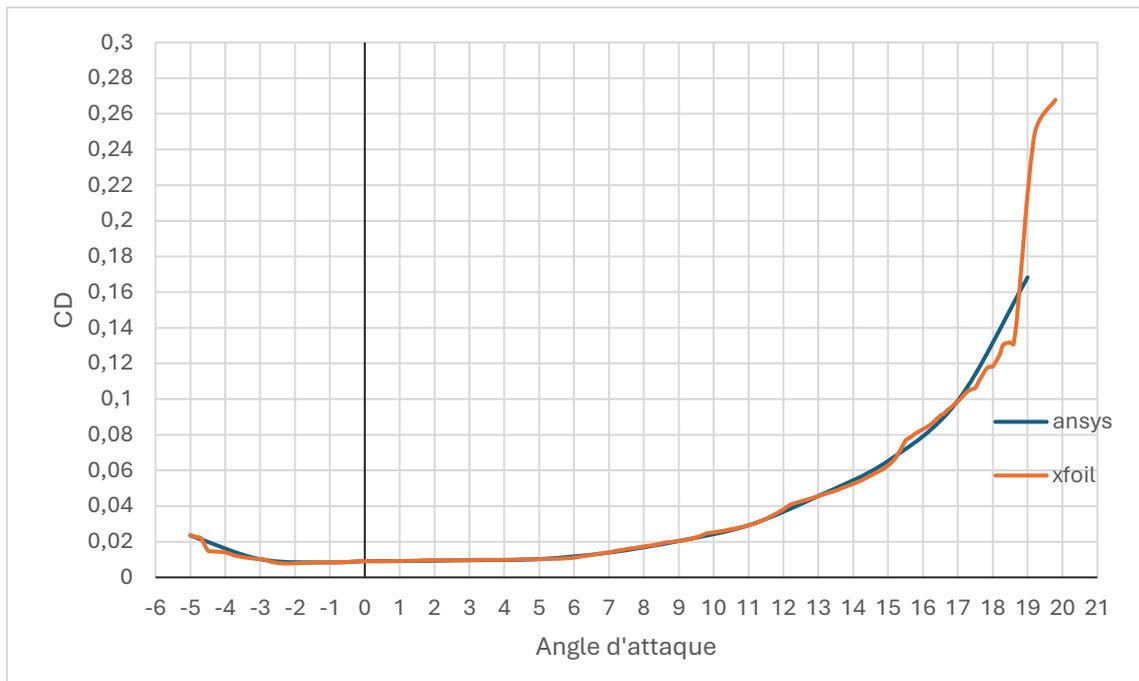


Figure V.2 Comparaison XFOIL/ANSYS 2D des coefficients CD

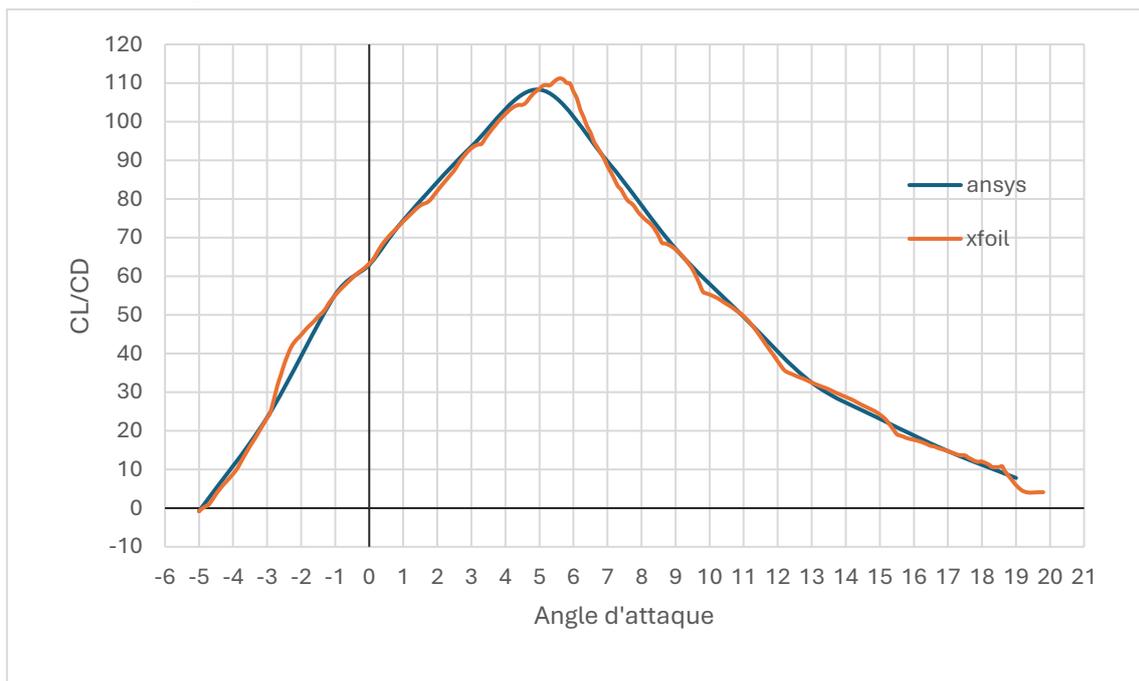


Figure V.3 Comparaison XFOIL/ANSYS 2D des coefficients CL/CD

V.2.2. Analyse du coefficient de portance CL

La courbe $CL(\alpha)$ montre une excellente corrélation entre XFOIL et ANSYS 2D jusqu'à $\alpha \approx 13$. Dans cette zone linéaire, les deux approches donnent des résultats presque identiques, confirmant la justesse du profil choisi et la cohérence des modèles.

À partir de $\alpha > 13$, un léger décalage apparaît : la simulation ANSYS (courbe bleue) montre un décrochage plus progressif, tandis que XFOIL (orange) présente une chute légèrement plus abrupte. Ce phénomène est attendu : ANSYS intègre un modèle de

turbulence ($k-\omega$ SST) capable de mieux capter la séparation partielle de l'écoulement, ce que XFOIL ne traite pas aussi finement.

V.2.3. Analyse du coefficient de traînée CD

Les résultats de $CD(\alpha)$ sont également très proches entre les deux méthodes jusqu'à environ $\alpha=13^\circ$. Dans cette zone, la simulation CFD et XFOIL prédisent une traînée très faible, ce qui est logique pour un profil optimisé à faible traînée comme le S803.

Au-delà de cet angle, XFOIL sous-estime légèrement CD par rapport à ANSYS. Cela s'explique par le fait que XFOIL repose sur des hypothèses d'écoulement quasi-idéal (profil mince, couche limite laminaire ou transition contrôlée), tandis que la simulation CFD tient compte des effets réels : vortex, friction et décollement local.

V.2.4. Analyse du rapport CL/CD

La courbe du rapport aérodynamique CL/CD est un indicateur direct de l'efficacité du profil. Elle atteint un maximum pour $\alpha \approx 6^\circ$ dans les deux cas, avec des valeurs proches de 110.

Après ce point optimal, on observe une chute progressive dans les deux courbes, mais là encore, la courbe bleue (simulation) est plus lissée et réaliste. La simulation prédit une dégradation plus douce de l'efficacité, alors que la chute dans XFOIL est plus abrupte. Cela reflète le comportement plus idéaliste du modèle XFOIL, qui ne prend pas en compte toutes les pertes réelles.

V.2.5. Conclusion locale

Les trois comparaisons montrent que XFOIL et ANSYS 2D donnent des résultats très cohérents dans les conditions de fonctionnement nominales du profil S803. Les écarts apparaissent principalement après le point de rendement maximal, et sont liés aux limites physiques du modèle XFOIL, qui simplifie l'écoulement et ne modélise pas les phénomènes complexes comme le décollement progressif ou les effets visqueux détaillés.

La simulation CFD confirme donc son rôle complémentaire et plus réaliste dans l'analyse aérodynamique fine, en particulier en vue d'une fabrication ou d'une validation expérimentale.

V.3. Résultats expérimentaux / Simulation ANSYS 3D

Ce volet vise à valider la simulation aérodynamique 3D complète de la pale S803 à l'aide des données issues des essais en soufflerie réalisés sur le prototype imprimé.

V.3.1. Présentation des résultats

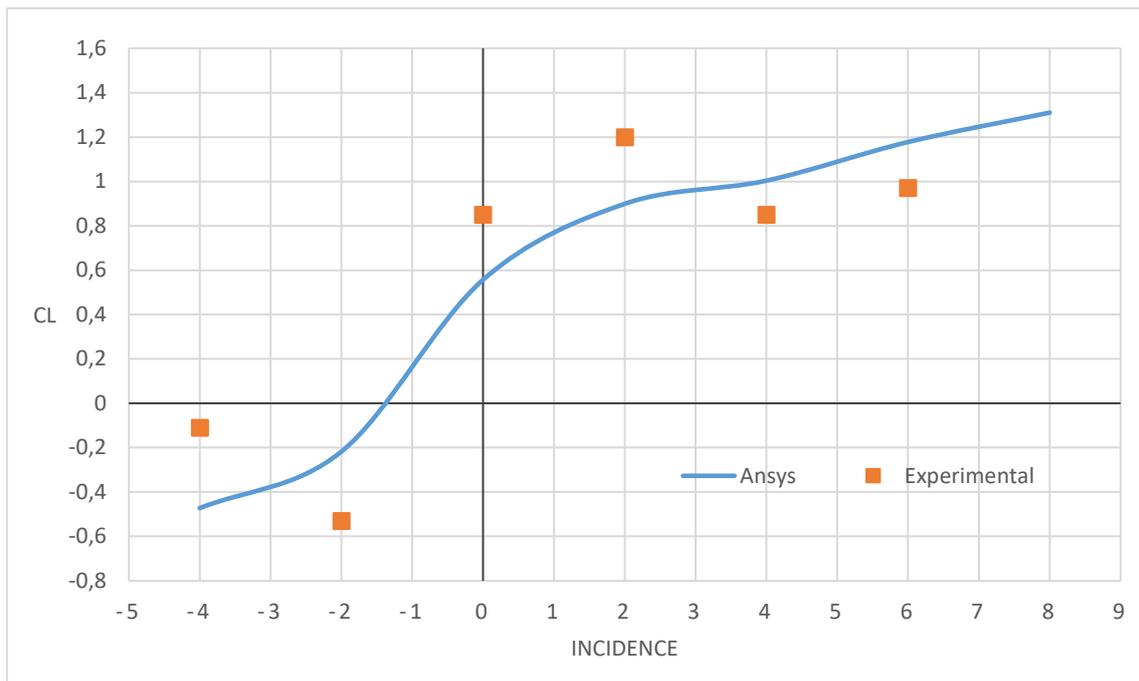


Figure V.4 Comparaison expérimental / ANSYS 3D des Coefficients CL

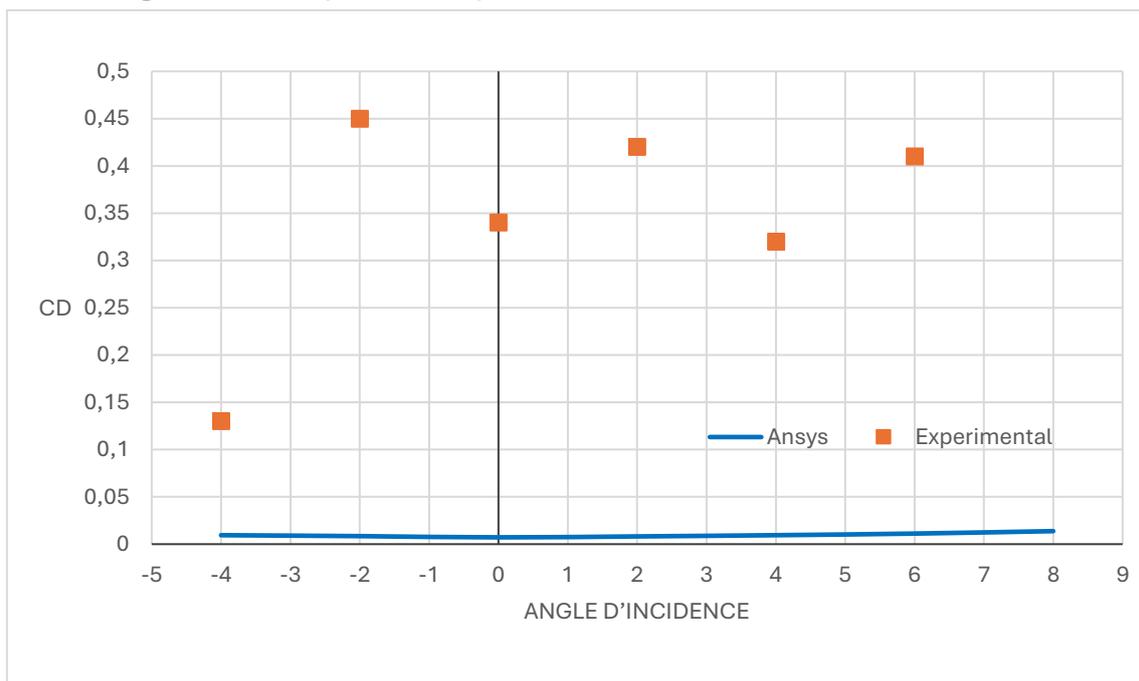


Figure V.5 Comparaison expérimental / ANSYS 3D des Coefficients CD

Les figures ci-dessus présentent les courbes comparatives des coefficients de portance CL et de traînée CD en fonction de l'angle d'incidence, issues respectivement de la simulation numérique 3D (CFD ANSYS Fluent) et des essais expérimentaux menés sur la pale imprimée.

V.3.2. Analyse des Coefficient de portance CL

La figure 4 présente la superposition des courbes du coefficient de portance CL issues de la simulation 3D (en bleu) et des essais expérimentaux en soufflerie (en orange) pour la pale S803.

a. Zone d'incidence négative ($\alpha < 0$)

Dans cette zone, la courbe expérimentale (orange) montre une grande sensibilité aux perturbations mécaniques. À $\alpha = -4$, la valeur mesurée de CL est très faible ($-0,11$) et s'écarte nettement de la valeur simulée. Cet écart s'explique par un phénomène de flottement observé durant l'essai : l'extrémité non fixée de la pale, trop fine (épaisseur < 1 mm), est entrée en vibration sous l'effet de la force aérodynamique. Cela a provoqué une instabilité du signal enregistré par la balance aérodynamique, rendant la mesure peu fiable. En revanche, la simulation (courbe bleue) prédit une évolution continue et régulière du CL, sans effet parasite, puisqu'elle repose sur des hypothèses de rigidité et de stabilité idéales.

À $\alpha = -2$, on observe un meilleur accord entre les deux courbes : la portance devient légèrement positive, et l'écart entre l'expérience et la simulation se réduit, indiquant que le régime de l'écoulement est plus stable et que les perturbations mécaniques sont moindres.

b. Zone d'incidence modérée ($0 \leq \alpha \leq 4$)

C'est dans cette zone que la concordance entre l'expérimental et la simulation est la plus forte. Les deux courbes montrent une augmentation quasi-linéaire de CL avec l'angle d'attaque. Le maximum de portance est atteint à $\alpha = 2$ dans les deux cas :

- $CL_{\text{exp}} = 1,20$
- $CL_{\text{sim}} \approx 1,17$

Cet accord confirme que la simulation 3D reproduit fidèlement le comportement aérodynamique de la pale dans des conditions proches de l'optimum, c'est-à-dire lorsque l'écoulement reste attaché et que les effets d'instabilité sont faibles. Le léger décalage en valeur est probablement dû à des éléments physiques non modélisés numériquement, comme la rugosité de surface du PLA, les effets de parois dans la soufflerie, et l'ajout d'une extension cylindrique pour la fixation, qui perturbent localement le flux.

c. Zone d'incidence supérieure ($\alpha > 4$)

Dans cette région, les différences entre les deux courbes s'accroissent. Tandis que la courbe de simulation (bleue) reste progressive et stable, indiquant un comportement aérodynamique linéaire avec un léger début de décrochage, la courbe expérimentale (orange) devient irrégulière : on observe une chute à $CL = 0,85$ à 4 degrés, suivie d'une remontée à $0,970$ à 6 degrés. Ce comportement suggère un décrochage instable ou un comportement transitoire mal capté par le système de mesure.

Cette instabilité peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La flexion excessive de l'extrémité libre de la pale à ces angles plus élevés, qui génère des oscillations mécaniques incontrôlées ;
- La modification de la géométrie d'origine par l'extension de fixation, qui déstabilise localement l'écoulement ;
- Une balance aérodynamique sensible à la traînée, mais affectant indirectement la mesure de portance à cause du désalignement induit par les vibrations.

De plus, la simulation 3D, en supposant un écoulement parfaitement contrôlé, ne prend pas en compte ces déformations et instabilités, ce qui explique l'aspect lissé et régulier de la courbe bleue.

d. Conclusion de la comparaison CL

En résumé, la comparaison des courbes expérimentale (orange) et simulée (bleue) du coefficient de portance montre une très bonne concordance dans la plage utile d'incidence (-2 à 4 degrés), confirmant la validité de la simulation 3D dans des conditions modérées. Les écarts aux extrémités de la plage angulaire sont attribués à des phénomènes mécaniques et physiques non représentés dans la modélisation, comme le flottement, la flexibilité de la structure, et les défauts de fixation. Ces observations renforcent l'idée que la simulation 3D est fiable pour prédire la performance de la pale, mais qu'elle doit être interprétée avec prudence lorsque les conditions expérimentales deviennent instables ou non idéales.

V.3.3. Analyse coefficient de traînée CD

La figure 5 montre la comparaison entre les coefficients de traînée CD obtenus par simulation numérique 3D (courbe bleue) et par mesures expérimentales en soufflerie (courbe orange) sur la pale S803 imprimée en PLA. Contrairement au coefficient de portance, cette comparaison révèle des écarts significatifs et plus irréguliers, ce qui est attendu compte tenu des nombreuses sources d'erreur affectant la traînée dans un environnement expérimental.

a. Traînée mesurée expérimentalement (orange)

Globalement, les valeurs expérimentales du CD restent élevées et dispersées sur l'ensemble de la plage angulaire. Par exemple :

- À $\alpha = -2$, on observe un pic anormal de $CD = 0,45$, sans justification aérodynamique réelle.
- Pour les autres angles ($0, 2, 4$ degrés), les valeurs fluctuent entre $0,28$ et $0,33$, ce qui reste très supérieur aux prédictions de la simulation.

Ces résultats s'expliquent par plusieurs limitations expérimentales majeures :

- Balance aérodynamique peu sensible à la traînée : la composante horizontale de force est plus difficile à capter avec précision, surtout avec des signaux faibles, ce qui rend les mesures sujettes à des erreurs systématiques.
- Rugosité importante de la surface imprimée, qui génère une couche limite turbulente prématurée et donc davantage de traînée de friction.
- Effets de parois de la soufflerie, surtout dans les veines étroites, qui provoquent un confinement de l'écoulement et augmentent artificiellement les pertes.
- Fixation modifiée (extension cylindrique), qui perturbe localement le flux à la base de la pale, créant une traînée parasite non modélisée.
- Vibrations et instabilités mécaniques, notamment aux angles élevés, qui perturbent l'alignement aérodynamique de la pale et induisent des efforts parasites.

En somme, la courbe orange représente un ensemble de mesures fortement affectées par des perturbations externes au comportement réel de la pale.

b. Traînée simulée (bleue)

La courbe bleue, issue de la simulation CFD 3D, présente une évolution douce et régulière du CD, avec des valeurs faibles, comprises entre 0.008 et 0.018 selon l'angle d'attaque. Cette réponse est typique d'un écoulement propre, non perturbé, dans un environnement numérique :

- Pas de rugosité ;
- Pas de mouvement de structure ;
- Maillage soigné autour des zones critiques (bord d'attaque, couche limite) ;
- Pas de perturbation par des parois ou une fixation.

Le contraste est donc évident entre la simulation, qui modélise un scénario idéal, et l'expérience, soumise à de nombreuses imperfections physiques.

c. Analyse des écarts

Les écarts entre les deux courbes sont significatifs, parfois jusqu'à un facteur 20 à 50 entre les valeurs simulées et mesurées. Cependant, cela ne signifie pas que la simulation est incorrecte : au contraire, elle représente le cas de référence d'un écoulement parfaitement maîtrisé, tandis que l'expérience reflète toutes les réalités physiques non modélisées.

Il faut aussi noter que la mesure de CD est particulièrement sensible :

- Aux petites erreurs de force horizontale, souvent amplifiées lors du calcul ;
- Aux petits défauts de parallélisme ou de calage de la pale dans le flux ;

- Et à la présence de joints, bords tranchants ou imperfections locales, tous absents de la simulation.

d. Conclusion sur la comparaison CD

La comparaison des coefficients de traînée montre un écart net entre simulation (bleue) et expérimental (orange), plus marqué que pour le coefficient de portance. Cette divergence est attribuée non pas à une erreur de simulation, mais à la difficulté intrinsèque de mesurer la traînée avec précision dans un montage expérimental non professionnel. La simulation 3D permet de visualiser un comportement théorique optimal de la pale, tandis que les mesures expérimentales intègrent les effets réels de fabrication, de montage et de conditions de soufflerie. Ainsi, les données numériques doivent être considérées comme une référence haute, à laquelle se compare la réalité avec toutes ses imperfections.

V.4. Résultats des performances de l'éolienne :

Cette section présente l'analyse des performances opérationnelles de l'éolienne pour des vitesses de vent caractéristiques de 3, 6, 9 et 12 m/s. Les données recueillies mettent en évidence l'évolution de la puissance mécanique maximale (P_{max}) délivrée par le système, ainsi que les paramètres clés associés incluant le coefficient de performance (C_{Pmax}), le tip-speed ratio (TSR) et la vitesse de rotation du rotor.

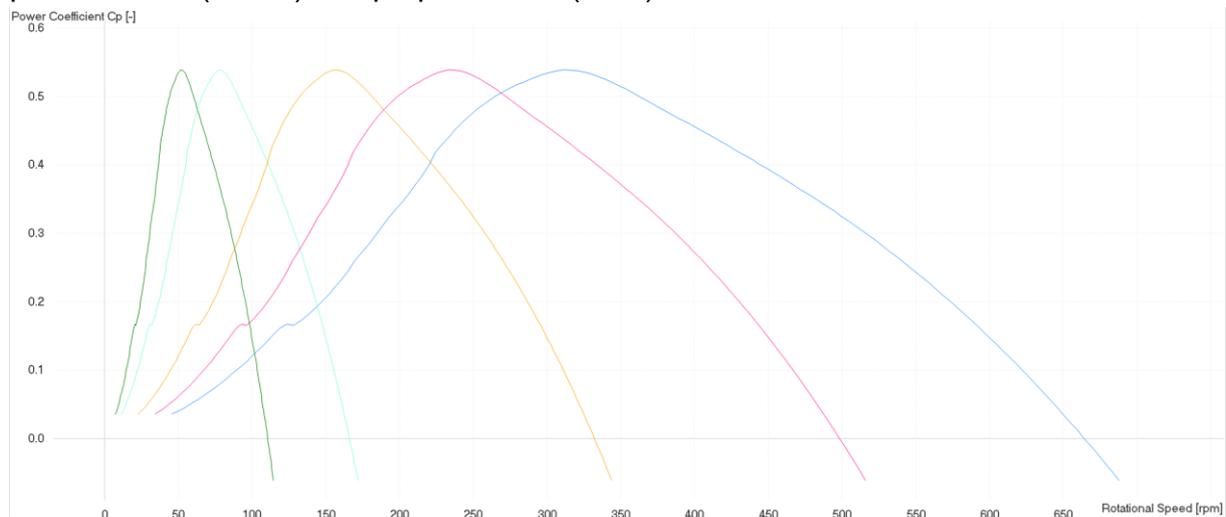


Figure V.6 Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de rotation

Le graphe ci-dessus représente les variations du coefficient de puissance des différentes vitesses, respectivement 2m/s 3m/s 6m/s 9m/s et 12m/s, en fonction de la vitesse de rotation du rotor en rpm; montrant le même C_{pmax} pour chaque vitesse du vent, avec une vitesse de rotation différente

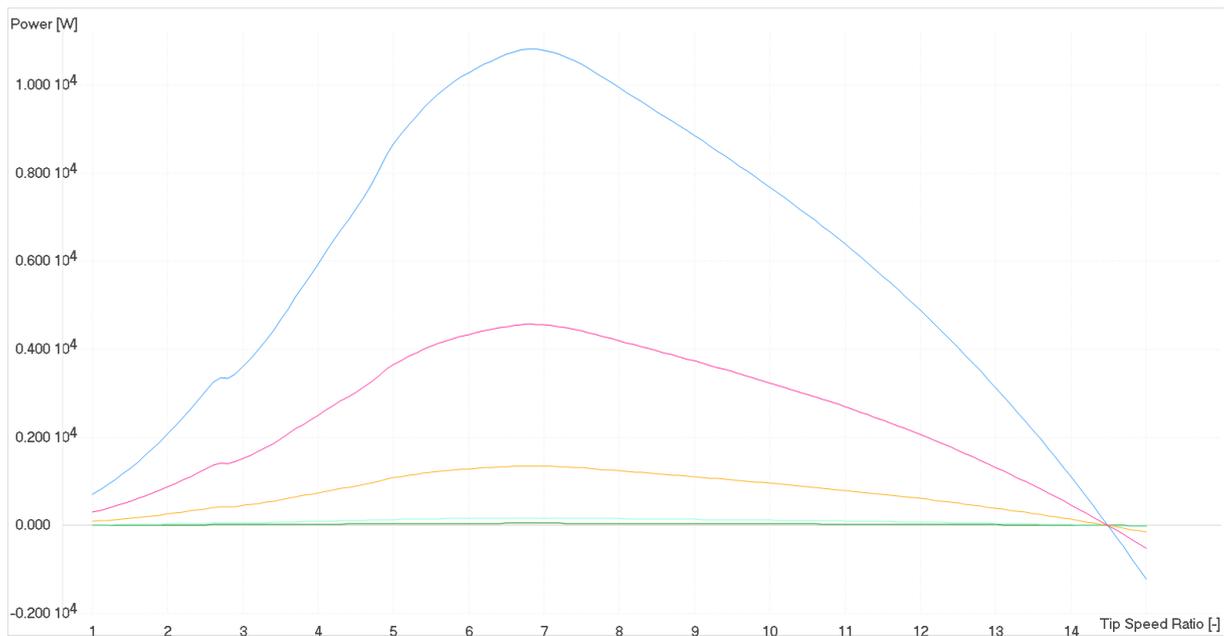


Figure V.7 Variation de la puissance extraite en fonction de la vitesse spécifique

Ce graphe représente la variation de la puissance extraite en fonction de la vitesse spécifique, en remarquant un pic à une vitesse spécifique commune.

Tableau V.1 Récapitulatif de l'analyse des performances de l'éolienne

V_0 (m/s)	Pitch (°)	P_{max} (W)	$C_{P_{max}}$	TSR	Rot (rpm)	V_{tip}
3m/s	2,5	169,19217	0,53926	6,8	78	20,4
6m/s	0,5	1353,5374	0,53926	6,8	156	40,8
9m/s	1	4568,1885	0,53926	6,8	234	61,2
12m/s	0,5	10828,299	0,53926	6,8	312	81,6

L'analyse des performances de notre éolienne révèle une conception aérodynamique hautement optimisée et un comportement en adéquation avec les attentes pour un système à axe horizontal. Le Tableau V.1, synthétisant les données pour des vents de 3, 6, 9 et 12 m/s, met en évidence la constance remarquable du coefficient de performance maximal $C_{P_{max}}$ à 0.53926 et du vitesse spécifique TSR à 6.8 sur l'ensemble de la plage de vitesses testées. Cette invariance justifie l'efficacité de la pale à capter l'énergie éolienne de manière optimale en adaptant sa vitesse de rotation proportionnellement à la vitesse du vent, ce qui est un indicateur clé d'un design capable de maintenir son point de fonctionnement idéal. La puissance extraite (P_{max}) évolue de manière significative et attendue, passant de 169.19 W à 3 m/s à plus de 10.8 kW à 12 m/s, validant la capacité de l'éolienne à exploiter efficacement la ressource éolienne. Les Figures V.6 et V.7 viennent corroborer ces observations : la Figure V.6 montre des pics de C_P distincts et de valeur constante pour chaque vitesse

de vent en fonction du RPM, tandis que la Figure V.7 confirme un pic de puissance commun à un TSR unique de 6.8, affirmant la robustesse du design pour opérer à son rendement aérodynamique maximal. En somme, ces résultats démontrent que la géométrie de pale adoptée, basée sur le profil S803, est non seulement bien conçue mais aussi performante et adaptable, répondant aux objectifs d'une conception optimisée.

V.5. Discussion générale des écarts et validation

L'analyse comparative des résultats obtenus par les différentes méthodes XFOIL, simulation CFD 2D, simulation CFD 3D, et essais expérimentaux, met en évidence des écarts dans les performances aérodynamiques du profil S803. Toutefois, ces écarts restent cohérents et attendus, compte tenu des spécificités et limitations propres à chaque méthode. Cette diversité d'approches permet non seulement de valider globalement le comportement de la pale, mais aussi de mieux comprendre les phénomènes aérodynamiques sous différents angles.

V.5.1. Apports de chaque méthode

- XFOIL se distingue par sa rapidité d'exécution et sa simplicité. Il fournit des tendances aérodynamiques globales sur profil isolé, mais reste limité dès que les phénomènes deviennent non linéaires : décrochage, effets tridimensionnels, viscosité réelle, etc. Fonctionnant sous des hypothèses d'écoulement quasi-idéal, il a tendance à sous-estimer la traînée CD et à prédire un décrochage plus abrupt ou retardé.
- La simulation CFD 2D, appliquée au profil S803 seul, constitue une avancée significative. Grâce à un maillage raffiné, la prise en compte de la turbulence (modèle k- ω SST) et de la viscosité, elle offre une modélisation plus réaliste que XFOIL. Elle reproduit fidèlement la montée en portance jusqu'au décrochage et donne une évaluation plus fiable de la traînée, bien qu'elle reste limitée à une représentation bidimensionnelle sans considérer les effets d'extrémité de pale, ni l'interaction avec l'environnement 3D.
- La simulation CFD 3D constitue la méthode la plus complète et représentative. En modélisant la géométrie entière de la pale, y compris les effets de bout d'aile, le volume d'écoulement complet et un maillage adapté tridimensionnel, elle offre des résultats extrêmement stables et lissés, avec une montée progressive du CL. Cependant, comme toute simulation, elle repose sur des hypothèses numériques idéales (parois rigides, surface lisse, aucune vibration), ce qui la différencie de la réalité expérimentale.
- L'expérimentation en soufflerie, enfin, offre une vision directe du comportement réel de la maquette imprimée. Toutefois, elle est affectée par de nombreuses sources d'erreur : rugosité de surface, flexibilité structurelle, imperfections de

fixation, effets de parois, vibrations mécaniques et calibration incertaine de la balance, notamment pour la mesure de la traînée CD. Elle devient également difficile à exploiter aux fortes incidences à cause du flottement observé sur la pale.

V.5.2. Interprétation des écarts

Les comparaisons ont permis de mettre en évidence plusieurs éléments clés :

- Le coefficient de portance CL présente une bonne cohérence entre la simulation 3D et l'expérience jusqu'à $\alpha=4$, avec un maximum bien localisé à $\alpha=2$ dans les deux cas. Les simulations 2D et XFOIL reproduisent également cette tendance, avec des résultats très proches jusqu'à $\alpha \approx 13$, au-delà duquel le décrochage est mieux capté par la CFD que par XFOIL.
- Le coefficient de traînée CD est largement surestimé en expérimentation, en raison des facteurs déjà cités : rugosité de l'impression 3D, vibrations, flottement, et incertitudes de mesure. Les simulations numériques notamment la CFD 2D et 3D prédisent des valeurs plus faibles mais cohérentes, particulièrement en zone linéaire. La simulation 3D reste donc plus fiable pour cette grandeur.
- Le rapport CL/CD, indicateur direct de l'efficacité aérodynamique, atteint un maximum similaire dans les simulations 2D et XFOIL, avec une valeur optimale vers $\alpha=6$. L'expérience souffre ici d'une trop grande incertitude sur CD pour être exploitée quantitativement.

Tableau V.2 Récapitulatif des Points forts et limites des approches

Méthode	Avantages	Limitations
XFOIL	Très rapide, analytique	Pas de 3D, pas de turbulence, sous-estime CD, décrochage simplifié
CFD 2D	Modélisation précise du profil, turbulence	Pas d'effet d'extrémité, simplifications géométriques
CFD 3D	Représentation complète et réaliste	Conditions idéales non réelles
Expérimental	Réalité physique, tangibilité	Erreurs de mesure, instabilités, limitations mécaniques

V.6. Recommandations de conception finale

Pour la conception finale de l'éolienne, une configuration optimisée pour les conditions algériennes a été retenue. Nous avons sélectionné un profil de pale S803, homogène sur toute l'envergure, afin d'optimiser le compromis entre une fabrication simplifiée et des performances énergétiques élevées atteignant un C_p de 0.539 pour une

puissance de 1,34 KW. La géométrie des pales a été précisément affinée, intégrant un vrillage progressif et une distribution de corde calculée via QBlade et la théorie BEM, pour assurer un Tip Speed Ratio (TSR) optimal de 6.8 et maximiser l'extraction d'énergie. Le diamètre du rotor reste conforme à celui de l'étude, garantissant un démarrage effectif dès 3-4 m/s et une opération nominale à 6 m/s, maintenue efficacement jusqu'à 12-15 m/s.

En matière d'opérabilité et de durabilité, des systèmes de contrôle robustes peuvent être intégrés : gestion du lacet (passif/actif), régulation de puissance par contrôle de pas (pitch control), et freinage aérodynamique/mécanique. Structuellement, l'emploi de matériaux composites (fibre de verre/carbone) est privilégié pour les pales, complété par des fixations pale-moyeu renforcées et un équilibrage rigoureux afin de minimiser les vibrations, avec une validation rigoureuse du design par la fabrication d'un prototype à échelle réduite pour essais en soufflerie et tests de fatigue. Enfin, la mise en œuvre d'une optimisation spécifique au contexte algérien, incluant la protection contre l'érosion éolienne et les variations thermiques, une conception modulaire pour la maintenance en zones isolées, et une compatibilité réseau nationale. Cette approche garantit un équilibre optimal entre performance, facilité de fabrication et fiabilité opérationnelle sur site.

V.7. Perspectives

Afin d'affiner davantage la modélisation et la compréhension du comportement de l'éolienne, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. Cela inclut l'intégration de modèles non-stationnaires pour une analyse plus dynamique des performances sous des conditions de vent variables, ainsi que la prise en compte de l'effet de sillage pour évaluer l'interaction entre plusieurs turbines dans un parc éolien. L'exploration des effets tridimensionnels (3D) de l'écoulement sur la pale, notamment aux extrémités et à l'interface pale-moyeu, pourrait également apporter des précisions cruciales. Une étude structurale approfondie est également essentielle pour évaluer la résistance aux contraintes de fatigue et aux charges extrêmes. Enfin, une validation expérimentale sur un prototype fonctionnel à grande échelle serait essentielle pour confirmer les performances prédites et valider la robustesse des méthodes de conception dans un environnement opérationnel réel.

V.8. Conclusion

Malgré les écarts observés, la convergence des résultats dans les plages de fonctionnement nominales permet de valider :

- La capacité de la pale S803 à générer une portance efficace (valeurs de CL proches entre simulations et soufflerie) ;
- La tendance aérodynamique globale attendue du profil, confirmée par toutes les méthodes ;

- La fiabilité de la simulation CFD 3D comme outil prédictif, notamment pour extrapoler les performances hors des conditions testées en laboratoire.

Ainsi, en intégrant la CFD 2D comme maillon intermédiaire entre XFOIL et la simulation 3D, cette étude montre que chaque niveau de complexité apporte une précision croissante, mais nécessite également des ressources et une interprétation adaptée. L'expérimentation, bien qu'imparfaite, reste essentielle pour valider les modèles numériques et appréhender les effets imprévus lors de la fabrication ou de l'exploitation réelle.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude, la modélisation et la validation aérodynamique d'une pale d'éolienne destinée à un fonctionnement dans les conditions typiques du vent en Algérie. À travers une démarche méthodique, combinant des outils analytiques, des simulations numériques avancées et une validation expérimentale, ce travail a permis de couvrir l'ensemble du processus de conception, depuis le choix du profil jusqu'aux essais en soufflerie.

Dans un premier temps, le profil aérodynamique S803 a été sélectionné parmi plusieurs profils candidats en raison de ses performances remarquables à faibles vitesses, de sa bonne finesse aérodynamique et de sa stabilité en fonctionnement. L'approche BEM utilisée pour le dimensionnement initial de la pale a permis d'optimiser la distribution de corde et l'angle de vrillage le long du rayon, en tenant compte des caractéristiques du vent local, de la vitesse de rotation de la turbine et des propriétés physiques de l'air.

Les simulations CFD 2D sous ANSYS Fluent ont ensuite permis de valider les performances aérodynamiques du profil S803 en isolé, en les comparant aux résultats de XFOIL. Cette étape a montré une bonne corrélation dans la zone linéaire, tout en soulignant la capacité supérieure de la simulation CFD à prédire des phénomènes complexes comme le décrochage progressif et les effets visqueux. En complément, une simulation tridimensionnelle complète de la pale a été réalisée afin d'inclure les effets d'extrémité, la géométrie réelle, la variation de vrillage et l'environnement fluide tridimensionnel. Les résultats de cette simulation 3D ont fourni des courbes très stables et cohérentes, particulièrement pour le coefficient de portance C_L , et ont permis une compréhension plus réaliste du comportement global de la pale.

Parallèlement, une maquette de la pale a été fabriquée par impression 3D, puis testée en soufflerie. Bien que cette phase ait rencontré certaines limitations techniques notamment une fixation instable, une flexibilité excessive à l'extrémité libre de la pale, et des difficultés de mesure de la traînée, elle a fourni des résultats concrets et exploitables. Le coefficient de portance mesuré expérimentalement s'est révélé en très bon accord avec les résultats numériques dans la plage angulaire nominale, ce qui a permis de valider efficacement le modèle CFD utilisé. En revanche, les mesures de traînée ont montré des écarts plus importants, attribuables à la rugosité de la surface imprimée, aux vibrations mécaniques, aux perturbations du flux dans la veine de soufflerie et aux imprécisions de la balance aérodynamique.

La confrontation entre les différentes méthodes XFOIL, simulation 2D, simulation 3D et essai réel a permis de dégager une vision globale et cohérente des performances de la pale étudiée. Chacune de ces approches présente ses propres avantages et limites, mais leur complémentarité a constitué un véritable atout méthodologique. Cette analyse croisée a démontré que la simulation CFD 3D, bien qu'exigeante en ressources, constitue un outil de prédiction très fiable, capable d'anticiper le comportement réel de la pale avec une grande précision. Elle s'est révélée

particulièrement pertinente dans les plages de fonctionnement normal, là où les mesures expérimentales deviennent moins fiables.

Ce travail a ainsi permis de valider une méthodologie complète, alliant théorie, simulation et expérimentation, pour concevoir et évaluer des pales d'éolienne adaptées aux réalités locales. Il met en lumière l'importance d'une approche multidisciplinaire et rigoureuse dans le domaine des énergies renouvelables, où les enjeux de performance, de fiabilité et de durabilité sont étroitement liés.

En conclusion, cette étude ouvre la voie à de nombreux prolongements. L'optimisation structurelle de la pale pour améliorer sa rigidité, l'utilisation de matériaux composites plus performants, la réalisation d'essais en rotation ou encore l'intégration de simulations multiphysiques représentent des pistes de recherche prometteuses. Dans un contexte de transition énergétique, ce type de démarche scientifique et technique constitue une contribution précieuse au développement de solutions renouvelables, locales et efficaces

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. MULTON, O.GERGAUD, H. AHMED, X.ROBOAM, S.ASTIER, B.DAKYO et C.NICHITA, «L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables,» 2002.
- [2] R. Marc et N. Jean-Marc, Énergie éolienne - 2e éd. : Du petit éolien à l'éolien off shore, Dunod, 2014.
- [3] A. BOYETTE, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,» 2006.
- [4] Y. SAIDI et Y. YAHIAOUI, «Étude et réalisation d'une turbine éolienne,» 2014.
- [5] F. K, «Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne,» Université Mentouri Constantine, 2009.
- [6] L. M. Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien,» 2012.
- [7] B.BOUKHEZZAR, «Stratégies de Commande pour L'optimisation et la Régulation de Puissance des Éoliennes à Vitesse Variable,» Paris, 2006.
- [8] A. Gaillard, «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service,» Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2018.
- [9] M.JOURIEH, «Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien,» 20 décembre 2007.
- [10] J. MANWELL, J. McGOAN et A. ROGERS, « Wind energy explained-theory, design and application,» Amhersts, USA.
- [11] W. Bernard, Promesses et réalités des énergies renouvelable, EDP sciences, 2013.
- [12] C. V, «Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique,» 2008.
- [13] H. D. Nedjari, S. K. Haddouche, A. Balehouane et O. Guerri, «Optimal windy sites in Algeria : potential and perspectives,» 2018.
- [14] M. Hansen, «Aerodynamics of Wind Turbines (2nd ed.),» Earthscan, London, 2008.
- [15] F. Bertagnolio et N. N. Sørensen, «Wind Turbine Airfoil Catalogue,» Risø National Laboratory, 2001.
- [16] S. Habali et I. Saleh, «Design and Testing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades,» *Renewable Energy*, vol. 6, n° %102, pp. 161-169, 1995.

- [17] O. Vries, «Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion,» *Agard Publication*, vol. AG 243, 1979.
- [18] W. Jansen, «Horizontal Axis Fast Running Wind Turbines for Developing Countries,» *Publications SWD 76-3*, juin 1976.
- [19] R. G. a. M. Woollard, «Performance of Optimal Wind Turbine,» *Applied Energy*, vol. 4, pp. 261-272, 1978.
- [20] D. Wood, «The Design and Analysis of Small Wind Turbines, 1st Edition of Notes,» University of Newcastle, School of Engineering, 2002.
- [21] L. OMAR, «Aérodynamique,» Université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF, 2018.
- [22] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe et E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook* (2nd ed.), Wiley, 2011.
- [23] M. Duquette et K. Visser, «Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines,» *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, p. 425, 2003.
- [24] S. AMIROUDINE et J.-L. BATTAGLIA, *Mécanique des fluides. Cours, 70 exercices corrigés*, 3e éd., DUNOD, 2017.
- [25] J. Jonkman, «Modelling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD, Task N°WER3 2010, NREL/TP-500-34755,» National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [26] R. Manceau, «Turbulence modeling in industrial CFD: Applications with ANSYS Fluent,», Poitiers, 2018.
- [27] A. Dejoan, «Simulation of wall-bounded turbulent flows with ANSYS CFX,» Toulouse, 2015.
- [28] M. Dubois, «LES simulation of dynamic stall on oscillating airfoils using ANSYS Fluent,» Toulouse, 2019.
- [29] L. Garnier, «Influence of turbulence models on lift and drag coefficients at high angles of attack,» 2018.
- [30] M. Lefèvre, «Accuracy analysis of CL/CD calculations in ANSYS Fluent for wind turbine blades,» Lille, 2020.
- [31] S. Martin, «Aerodynamic coefficients prediction for offshore wind turbines using DES models,» 2020.
- [32] [En ligne]. Available: <https://www.raise3d.com/products/raise3d-pro2-plus-3d-printer/>.
- [33] [En ligne]. Available: <https://www.tecquipment.com/subsonic-wind-tunnel-600mm>.

Annexes

Données de l'étude

Diamètre	5 m
Vitesse vent	6 m/s
Température	25 °C
Masse volumique	1,183634 kg/m ³
Viscosité cinématique	1,552E-5 m ² /s
Viscosité dynamique	1,837E-5 N·s/m ²
Nombre de Reynolds	386598

Profils aérodynamiques

- **NACA 4412**

Un profil symétrique classique de la série NACA 4 chiffres, développé dans les années 1930. L'épaisseur relative est de 12% de la corde. Utilisé historiquement pour les premières éoliennes grâce à sa simplicité de fabrication et ses caractéristiques aérodynamiques prévisibles.



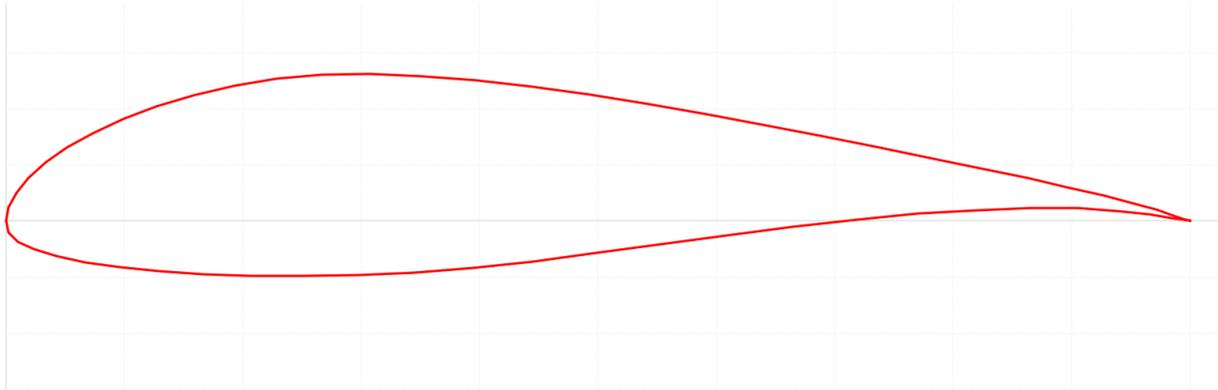
- **S803**

Un profil spécialement conçu pour les éoliennes par le NREL (National Renewable Energy Laboratory). Épaisseur relative de 21% de la corde. Optimisé pour offrir une excellente finesse aérodynamique et un comportement de décrochage progressif, particulièrement adapté aux sections externes des pales d'éoliennes.



- **S804**

Profil NREL de la série Somers, avec une épaisseur relative de 21% de la corde. Développé comme alternative au S803, il présente des caractéristiques similaires mais avec des variations dans la distribution de pression et le comportement en décrochage.



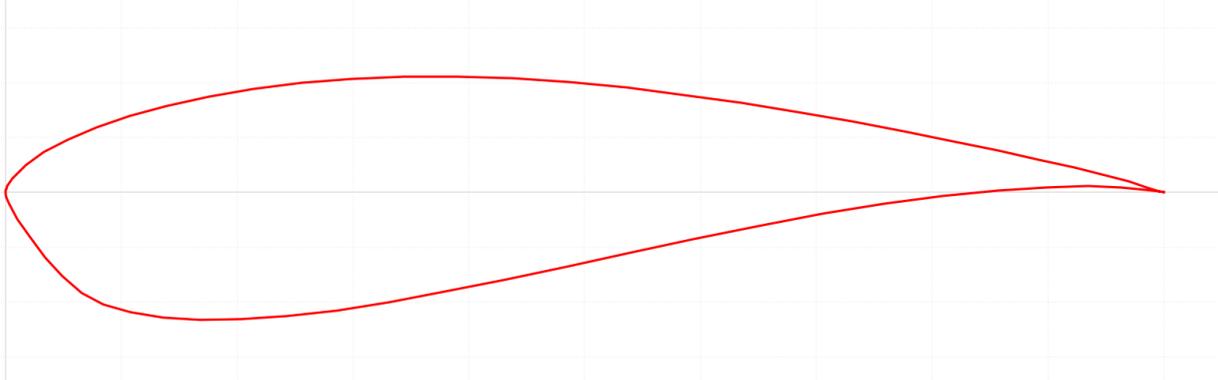
- **S822**

Profil épais de la série NREL avec 16% d'épaisseur relative. Conçu pour les sections intermédiaires des pales d'éoliennes, offrant un bon compromis entre performances aérodynamiques et résistance structurelle nécessaire aux contraintes de flexion.



- **S823**

Profil NREL d'épaisseur relative 21%, similaire au S803 mais avec une géométrie légèrement modifiée. Développé pour optimiser la transition entre les différentes sections de pale tout en maintenant d'excellentes performances aérodynamiques en régime de fonctionnement nominal.



Pales

- **Géométries**

- **NACA 4412**

<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,25	0,436	22,183	1,3	0,146	3,319
0,3	0,401	19,763	1,35	0,141	3,033
0,35	0,37	17,708	1,4	0,137	2,764
0,4	0,344	15,944	1,45	0,133	2,511
0,45	0,321	14,418	1,5	0,129	2,273
0,5	0,3	13,085	1,55	0,126	2,048
0,55	0,282	11,913	1,6	0,122	1,835
0,6	0,266	10,874	1,65	0,119	1,634
0,65	0,251	9,948	1,7	0,116	1,443
0,7	0,238	9,118	1,75	0,113	1,261
0,75	0,227	8,37	1,8	0,11	1,089
0,8	0,216	7,692	1,85	0,108	0,925
0,85	0,206	7,076	1,9	0,105	0,768
0,9	0,197	6,513	1,95	0,103	0,619
0,95	0,189	5,997	2	0,1	0,477
1	0,181	5,522	2,05	0,098	0,341
1,05	0,174	5,084	2,1	0,096	0,21
1,1	0,168	4,679	2,15	0,094	0,085
1,15	0,162	4,302	2,2	0,092	-0,034
1,2	0,156	3,952	2,25	0,09	-0,149
1,25	0,151	3,625	2,3	0,088	-0,26

➤ **S803**

<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,2	0,437	25,163	1,3	0,134	3,42
0,25	0,4	22,28	1,35	0,13	3,13
0,3	0,368	19,86	1,4	0,126	2,86
0,35	0,34	17,81	1,45	0,122	2,61
0,4	0,315	16,04	1,5	0,119	2,37
0,45	0,294	14,52	1,55	0,115	2,15
0,5	0,275	13,19	1,6	0,112	1,94
0,55	0,259	12,01	1,65	0,109	1,73
0,6	0,244	10,97	1,7	0,106	1,54
0,65	0,231	10,05	1,75	0,104	1,36
0,7	0,219	9,22	1,8	0,101	1,189
0,75	0,208	8,47	1,85	0,099	1,02
0,8	0,198	7,79	1,9	0,096	0,87
0,85	0,189	7,18	1,95	0,094	0,72
0,9	0,181	6,61	2	0,092	0,58
0,95	0,173	6,1	2,05	0,09	0,44
1	0,166	5,62	2,1	0,088	0,31
1,05	0,16	5,18	2,15	0,086	0,185
1,1	0,154	4,78	2,2	0,084	0,07
1,15	0,148	4,4	2,25	0,083	-0,05
1,2	0,143	4,05	2,3	0,081	-0,16

➤ **S804**

<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,25	0,268	16,883	1,3	0,09	-1,981
0,3	0,246	14,463	1,35	0,087	-2,267
0,35	0,228	12,408	1,4	0,084	-2,536
0,4	0,211	10,644	1,45	0,082	-2,789
0,45	0,197	9,118	1,5	0,079	-3,027
0,5	0,185	7,785	1,55	0,077	-3,252
0,55	0,173	6,613	1,6	0,075	-3,465
0,6	0,163	5,574	1,65	0,073	-3,666
0,65	0,155	4,648	1,7	0,071	-3,857
0,7	0,147	3,818	1,75	0,069	-4,039
0,75	0,139	3,07	1,8	0,068	-4,211
0,8	0,133	2,392	1,85	0,066	-4,375
0,85	0,127	1,776	1,9	0,065	-4,532
0,9	0,121	1,213	1,95	0,063	-4,681
0,95	0,116	0,697	2	0,062	-4,823
1	0,112	0,222	2,05	0,06	-4,959
1,05	0,107	-0,216	2,1	0,059	-5,09
1,1	0,103	-0,621	2,15	0,058	-5,215
1,15	0,1	-0,998	2,2	0,057	-5,334
1,2	0,096	-1,348	2,25	0,055	-5,449
1,25	0,093	-1,675	2,3	0,054	-5,56

➤ **S804-S803**

<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,25	0,268	16,883	1,3	0,09	-1,981
0,3	0,246	14,463	1,35	0,087	-2,267
0,35	0,228	12,408	1,4	0,084	-2,536
0,4	0,211	10,644	1,45	0,082	-2,789
0,45	0,197	9,118	1,5	0,079	-3,027
0,5	0,185	7,785	1,55	0,077	-3,252
0,55	0,173	6,613	1,6	0,075	-3,465
0,6	0,163	5,574	1,65	0,073	-3,666
0,65	0,155	4,648	1,7	0,071	-3,857
0,7	0,147	3,818	1,75	0,069	-4,039
0,75	0,139	3,07	1,8	0,068	-4,211
0,8	0,133	2,392	1,85	0,066	-4,375
0,85	0,127	1,776	1,9	0,065	-4,532
0,9	0,121	1,213	1,95	0,063	-4,681
0,95	0,116	0,697	2	0,062	-4,823
1	0,112	0,222	2,05	0,06	-4,959
1,05	0,107	-0,216	2,1	0,059	-5,09
1,1	0,103	-0,621	2,15	0,058	-5,215
1,15	0,1	-0,998	2,2	0,057	-5,334
1,2	0,096	-1,348	2,25	0,055	-5,449
1,25	0,093	-1,675	2,3	0,054	-5,56

➤ **S822**

<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,25	0,539	21,783	1,3	0,181	2,919
0,3	0,495	19,363	1,35	0,175	2,633
0,35	0,458	17,308	1,4	0,17	2,364
0,4	0,425	15,544	1,45	0,165	2,111
0,45	0,396	14,018	1,5	0,16	1,873
0,5	0,371	12,685	1,55	0,155	1,648
0,55	0,349	11,513	1,6	0,151	1,435
0,6	0,329	10,474	1,65	0,147	1,234
0,65	0,311	9,548	1,7	0,143	1,043
0,7	0,295	8,718	1,75	0,14	0,861
0,75	0,28	7,97	1,8	0,136	0,689
0,8	0,267	7,292	1,85	0,133	0,525
0,85	0,255	6,676	1,9	0,13	0,368
0,9	0,244	6,113	1,95	0,127	0,219
0,95	0,234	5,597	2	0,124	0,077
1	0,224	5,122	2,05	0,121	-0,059
1,05	0,216	4,684	2,1	0,119	-0,19
1,1	0,208	4,279	2,15	0,116	-0,315
1,15	0,2	3,902	2,2	0,114	-0,434
1,2	0,193	3,552	2,25	0,111	-0,549
1,25	0,187	3,225	2,3	0,083	-2,16

➤ **S823**

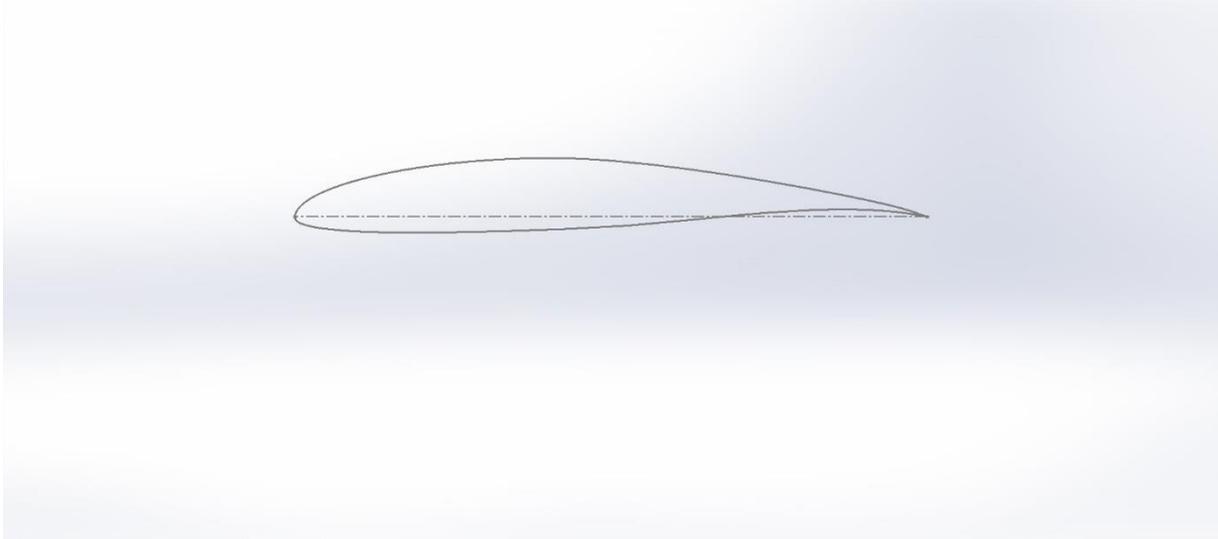
<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,2	0,447	23,163	1,35	0,133	1,133
0,25	0,409	20,283	1,4	0,129	0,864
0,3	0,376	17,863	1,45	0,125	0,611
0,35	0,347	15,808	1,5	0,121	0,373
0,4	0,323	14,044	1,55	0,118	0,148
0,45	0,301	12,518	1,6	0,115	-0,065
0,5	0,282	11,185	1,65	0,112	-0,266
0,55	0,265	10,013	1,7	0,109	-0,457
0,6	0,249	8,974	1,75	0,106	-0,639
0,65	0,236	8,048	1,8	0,103	-0,811
0,7	0,224	7,218	1,85	0,101	-0,975
0,75	0,213	6,47	1,9	0,099	-1,132
0,8	0,203	5,792	1,95	0,096	-1,281
0,85	0,193	5,176	2	0,094	-1,423
0,9	0,185	4,613	2,05	0,092	-1,559
0,95	0,177	4,097	2,1	0,09	-1,69
1,1	0,158	2,779	2,15	0,088	-1,815
1,2	0,147	2,052	2,2	0,086	-1,934
1,25	0,142	1,725	2,25	0,085	-2,049
1,3	0,137	1,419	2,3	0,083	-2,16

➤ **S823-S803**

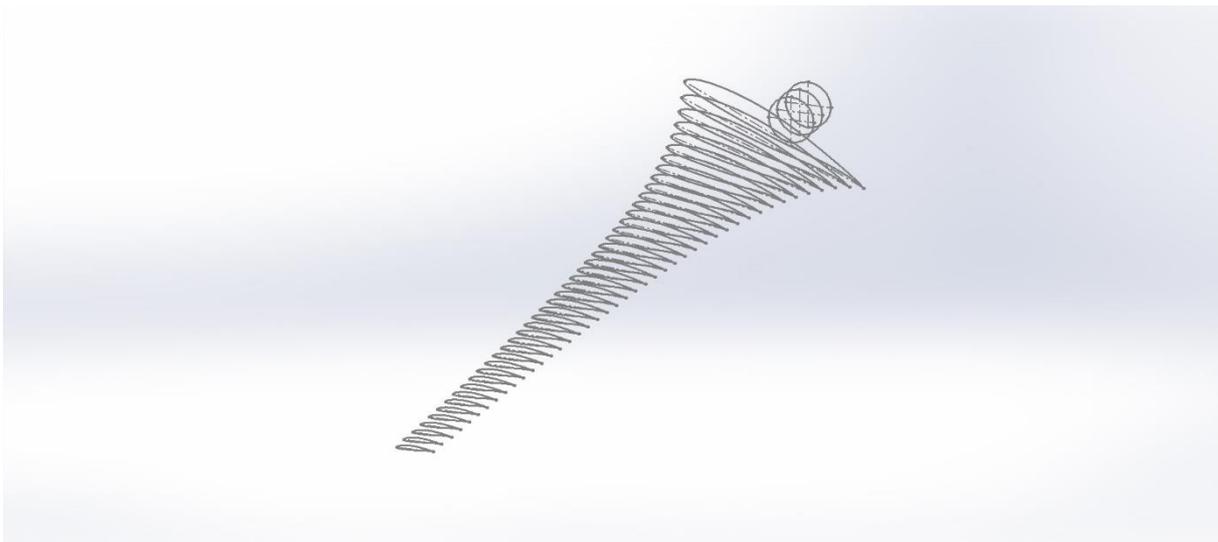
<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>	<i>Pos [m]</i>	<i>Chord [m]</i>	<i>Twist [deg]</i>
0,2	0,447	23,163	1,35	0,13	3,133
0,25	0,409	20,283	1,4	0,126	2,864
0,3	0,376	17,863	1,45	0,122	2,611
0,35	0,347	15,808	1,5	0,119	2,373
0,4	0,323	14,044	1,55	0,115	2,148
0,45	0,301	12,518	1,6	0,112	1,935
0,5	0,282	11,185	1,65	0,109	1,734
0,55	0,265	10,013	1,7	0,106	1,543
0,6	0,249	8,974	1,75	0,104	1,361
0,65	0,236	8,048	1,8	0,101	1,189
0,7	0,224	7,218	1,85	0,099	1,025
0,75	0,216	7,77	1,9	0,096	0,868
0,8	0,206	7,092	1,95	0,094	0,719
0,85	0,197	6,476	2	0,092	0,577
0,9	0,188	5,913	2,05	0,09	0,441
0,95	0,18	5,397	2,1	0,088	0,31
1,15	0,148	4,402	2,15	0,086	0,185
1,2	0,143	4,052	2,2	0,084	0,066
1,25	0,139	3,725	2,25	0,083	-0,049
1,3	0,134	3,419	2,3	0,081	-0,16

- **Conception SolidWorks**

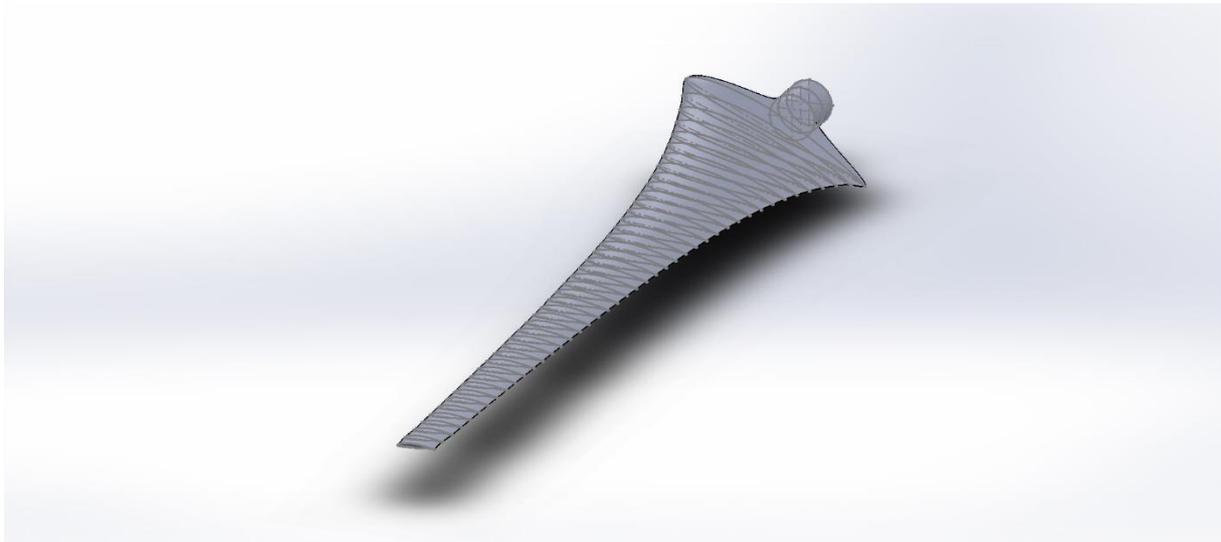
Etape 1 : Importation du profil S803 sur SolidWorks à l'aide de la fonction « courbe »



Etape 2 : Recopier les profils en respectant les distances, cordes, angle de vrillage mentionnés précédemment afin de créer la géométrie basique de la pale



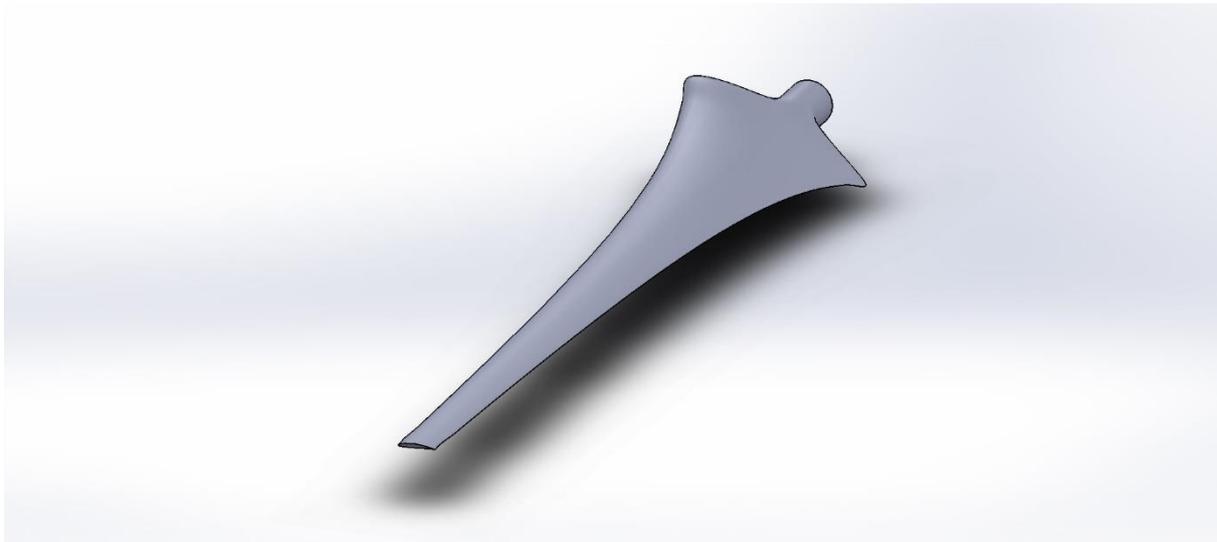
Etape 3 : création de la surface de la pale a l'aide de la fonction « surface lisse» et formation de la forme finale de la pale



Etape 4 : Fermeture de la surface aux deux extrémités



Etape 5 : Transformer la surface en corps uni avec la fonction « surface cousue »



- Analyse des performances de l'éolienne
- ✓ $V_0 = 3\text{m/s}$

$P(\alpha)$

PITCH [deg]	POWER [W]
-10	104,9921
-9,5	109,0928
-9	113,0314
-8,5	117,0932
-8	121,6340
-7,5	126,8081
-7	130,9851
-6,5	134,3928
-6	137,5558
-5,5	140,6907
-5	144,0361
-4,5	147,2719
-4	150,3282
-3,5	153,4505
-3	156,6707
-2,5	159,8443
-2	162,5549
-1,5	164,8640
-1	166,6132
-0,5	168,0976
0	169,1922

PITCH [deg]	POWER [W]
0,5	169,1692
1	168,3322
1,5	167,0222
2	165,0650
2,5	162,8168
3	160,0150
3,5	156,7228
4	153,1355
4,5	149,0879
5	144,6130
5,5	139,8023
6	134,7230
6,5	129,3551
7	123,7437
7,5	117,7978
8	111,5590
8,5	105,0861
9	98,4247
9,5	91,5084
10	84,3723

✓ $V_0 = 6\text{m/s}$ $P(\alpha)$

PITCH [deg]	POWER [W]
-10	839,9368
-9,5	872,7427
-9	904,2512
-8,5	936,745
-8	973,0718
-7,5	1014,465
-7	1047,881
-6,5	1075,142
-6	1100,447
-5,5	1125,526
-5	1152,289
-4,5	1178,175
-4	1202,626
-3,5	1227,604
-3	1253,366
-2,5	1278,754
-2	1300,44
-1,5	1318,912
-1	1332,906
-0,5	1344,781
0	1353,538

PITCH [deg]	POWER [W]
0,5	1353,353
1	1346,657
1,5	1336,178
2	1320,521
2,5	1302,534
3	1280,12
3,5	1253,783
4	1225,084
4,5	1192,703
5	1156,904
5,5	1118,418
6	1077,784
6,5	1034,841
7	989,95
7,5	942,3819
8	892,4719
8,5	840,6886
9	787,3972
9,5	732,0672
10	674,9786

✓ $V_0 = 9\text{m/s}$ $P(\alpha)$

PITCH [deg]	POWER [W]
-10	2834,788
-9,5	2945,506
-9	3051,848
-8,5	3161,515
-8	3284,118
-7,5	3423,819
-7	3536,598
-6,5	3628,606
-6	3714,006
-5,5	3798,65
-5	3888,975
-4,5	3976,342
-4	4058,863
-3,5	4143,165
-3	4230,109

PITCH [deg]	POWER [W]
0,5	4567,567
1	4544,97
1,5	4509,599
2	4456,754
2,5	4396,052
3	4320,405
3,5	4231,516
4	4134,659
4,5	4025,374
5	3904,551
5,5	3774,663
6	3637,52
6,5	3492,588
7	3341,081
7,5	3180,539

-2,5	4315,796
-2	4388,983
-1,5	4451,327
-1	4498,557
-0,5	4538,636
0	4568,188

8	3012,093
8,5	2837,324
9	2657,466
9,5	2470,726
10	2278,053

✓ $V_0 = 12\text{m/s}$

$P(\alpha)$

PITCH [deg]	POWER [W]
-10	4209,483
-9,5	3198,928
-9	3676,417
-8,5	4383,349
-8	4912,388
-7,5	5494,121
-7	5904,212
-6,5	6294,615
-6	6594,126
-5,5	7073,821
-5	7383,33
-4,5	7632,708
-4	7919,652
-3,5	8083,735
-3	8218,987
-2,5	8359,707
-2	8568,935
-1,5	8770,876
-1	8834,938
-0,5	8868,462
0	8877,667

PITCH [deg]	POWER [W]
0,5	8900,155
1	8886,2
1,5	8860,19
2	8817,743
2,5	8759,926
3	8694,017
3,5	8630,213
4	8555,468
4,5	8452,756
5	8322,986
5,5	8167,249
6	7992,916
6,5	7802,981
7	7597,375
7,5	7378,172
8	7145,771
8,5	6902,369
9	6648,717
9,5	6386,507
10	6118,395