

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Par : - BOUKERCHA Salah Eddine

- RACHEDI Younes

- BENZERTIHA Farouq

- GHETTAS Ahmed Brahim Meziane

Sujet

Conception et réalisation d'une éolienne à axe horizontal adaptée au climat de l'Algérie

Soutenu publiquement le : 20/11/2024, devant le jury composé de :

ZAOUI Fares	MCB	Univ-BBA	Président
SAAD SAOUD Marouane	MCB	Univ-BBA	Examineur
MEGHLAOUI Issam	MCB	Univ-BBA	Encadrant
BENGEDDOUDJ Abd Ellah	MCB	Univ-BBA	Représentant de l'incubateur

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant et le Miséricordieux, pour nous avoir guidés et soutenus dans les moments difficiles tout au long de nos études. Il nous a donné la force, l'énergie, et surtout le courage nécessaire pour mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons également adresser nos plus chaleureux remerciements à Monsieur **Meghlaoui Issam**, pour avoir accepté de diriger ce travail. Sa patience, sa confiance, sa disponibilité à tout moment, ainsi que ses précieux conseils et orientations, ont été d'une aide inestimable. Son soutien constant et sa bienveillance ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail, et nous lui en sommes profondément reconnaissants.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre étude. Nous les remercions d'avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions et remarques constructives.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés durant la réalisation de ce mémoire. Une mention spéciale à nos parents, dont l'amour, le soutien indéfectible et la patience ont été essentiels tout au long de ce parcours.

Dédicace

Dédicace

Avec toute ma gratitude et mon profond respect,

Je dédie ce travail à Monsieur **Meghlaoui Issam**, en témoignage de ma sincère reconnaissance pour son soutien constant et ses précieux conseils tout au long de ce projet de fin d'études.

À ma chère famille, dont l'amour inconditionnel, la force et les encouragements m'ont porté(e) dans les moments difficiles, je leur adresse toute ma gratitude pour leur présence indéfectible à mes côtés.

Un immense merci également à mes amis, qui ont partagé avec moi les défis, les doutes et les joies de ce parcours. Leur soutien, leur inspiration et leur bonne humeur ont été une véritable source de motivation.

À vous tous, cet accomplissement est avant tout le vôtre. Merci du fond du cœur.

Salah Eddine

Dédicace

Dédicace

C'est avec une immense joie et une profonde émotion que je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère, **Wardiya**,

Quelles que soient mes actions ou mes paroles, elles ne suffiront jamais à exprimer toute ma reconnaissance. Ton amour m'enveloppe, ta bienveillance me guide, et ta présence constante à mes côtés a toujours été ma plus grande force pour affronter les obstacles.

À mon très cher père, **Abdelmadjid**,

Tu as toujours été présent pour me soutenir et m'encourager. Ton appui et ton affection m'ont porté dans les moments difficiles. Je te souhaite une excellente santé et une vie remplie de bonheur. Que ce travail témoigne de toute ma gratitude et de mon affection pour toi.

À mes chers frères et sœurs : **Yacin, Abderrahim, Mohamed, Chaima et Hanan**,
Votre soutien et votre amour sont une source de motivation et de fierté pour moi.

Au petit trésor de la famille, **Ousaid**,

Ton innocence et ta joie illuminent nos vies.

Je dédie également ce travail à mes précieux amis : **Kheir-Eddine, Ahmed, Bilal et Badr Eddine**,

Pour leur amitié sincère et leur présence à mes côtés dans les bons comme dans les moments difficiles.

À mes chers collègues : **Salah Eddine, Farouk et Ahmed**,

Pour leur collaboration, leur encouragement et leur esprit d'équipe.

Enfin, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toute la famille **Rachedi et Boulefrakh**,

Pour leur soutien constant, leur gentillesse et leur bienveillance.

À vous tous, ce travail est le reflet de votre amour, de votre soutien et de votre présence dans ma vie.

Dédicace

Dédicace

À mon père, **Abd Elhafid**,

Un immense merci pour m'avoir inculqué la patience, la confiance et l'espoir. Ton soutien constant et tes sacrifices ont été inestimables. Je te souhaite une excellente santé et une vie pleine de bonheur.

À ma mère, **Rebh**,

Avec tout mon amour et ma profonde reconnaissance pour tes sacrifices et tes prières. Ton soutien indéfectible a été le pilier de ma réussite académique. Je te souhaite une santé parfaite et un bonheur sans limites.

À mon frère, **Ilyes**, et à sa femme,

Merci pour votre aide précieuse et votre soutien. Je vous souhaite tout le bonheur du monde et que tous vos rêves se réalisent.

À ma chère nièce, **Roumaissa**,

Je t'aime profondément et je te souhaite de réaliser tous tes rêves. Que ta vie soit remplie de joie et de réussite.

À mon frère, **Zakarya**,

Avec tout mon amour et mes meilleurs vœux, je te souhaite réussite et bonheur dans tous les aspects de ta vie.

À mon professeur, **Issam Meghlaoui**,

Merci infiniment pour votre confiance en mes capacités, votre soutien indéfectible et vos encouragements. Vous méritez toute mon respect et mon admiration. Que Dieu vous bénisse dans votre savoir et votre travail.

À mes amis, **Hayder, Imad, Djalal, Daredji, Abou Baker, Idris et Marwan**,

Merci pour les merveilleux souvenirs et pour votre soutien constant. Je vous souhaite une vie pleine de succès, de bonheur et de santé.

À mes amis et collègues, **Salah Eddine, Younes et Ahmed**,

Un grand merci pour votre aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Vous êtes plus que des amis : des frères sur qui je peux toujours compter. Que Dieu préserve notre amitié et vous comble de joie, de bonheur et de succès.

Enfin, je prie Dieu de préserver toutes ces personnes chères à mon cœur et de leur accorder santé, bonheur et réussite dans tous leurs projets.

Dédicace

Dédicace

J'adresse toute ma gratitude et mon amour à ma famille, et tout particulièrement à mon père, qui a toujours été un pilier dans ma vie. Son soutien indéfectible m'a permis de bénéficier d'une vie meilleure et de construire un avenir prometteur.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon frère aîné,

Qui m'a appris, par son exemple, à placer l'honnêteté et le courage au sommet de toutes les autres vertus. C'est avec une immense fierté que je vous dédie ce travail.

Je dédie également ce travail à mes précieux amis : **Riyad, Fares, Muhammad, Zain Al-Din Al-Abidin, Ayman, Ramzi et Bagdad,**

Ainsi qu'à toutes les personnes que je respecte profondément. Vous m'avez soutenu et encouragé à ne jamais perdre de vue mon objectif ultime. Merci pour votre amitié sincère et vos encouragements constants.

Ahmed Brahim Meziane

Sommaire

Introduction générale :	1
I. Gisement éolien en Algérie	3
I.1 Introduction :	3
I.2 Energie éolienne :	3
I.2.1 Type des vents :	3
I.3 Potentialités de l'énergie éolienne en Algérie :	4
I.3.1 Potentialités de l'énergie éolienne à Bordj Bou Arreridj :	6
I.4 Conclusion :	6
II. Conception des pales d'éoliennes	18
II.1 Introduction :	7
II.2 Principe de fonctionnement des éoliennes :	7
II.3 Classification de l'éolienne :	8
II.4 Rendement maximal des turbines :	10
II.4.1 Puissance du vent :	10
II.4.2 Coefficient de puissance :	10
II.4.3 Vitesse spécifique :	11
II.4.4 Nombre de Reynolds :	11
II.5 Forme et Nombre de pale prévue :	12
II.5.1 Forme de la pale :	12
II.5.2 Nombre de pale utilisée :	13
II.6 Performance aérodynamique :	13
II.7 Caractéristiques du profil :	14
II.7.1 Pales de type NACA :	14
II.8 Effet de la densité sur la vitesse de rotation des turbines :	16
II.8.1 Poids total des pales :	16
II.8.2 Moment d'inertie :	16
II.8.3 Stress et usure :	16
II.9 Conclusion :	17
III. Conception, analyse et tests d'une micro éolienne à axe horizontal	18
III.1 Introduction :	18
III.2 Ingénierie des pales de turbine éolienne :	18
III.3 Étapes de la modélisation :	19
III.3.1 Entrées.....	19
III.3.2 Sorties :	19

Sommaire

III.4 Conception mécanique de la pale sur SolidWorks :.....	20
III.5 Modèle des pales :.....	22
III.5.1 Modèle à trois pales :	23
III.5.2 Modèle à cinq pales :	23
III.5.3 Modèle à sept pales :.....	24
III.6 Prototype :	25
III.6.1 Pales de l'éolienne :.....	25
III.6.2 Moyeu de la turbine (ou rotor) :.....	25
III.6.3 Mât :	26
III.6.4 Support (ou châssis) du prototype :.....	26
III.6.5 Générateur :.....	27
III.6.6 Composants, outils et accessoires :.....	27
III.6.7 Caractéristiques de la Turbine éolienne proposé :	28
III.7 Conception d'une éolienne à pales démontable :	29
III.7.1 Technique mise en œuvre pour la mesure de la vitesse de rotation :.....	29
III.7.2 Impression 3D de la turbine éolienne :	30
III.7.3 Résultats et analyse :.....	31
III.8 Conclusion :.....	32
Conclusion générale :.....	34

Liste des figures

Liste des figures :

Figure. 1. Atlas de la vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol.	5
Figure. 2. Vitesse moyenne du vent en Algérie à 10-50-100 [m] d'altitude.....	5
Figure. 3. Vitesse moyenne du vent à Bordj Bou Arreridj à 10 à 50-100 [m] d'altitude	6
Figure. 4 . Principe de fonctionnement des éoliennes	7
Figure. 5. Configurations alternatives pour l'orientation de l'arbre et du rotor.	9
Figure. 6. Vitesse spécifique pour différents types de turbines éoliennes	11
Figure. 7. Plan de pale typique et classification des régions	12
Figure. 8. Dépendances des plans des pales par rapport à la vitesse spécifique et le nombre de pale.	13
Figure. 9. Profil aérodynamique NACA 4412.	15
Figure. 10. Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 4412 en fonction de l'angle d'attaque α	15
Figure. 11. Rapport du coefficient de portance et traînée en fonction de l'angle d'attaque α	16
Figure. 12. Paramètres pour la conception des pales	18
Figure. 13. Profil aérodynamique NACA 4412.....	21
Figure. 14. Répartition spatiale des profils aérodynamiques le long de la pale.	21
Figure. 15. Modification de l'angle de vrillage et de la longueur de corde de la bride de l'éolienne dans l'espace.....	21
Figure. 16. Forme finale de la pale modalisée sur SolidWorks.	22
Figure. 17. Éolienne tripale.	23
Figure. 18. Éolienne à cinq pales.	23
Figure. 19. Éolienne à sept pales.....	24
Figure. 20. Comparaison de la valeur de C_p pour différents nombres de pales.	24
Figure. 21. Pales du prototype imprimées en 3D.....	25
Figure. 22. Moyeu de la turbine.	26
Figure. 23. Mât utilisé pour la réalisation du prototype.....	26
Figure. 24. Support du prototype.....	27
Figure. 25. Générateur électrique utilisé pour la réalisation du prototype.	27
Figure. 26. Conception finale de l'éolienne à pales démontable.	29
Figure. 27. Technique mise en œuvre pour la mesure de la vitesse de rotation de la turbine.	30
Figure. 28. Prototype de l'éolienne réalisée dans le cadre de cette étude.	31
Figure. 29. Effet de la vitesse du vent et le nombre de pale sur la vitesse de rotation de la turbine.	32

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux :

Tableau 1. Conceptions modernes et historiques des rotors	9
Tableau 2. Matériaux des pales et leurs masses volumétriques	17
Tableau 3. Facteurs de contrôle et valeurs des paramètres correspondantes à chaque niveau.....	20
Tableau 4. Valeurs du rayon, de la corde et du vrillage pour les pales	20
Tableau 5. Récapitulatif des composants, outils et accessoires utilisée pour la réalisation du prototype ..	27
Tableau 6. Résultats des mesures pratiques de la vitesse de rotation en (tr /min) pour différentes vitesses de vent et différent nombre de pales	31

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles :

ρ : Densité de l'air [Kg/m³]

V : Vitesse du vent [m/s]

P : Puissance extraite du vent [W]

C_p : Coefficient de puissance [-]

λ : Rapport de vitesse spécifique [-]

R : Rayon du rotor ou de la pale [m]

Ω : Vitesse angulaire [rad/s]

Re : Nombre de Reynolds, utilisé pour caractériser les régimes d'écoulement [-]

C_l : Coefficient de portance de la pale [-]

C_d : Coefficient de traînée [-]

α : Angle d'attaque de la pale [°]

β : Angle de calage de la pale [°]

C : Longueur de corde de la pale [m]

Liste des abréviations :

NACA : Comité consultatif national pour l'aéronautique (National Advisory Committee for Aeronautics), utilisé pour désigner les profils aérodynamiques.

HAWT : Éolienne à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine).

VAWT : Éolienne à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbine).

BEM : Méthode des éléments de pale (Blade Element Method), une méthode d'analyse des pales.

C_p : Coefficient de puissance, indique l'efficacité de la turbine dans l'exploitation de l'énergie du vent.

3D : Trois dimensions, se réfère aux modèles tridimensionnels utilisés dans la conception.

Re : Nombre de Reynolds, utilisé pour déterminer la nature de l'écoulement de l'air autour de la pale.

Résumé

La pale de turbine est la partie la plus importante et essentielle des turbines éoliennes, car l'extraction d'énergie à partir du vent dépend de sa conception. L'objectif de cette étude est de concevoir et de développer des turbines éoliennes adaptées aux conditions de vent en Algérie, et plus particulièrement aux vents locaux de la région de Bordj Bou Arreridj. Les données météorologiques fournies par le site « Global Wind Atlas » on permet d'extraire la vitesse moyenne du vent à l'échelle de l'Algérie en général et de la Wilaya de Bordj Bou Arreridj en particulier. L'analyse de la vitesse moyenne à permet d'opter pour une conception mécanique personnalisée des pales, un programme d'optimisation de la géométrie basée sur la méthode de l'élément de pale a été développée dans ce travail, la géométrie obtenue via la simulation numérique permet à l'éolienne une récupération optimale d'énergie pour des faibles vitesses de vent, les résultats des essais pratiques sur l'éolienne développée et réalisée sont en concordance totale avec les résultats issues de la simulation numérique.

Abstract

The wind turbine blade is the most essential and critical part of wind turbines, as energy extraction from the wind depends on its design. The objective of this study is to design and develop wind turbines adapted to Algerian wind conditions, specifically to the local winds of the Bordj Bou Arreridj region. Meteorological data provided by the Global Wind Atlas enabled the extraction of average wind speeds across Algeria in general and particularly in the Wilaya of Bordj Bou Arreridj. Analysis of the average wind speed led to the selection of a customized blade mechanical design, and an optimization program for the blade geometry based on the blade element method was developed in this work. The geometry obtained through numerical simulation enables the turbine to achieve optimal energy recovery at low wind speeds. The results from practical tests on the developed and realized turbine align completely with the outcomes from the numerical simulation.

المخلص

تُعد شفرة التوربين الجزء الأهم والأساسي في توربينات الرياح، حيث تعتمد عملية استخراج الطاقة من الرياح على تصميمها. يهدف هذا البحث إلى تصميم وتطوير توربينات رياح تتناسب مع ظروف الرياح في الجزائر، وتحديدًا مع الرياح المحلية في منطقة برج بوعرييرج. وقد أتاحت البيانات المناخية المقدمة من موقع [الأطلس العالمي للرياح] استخراج سرعة الرياح المتوسطة على مستوى الجزائر بشكل عام وولاية برج بوعرييرج بشكل خاص. أدى تحليل سرعة الرياح المتوسطة إلى اختيار تصميم ميكانيكي مخصص للشفرة، وتم تطوير برنامج تحسين هندسي يعتمد على طريقة عنصر الشفرة في هذا العمل. أسفرت نتائج المحاكاة العددية للتوربين استرجاعاً مثالياً للطاقة عند سرعات الرياح المنخفضة. تتطابق نتائج الاختبارات العملية على التوربين المُطوّر والمُصنَّع تماماً مع النتائج المستخلصة من المحاكاة العددية.

Introduction générale

Introduction générale :

Les éoliennes sont l'une des principales sources d'énergie renouvelable à l'ère moderne, jouant un rôle crucial dans les efforts de transition vers une énergie propre et durable. Ces turbines exploitent l'énergie du vent pour générer de l'électricité, ce qui aide à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer les émissions de carbone. Les tailles des éoliennes varient des petites utilisées dans les foyers aux grandes installées dans les parcs éoliens. La popularité de cette technologie augmente grâce à son développement continu et à son efficacité élevée en matière de production d'énergie. Elles contribuent également à la création d'emplois et au renforcement de l'économie locale. Face aux défis environnementaux croissants, les éoliennes représentent une solution prometteuse pour relever ces défis et répondre aux besoins énergétiques croissants.

Les éoliennes fonctionnent en convertissant l'énergie du vent en énergie électrique à travers plusieurs étapes. Tout d'abord, les pales de la turbine se déplacent sous l'effet du vent, ce qui entraîne la rotation de l'arbre. Ce mouvement rotatif transmet l'énergie à un générateur électrique connecté à la turbine. L'énergie mécanique produite par la rotation de l'arbre est ensuite convertie en énergie électrique par le générateur. Ensuite, cette électricité est dirigée vers le réseau électrique ou stockée pour une utilisation ultérieure. L'efficacité de la turbine dépend de plusieurs facteurs, notamment la vitesse du vent et l'angle des pales. De plus, des technologies modernes, comme des systèmes de contrôle avancés, sont utilisées pour ajuster le fonctionnement des turbines en fonction des conditions de vent changeantes. En fin de compte, ces processus contribuent à fournir une énergie propre et durable.

L'Algérie s'appuie de plus en plus sur les éoliennes dans le cadre de sa stratégie de diversification des sources d'énergie et de promotion de l'utilisation des énergies renouvelables. Le pays bénéficie d'une situation géographique idéale, avec des côtes et des plaines offrant une énergie éolienne forte et durable. Le gouvernement algérien a lancé d'importants projets pour développer des parcs éoliens, visant à accroître la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique national. Le projet de "Parc éolien d'Aïn Salah" est l'un des projets les plus marquants, contribuant à fournir de l'électricité à des centaines de milliers de foyers. De plus, l'Algérie cherche à réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et à diminuer les émissions de carbone. Ces initiatives aident à atteindre les objectifs environnementaux et économiques du pays, ouvrant de nouvelles perspectives d'investissement et de croissance dans le secteur des énergies renouvelables.

Ce travail vise à étudier les petites éoliennes et la possibilité de construire des éoliennes en Algérie en général. Notre étude consiste à décrire les théories de la dynamique des fluides pour les éoliennes et à fournir une analyse scientifique du comportement de l'air autour des pales des

Introduction générale

éoliennes afin d'optimiser leur géométrie et d'arriver à un design de forme optimale pour les pales d'éoliennes. Pour commencer cette étude, nous avons divisé ce travail en plusieurs chapitres, résumés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude du vent en termes de types et des potentialités de l'Algérie en matière d'énergie éolienne, en se concentrant particulièrement sur la wilaya de Bordj Bou Arreridj.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons la manière de concevoir les pales des éoliennes en termes de forme, du meilleur profil pour la conception de la turbine et des matériaux utilisés pour la fabrication des éoliennes.

Le troisième et dernier chapitre, sera consacré au développement du programme d'optimisation, l'obtention de la forme géométrique optimale des pales, et la réalisation pratique de l'éolienne, ce chapitre comprend aussi les résultats pratique issues des expériences réaliser sur le prototype développé.

Enfin ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

I. Gisement éolien en Algérie

I.1 Introduction :

L'homme n'a pas cessé à ce stade d'utiliser le vent pour propulser les navires à voiles sur les rivières et les mers. Au contraire, l'homme a commencé à réfléchir à l'invention et au développement d'autres machines et outils qui pourraient le servir dans sa vie. L'énergie éolienne a ainsi constitué une source importante parmi les ressources que l'homme a utilisées tout au long de son histoire à de diverses fins telles que l'agriculture, l'industrie et le transport. Par la suite, l'énergie éolienne a été utilisée pour la production d'électricité. De nos jours, lorsque l'on parle d'énergie éolienne, cela fait souvent référence à l'utilisation de cette énergie pour la production d'électricité, qui peut ensuite être utilisée à de nombreuses fins.

Les vents peuvent exploiter leur énergie cinétique, car ils nécessitent une grande quantité d'énergie pour se déplacer. Plus cette énergie augmente, plus la vitesse du vent augmente, atteignant son maximum lors de perturbations atmosphériques et de tempêtes, ce qui signifie une maximisation de l'énergie. Les utilisations et les avantages des vents pour la civilisation humaine sont multiples, en plus de leur rôle en tant que source d'énergie renouvelable.

En Algérie, l'énergie éolienne varie selon les régions en raison de la topographie et du climat diversifié. L'Algérie possède une ressource éolienne modérée, estimée entre 2 et 6 m/s. Les régions du sud du pays ont des vitesses de vent plus élevées que celles du nord, en particulier dans le sud-ouest où la vitesse moyenne du vent est d'environ 4 m/s, atteignant 6 m/s dans la région d'Adrar la réserve technique d'énergie éolienne en Algérie est estimée à 172 térawatts heures/an, dont 37 térawatts heures/an sont exploitables économiquement [01].

I.2 Energie éolienne :

Il s'agit de l'énergie générée par le mouvement de grandes pâles fixées en hauteur en raison du vent. L'énergie électrique est produite à partir du vent à l'aide de turbines à trois pales rotatives montées sur un axe, qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Lorsque le vent passe à travers les pales, il crée une poussée d'air dynamique qui provoque leur rotation. Cette rotation actionne la génératrice, générant ainsi de l'énergie électrique [01].

I.2.1 Type des vents :

Les vents sont caractérisés par leur stabilité ou leur régularité. Sur cette base, on peut diviser les vents dans le monde en Trois types principaux, selon leur accélération relative, comme suit :

I.2.1.1 Vents constants :

Ce sont des vents qui soufflent selon un régime presque stable tout au long des différentes saisons de l'année, bien que leurs caractéristiques générales, notamment en ce qui concerne la vitesse et l'étendue, puissent varier de temps à autre [01].

I.2.1.2 Vents saisonniers :

Les vents saisonniers qui soufflent sur le continent asiatique sont un excellent exemple de ces vents dont les caractéristiques varient au cours des saisons hivernales et estivales. Leur plage de direction est généralement entre les tropiques et souffle principalement sur les régions orientales des différentes masses continentales, variant leur direction au cours des saisons hivernales et estivales la plupart du temps [01].

I.2.1.3 Vents locaux :

Ces vents sont associés aux dépressions atmosphériques où ils soufflent autour d'elles. Ils se caractérisent par une portée limitée et soufflent pendant des périodes spécifiques et de manière intermittente, d'où leur nom "vents locaux". On peut les classer en trois sous-groupes en fonction de leurs caractéristiques générales : vents locaux chauds (Khamsin, Sirocco), vents locaux froids (brise terrestre, brise marine, brise de vallée, brise de montagne).

- Les vents quotidiens : Ce sont des vents qui se produisent quotidiennement de manière régulière, représentés par :
- La brise terrestre et la brise marine : Ce mouvement, connu sous le nom de la brise marine, se manifeste peu de temps après le lever du soleil, car les surfaces marines ne présentent pas d'obstacles entravant le mouvement de l'air (la brise marine) vers les terres.
- La brise de montagne et la brise de vallée : ce phénomène quotidien se produit dans les régions montagneuses, en particulier lorsque le mouvement général des vents s'affaiblit [01].

I.3 Potentialités de l'énergie éolienne en Algérie :

Ils varient selon les régions, en raison de la topographie et du climat diversifié. L'Algérie dispose d'une quantité modérée de cette énergie, estimée entre 2 et 6 m/s. Les régions du sud du pays se distinguent par des vitesses de vent plus élevées que celles du nord, notamment dans le sud-ouest où la vitesse moyenne du vent atteint 4 m/s et peut même dépasser 6 m/s dans la région d'Adrar.

Les trois régions situées dans le sud-ouest du désert, (Tindouf, Aïn Salah, et Adrar), semblent être les plus propices à l'installation de parcs éoliens, car elles détiennent seules une réserve économiquement exploitable approchant les 24 térawatts heures/an. En effet, la réserve technique

totale d'énergie éolienne en Algérie est estimée à 172 térawatts heures/an, dont 37 térawatts heures/an sont économiquement exploitables. Cependant, l'exploitation des potentiels éoliens dans cette région est souvent confrontée à des contraintes économiques et techniques, telles que la distance géographique, l'absence de communication avec la zone s'étendant de Béjaïa à Biskra, ainsi que la situation à Annaba.

Il convient de noter que le réservoir éolien en Algérie représente un défi économique et technique, malgré ses immenses capacités. La mise en place d'infrastructures adéquates et la résolution des contraintes spécifiques peuvent ouvrir la voie à une exploitation plus efficace de l'énergie éolienne dans cette région [01].

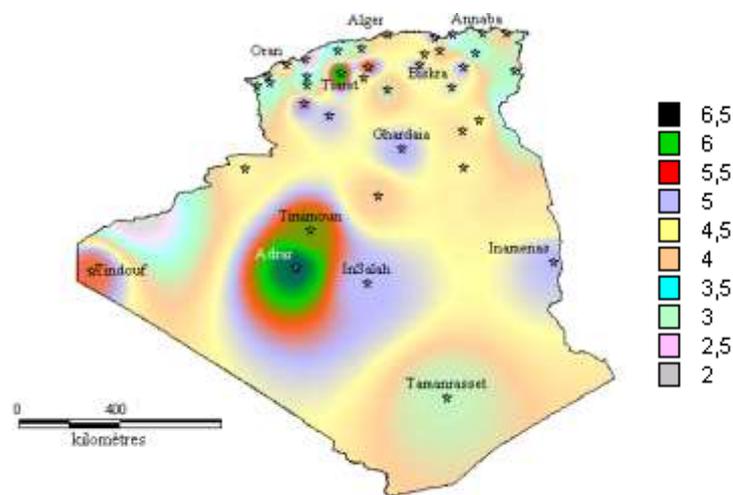


Figure. 1. Atlas de la vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol. [02].

D'après la figure 2, on remarque que la vitesse moyenne du vent est de 5,45 [m/s] pour une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol, tandis que la vitesse moyenne du vent atteint une moyenne de 7,33 m/s a une hauteur de 50 mètres.

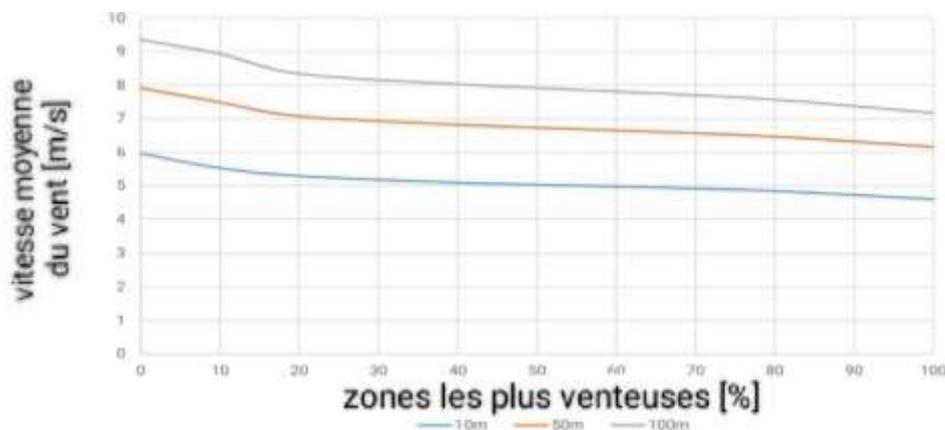


Figure. 2. Vitesse moyenne du vent en Algérie à 10-50-100 [m] d'altitude.

I.3.1 Potentialités de l'énergie éolienne à Bordj Bou Arreridj :

D'après la figure 3, on remarque que la vitesse moyenne du vent est de 5,13 m/s pour une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol, tandis que la vitesse moyenne du vent atteint une moyenne de 6,9 m/s à une hauteur de 50 mètres.

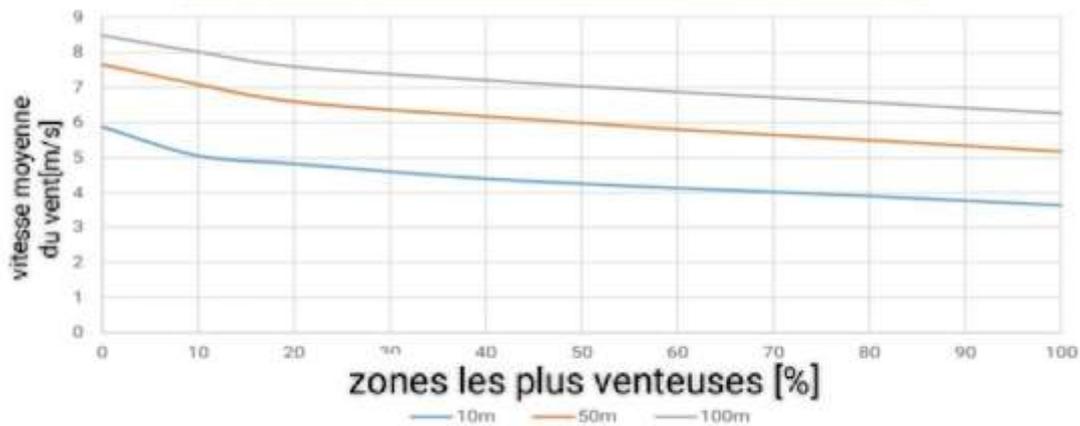


Figure. 3. Vitesse moyenne du vent à Bordj Bou Arreridj à 10 à 50-100 [m] d'altitude [03].

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre ont a mis l'accent sur le potentiel éolien de l'Algérie en générale et la wilaya de Bordj Bou Arreridj en particulier, l'objectif dans ce chapitre été de connaitre la vitesse de vent moyenne dans les différentes régions du pays, le potentiel de l'énergie éolienne en Algérie est estimé à 172 térawatts heures/an, dont 37 térawatts heures/an sont économiquement exploitables.

L'étude entamée dans ce chapitre a montré que la vitesse moyenne du vent en Algérie varie entre 3 et 6 m/s, cette moyenne est jugée faible, d'où la nécessité de chercher la forme et le nombre de pale adéquate qui permet aux éoliennes d'opérer dans de tel conditions.

Le second chapitre portera sur m'état de l'art sur la conception des pales des éoliennes, formes profil aérodynamique et matériaux.

II. Conception des pales d'éoliennes

II.1 Introduction :

Ce chapitre portera sur la conception des pales des éoliennes, afin de concevoir des pales des turbines, le choix du profil aérodynamique et du matériau est crucial. En termes de profils, le NACA 4412 est souvent utilisé pour ses bonnes performances à faible vitesse de vent [05]. Cependant, d'autres profils peuvent également être explorés, en fonction des besoins spécifiques comme l'efficacité énergétique ou la réduction du bruit.

Concernant les métaux, l'acier et les alliages d'aluminium sont fréquemment utilisés. L'acier, bien que plus lourd, offre une grande résistance et durabilité. L'aluminium, en revanche, est plus léger, ce qui peut réduire la fatigue sur les structures, mais il est moins résistant. Les composites comme la fibre de verre ou de carbone sont également couramment utilisés pour les pales en raison de leur légèreté et de leur rigidité.

II.2 Principe de fonctionnement des éoliennes :

Le vent agit sur les pales inclinées des éoliennes, mettant ainsi les turbines en mouvement. Lorsqu'il souffle sur la surface inclinée d'une pale, il exerce une force qui pousse la pale vers l'arrière, appelée **force de traînée**, et simultanément, il soulève la surface de la pale, ce qui est appelé **force de portance** [05].

Le principe de fonctionnement de l'**énergie éolienne** est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le **générateur de l'éolienne** .A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des **batteries de stockage d'électricité éolienne** [06].

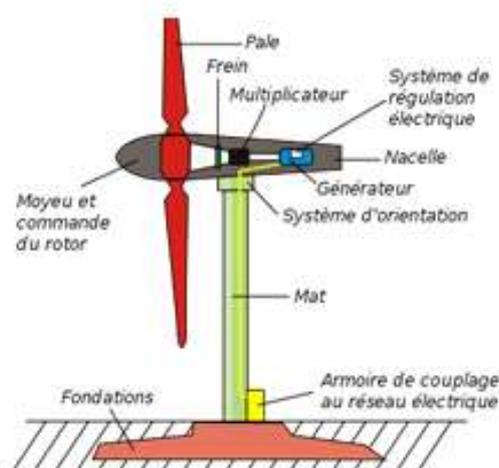


Figure. 4 . Principe de fonctionnement des éoliennes [06].

Cette figure représente un schéma explicatif des composants d'une éolienne et de son fonctionnement. Voici une explication des différentes parties mentionnées :

Pale : Les pales captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie mécanique grâce à leur design aérodynamique.

Frein : Utilisé pour ralentir ou arrêter la rotation de l'éolienne en cas de besoin (comme lors de vents violents ou pour des opérations de maintenance).

Multiplicateur : Un mécanisme qui augmente la vitesse de rotation des pales afin qu'elle soit adaptée au fonctionnement du générateur électrique.

Générateur : Convertit l'énergie mécanique issue de la rotation des pales en énergie électrique.

Système de régulation électrique : Assure la stabilité de la tension électrique produite et gère l'énergie générée.

Nacelle : Enveloppe extérieure qui protège les composants internes de l'éolienne, tels que le générateur et le multiplicateur.

Système d'orientation : Permet de diriger les pales face au vent afin d'optimiser la production d'énergie.

Mât : La structure qui supporte la nacelle et les pales. Il est généralement haut pour capter les vents les plus forts en altitude.

Fondations : Assurent la fixation du mât au sol et garantissent la stabilité de l'éolienne.

Armoire de couplage au réseau électrique : Relie l'éolienne au réseau électrique et contrôle la distribution de l'électricité produite.

Cette éolienne est un exemple des technologies permettant de produire de l'énergie propre et durable à partir de l'énergie éolienne.

II.3 Classification de l'éolienne :

L'orientation de l'arbre de rotation détermine la première classification de l'éolienne. Une éolienne avec un arbre monté horizontalement parallèlement au sol est appelée éolienne à axe horizontal ou (HAWT). Une éolienne à axe vertical (VAWT) a son arbre perpendiculaire au sol [04].

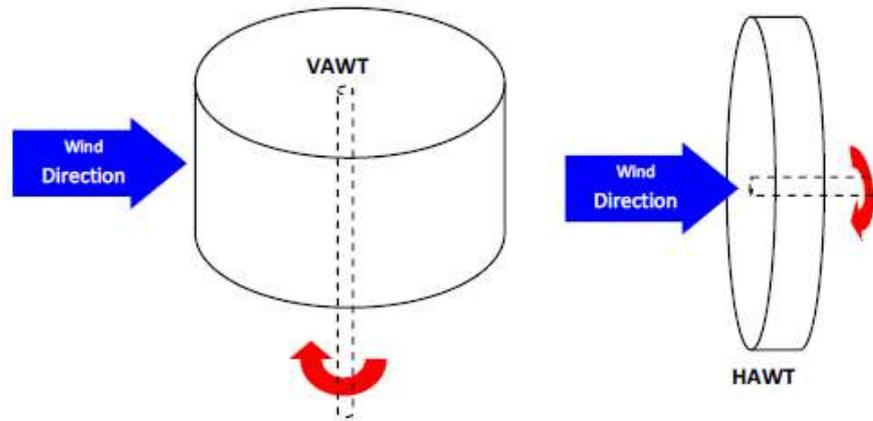
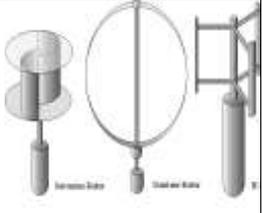
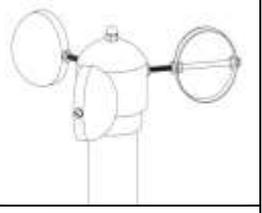


Figure. 5. Configurations alternatives pour l'orientation de l'arbre et du rotor.

Tableau 1. Conceptions modernes et historiques des rotors [07].

N° :	Conception	Orientation	Utiliser	Propulsion	Efficacité maximale	
1	Le rotor Savonius	VAWT	Le moulin à vent persan historique jusqu'à la ventilation moderne d'aujourd'hui.	Trainée	16%	
2	Coupelle	VAWT	L'anémomètre à coupelle moderne	Trainée	8%	
3	Le moulin à vent de ferme américain	HAWT	Du 18ème siècle à nos jours, utilisation agricole pour pomper de l'eau, moudre du blé, générer de l'électricité	Portance	31%	
4	Moulin à vent néerlandais	HAWT	Au 16ème siècle, utilisé pour moudre le blé	Portance	27%	
5	Rotor Darrieus (bateur d'œufs)	VAWT	Au 20ème siècle, génération d'électricité.	Portance	40%	

6	Turbine éolienne moderne.	HAWT	Au 20ème siècle, génération d'électricité.	Portance	Nom bre de Pale	Effi cac ité	
					1	43 %	
					2	47 %	
					3	50 %	

II.4 Rendement maximal des turbines :

Le rendement maximal d'une turbine éolienne est limité par ce qu'on appelle la limite de Betz, qui stipule qu'une turbine ne peut convertir qu'environ 59,3 % de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable. En pratique, les turbines atteignent généralement un rendement réel compris entre 35 % et 50 % en raison de pertes mécaniques, aérodynamiques et électriques [05].

II.4.1 Puissance du vent :

La puissance contenue dans le vent est liée à l'énergie cinétique de l'air en mouvement. Lorsqu'une turbine capture cette énergie, elle transforme une partie de cette énergie cinétique en énergie mécanique (et finalement en électricité) [05]. Équation (1) :

$$P_v = 1/2 \rho S V_v^3 \tag{1}$$

ρ : Densité du vent (Kg /m³)

V_v : vitesse du vent (m /s)

S : surface balayée (m²)

II.4.2 Coefficient de puissance :

En réalité, il n'est pas possible d'utiliser toute l'énergie cinétique du vent. L'efficacité des éoliennes ne peut pas dépasser 59,3 %, ce qui est représenté par ce qu'on appelle le coefficient de puissance C_p (C_p max=0.593) est appelé la limite de Betz [05].

$$C_p = \frac{P_T}{P_v} \tag{2}$$

P_T : Puissance récupérée par la turbine éolienne

II.4.3 Vitesse spécifique :

Défini par l'équation 3 comme le rapport de la vitesse spécifique de la pale et la vitesse du vent, c'est le paramètre de conception principal autour duquel toutes les autres dimensions optimales du rotor sont calculées [04].

$$\lambda = \Omega r_{tip} / V_v \tag{3}$$

λ : vitesse spécifique (-)

Ω : vélocité de rotation (rad/s)

r_{tip} : Rayon de l'extrémité de la pale (m)

Chaque type d'éolienne dépend d'une zone de vitesse spécifique bien définie. La figure 6 permet de déterminer le meilleur compromis entre C_p et λ pour bien choisir le type de turbines à installer dans une région donnée, cela permet le bon choix de la turbine dans sa zone d'efficacité maximale.

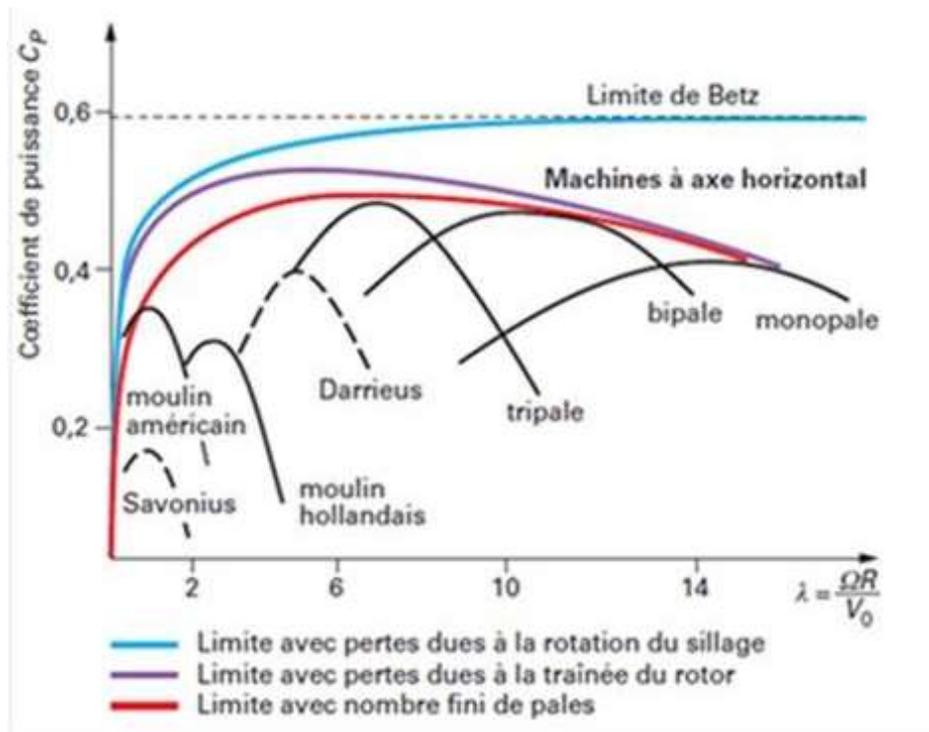


Figure. 6. Vitesse spécifique pour différents types de turbines éoliennes [06].

II.4.4 Nombre de Reynolds :

Ce nombre représente une caractéristique très importante impliquées dans la conception et l'analyse des pales des éoliennes, Pour cela, il est essentiel d'obtenir les données aérodynamiques

du profil aérodynamique choisie pour différentes valeurs de Re . Le nombre de Reynolds est défini par l'équation 4 comme suit :

$$Re = U_T C / \nu \quad (4)$$

U_T : vitesse totale ou résultante du vent (m/s)

C : Longueur de la corde en (m)

ν : viscosité cinématique de l'air ($\nu = 14,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$)

II.5 Forme et Nombre de pale prévue :

II.5.1 Forme de la pale :

La forme idéale du plan d'une pale de rotor HAWT est définie en utilisant la méthode BEM en calculant la longueur de corde selon la limite de Betz, les vitesses locales de l'air et la portance du profil aérodynamique.

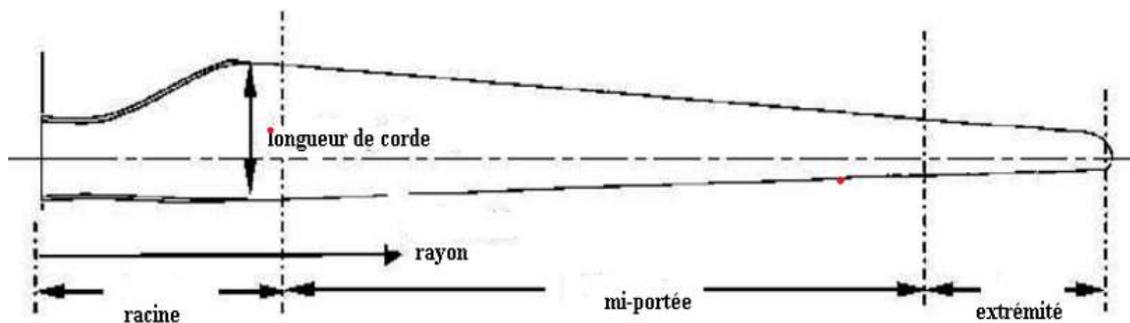


Figure. 7. Plan de pale typique et classification des régions [04].

Racine de la pale (root) : La transition entre le support circulaire et le premier profil aérodynamique – cette section supporte les charges les plus élevées. Sa faible vitesse de vent relative est due au rayon relativement petit du rotor. La faible vitesse du vent entraîne une réduction de la portance aérodynamique conduisant à de grandes longueurs de corde. Par conséquent, le profil de la pale devient excessivement grand au niveau du moyeu du rotor. Le problème de faible portance est aggravé par la nécessité d'utiliser des sections aérodynamiques excessivement épaisses pour améliorer l'intégrité structurelle dans cette région à forte charge. Par conséquent, la région de la racine de la pale se composera généralement de profils aérodynamiques épais avec une faible efficacité aérodynamique [04].

Milieu de la portée (midspan) : D'importance aérodynamique - le rapport portance/trainée sera maximisé. Par conséquent, en utilisant la section aérodynamique la plus mince possible que les considérations structurelles permettront [04].

Extrémité (tip) : critique sur le plan aérodynamique – le rapport portance/trainée sera maximisé. Par conséquent, en utilisant des aérosols élancés et des géométries de bout spécialement conçues pour réduire le bruit et les pertes. De telles géométries de bout n'ont pas encore fait leurs preuves sur le terrain, de toute façon, elles sont toujours utilisées par certains fabricants [04].

II.5.2 Nombre de pale utilisée :

En supposant qu'un coefficient de portance raisonnable soit maintenu, l'utilisation d'une méthode d'optimisation de pale produit des plans de pale principalement dépendants du rapport de vitesse spécifique de conception et du nombre de pales [07].

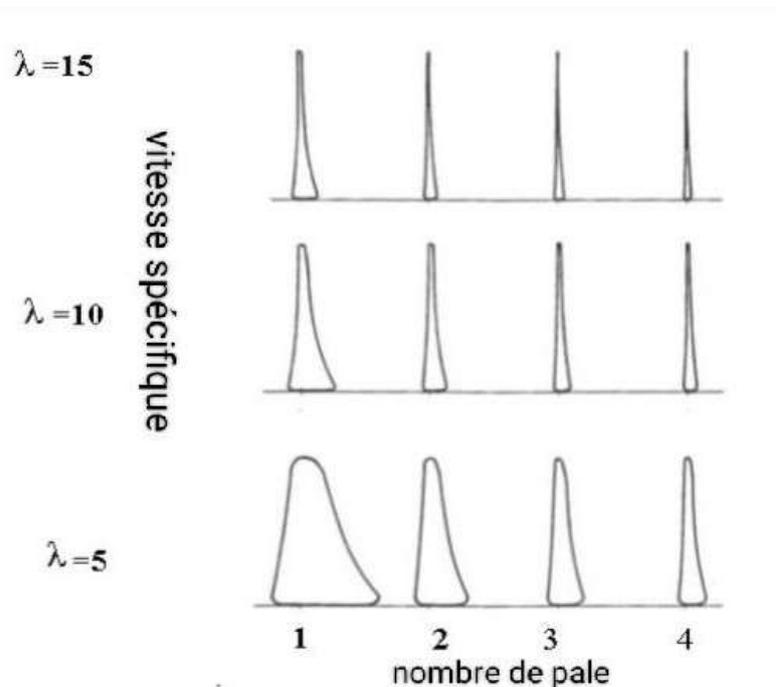


Figure. 8. Dépendances des plans des pales par rapport à la vitesse spécifique et le nombre de pale.

II.6 Performance aérodynamique :

La performance aérodynamique est cruciale pour la conception des rotors. La portance aérodynamique, essentielle pour l'efficacité énergétique, doit être maximisée, tandis que la traînée doit être minimisée. Un rapport portance/trainée élevé, supérieur à 30, est idéal pour la conception des pales. Les coefficients de portance et de traînée, bien que difficilement prédictibles, peuvent

être modélisés avec des logiciels comme XFOIL, mais nécessitent encore des tests expérimentaux [08],[09].

Les profils aérodynamiques des éoliennes, empruntés à l'aéronautique, doivent être adaptés aux conditions spécifiques des turbines, notamment en raison de l'encrassement par des particules au niveau du sol. Les pales doivent aussi répondre à des exigences structurelles, avec des profils épais à la racine pour supporter les charges, ce qui réduit le rapport portance/trainée. Les conceptions NACA ont été utilisées initialement, mais des profils spécifiques aux éoliennes, comme ceux de l'université de Delft, LS, SERI-NREL, FFA et RISO, sont maintenant privilégiés [10],[11].

L'angle d'attaque, crucial pour la performance, varie le long de la pale, nécessitant des profils aérodynamiques différents pour chaque section. Les sections épaisses à la racine supportent de grandes charges, tandis que les sections plus fines vers la pointe favorisent une performance aérodynamique optimale. Les variations de vitesse et de charge structurale le long de la pale imposent des profils aérodynamiques spécifiques pour chaque élément [12 ; 07].

La finesse du profil est le rapport portance/trainée (Lift / Drag) est défini par l'équation 5

$$\text{Finesse} = \frac{\text{Coefficient de portance (lift)}}{\text{Coefficient de trainée (drag)}} = \frac{C_L}{C_D} \quad (5)$$

II.7 Caractéristiques du profil :

Les caractéristiques du profil sont classées selon la forme de la surface inférieure et de la surface supérieure on peut distinguer :

Différents types des profils aérodynamiques sont catalogués. On note par exemple, les profils EPPLER, WORTMANN, CLARK, RITZ, NACA. On constate que Chaque profil utilise sa propre appellation Pour définir ces références, certains donnent pratiquement tous les renseignements sur la géométrie du profil (comme les profils NACA a 6chiffre), d'autres ne donnent qu'un numéro de série [13].

II.7.1 Pales de type NACA :

Le profil d'aile le plus célèbre et le plus utilisé dans le monde à l'heure actuelle est celui de type NACA (Comité National Consultatif pour l'Aéronautique) américain. Ce système a étudié les différents types de profils utilisés de manière extensive dans les applications des turbines éoliennes.

Il existe plusieurs classifications des profils NACA les plus couramment utilisés, basées sur des désignations composées de quatre et cinq chiffres. Ces chiffres indiquent les caractéristiques géométriques du profil [14].

II.7.1.1 Profil aérodynamique NACA 4412 :

La première étape de la conception d'une pale d'éolienne consiste à déterminer le profil aérodynamique et à obtenir les informations de conception associées [15]. La figure 9 montre le profil aérodynamique NACA 4412, sélectionné comme profil latéral pour les petites éoliennes et le plus couramment utilisé dans l'industrie.

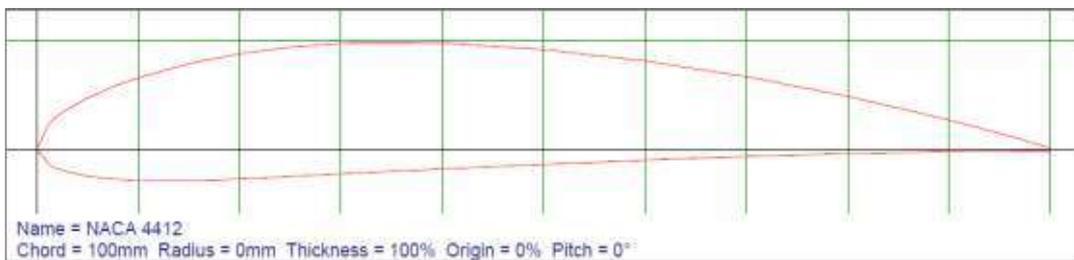


Figure. 9. Profil aérodynamique NACA 4412.

Les coefficients de portance et de traînée du profil NACA 4412 sont illustrés dans figure 10-A et la figure 10-B respectivement, tandis que le rapport C_l/C_d des coefficient de portance et traînée est illustré dans la figure 11. Nous observons que pour les faibles valeurs de l'angle d'attaque, l'aile génère une portance importante avec peu de traînée [16].

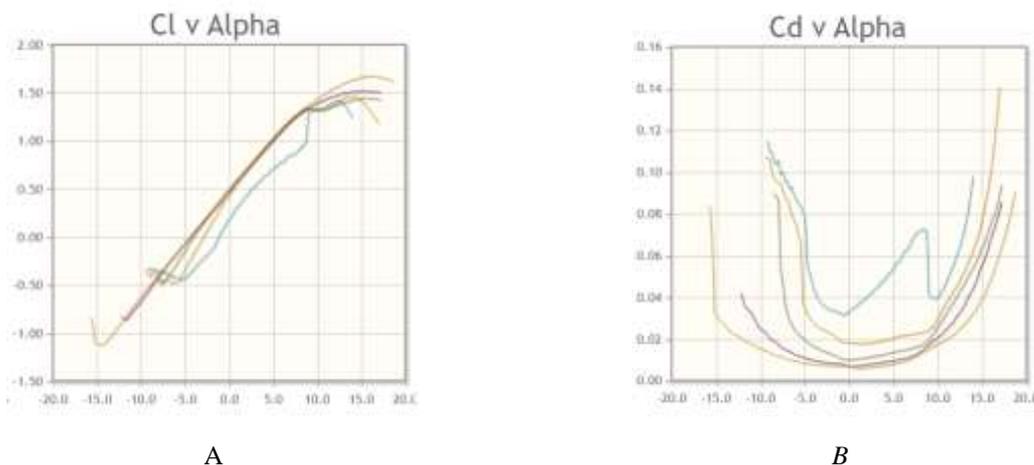


Figure. 10. Coefficients de portance et de traînée du profil NACA 4412 en fonction de l'angle d'attaque α .

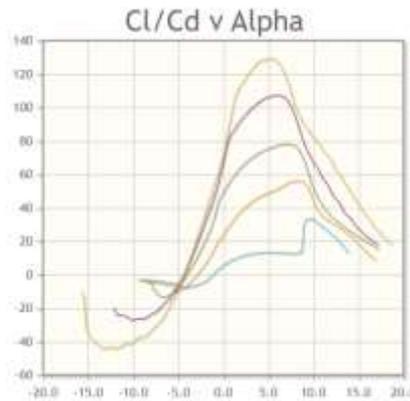


Figure. 11. Rapport du coefficient de portance et traînée en fonction de l'angle d'attaque α .

À un angle d'attaque de $\alpha=5,25^\circ$ un phénomène appelé décrochage se produit, où il y a une augmentation massive de la traînée et une chute brutale de la portance. Cela permet de déterminer α optimal et donc de définir le point de conception du profil NACA 4412[14 ,16].

II.8 Effet de la densité sur la vitesse de rotation des turbines :

L'influence de la masse volumique (densité) du matériau de fabrication des pales de turbine a un impact significatif sur la vitesse de rotation et l'efficacité de celles-ci. Voici quelques points qui illustrent cette influence :

II.8.1 Poids total des pales :

Les pales fabriquées à partir de matériaux à haute densité sont plus lourdes, ce qui augmente le couple nécessaire pour les faire tourner.

Les pales plus légères (fabriquées à partir de matériaux de faible densité) nécessitent moins d'énergie pour créer la rotation et maintenir la vitesse [17].

II.8.2 Moment d'inertie :

Les pales plus lourdes ont un moment d'inertie plus élevé, ce qui signifie qu'elles résistent davantage aux changements de vitesse de rotation par rapport aux pales plus légères. Les pales plus légères réagissent plus rapidement aux variations de la vitesse du vent, ce qui peut augmenter l'efficacité de la turbine dans des conditions de vent changeantes [17].

II.8.3 Stress et usure :

Les matériaux lourds peuvent être soumis à un stress plus important à des vitesses élevées en raison de la force centrifuge, ce qui peut réduire leur durée de vie et augmenter les risques d'usure. Les matériaux légers supportent mieux le stress et offrent une durée de vie plus longue aux pales [17].

Tableau 2. Matériaux des pales et leurs masses volumétriques

Matière	Masse volumique(kg\m³)
Carbone fibre	1600
Fibre glass	2000-1850
Aluminium	2700
Titanisme	4500
Steele	7850
PVC	1160-1350
Bois laminé	400-500

II.9 Conclusion :

Le meilleur choix du profil et du métal lors de la fabrication des éoliennes garantit une maximisation de l'énergie éolienne récupérée. Lors du choix d'un profil adapté aux petites éoliennes, l'angle d'attaque étant faible, cela génère un angle de portance important, ce qui aide à une meilleure rotation des turbines éoliennes à des vitesses de vent faibles. De plus, le métal utilisé dans la conception des turbines éoliennes est d'une grande importance pour le couple des pales. Les pales plus légères réagissent plus rapidement aux variations de la vitesse du vent.

III. Conception, analyse et tests d'une micro éolienne à axe horizontal

III.1 Introduction :

L'ingénierie des pales de turbine éolienne joue un rôle central dans l'amélioration de l'efficacité de l'exploitation de l'énergie éolienne, constituant ainsi un élément clé dans la conception des systèmes de production d'énergie durable. Dans cette étude, nous avons examiné l'effet du nombre de pales, de l'angle de vrillage (angle de calage) et de la répartition de la corde (longueur du profil) sur les performances des turbines éoliennes. Cette recherche repose sur l'utilisation de logiciels avancés tels que MATLAB et SolidWorks, où un modèle tridimensionnel des pales de la turbine a été développé à partir de résultats mathématiques, puis imprimé à l'aide d'une imprimante 3D.

Les modèles imprimés ont été testés sur des prototypes de petites turbines éoliennes dans différentes conditions afin de déterminer la performance optimale des turbines à des vitesses de vent faibles et moyennes.

III.2 Ingénierie des pales de turbine éolienne :

La répartition de la charge le long de la pale est déterminée en fonction de la répartition de l'angle de calage et de la longueur de la pale, Les angles de calage β et les profils de section C sont extraits de cette pale spécifique en fonction de la longueur et de la vitesse de rotation.

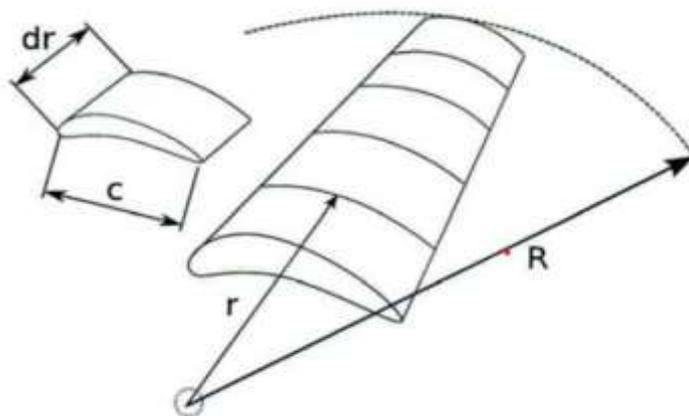


Figure. 12. Paramètres pour la conception des pales [18].

Il est essentiel de déterminer avec précision les caractéristiques aérodynamiques des pales de turbine, telles que les angles d'incidence et les profils de section pour chaque élément de pale. Pour chaque élément de la pale, les paramètres tels que les angles d'incidence β et les profils de section C doivent être précisément calculés. Un programme informatique a été développé à cet effet en utilisant 'MATLAB'. Ce programme génère les caractéristiques aérodynamiques NACA

4412 pour chaque élément, y compris les angles β et les profils C en fonction de la position radiale r [18].

III.3 Étapes de la modélisation :

Dans cette étude, nous allons chercher la géométrie idéale d'une petite éolienne à axe horizontal. Dans ce cas l'angle de calage des pales varie de 0° à 30° . De même, le nombre de pales qui est un autre facteur important dans cette étude varie entre : 3, 5 et 7 pales.

La phase de modélisation passe par la détermination de la répartition des angles d'incidence et des longueurs de corde le long de la pale de la turbine :

- 1- Chaque élément de la pale est caractérisé par sa valeurs en fonction de la position radiale r.
- 2- L'optimisation des angles d'incidence α (optimal) déterminée est basée sur les profils aérodynamiques NACA 4412.
- 3- La répartition des longueurs de corde C (r) est optimisée le long de la pale pour chaque itération ainsi que l'angle d'incidence β associer.

III.3.1 Entrées

Les entrées nécessaires à l'exécution de calcul sont :

- 1- Rayon du rotor $R = 0.2$ m.
- 2- Vitesse du vent incident $\dot{E}_{vent} = 2$ m/s ou 5m/s.
- 3- vitesse spécifique $\lambda = 7.1-5-3$.
- 4- Nombre de pales $N_p = 3-5-7$.
- 5- Masse volumique $\rho = 550$ kg/m³.
- 6- Profil aérodynamique NACA 4412.

III.3.2 Sorties :

Les sorties du programme MATLAB sont une structure de données **data** qui contient un ensemble de paramètres utilisés pour la conception et l'optimisation des pales d'éoliennes. Elles contiennent également des informations sur les paramètres aérodynamiques tels que les valeurs du nombre de Reynolds (Re), les angles d'attaque, ainsi que les coefficients de portance et de traînée (C_l et C_d) pour chaque angle. De plus, les caractéristiques des pales sont définies, comme le nombre de pales, la surface, la densité, et les dimensions telles que le rayon de l'extrémité, la corde maximale et l'angle de vrillage de la pale.

Dans cette étude 3 facteurs de contrôle ont été pris en considération pour 3 niveaux distincts, le tableau 3 représente ces facteurs de contrôle ainsi que les niveaux considérés dans cette étude.

Tableau 3. Facteurs de contrôle et valeurs des paramètres correspondantes à chaque niveau

Facteur de control	Description	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
A	Nombre de pales	3	5	7
B	Solidité [%]	15	20	25
C	Vitesse spécifique λ	7.1	5	3

Une série de simulation pour les différents cas de simulation possible présenter sur le tableau 3 a été effectué dans cette partie, les résultats obtenus par le programme d'optimisation élaborés en termes de valeurs [radius, chord, twist], sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Valeurs du rayon, de la chorde et du vrillage pour les pales

Radius	Chord	Twist
0.1445	0.1000	29.5992
0.2035	0.1000	23.3919
0.2625	0.1000	18.0225
0.3215	0.0895	14.7679
0.3805	0.0804	11.9479
0.4395	0.0723	9.7676
0.4985	0.0656	8.0208
0.5575	0.0590	6.6497
0.6165	0.0539	5.4736
0.6755	0.0498	4.4414
0.7345	0.0458	3.6224
0.7935	0.0431	2.8044
0.8525	0.0407	2.0641
0.9115	0.0377	1.3903
0.9705	0.0326	0.3674

III.4 Conception mécanique de la pale sur SolidWorks :

Après avoir déterminé la chorde et l'angle de vrillage de chaque élément de pale, un modèle 3D a été conçu à l'aide du logiciel SolidWorks. Le processus de conception est passé par les étapes suivantes :

- 1- Dessiner le profil aérodynamique NACA 4412 en utilisant les coordonnées (x,y).

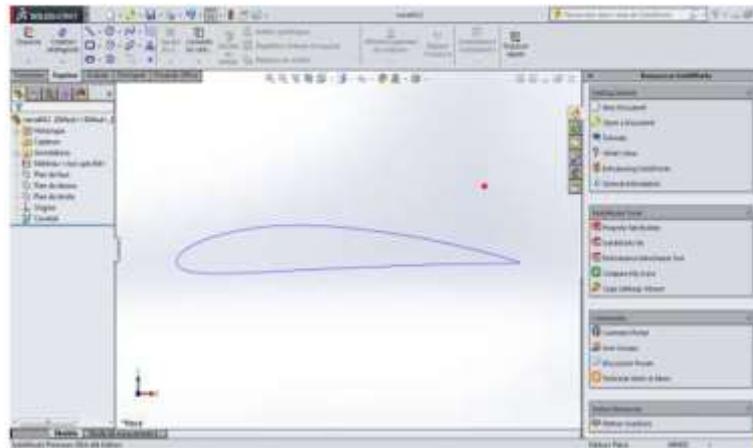


Figure. 13. Profil aérodynamique NACA 4412.

2- Redessiner le profil 15 fois, en ajustant à chaque fois la corde et l'angle de vrillage pour chaque élément le long de la longueur de la pale.

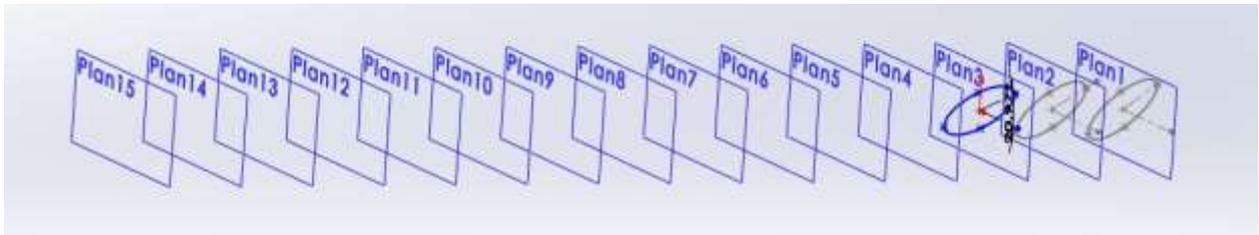


Figure. 14. Répartition spatiale des profils aérodynamiques le long de la pale.

3- La procédure de récupération des coordonnées de tous les profils conduit finalement à leur répartition dans l'espace comme le montre la figure suivante :

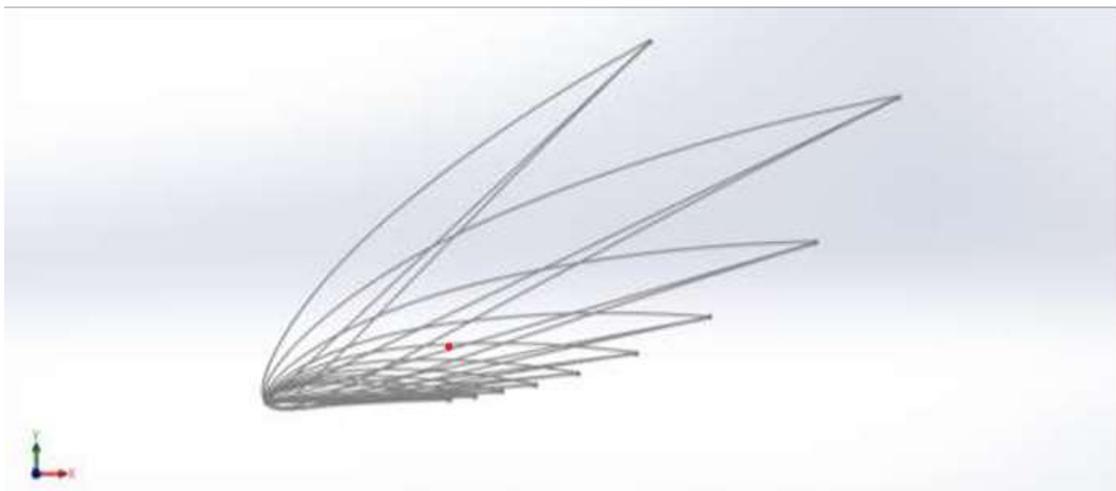


Figure. 15. Modification de l'angle de vrillage et de la longueur de corde de la bride de l'éolienne dans l'espace.

4- Une fois les sections conçues et enregistrés, il faut maintenant les assembler pour obtenir la forme finale de la pale.

A partir de la modélisation de la géométrie sur SolidWorks, nous avons pu atteindre la forme de pale d'éolienne pouvant être utilisée pour la fabrication des éoliennes compatible aux condition météo de la zone de Bordj Bou Arreridj afin d'extraire une puissance optimale.

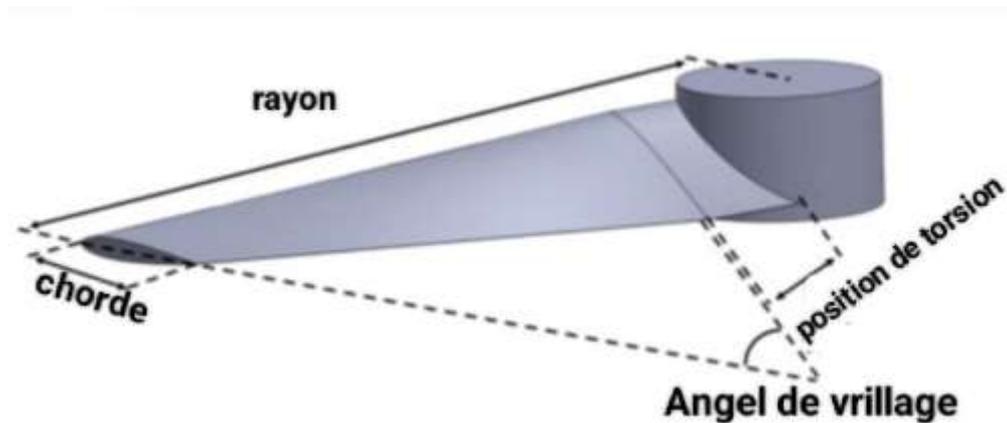


Figure. 16. Forme finale de la pale modalisée sur SolidWorks.

III.5 Modèle des pales :

D'après les résultats obtenus et le tableau 4, nous avons conçu les turbines éoliennes (3, 5, 7 pales) à l'aide du programme SolidWorks, et les résultats sont les suivants :

III.5.1 Modèle à trois pales :



Figure. 17. Éolienne tripale.

Dans ce modèle à trois pales, la valeur de la corde et du vrillage des pales correspond aux valeurs issues de la simulation numérique présentés sur le tableau 4, la solidité et alors de solidité de 15 %, pour cette configuration nous avons obtenu une bonne valeur de C_p de 0,46. En revanche on a pu mesurer un retard dans le lancement de la turbine pour atteindre sa vitesse maximale.

III.5.2 Modèle à cinq pales :

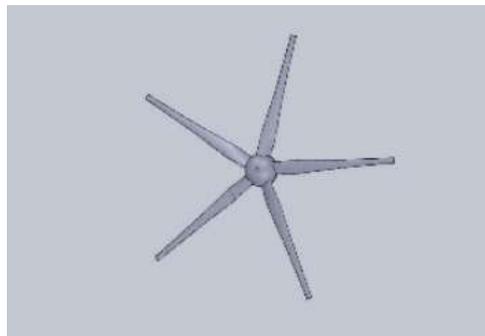


Figure. 18. Éolienne à cinq pales.

Dans ce modèle à cinq pales la valeur de la corde et du vrillage des pales correspond aux valeurs issues de la simulation numérique présentés sur le tableau 4, la solidité et alors de solidité de 20 %, pour cette configuration nous avons obtenu une bonne valeur de C_p de 0,48. En revanche on a pu mesurer un court délai de lancement de la turbine pour atteindre à sa vitesse maximale.

III.5.3 Modèle à sept pales :



Figure. 19. Éolienne à sept pales.

Dans ce modèle à sept pales, la valeur de la corde et du vrillage des pales correspond aux valeurs issues de la simulation numérique présentés sur le tableau 4, la solidité et alors de solidité de 25 %, nous avons obtenu une bonne valeur de C_p de 0,49. En revanche on a pu mesurer un court délai de lancement de la turbine pour atteindre à sa vitesse maximale.

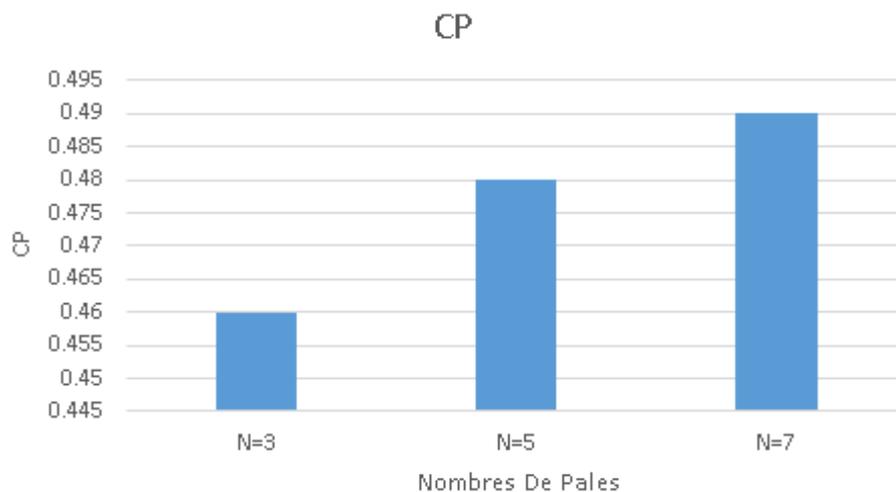


Figure. 20. Comparaison de la valeur de C_p pour différents nombres de pales.

La figure 20 indique clairement qu'une augmentation du nombre de pales entraîne une augmentation de la valeur de C_p . Cela signifie qu'ajouter des pales supplémentaires au système améliore ses performances ou son efficacité. On note également que la relation entre le nombre de pales et la valeur de C_p soit approximativement linéaire, c'est-à-dire qu'une augmentation du nombre de pales entraîne une augmentation proportionnelle de la valeur de C_p . De plus, nous ne pouvons pas déterminer à partir du graphique quel est le nombre maximal de pales pouvant être

utilisé ou la valeur maximale pouvant être atteinte pour C_p . Il pourrait y avoir une limite supérieure au nombre de pales en raison d'autres facteurs tels que la taille, le poids et le coût.

III.6 Prototype :

Ce modèle miniature représente une éolienne et est utilisé pour illustrer le fonctionnement de cette technologie dans la production d'énergie éolienne. Il est composé de plusieurs parties essentielles qui travaillent ensemble pour transformer le mouvement du vent en énergie mécanique. Dans certains cas, cette énergie peut être convertie en électricité grâce à un petit générateur intégré.

III.6.1 Pales de l'éolienne :

Ce sont les parties blanches longues qui s'étendent depuis le centre. Elles captent le mouvement du vent et le transforment en énergie mécanique. Ces pales sont conçues sur SolidWorks à partir des résultats issus du programme d'optimisation développée et réalisé grâce une imprimante 3D



Figure. 21. Pales du prototype imprimées en 3D.

III.6.2 Moyeu de la turbine (ou rotor) :

La partie circulaire au centre où se rejoignent les pales, et qui est responsable de la transmission du mouvement de rotation à l'arbre. Cette partie du prototype est conçue sur SolidWorks et réalisée par impression 3D.



Figure. 22. Moyeu de la turbine.

III.6.3 Mât :

C'est un tube cylindrique en acier qui permet à la fois de supporter le rotor et la nacelle et permet de loger le câblage électrique, le mât mesure 35 cm de hauteur.



Figure. 23. Mât utilisé pour la réalisation du prototype.

III.6.4 Support (ou châssis) du prototype :

Il s'agit de la base rectangulaire sur laquelle reposent les autres composants, et qui soutient l'éolienne pour la maintenir stable, Il mesure 35 cm de longueur, 25 cm de largeur et 15 cm de hauteur.



Figure. 24. Support du prototype.

III.6.5 Générateur :

Le générateur électrique dans les éoliennes est l'élément qui convertit l'énergie cinétique résultant de la rotation des pales de l'éolienne en énergie électrique. Lorsque les pales tournent sous l'effet du vent, cette énergie cinétique est transférée à l'arbre principal de l'éolienne, ce qui fait tourner le générateur, qui à son tour produit de l'électricité.



Figure. 25. Générateur électrique utilisé pour la réalisation du prototype.

III.6.6 Composants, outils et accessoires :

Le tableau 5 présente les différents composants, outils et accessoires électriques et électroniques utilisés pour la réalisation du prototype

Tableau 5. Récapitulatif des composants, outils et accessoires utilisée pour la réalisation du prototype

Composants, outils et accessoires	Photo
Fourche optique : Capteur pour mesurer la vitesse de rotations de l'éolienne.	

Carte Arduino : permet l'acquisition des données issues du capteur de vitesse	
Lampe LED : Considérer comme charge pour l'éolienne	
Fils de connexion : permettent de réaliser le câblage entre composants électriques	
Imprimante 3D : permet l'impression des parties de la turbine : les pales et le moyeu	

III.6.7 Caractéristiques de la Turbine éolienne proposé :

La caractéristique principale de la turbine proposée (voir figure 26) réside en ce que le nombre de pales peut être choisi 3,5 et 7, l'utilisateur peut alors choisir le nombre de pale qui répond aux exigences du site et les conditions météo dans sa région.

III.7 Conception d'une éolienne à pales démontable :



Figure. 26. Conception finale de l'éolienne à pales démontable.

Ce design offre plusieurs avantages à savoir :

Amélioration de l'efficacité : Permet d'ajuster le nombre de pales pour maximiser l'efficacité de l'éolienne dans différentes conditions de vent.

Facilité de maintenance : Le démontage des pales du support facilite la maintenance et le remplacement, ce qui est plus rapide.

Augmentation de la flexibilité : Possibilité d'avoir différentes conceptions de pales (longueur, forme, matériau) adaptées à des besoins spécifiques.

Réduction des coûts : La capacité à remplacer uniquement les pales plutôt que l'ensemble du support peut réduire les coûts.

III.7.1 Technique mise en œuvre pour la mesure de la vitesse de rotation :

Une fourche optique est insérée sur le prototype afin de mesurer la vitesse de rotation de la turbine éolienne, la figure 27 représente le schéma de montage de la fourche optique avec Arduino, l'affichage de la valeur de la vitesse de rotation est affiché sur PC.

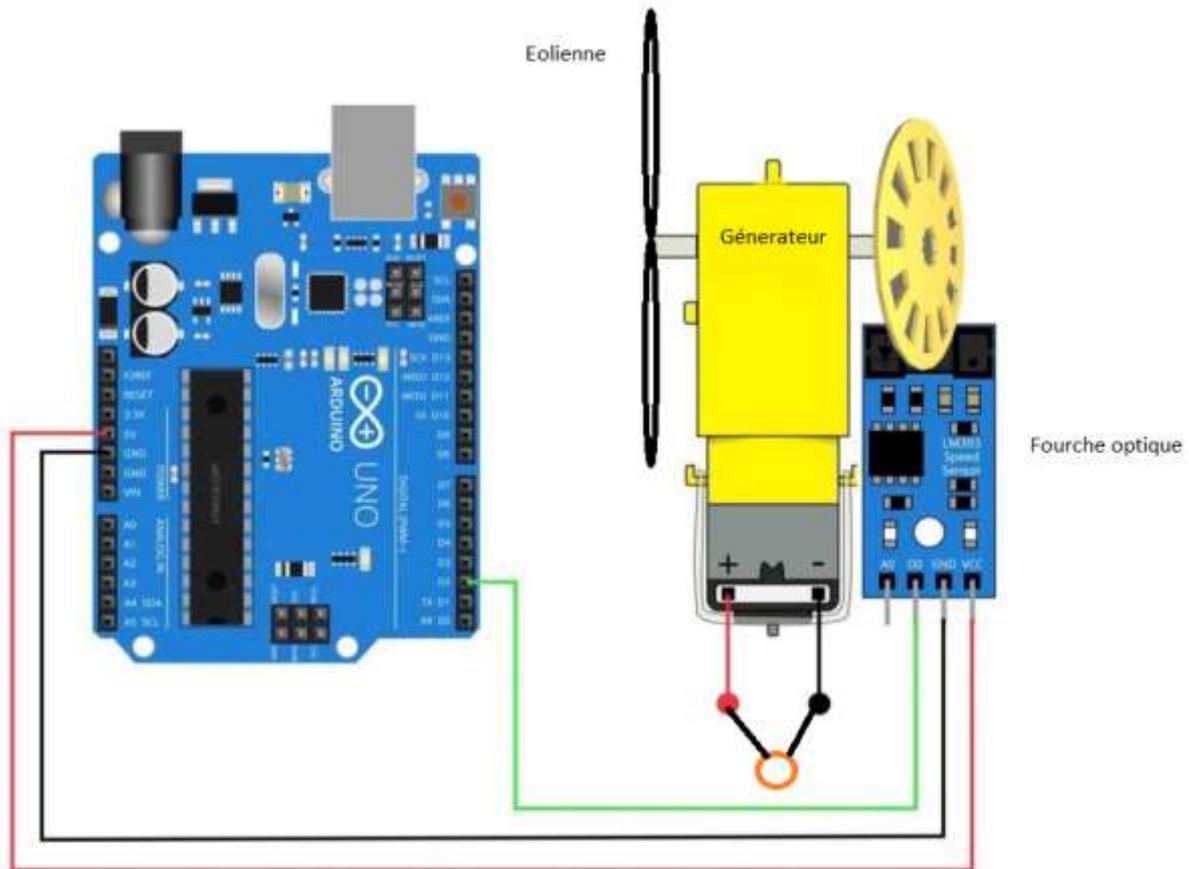


Figure. 27. Technique mise en œuvre pour la mesure de la vitesse de rotation de la turbine.

III.7.2 Impression 3D de la turbine éolienne :

Après la finalisation de la conception mécanique des différentes parties de la turbine éolienne sur SolidWorks, le modèle a été converti au format **STL** et préparé pour l'impression avec un réglage des paramètres d'impression tels que la précision des couches et le motif de remplissage interne. L'imprimante a été préparée avec le réglage de la température du lit et de l'équilibre de l'impression pour assurer une bonne adhésion de la première couche. Après le démarrage de l'impression, le processus a été surveillé de près pour vérifier l'absence de problèmes dans la construction des pales. Enfin, chaque pièce imprimée sera retirée après l'impression et un contrôle qualité sera effectué pour s'assurer de sa conformité avec le design initial.

Prototype final :

La figure 28 représente le prototype final réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études, pour cela les différentes parties ont été assemblées, pales, moyeu, génératrice, mat et châssis, le système de mesure de la vitesse de rotation ainsi que le câblage électrique ont été aussi insérés dans le prototype.



Figure. 28. Prototype de l'éolienne réalisée dans le cadre de cette étude.

III.7.3 Résultats et analyse :

Une série de tests pratiques ont été menés sur le prototype de la turbine éolienne afin de valider les résultats de la simulation numérique, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 6

Tableau 6. Résultats des mesures pratiques de la vitesse de rotation en (tr /min) pour différentes vitesses de vent et différent nombre de pales

Vent (m/s) \ Nombre de pale	2	3	4	5
3	00	20	193	257
5	182	266	343	374
7	248	307	369	386

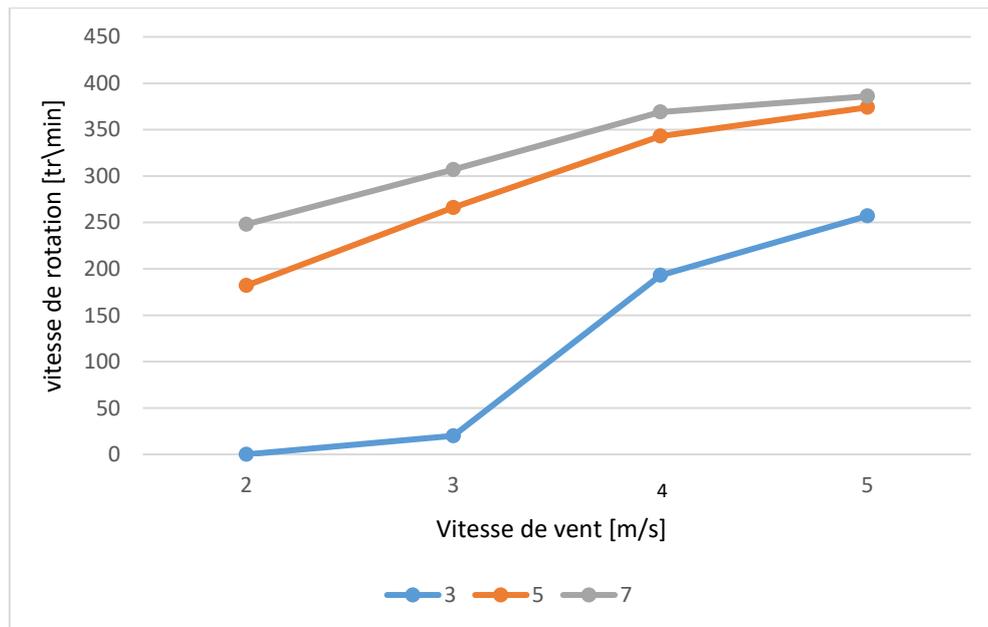


Figure. 29. Effet de la vitesse du vent et le nombre de pale sur la vitesse de rotation de la turbine.

La figure 29 montre l'effet de la vitesse du vent et le nombre de pales sur la vitesse de rotation de la turbine éolienne. La courbe en bleue représente la turbine à trois pales, la courbe orange la turbine à cinq pales, et la courbe en gris la turbine à sept pales. On observe que la turbine à trois pales n'a pas démarré à une vitesse du vent faible (2 m/s, ce qui correspond à 0 tr/min). Cependant, à des vitesses de vent supérieures à 2 mètres par seconde, la vitesse de rotation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la vitesse du vent. En revanche, pour les turbines à cinq et à sept pales, les turbine démarrent pour une vitesse de vent inférieure à 2 m/s. La turbine à cinq pales enregistre une vitesse de rotation supérieure à celle de la turbine à trois pales, et cette vitesse augmente à mesure que la vitesse du vent augmente. Quant à la turbine à sept pales, elle enregistre une vitesse de rotation supérieure à celle des turbines précédentes, avec une augmentation de la vitesse de rotation correspondant à l'augmentation de la vitesse du vent.

III.8 Conclusion :

L'étude a examiné l'effet de la variation du nombre de pales et des angles de vrillage ainsi que la répartition des cordes sur la performance des éoliennes. À l'aide du prototype conçu sur SolidWorks et imprimés en 3D, des essais ont été effectués en variant la vitesse du vent et le nombre de pales et en mesurant pour chaque cas la vitesse de rotation de la turbine. Les résultats ont montré que l'augmentation du nombre de pales de 3 à 7 améliore le coefficient de puissance C_p , avec un léger retard dans l'atteinte de la vitesse maximale de la turbine à 3 pales. En outre, les tests pratiques ont démontré que le design optimisé à 7 pales pourrait être efficace dans les régions

à faible vitesse de vent, comme la région de Bordj Bou Arreridj, où les expériences sur le prototype ont révélé une bonne efficacité à basse vitesse de vent.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire de fin d'études on a engagé une étude pour l'évaluation du potentiel de l'énergie éolienne en Algérie, avec un accent particulier sur la wilaya de Bordj Bou Arreridj, une région prometteuse pour l'exploitation de cette énergie renouvelable, malgré une vitesse moyenne de vent relativement faible, comprise entre 3 et 6 m/s. Cette faible vitesse rend nécessaire le développement de turbines éoliennes capables de fonctionner efficacement dans de telles conditions, nécessitant ainsi une analyse minutieuse du design des pales, incluant le profil aérodynamique, le nombre de pales, l'angle de vrillage et la distribution des cordes. Le potentiel éolien de l'Algérie est estimé à environ 172 térawatt-heures par an, dont 37 térawatt-heures sont exploitables économiquement, ce qui souligne l'importance de solutions innovantes pour améliorer les performances des turbines.

Dans ce modeste travail on a également mis en évidence l'importance du choix du profil aérodynamique, qui contribue à obtenir un angle de portance élevé même à un faible angle d'attaque, ainsi que le choix du matériau pour les pales, en particulier pour les petites éoliennes. Un profil aérodynamique adapté permet une récupération optimale de puissance à faibles vitesses de vent, tandis que l'utilisation de métaux légers pour les pales améliore la réactivité de la turbine face aux variations de la vitesse du vent, optimisant ainsi la conversion de l'énergie.

Dans ce travail un programme d'optimisation de la géométrie du rotor basé sur la méthode de l'élément de pale a été développé sur MATLAB, Le programme d'optimisation offre les différents paramètres de conception de la pale tel que [raduis, chord, twust]. Une fois les paramètres de conception sont connus, le rotor de la turbine a été conçu en utilisant SolidWorks, puis imprimés en 3D, puis testé en conditions réelles.

Les tests pratiques ont été mené pour des vitesse de vent variant entre 3 et 6 m/s, ainsi qu'un nombre de pales variant de 3 à 7. Les résultats des expériences pratiques sur le prototype réalisé ont montré qu'un nombre de pales égal à 7 enregistre le meilleur coefficient de puissance (C_p), contrairement au désigne à 3 pales qui a enregistré le faible C_p et qui n'a pas pu démarrer à des faibles vitesses du vent. Ces essais ont confirmé que le design optimisé avec 7 pales est le plus performant dans les régions à faible vitesse de vent, comme Bordj Bou Arreridj, où les tests ont révélé une efficacité satisfaisante à de faibles vitesses de vent.

Enfin, cette étude fournit des directives et des recommandations clés pour la conception idéal des éoliennes en Algérie, notamment dans les régions isolées à faible moyenne de vitesse de vent qui

Conclusion générale

pourraient bénéficier de sources d'énergie durables à faible coût. L'étude ouvre également des perspectives pour des recherches plus approfondies sur la conception et la fabrication de turbines éoliennes, en mettant l'accent sur l'exploitation du potentiel éolien dans les zones de vent faible et l'amélioration de l'efficacité aérodynamique des pales.

Références bibliographiques :

- [01] **Revue Hoggar des études économiques.** *Centre Universitaire de Tindouf.* Numéro 02, Juin 2018.
- [02] **ResearchGate.net.** [En ligne]. Disponible sur : (<https://www.researchgate.net/>) [Consulté le : (28juin2024)].
- [03] **Global Wind Atlas.** *Zone Algérie.* [En ligne]. Disponible sur : <https://globalwindatlas.info/fr/area/Algeria> [Consulté le : (07juillet2024)].
- [04] **Schubel, P.J., Crossley, R.J.** *Wind Turbine Blade Design.* Energies, ISSN 1996-1073
- [05] **J. Vernier,** Les énergies renouvelables : Que sais-je ? 2007
- [06] **Les énergies renouvelables. Principe et fonctionnement d'une éolienne [en ligne].** Disponible sur : [[Fonctionnement d'une éolienne - Les Énergies Renouvelables](#)]. [Consulté le 26 novembre 2024].
- [07] **Multon, B., Gergaud, O., Ahmed, H.B., Roboam, X., Astier, S., Dakyo, B., & Nikita, C.** "État de l'art des aérogénérateurs," Ed. NOVELECT-ÉCRIN, ISBN 2-912154-8-1, 2002.
- [08] **Rapin, M., Noël, J.** *Énergie éolienne.* 2010.
- [09] **Hau, E.** *Éoliennes, Fondamentaux, Technologies, Applications,* 2e éd. Berlin, Allemagne : Springer, 2006.
- [10] **Griffiths, R.T.** "L'effet des caractéristiques de profil aérodynamique sur la performance des éoliennes." *Journal Aéronautique.* 1977, 81, pp. 322–326.
- [11] **Drela, M.** *XFOil.* Institut de Technologie du Massachusetts, Cambridge, MA, États-Unis, 2000.
- [12] **Abbott, I.H., Doenhoff, A.V.** *Théorie des sections de vent.* Londres, Royaume-Uni : McGraw-Hill, 1949.
- [13] **Airfoil Tools.** [En ligne]. Disponible sur : <http://www.airfoiltools.com> [Consulté le : (03aout2024)].
- [14] **Timmer, W., Van Rooij, R.** "Résumé des profils aérodynamiques dédiés aux éoliennes de l'Université de Delft." *Journal de l'ingénierie de l'énergie solaire,* ASME, vol. 125, pp. 488-496, 2003.
- [15] **Bertagnolio, F., Sørensen, N., Johansen, J., Fuglsang, P.** "Catalogue des profils aérodynamiques pour éoliennes." 2001.
- [16] **Marten, D., Wendler, J.** *Directives de conception des pales v0.6.* Berlin : TU Berlin, 2013.
- [17] **Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L.** *L'énergie éolienne expliquée : théorie, conception et application.* John Wiley & Sons, 2010.
- [18] **ANSYS Inc.** *Guide théorique ANSYS Fluent 12.0.* Canonsburg, PA, 2009.