

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electromécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme master en électromécanique

Thème

Etude et réalisation d'une éolienne à
axe horizontal

Réalisées par :

- ❖ KHERFALLAH Melissa
- ❖ KHOUALDI Safia

Encadré par :

M. MEBARKI

Promotion : 2021



Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur, de beaucoup de sacrifices et le fruit de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes.

On remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce nous a permis d'arriver au bout de nos efforts en nous donnant la santé, la force, le courage mais aussi de nous avoir entouré de merveilleuses personnes que nous tenons à remercier infiniment.

*Nous adressons notre profonde reconnaissance à notre encadreur **M. MEBARKI Youcef**, qu'il trouvera ici notre profonde gratitude et nos sincère remerciements pour son encadrement, sa disponibilité, sa confiance en nous et les innombrables conseils qu'il nous a généreusement prodigués.*

*Mes sincères gratitude à **M. HAMITOCHE** pour ses compétences et conseils qu'il nous a partagées, ainsi qu'à l'intérêt qu'il a portais à notre travail.*

*En guise de reconnaissance, nous adressons un remerciement spécial et sincère à **M. ATROUNE SALAH**, qui tout au long de notre parcours, a su nous soutenir moralement pour pouvoir surmonter les épreuves et les difficultés par lesquels nous somme passées. Il a su nous prodiguer, à tout instant, conseils et encouragements.*

*Nos remerciements vont également à **M. YUCEFI Rachid**, **M. ATTOUB Noureddine** et l'ensemble des employés du hall de technologie qui nous ont accueillis la porte grande ouverte et qui ont tout mis à notre disposition pour nous permettre de travailler dans les meilleures conditions et tout cela avec sympathie.*

*Nos vifs remerciements au président de l'association scientifique **LEFNAR M. TAZDAITH** pour sa collaboration qui nous a été d'une aide précieuse visant à la réussite de notre projet.*

Nous tenons à remercier les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'apporter leurs jugements sur notre travail.

Dans l'impossible de citer tous les noms, nos sincère remerciement vont à tous ceux ou celles, ont permis par leurs conseils et leurs compétences à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

Dédicaces

Je vous dédis le fruit de ce présent labeur et cet humble travail en signe de reconnaissance et respect :

*A vous mes **chers parents**, toujours prêt à satisfaire mes droits d'études, qui ont toujours su inventer des petites astuces pour adoucir les mauvais moments. Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir, tout ce que je peux vous offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte.*

*A mes deux sœurs : **CELIA** et **SARAH**, à tous les moments d'enfance passés avec vous mes sœurs, en gage de ma profonde estime pour l'aide que vous m'avez apportée. Vous m'avez soutenue, réconfortée et encouragée.*

*A ma nièce **ALICE**, avoir une nièce est le plus beau cadeau qu'une sœur puisse vous faire. Tes petites mains, ton envie de parcourir le monde, ton enthousiasme, tes sourires, tes yeux brillants sont incomparables. Tu as apporté beaucoup de bonheur à notre famille. Je t'aime*

*A mes **chers grands parents** fidèles à leur gentillesse, amour et tendresse, qui m'ont éternellement soutenu durant tout mon parcours.*

*A **SULA**, pour sa gentillesse, ses conseils et aussi son soutien quotidien durant ce long parcours et qui a su me motiver afin de réaliser cet objectif qui m'est cher au cœur.*

*A mes amies **NESRINE** et **MALIKA**, Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail.*

*Pour mon binôme **Safia** :*

Pour son sérieux et sa compréhension pendant la réalisation de ce modeste travail.

*A mes collègues et amis : **NANI**, **CHIHAB**, **ANOUAR**, **ANIS**, **BILLAL** et **TAREK** pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail.*

KHERFALLAH

Melissa

Dédicaces

C'est avec une profonde gratitude et sincères mots, que je Dédie ce modeste travail de fin d'étude à :

A mes chers parents :

Qui m'ont toujours soutenu autant de phrases et expressions aussi éloquents soient-elles ne saurions exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers vous, votre compréhension et vos encouragements ont été pour moi un soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter.

J'espère un jour, je pourrais vous rendre un peu de ce que vous avez fait pour moi.

*A Ma très chère sœur **Sonia** et mes chères cousines (**Soraya, Sabrina, Lola**)*

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je vous porte, je ne vous remercierai jamais assez pour votre présence, votre soutien et votre générosité.

*A ma petite nièce adorée **Ayline**, tu as embelli ma vie Tu as apporté beaucoup de bonheur à notre famille. Je t'aime.*

*A Mes frères **Sofiane** et **Nassime** :*

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance pour tous vos encouragements je vous souhaite une vie pleine de bonheur.

A mes ami(e)s :

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé qui ont été toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études :

Sara, Mhenni, Sofiane, Yasmine, Ben-yamine, Kouceila, Anouar.

*Pour mon binôme **Mélissa** :*

Pour son sérieux et sa compréhension pendant la réalisation de ce modeste travail.

KHOUALDI

Safia

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	2
------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les éoliennes

Introduction	5
--------------	---

I.1 Historique de l'éolienne	5
------------------------------	---

I.2 Le vent	8
-------------	---

I.2.1 Circulation atmosphérique générale	8
--	---

I.2.1.1 Les zones des calmes et basses pressions équatoriales	9
---	---

I.2.1.2 Les zones tropicales	9
------------------------------	---

I.2.1.3 Les zones des calmes et hautes pressions subtropicales	10
--	----

I.2.1.4 Les zones tempérées	10
-----------------------------	----

I.2.1.5 Les zones polaires	10
----------------------------	----

I.2.2 Direction du vent	11
-------------------------	----

I.2.2.1 Variations journalières	11
---------------------------------	----

I.2.2.2 La variation saisonnière	12
----------------------------------	----

I.3.2.3 La rose des vents	12
---------------------------	----

I.2.3 Vitesse du vent	12
-----------------------	----

I.2.3.1 Unités de mesure de la vitesse du vent	13
--	----

I.2.3.2. Instrument de mesure de la vitesse du vent	13
---	----

I.3 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	14
I.3.1 Définition de l'énergie éolienne	14
I.3.2 Principaux composants d'une éolienne	14
I.3.2.1 Le rotor	15
I.3.2.2 La pale	15
I.3.2.3 La nacelle	15
I.3.2.4 Le mât	15
I.3.2.5 Le générateur	15
I.3.2.6 Le multiplicateur	15
I.3.2.7 Le moyeu	15
I.3.3. Différents types d'éoliennes	16
I.3.3.1. Classification selon le principe de fonctionnement	16
I.3.3.1.1. Éolienne à axe vertical (VAWT)	16
I.3.3.1.2 Éolienne à axe horizontal (HAWT)	17
I.3.3.2 Classification selon la puissance délivrée et le diamètre du rotor	17
I.3.4 Le fonctionnement d'une éolienne	18
I.4 Utilisation de l'énergie éolienne	19
I.5 Régulation de la vitesse d'une éolienne	20
I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne	20
I.7 Fonctionnement des freins de régulation de la vitesse d'une éolienne	21
I.7.1 Régulation aérodynamique des pales	21

I.7.2 Régulation par force centrifuge	21
I.7.3 Freinage mécanique	21
I.7.4 Frein à disque électronique	22
I.8 Évolution de l'énergie éolienne	22
I.8.1. En Afrique	22
I.8.2 Dans le monde	23
I.9 La carte de gisement éolien en Algérie	23
I.10 Les atouts et les inconvénients de l'énergie éolienne	24
I.10.1. Les Atouts	24
I.10.2 Les inconvénients	25
Conclusion	25

Chapitre II : Profils aérodynamiques

Introduction	27
II.1 Dénomination des profils	27
II.2 Historique du développement du profil d'aile de type NACA	28
II.3 Descriptions aérodynamique	28
II.3.1 Définition d'une pale	28
II.3.1.1 Taille d'une pale d'éolienne	28

II.3.1.2 Le nombre de pale	29
II.3.1.4 Matériaux de construction des pales	29
II.3.2 Géométrie du profil	30
II.3.2.1 Caractéristiques géométriques d'un profil	31
II.3.3 Définition des angles autour du profil de la pale	31
II.3.4 Types de profils utilisé dans une pale d'éolienne	32
II.4 Profil NACA	35
II.4.1 Désignation du profil NACA	35
II.4.2 La famille des profils NACA	35
II.4.1.1 Profil NACA à quatre chiffres	35
II.4.1.2 Profil NACA à cinq chiffres	37
II.5 Choix de profil	37
II.6 caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne	38
II.6.1 Action de l'air sur la pale	38
II.6.1.1 Le Poids	39
II.6.1.2 La force de portance	39
II.6.1.3 La traînée	40
II.6.1.4 Action aérodynamique	41
II.6.2 L'influence d'une variation de l'angle d'incidence sur le CZ et le CX	42
II.6.3 La finesse	42

II.6.4. La polaire _____	43
II.6.4.1 La polaire d'Eiffel _____	43
II.6.4.2 La polaire Lilienthal _____	44
II.6.5 Les vitesses _____	45
II.6.5.1 La vitesse angulaire du rotor _____	45
II.6.5.2 La vitesse tangentielle _____	45
II.6.5.3 La vitesse relative _____	46
II.6.5.4 La vitesse Spécifique _____	47
II.7 Théorie de Betz _____	47
II.7.1 Définition de l'action du moteur éolien sur l'air _____	48
II.7.2 Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien _____	49
II.7.3 La puissance maximale absorbée par le moteur éolien _____	50
Conclusion _____	51

Chapitre III : Calculs et réalisation

Introduction _____	54
III.1 Choix du profil _____	54
III.2 Réalisation des pales _____	54
III.2.1 Calcul des différents points de profil de la pale _____	54
III.2.2 Constructions des profils _____	55
III.2.2.1 Profil P_1 _____	56

III.2.2.2 Profil P'_8	57
III.2.2.3 Profil P'_{15}	58
III.2.3 Matériaux nécessaire pour la construction des pales	59
III.3 Réalisation	59
III.3.1 Réalisation des pales	59
III.3.2 Le mat	63
III.3.3 Support	65
III.4 Nacelle	66
III.4.1 Multiplicateur	66
III.4.2 Alternateur	67
III.4.2.1 Alternateur à griffes	67
III.4.3 Type d'implantation de l'alternateur sur l'éolienne	70
III.5 Principe de fonctionnement	71
III.6 Eolienne réalisée	72
Conclusion	74

Chapitre IV : Equilibrages et essais expérimentaux

Introduction	76
IV.1 Equilibrage de l'éolienne	76
IV.1.1 Equilibrage statique	76
IV.1.2 Equilibrage dynamique	76

IV.2 Caractérisation dynamique	76
IV.3 Conversion de l'énergie	78
IV.3.1 Tension obtenue à partir du vent en fonction de La vitesse	78
Conclusion	79
Conclusion générale	81
Références bibliographiques	84
Annexes	91

*Liste des Figures
et Tableaux*

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les éoliennes

Figure I.1 : Moulin à vent. _____	6
Figure I.2 : Moulin à vent à voile. _____	6
Figure I.3 : Un moulin à vent à pale. _____	7
Figure I.4 : Éolienne. _____	7
Figure I.5 : Carte mondiale du rayonnement solaire . _____	9
Figure I.6 : Carte des pays à climat tempéré. _____	10
Figure I.7 : Localisation des régions polaires (en vert). _____	11
Figure I.8 : Rose des vents. _____	12
Figure I.9 : Des manches à air. _____	13
Figure I.10 : Anémomètre à coupelles sur son mât, surmonté d'une girouette. _____	13
Figure I.11 : Schéma d'une éolienne. _____	14
Figure I.12 : Constitution d'une éolienne. _____	14
Figure 1.13 : Les différents types d'éoliennes. _____	16
Figure I.14 : Eolienne à axe vertical (de gauche a droite) : Turbine Savonius, turbine Darrieus et Darrieus en H. _____	16
Figure I.15 : Éolienne à axe horizontal (En amont et en aval). _____	17
Figure I.16 : La conversion de l'énergie cinétique du vent. _____	19
Figure I.17 : Zones de fonctionnement d'une éolienne. _____	20
Figure I.18 : Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol. _____	24

Chapitre II : Profils aérodynamiques

Figure II.1 : Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale.	29
Figure II.2 : Fibre de verre.	30
Figure II.3 : Géométrie du profil.	31
Figure II.4 : Champs de vitesse du vent.	32
Figure II.5 : Profil plan convexe.	32
Figure II.6 : Profil double courbure (auto stable).	33
Figure II.7 : Profil supercritique.	33
Figure II.8 : Profil biconvexe symétrique.	33
Figure II.9 : Profil biconvexe dissymétrique.	34
Figure II.10 : Profil creux classique.	34
Figure II.11 : Profil creux Jedelsky.	34
Figure II.12 : NACA 6409.	35
Figure II.13 : Pressions générées par le mouvement du vent autour d'une section de la pale.	38
Figure II.14 : Les composantes de la force aérodynamique.	39
Figure II.15: Portance sur le profil d'une pale.	40
Figure II.16 : Trainée sur le profil d'une pale.	41
Figure II.17 : Variation des coefficients aérodynamique.	42

Figure II.18 : Polaire Eiffel.	44
Figure II.19 : La polaire Lilienthal.	44
Figure II.20 : La résultante des forces appliquée sur une pale.	45
Figure II.21 : Vitesse relative.	46
Figure II.22 : Vitesse spécifique.	47
Figure II.23 : Courbe de C_x en fonction de l'incidence.	48

Chapitre III : Calculs et Réalisation

Figure III.1: La Dimension de la pale.	54
Figure III.2 : Profil P_1 NACA 6409 (220m).	57
Figure III.3 : Profil P_8 NACA 6409 (140 mm).	58
Figure III.4 : Profil P_{15} NACA 6409 (60 mm).	59
Figure III.5 : Touret à meuler.	60
Figure III.6 : NACA 6409 en carton épais.	60
Figure III.7 : Coupe polystyrène à fil chaud.	60
Figure III.8 : Pales en polystyrène.	61
Figure III.9 : Pale recouverte d'enduit et de plâtre.	61
Figure III.10 : Pale et fibre de verre.	62
Figure III.11 : Pale en résine et fibre de verre.	62
Figure III.12 : Pale prête .	63
Figure III.13 : Pièce1 (SolidWorks).	63

Figure III.14 : Photo réelle de la pièce 1.	63
Figure III.15: Pièce 2 (SolidWorks).	64
Figure III.16 : Photo réelle de la pièce 2.	64
Figure III.17 : Soudage de la pièce 1 sur la plaque métallique.	64
Figure III.18 : Support de la nacelle (SolidWorks).	65
Figure III.19 : Photo réelle du Support de la nacelle.	65
Figure III.20 : Support (SolidWorks) .	65
Figure III.21 : Mat et support (SolidWorks).	66
Figure III.22 : Schéma cinématique Polie-courroie.	67
Figure III.23 : Alternateur à griffe.	67
Figure III.24 : Rotor.	68
Figure III.25 : Stator.	68
Figure III.26 : Redresseur.	68
Figure III.27 : Schéma électrique d'un redresseur.	68
Figure III.28 : Régulateur de l'alternateur.	69
Figure III.29 : Refroidissement par ventilations.	69
Figure III.30 : Refroidissement par circulation d'eau.	69
Figure III.31 : Palier aval.	70
Figure III.32 : Palier arrière.	70

Figure III.33 : Alternateur sur une pale horizontale. _____ 70

Figure III.34 : Vue de face de notre éolienne réalisée. _____ 72

Figure III.35 : Vue de coté de notre éolienne réalisée. _____ 73

Chapitre IV : Equilibrages et essais expérimentaux

Figure IV.1 : La puissance en fonction de la vitesse du vent. _____ 77

Figure IV.2 : Tension obtenue. _____ 79

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les éoliennes

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance délivrée et le diamètre du rotor. _____ 18

Chapitre III : Calculs et Réalisation

Tableau III.1 : Les cordes des profils . _____ 55

Tableau III.2 : Les coordonnées du profil P_1 . _____ 56

Tableau III.3 : Les coordonnées du profil P'_8 . _____ 57

Tableau III.4 : Les coordonnées du profil P'_{15} . _____ 58

Tableau III.5 : Les éléments utilisés pour la réalisation. _____ 59

Chapitre IV : Equilibrages et essais expérimentaux

Tableau IV.1 : La puissance du vent en fonction de la vitesse. _____ 77

Tableau IV.2 : Tension obtenue à la sortie de l'alternateur. _____ 78

*Liste des Symboles
et Abréviations*

Liste des symboles et abréviations

NACA	National Advisory Committee for Aeronautics	
NASA	National Administration of SPACE and AERONAUTICS	
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables	
EPST	Etablissement public à caractère scientifique et Technologique	
HAWT	Horizontal axis wind turbine	
ONM	Office national de météorologie	
VAWT	Vertical axis wind turbine	
a_0, a_1, a_2, a_3 et a_4	Constantes spécifiques de profil type NACA quatre chiffres	
C	Corde	cm
C_m	Cambrure maximale	cm
C_r	Coefficient aérodynamique total	-
C_x	Coefficient de traîné	-
d	Diamètre	mm
d_1	Diamètre de la poulie motrice	mm
d_2	Diamètre de la poulie réceptrice	mm
dP	Variation de puissance	W
Ec	Puissance du moteur éolien ou l'énergie cinétique transformé	Joule
Ec_1	Énergie cinétique à l'amant	Joule
Ec_2	Énergie cinétique à l'aval	Joule
F	Force aérodynamique totale	N
F_x	Force de trainée	N
F_z	Force de portance	N
f	Fréquence de rotation du rotor	hertz
g	Force de Gravité	N/kg
h_p	Largeur max de profil	cm
h_x	Entre-profil	cm

Liste des symboles et abréviations

I	Angle d'inclinaison ou d'écoulement	°
i	Angle d'incidence	°
K_p	Coefficient de pression	-
L	Longueur de la pale	cm
M	Moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque	
m	masse de l'air	kg
N	fréquence de rotation du rotor	tr/min
P	Puissance réabsorbé par l'éolienne	W
p	Poids	N
P_{max}	Puissance maximale absorbée par l'éolienne	W
P_i	Position de la cambrure maximale	cm
p	Pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire	Pa
p_0	Pression à l'infini	Pa
q	Pression dynamique	Pa
R	Longueur des pales ou rayon de la turbine	m
r	Distance du point considéré à l'axe de rotation	m
S	Surfaces de la pale (surface projetée, surface mouillée, maître couple)	m ²
S	finesse du profil	-
S_1	Surface en amont	m ²
S_2	Surface en aval	m ²
T	Température	°C
t	Rayon vecteur	-
t_i	Epaisseur relative maximale	cm
U	Vitesse de rotation des pales	m/s
\vec{U}	Vecteur vitesse de rotation des pales	-
V	Vitesse du vent	m/s

Liste des symboles et abréviations

V_0	Vitesse de vent à l'infini	m /s
V_1	Vitesse axiale initiale du vent avant l'éolienne	m /s
V_2	Vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par l'éolienne	m/s
\vec{V}	Vecteur vitesse du vent perpendiculaire rotation	-
v_r	Vitesse de déplacement (vitesse relative du vent par rapport à la pale)	m/s
W	Vitesse relative	m/s
\vec{W}	Vecteur de vitesse de vent relative	-
X	Position de centre de pression par rapport au bord d'attaque	-
x_i	Abscisses des points de ligne d'intrados	-
x_u	Abscisses des points de ligne d'extrados	-
y	Hauteur au-dessus du centre de cercle générateur	-
y_c	Ligne moyenne (camber)	-
y_i	Coordonnées des points de ligne d'intrados	-
y_u	Coordonnées des points de ligne d'extrados.	-
y_t	Distribution d'épaisseur	-
α	Angle de calage	°
γ	Angle spécifique de profil	-
λ	Vitesse spécifique	rad /s
ρ	Masse volumique de l'air	kg/m ³
ρ_0	Masse volumique de l'air à l'infini (pression atmosphérique)	-
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg/m ³
Δp	Variation de pression	Pa
ΔQ_m	Variation de quantité de mouvement	-
η_{profil}	Rendement du profil	-
ω	Vitesse angulaire	rad/s

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis près d'un siècle, l'électricité est devenue indispensable dans tous les aspects de notre vie quotidienne. Aujourd'hui, cette électricité est produite par des centrales électriques, transportée et distribuée aux consommateurs. Tout comme le feu des humains préhistoriques, l'électricité a changé la vie de l'humanité. Elle est produite depuis bien longtemps grâce aux énergies fossiles tel que le charbon ou l'uranium dans de grandes centrales électriques mais malheureusement cette méthode de transformation est très coûteuse et surtout émet énormément de pollution qui a engendré un réchauffement climatique et une baisse considérable des ressources en énergie fossile. Après d'innombrables études sur les moyens de créer cette électricité sans pollution et à moindre coût, le monde se tourne vers des alternatifs utilisant des énergies naturelles et renouvelables tel que ; le soleil ou le vent pour générer de l'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes qui a leur tour remplaceront les énormes centrales électriques pour approvisionner le monde en électricité tout en évitant un désastre écologique et une pénurie d'énergie fossile.

Parlons un peu du vent qui est utilisé depuis belle lurette comme dans la navigation à voile ou même le séchage, mais cette énergie reste encore très peu exploitée. En effet grâce au vent nous pouvons transformer la force motrice de ce dernier en électricité en faisant appel à la technologie de pointe de l'éolienne qui, elle créera de l'électricité tel que le ferait une centrale, et cela sans émettre aucun effet de serre ni déchet nocif pour la terre. Nous obtenons là, une énergie totalement renouvelable et propre.

Une étude approfondie qui a mené à déduire que l'éolienne est l'alternative idéale pour la production d'électricité de manière propre et durable grâce à la force motrice du vent qui est une énergie renouvelable même si elle pourrait se montrer capricieuse (le vent ne souffle pas toujours quand on le veut), pour remédier à cela une étude topographique et météorologique est nécessaire avant l'installation d'éolienne. En conclusion, nous sommes tombées sur les problématiques suivantes :

- L'énergie éolienne peut être tout aussi rentable que respectueuse de l'environnement ?

- Quel choix de profil aérodynamique et des matériaux rigides et légers nécessaires à la réalisation de nos pales d'éolienne ?

Tout au long de ce projet qui consistera à réaliser une micro éolienne à axe horizontal jugé comme étant la plus adaptée à la transformation de l'électricité à grande échelle de par sa fiabilité et performance, nous allons scinder les travaux en quatre chapitres essentiels.

Dans un premier temps nous entamons le premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne à commencer par quelques notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et les technologies nécessaires pour capter l'énergie du vent.

Au second chapitre, nous définiront les théories utilisées pour l'aérodynamique du profil de la pale, qui simplifieront l'écoulement du vent autour de celui-ci et enfin nous allons étudier la théorie générale de BETZ.

Pour le troisième chapitre nous présenterons le profil choisit, les matériaux et les étapes de la réalisation de notre projet.

Nous consacrerons le quatrième et dernier chapitre pour l'équilibrage et les essais expérimentaux.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur les éoliennes

Introduction

Parmi toutes les énergies renouvelables, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme, cette source d'énergie est utilisée depuis des siècles et a été exploitée sur terre durant au moins les 3000 dernières années. En effet, des moulins à vent à axe vertical ont été mis en service dans les hautes terres d'Afghanistan et sont utilisés pour moudre les grains. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [1].

Les éoliennes deviennent de moins en moins onéreuses et plus rentables, ce qui entraîne un abaissement du coût de l'électricité. Economiquement, elle est donc présumée compétitive par rapport aux autres formes d'énergies. Autrement dit, c'est une énergie d'avenir.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Autres les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante [2].

Dans cette recherche, nous rappellerons les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien, les technologies utilisées pour capter l'énergie du vent, et à la fin, la problématique que nous allons évoquer sera démontrée.

I.1 Historique de l'éolienne

Le moulin à vent est l'ancêtre de l'éolienne. Il est d'abord apparu en Orient, en Egypte ancienne, en Iran, il fut exploité en Perse pour l'irrigation dès l'an 600 J.C. Les ailes sont disposées radialement sur un axe vertical. L'utilisation du moulin à vent se généralise en Europe à partir Xe siècle dans les zones les plus favorables, et elle connaît un certain succès en particulier auprès des meuniers qui s'en servent pour la fabrication des farines [3].



Figure I.1 : Moulin à vent [4].

Le moulin s'oriente vers le sens du vent et est muni de voiles pour mieux capter l'énergie du vent. Un moulin à vent à voile est présenté dans la figure I.2.



Figure I.2 : Moulin à vent à voile.

Au XII^e siècle apparaît le premier laminoir à lames profilées. Bien que simple, il s'agit de la première recherche aérodynamique des pales. Son utilisation est principalement de pomper l'eau ou moudre le grain.

À la renaissance, des inventeurs célèbres, tels que : Léonard de Vinci ont développé un vif intérêt pour les moulins à vent, ce qui a conduit à de nombreuses innovations. Par conséquent, le nombre d'usines en Europe a augmenté de façon exponentielle.

La révolution industrielle offre un nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation du métal permet de modifier les formes des tours et augmente considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais « éoliennes » [5]. La figure I.3 montre un moulin à vent à pale.



Figure I.3 : Un moulin à vent à pale [5].

L'avènement de l'électricité au XXème siècle fait place aux premiers modèles d'éoliennes modernes. La figure I.4 présente une éolienne [5].



Figure I.4 : Éolienne.

De nos jours, les éoliennes sont quasiment toutes à axe horizontal à l'exception de modèles à axe vertical tels que le rotor de Savonius et de Darrieus qui sont encore utilisés mais qui tendent à disparaître.

Les dernières innovations permettent aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable, c'est-à-dire de régler la vitesse de la turbine éolienne par rapport à la vitesse du vent.

I.2 Le vent

Le vent est un courant d'air qui se forme lorsque l'air d'une zone de haute pression se déplace vers une zone de basse pression. La différence de pression est (entre autres) la conséquence d'un réchauffement ou d'un refroidissement différencié de l'air. S'il s'agit de déplacement d'air sur de grandes distances, alors la rotation de la terre joue aussi un rôle.

Le vent est porteur d'une force motrice que l'homme utilise depuis longtemps. Pour la transformer en électricité, il fait appel à l'énergie éolienne.

Une éolienne capte l'énergie du vent par l'intermédiaire des pales. Dans le cas des éoliennes électriques, l'énergie transférée par le vent est convertie en énergie de rotation, qui est ensuite convertie en énergie électrique par un générateur de courant.

I.2.1 Circulation atmosphérique générale

La circulation générale de l'atmosphère décrit l'ensemble des mouvements et des trajectoires des parcelles d'air dans l'atmosphère entourant la Terre. Son unique moteur est l'ensoleillement. Cette énergie reçue sous forme de rayonnements va être confrontée à l'atmosphère puis à la surface de la Terre. Sur la totalité des rayonnements reçus 30 % vont être renvoyés vers l'espace et 20 % vont être absorbés par l'atmosphère. La sphéricité de la Terre fait que l'énergie reçue sous forme de rayonnements n'est pas répartie uniformément à sa surface. L'atmosphère et l'océan, par leurs mouvements, il y a donc un transport de chaleur de l'équateur vers les pôles. Selon Trenberth et Caron (2001) l'océan est à l'origine de 22 % de ce transport énergétique dans l'hémisphère Nord et de 11 % dans l'hémisphère Sud. L'atmosphère réalise donc la majorité du transport énergétique de l'équateur vers les pôles [6].

En faisant abstraction des périodes géologiques ou des fluctuations mineures, les températures observées restent approximativement inchangées d'année en année.

Et si La circulation atmosphérique change continuellement, la tendance de base reste relativement constante, responsable d'un transport d'énergie des zones excédentaires en énergie vers les zones déficitaires.

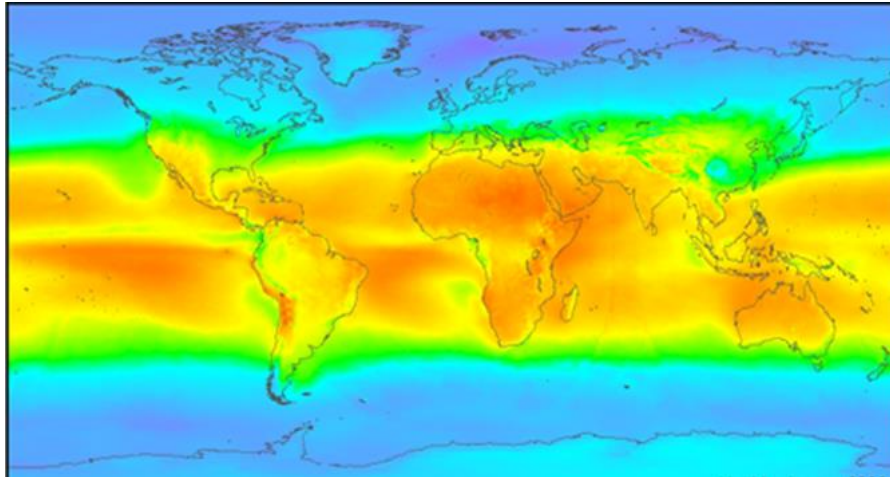


Figure I.5 : Carte mondiale du rayonnement solaire [7].

I.2.1.1 Les zones des calmes et basses pressions équatoriales

La zone des calmes équatoriaux, ou en termes simples, une zone de ralentissement est une zone de vents calmes ou faibles et variables dans la basse atmosphère près de l'équateur météorologique, d'où il est légèrement retardé [8].

I.2.1.2 Les zones tropicales

La zone tropicale est la zone climatique la plus chaude sur la terre. Le fond de la zone de basse pression équatoriale est alimenté à sa base par des courants aériens provenant des régions tropicales voisines : les vents alizés. L'air chaud des régions équatoriales retourne lorsqu'il arrive suffisamment haut dans son mouvement convectif vers les tropiques, sous la forme d'un centre courant constitué par les vents contre-alizés.

I.2.1.3 Les zones des calmes et hautes pressions subtropicales

Les contre-alizés amorcent un mouvement de descente vers le 30^{ème} parallèle assurant ainsi l'alimentation au sol des vents alizes. Il en résulte l'apparition à la surface du globe de deux ceintures plus ou moins continues de hautes pressions. Les précipitations sont rares dans cette région du fait que le mouvement de descente s'oppose au mouvement convectif de l'air. C'est dans ces zones que l'on rencontre les principaux déserts, Sahara, Lybie, Arable, Gobi, Mexique dans l'hémisphère nord, Kalahari et Australie dans hémisphère sud [4].

I.2.1.4 Les zones tempérées

Le climat tempéré est un type de climat caractérisé par des températures annuelles moyennes de l'ordre de 18 °C et des précipitations moyennes de 600 à 2000 mm par an. Il est divisé en climat océanique, méditerranéen et subtropicale humide, chinois ou pampéen. Une région à climat tempéré a une température qui varie régulièrement tout au long de l'année, avec une température moyenne supérieure à 10 °C pendant les mois les plus chauds et entre -3 et -18 °C pendant les mois les plus froids [9]. La figure I.6 montre une carte des pays à climat tempéré

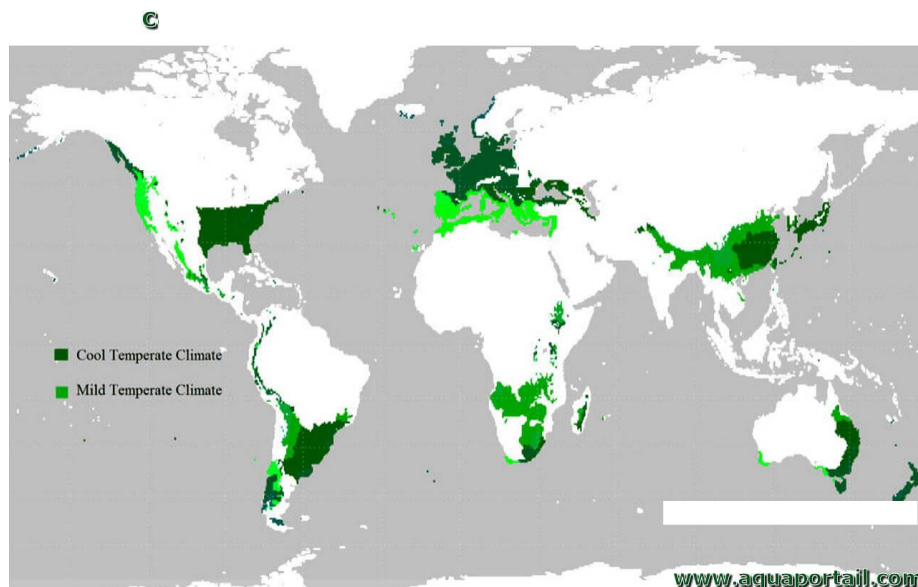


Figure I.6 : Carte des pays à climat tempéré [9].

I.2.1.5 Les zones polaires

Les régions polaires de la terre sont les régions de la terre qui entourent les deux pôles et s'étendent au-delà des deux cercles polaires : Du cercle polaire arctique dans l'hémisphère nord et du cercle antarctique dans l'hémisphère sud. Ces

régions sont centrées sur le pôle Nord et le pôle Sud, recouvertes de calottes glaciaires, et sont situées respectivement dans l'océan Arctique et le continent antarctique. La localisation des régions polaires est présentée dans la figure I.7.

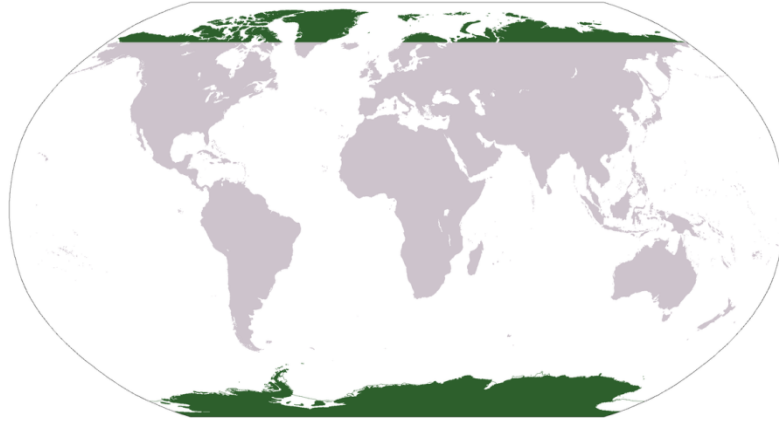


Figure I.7 : Localisation des régions polaires (en vert).

I.2.2 Direction du vent

En principe, le vent souffle de la zone de haute pression vers la zone de basse pression. Aux altitudes moyennes et aux grandes altitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre.

Le vent devient parallèle aux isobares plutôt que perpendiculairement à celles-ci. Dans l'hémisphère au nord, le vent tourne dans le sens antihoraire autour des aires cycloniques et dans le sens horaire des aires anticyclonique. Dans l'hémisphère sud, la direction est opposée à celle du nord. On dit que la direction du vent est ouest si le courant d'air vient de l'ouest. Cette direction nous est indiquée par la girouette. La direction des vents subit deux types de variation cyclique du vent [10].

I.2.2.1 Variations journalières

Les phénomènes journaliers sont dus aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire (généralement dû à la différence de températures entre la mer et la terre est plus important le jour que la nuit).

La vitesse moyenne du vent est plus faible pendant la nuit ou elle varie peu puis augmente à partir du lever du soleil avant d'atteindre son maximum entre 12h et 16h. Les vents sont également plus turbulents le jour que la nuit et ont tendance à changer de direction plus fréquemment. Ce phénomène peut être un avantage pour

les producteurs d'énergie éolienne du fait que la consommation électrique est elle aussi plus importante le jour que la nuit [10,11].

I.2.2.2 La variation saisonnière

En hiver, le vent du nord tourne au sud-ouest, alors qu'il est nord-ouest dans le sud en été.

I.2.2.3 La rose des vents

La rose des vents était un instrument de navigation utilisé depuis l'antiquité par les marins pour déterminer la direction des vents et, ainsi, s'orienter.

Sa forme la plus simple est celle d'une étoile à huit branches : les quatre branches principales indiquent les principaux points cardinaux (nord, sud, est, ouest), tandis que les autres branches désignent les points intermédiaires (nord-est, nord-ouest, sud-est, sud-ouest). La figure I.8 montre une rose des vents.

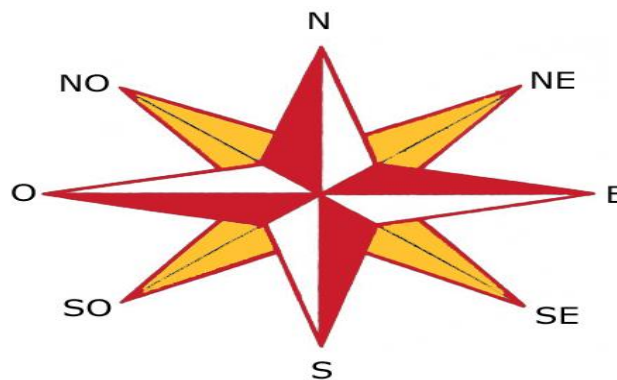


Figure I.8 : Rose des vents.

I.2.3 Vitesse du vent

La vitesse du vent est le volume atmosphérique de base causé par le mouvement de l'air de haute pression à basse pression, généralement en raison des changements de température.

Sur les aéroports, aérodromes ou encore au bord des routes, on observe des « manches à air » constituées de 5 bandes de tissu rouge et blanc. Ces instruments permettent une bonne estimation du vent en surface tant en direction qu'en force. On voit sur la figure I.9 des manches à air.

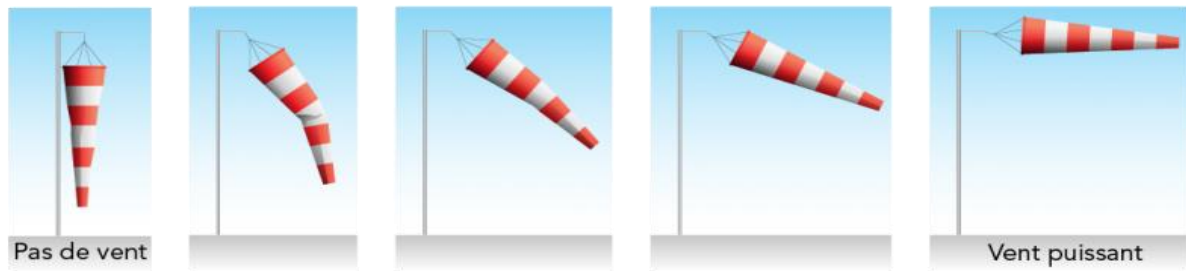


Figure I.9 : Des manches à air.

I.2.3.1 Unités de mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités :

- Mètre par seconde (m/s).
- Kilomètre par heure (km/h).
- Nœud (Kt) : a été longtemps utilisé en marine et puis en aviation, il est utilisé aussi en météorologie. Il vaut un mille marin (1 852 m) par heure, soit 0,514 m/s [12].

I.2.3.2 Instrument de mesure de la vitesse du vent

L'instrument qui sert à mesurer la vitesse du vent est nommé « **anémomètre** », la plupart des anémomètres modernes comprennent un système électronique interne qui calcule le nombre de tours que font les coupelles pendant un temps précis. La vitesse du vent, convertie par l'ordinateur interne, apparaît alors sur l'écran. Plus le vent est fort, plus les coupelles tournent rapidement. La figure I.10 montre un anémomètre à coupelles sur son mât, surmonté d'une girouette.



Figure I.10 : Anémomètre à coupelles sur son mât, surmonté d'une girouette.

I.3 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un appareil qui est utile dans la production d'énergie renouvelable. Ce dispositif sert à convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre d'entraînement, puis le converti en énergie électrique grâce à un générateur. Le schéma d'une éolienne à axe horizontal est présenté dans la figure I.11 [13].

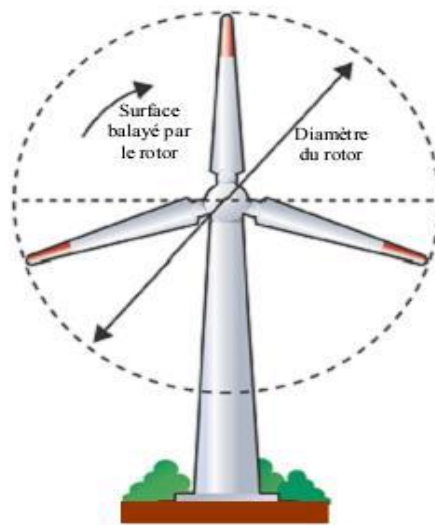


Figure I.11 : Schéma d'une éolienne.

I.3.2 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée de plusieurs éléments. La figure I.12 donne une représentation schématique.

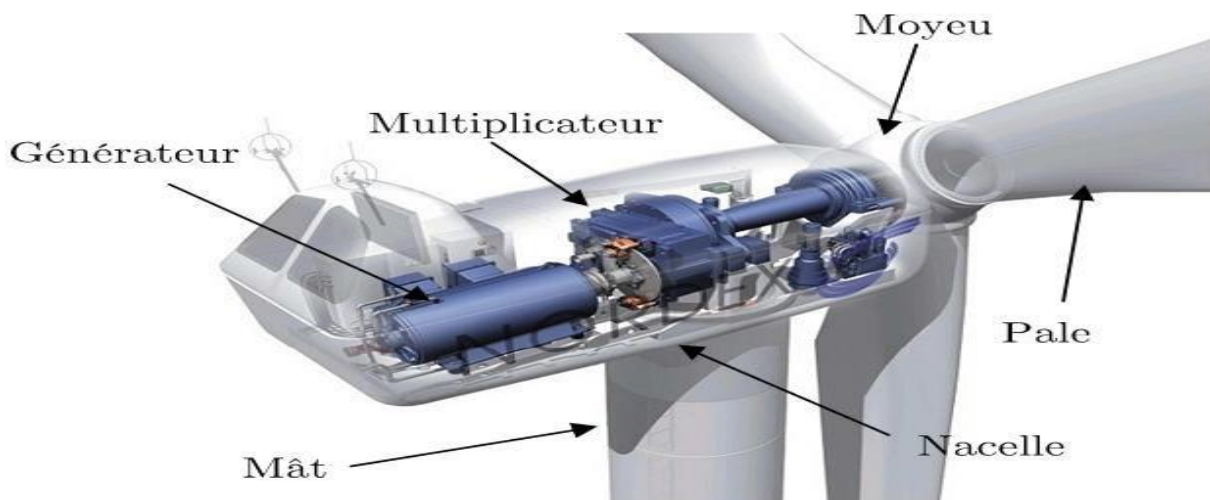


Figure I.12 : Constitution d'une éolienne.

I.3.2.1 Le rotor

Le rotor, est la partie tournante d'une éolienne. Il se compose de pales et d'un moyeu, qui permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui peut ensuite être transmise au générateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur.

I.3.2.2 La pôle

Une pale est une surface portante en rotation autour d'un axe. C'est un dispositif qui transfère la puissance du vent au moyeu du rotor.

I.3.2.3 La nacelle

La nacelle est installée au sommet du mât et est équipée de composants mécaniques, pneumatiques et de certains composants électriques et électroniques essentiels à la conversion d'énergie.

I.3.2.4 Le mât

Le mât désigne la structure qui maintient l'éolienne. Il est essentiel car il permet de placer l'éolienne domestique en hauteur, et donc de capter le plus de vent possible. Plus la hauteur du mât d'une éolienne est importante, plus celle-ci captera le vent et sera productive.

I.3.2.5 Le générateur

Un générateur est un dispositif utilisé pour générer de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Dans le cas d'une éolienne, il s'agira de l'énergie mécanique transmise par le rotor à partir de l'énergie cinétique du vent.

I.3.2.6 Le multiplicateur

Le multiplicateur convertit la puissance à faible vitesse et à couple élevé générée par le rotor de l'éolienne en puissance à grande vitesse et à faible couple utilisée par le générateur.

I.3.2.7 Le moyeu

Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle tout en modifiant l'angle d'attaque des pales.

I.3.3 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon leur fonctionnement ou leur taille.

I.3.3.1 Classification selon le principe de fonctionnement

Les éoliennes sont classées selon la disposition géométrique des arbres. Il s'agit de l'installation de turbines. Il existe deux familles d'éoliennes : aérogénérateur à axe vertical aussi appelé vertical axis wind turbine (VAWT) et aérogénérateur à axe horizontal aussi appelé horizontal axis wind turbine (HAWT). Un schéma de différents types d'éoliennes est présenté dans la figure I.13 [14].



Figure 1.13 : Les différents types d'éoliennes.

I.3.3.1.1. Éolienne à axe vertical (VAWT)

Elles sont très peu utilisées de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Ce type d'éolienne présente un axe perpendiculaire à la direction du vent et l'axe est souvent positionné à la verticale [15].

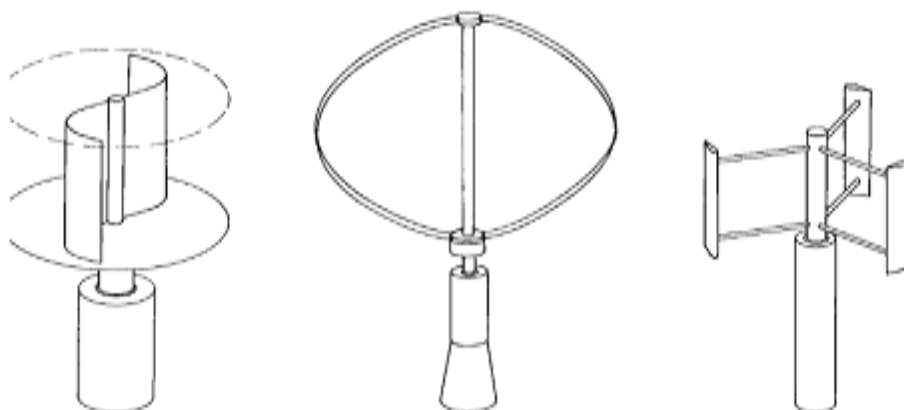


Figure I.14 : Eolienne à axe vertical (de gauche à droite) : Turbine Savonius, turbine Darrieus et Darrieus en H [16].

I.3.3.1.2 Éolienne à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes horizontales sont les éoliennes les plus "classiques", elles sont les plus répandues en bord de route et reflètent parfaitement l'image de cette énergie renouvelable.

Ce type d'aérogénérateur capte le vent en assemblant des pales en forme d'hélices. Ces pales tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol, ce qui explique aussi le nom de cette éolienne. Dans ce type d'éolienne, la force de l'hélice en rotation démarre un générateur situé au-dessus de l'éolienne. Le grand avantage de ce type d'éolienne est son efficacité, surtout lorsqu'elle comprend un système qui oriente les pales en fonction du vent.

Ces turbines sont également considérées comme plus robustes et moins coûteuses en maintenance. Les éoliennes à axe horizontal sont positionnées en « amont » ou en « aval ». La figure I.15 présente les deux types mentionnés.

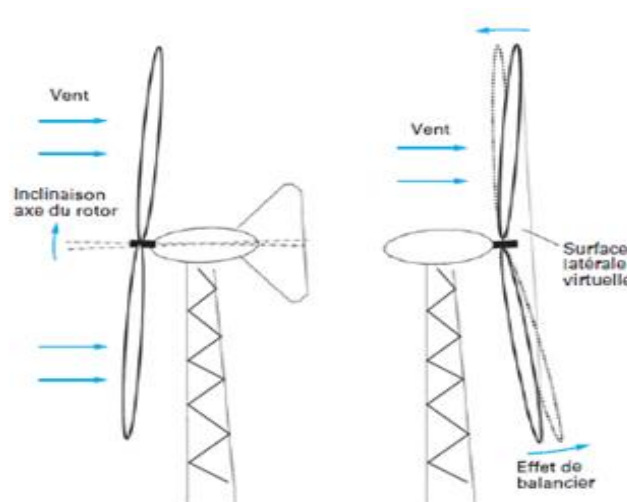


Figure I.15 :Éolienne à axe horizontal (En amont et en aval).

I.3.2.2 Classification selon la puissance délivrée et le diamètre du rotor

On peut donner un ordre d'idées des puissances potentielles sur différentes éoliennes. Le tableau (I.1) propose une classification des turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre du rotor [17].

Echelle	Diamètre du rotor [m]	Puissance délivrée
Micro	0,5 à 2 m	100 W à 1 kW
Petite	2 à 12 m	1 kW à 36 kW
Moyenne	12 à 35 m	36 et 350 kW
Grande	35 à 125 m	350 kW à 5 MW

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance délivrée et le diamètre du rotor.

Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- **Micro-éoliennes** : En général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- **Petites éoliennes** : Elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, ou les fermes, elles sont utilisées pour produire de l'électricité consommée sur place, peuvent être aussi utilisées en milieu urbain mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Moyennes éoliennes** : Elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises, voire des petits parcs éoliens.
- **Grandes éoliennes** : Ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

I.3.4 Le fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.

Les éoliennes utilisent le vent pour produire de l'électricité, entrainer le rotor et la convertir en énergie mécanique. La vitesse de rotation de l'arbre entraînée par le mouvement de la lame est accélérée par le multiplicateur. Cette énergie mécanique est ensuite transférée au générateur.

Un transformateur situé dans le mât élève la tension du courant généré par l'alternateur, facilitant ainsi son acheminement sur la ligne moyenne tension du réseau.

Un parc éolien se compose de plusieurs éoliennes, distantes de plusieurs centaines de mètres, reliées entre elles par un réseau souterrain interne, et reliées au réseau public par une station de transmission.

Premièrement, la vitesse minimale du vent requise pour les éoliennes est d'environ 10 à 15 km/h. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h. La meilleure vitesse est de 50 km/h [18].

La conversion de l'énergie cinétique du vent est présentée dans La figure I.16.

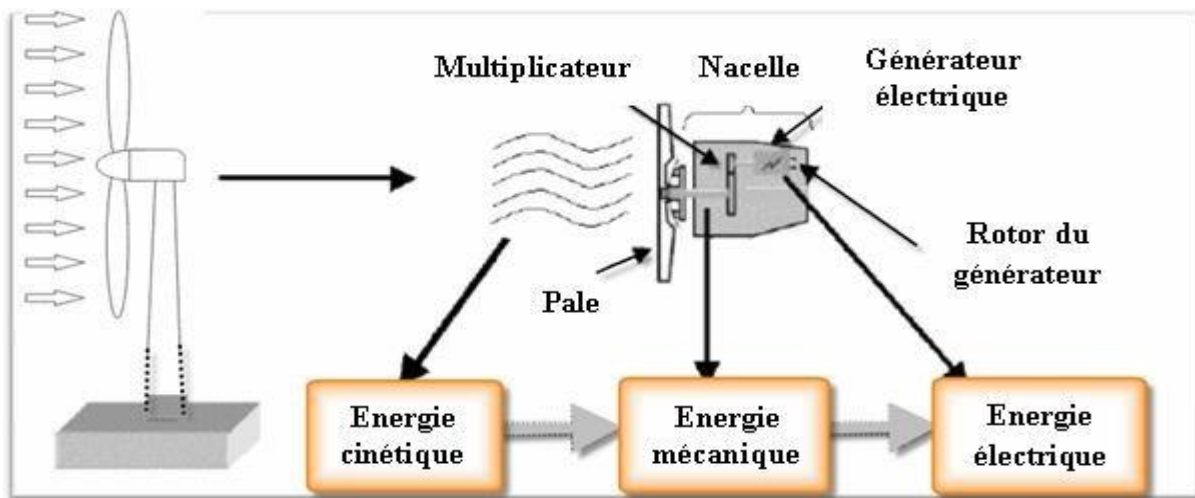


Figure I.16 : La conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4 Utilisation de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conversion de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour déplacer des véhicules (voilier...) ou pour faire tourner des meules.
- Transformation en énergie (pompage de liquide, compression de fluide...) : par exemple dans les moulins de Majorque, pour irriguer les champs, ou pour abreuver le bétail.
- Production de l'énergie électrique : Les éoliennes sont couplées à des générateurs pour générer du courant continu ou du courant alternatif. En raison de générateur de secours (tels que des groupes électrogènes) et/ou d'un ensemble de batteries ou d'autres dispositifs de stockage d'énergie, les

générateurs sont connectés au réseau ou fonctionnent dans un système plus autonome.

I.5 Régulation de la vitesse d'une éolienne

La production d'énergie des éoliennes dépend du vent, qui est irrégulier. Un vent trop fort peut entraîner un emballement de la rotation d'une éolienne. Au-delà d'une certaine vitesse, les pales peuvent être endommagées.

C'est pourquoi il est indispensable de prévoir un système qui régule cette vitesse, et il existe plusieurs manières de réguler la vitesse :

- Mécaniquement ou de manière automatique.
- Électroniquement.

I.6 Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [19] :

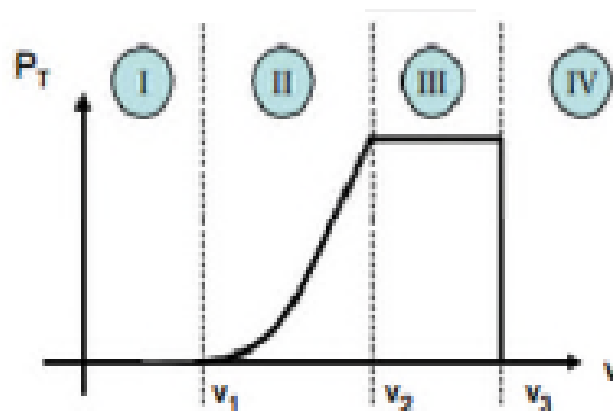


Figure I.17 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.

V1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V3 vaut 25m/s.

- **Zone I : $V < V_1$**

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

- **Zone II : $V_1 < V < V_2$**

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

- **Zone III : $V_2 < V < V_3$**

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

- **Zone IV : $V > V_3$**

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90^\circ$). Donc la puissance extraite est nulle.

I.7 Fonctionnement des freins de régulation de la vitesse d'une éolienne

Il existe différents systèmes de freinage :

I.7.1 Régulation aérodynamique des pales

Le principe est de modifier l'angle des pales par rapport au vent de manière à diminuer la vitesse de rotation des pales par une moindre prise au vent et le jeu des turbulences. Plusieurs moyens existent pour modifier cet angle.

I.7.2 Régulation par force centrifuge

Lorsque la vitesse des pales augmente, un système de masse pousse grâce à la force centrifuge des freins qui sont :

- Des **spoilers** intégrés dans les pales (aérofreins).
- Des **volets** qui modifient l'angle de calage des pales et servent aussi d'aérofreins.

Ce système est efficace mais onéreux. Par ailleurs les aérofreins génèrent du bruit en mode régulation.

I.7.3 Freinage mécanique

Il existe deux systèmes mécaniques de freinage par pivotement et basculement du rotor :

- **Le gouvernail articulé** : Lorsque le vent dépasse une limite déterminée, le gouvernail de l'éolienne pivote pour se mettre parallèle au vent (en drapeau) et ainsi arrêter sa vitesse.
- **Le basculement** : le rotor, au-delà d'une certaine vitesse de vent se bascule en arrière (système de ressort, calibré pour se détendre au-delà d'une certaine force).

Ces systèmes sont réservés aux petites éoliennes du fait des charges mécaniques qu'ils engendrent sur la tête du rotor et sur le mât. Cette solution est cependant efficace pour un coût assez faible.

I.7.4 Frein à disque électronique

Un détecteur de vitesse déclenche un mécanisme d'arrêt automatique :

- Ce système souvent utilisé en complément d'un système mécanique. Le système mécanique évite le plus souvent un emballement de l'éolienne.
- Le frein peut aussi être déclenché manuellement en cas de problèmes sur le réseau électrique et pour réaliser des entretiens.

I.8 Évolution de l'énergie éolienne

I.8.1 En Afrique

En 2020, la capacité installée d'énergie éolienne en Afrique a augmenté de 12,8%, passant de 6 454 MW fin 2019 à 7 277 MW fin 2020, dont l'Afrique du Sud est de 2 465 MW et l'Égypte est de 1 465 MW. La nouvelle installation en 2020 est de 823 MW, dont 515 MW sont situés en Afrique du Sud [20].

Cette puissance éolienne a progressé de 16,5 % en 2019. Les ajouts de 2019 ont été de 944 MW, dont 262 MW en Égypte [21].

La progression a été de 20 % en 2018. Les ajouts de 2018 ont été de 962 MW, dont 380 MW en Égypte et 310 MW au Kenya [22].

La puissance éolienne a progressé de 16 % en 2017 (12 % en 2016, 30 % en 2015, 58 % en 2014) ; plus de la moitié du bond en avant de 934 MW en 2014 s'est produit en Afrique du Sud : +560 MW et près d'un tiers au Maroc : +300 MW ; en 2015, l'Afrique du Sud a contribué pour 64 % à la progression du parc africain avec

+483 MW, suivie par l'Éthiopie : +153 MW ; en 2016, la totalité des mises en service ont été effectuées en Afrique du Sud : +418 MW ; de même en 2017 : +621 MW[23].

I.8.2 Dans le monde

En 2018, la production mondiale d'électricité éolienne s'élevait à 1 273.4 TWh, en hausse de 12.4% ; elle représentait 4,8% de la production totale d'électricité [24].

La société BP (compagnie britannique de recherche, d'extraction, de raffinage et de vente de pétrole fondée en 1909) estime la production éolienne mondiale à 1429.6 TWh en 2019 (+12.6%), soit 5.3% de la production total d'électricité : 27 004.7 TWh [25].

Selon le dernier rapport du Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), 93 gigawatts (GW) d'éolien supplémentaire ont été raccordés au réseau. Un rythme de progression d'une année à l'autre jamais vu dans l'industrie qui avait réalisé, avant 2020, son meilleur résultat en 2015 avec 63,8 GW ajoutés. La performance porte la puissance totale du parc éolien installé dans le monde à 743 GW. La pandémie de coronavirus et les perturbations dans les chaînes mondiales d'approvisionnement n'auront donc pas suffi à essouffler la dynamique affichée par les projets de construction ces dernières années [26].

I.9 La carte de gisement éolien en Algérie

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), publie, à l'occasion du solstice d'hiver, une nouvelle carte du gisement éolien national.

Étant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent [27].

L'élaboration de l'ensemble des Atlas éoliens par les chercheurs de l'établissement public à caractère scientifique et technologique(l'EPST) CDER

(Centre de développement des Energie renouvelables), a été effectuée par des analyses statistiques en utilisant des distributions, afin d'ajuster les données collectées auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM). Bien que le nombre de points de mesures répartis sur l'ensemble du territoire national soit relativement faible par rapport à la grande surface du pays, les cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER restent sans doute une base de référence pour les différents acteurs du secteur socio-économique qui prévoient le développement de cette énergie dans le pays. La figure I.17 représente une carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [13].

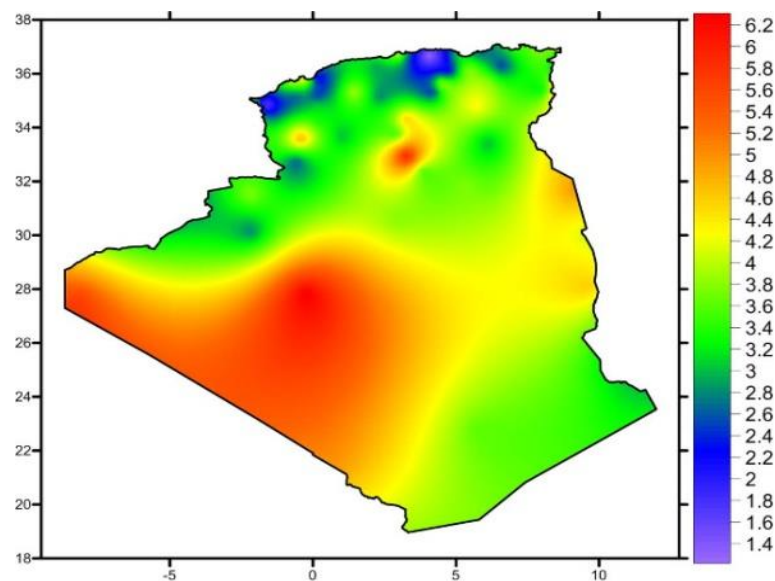


Figure I.18 : Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol.

I.10 Les atouts et les inconvénients de l'énergie éolienne

I.10.1 Les Atouts

- Une énergie 100 % naturelle, renouvelable et durable.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
- Cette énergie ne connaît aucun risque de pénurie.

I.10.2 Les inconvénients

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles (esthétique) et sonores.
- Le coût de la construction d'une éolienne reste important, car son implantation nécessite l'intervention d'engins spéciaux et a donc un coût de génie civil à prendre en compte.
- Les vents sont difficiles à anticiper et il faut savoir que, si une éolienne a besoin d'un vent minimum pour démarrer, elle s'arrêtera de fonctionner en cas de vent supérieur à 90 km/h.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté quelques aperçus des systèmes éoliens, dans lequel nous avons brièvement présenté l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation des éoliennes et l'énergie qu'elles produisent, les différents types d'aérogénérateurs, leurs principaux composants, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

On peut dire que les éoliennes sont la perspective d'avenir. Elles se composent de nombreuses parties, mais elles sont en fait très simples à utiliser. De plus elles sont très intéressantes par rapport aux autres sources d'énergie comme les centrales nucléaires ou à charbon qui émet du dioxyde de carbone qui est nocif pour l'environnement.

D'autre part, après une étude météorologique et topographique du site visé pour l'installation d'un parc éolien, cette dernière s'installe en un temps record.

Les éoliennes ne sont peut-être pas la seule solution pour remplacer les combustibles fossiles mais leur réversibilité les rend remarquables dans le développement durable.

CHAPITRE II

Profils aérodynamiques

Introduction

L'étude des performances aérodynamique des éoliennes à axe horizontal a beaucoup suscité les chercheurs pendant ces dernières années. A cause de l'application potentielle dans la production de l'électricité, l'énergie cinétique du vent rentre dans la catégorie des énergies renouvelables propres à l'environnement.

Pour commencer, les pales d'éolienne permettent la conversion de la force du vent en énergie mécanique. Leurs conceptions et leurs utilisations est une science délicate qui se repose sur de nombreux facteurs comme l'aérodynamique et la résistance à l'air, à savoir, il est nécessaire d'optimiser la forme de chaque profil formant la pale.

Dans ce chapitre, nous allons définir des théories basées sur l'aérodynamique du profil de la pale, qui simplifie l'écoulement autour du profil en tenant compte de sa vraie géométrie.

Enfin, nous allons étudier la théorie générale de BETZ, afin de déterminer la puissance idéale du rotor.

II.1 Dénomination des profils

Différents types de profils aérodynamiques sont catalogués dans le monde. On notera, par exemple, les profils Joukowski, Eppler, Wortmann, NACA, RAE, Göttingen, NLR, RITZ, CLARK et SANDIA. Parmi ces derniers, les profils de type NACA sont très connus, et on en utilise certains couramment tant en pratique que pour la validation des méthodes numériques.

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 à 6 chiffres), d'autres ne donnent qu'un numéro de série.

Les profils NACA : NACA est suivi soit de 4, 5 ou 6 chiffres qui donnent toujours l'épaisseur relative.

Les profils WORTMANN : Désigné par FX puis suivi de chiffre indiquant la courbure relative et l'épaisseur relative. Les profils EPPLER : les initiales du nom concepteurs est suivi du numéro de série du profil.

II.2 Historique du développement du profil d'aile de type NACA

En 1915, les États-Unis d'Amérique ont créé un comité pour accélérer le développement de la technologie aéronautique. Ce comité est connu sous le nom d'Administration Consultatif National de l'Aéronautique (NACA), dont l'actuelle appellation est NASA (National Administration of Space and Aeronautics).

Le Centre de recherche NACA à Langley a commencé à rechercher des séries de profils au début des années 1920 et a commencé à mettre en œuvre un programme d'essais en soufflerie en 1927. En 1933, un catalogue de 78 profils est édité et lancé. Le profil est caractérisé par une série de 4 chiffres décrivant sa forme géométrique comme par exemple NACA 6409 [28].

En outre, NACA a également étudié l'influence de la forme aérodynamique sur les caractéristiques forme aérodynamique pour augmenter la portance et réduire la traînée. Ceci abouti à des profils NACA à cinq chiffres en 1934 et conçoit à partir de 1935 la série des 230 dont le profil 23012 est un des plus connus [29].

II.3 Descriptions aérodynamique

II.3.1 Définition d'une pale

Les pales sont une partie très importante de l'aéromoteur. Elles ont une surface portante en rotation autour d'un axe (mât), qu'elle soit verticale ou horizontale. Les éoliennes sont entraînées par le vent et leur mouvement actionne le générateur qui produit ainsi de l'électricité.

Leurs conceptions doivent être optimales de manière à ce qu'elles captent le maximum de vent possible, cela pour avoir un bon fonctionnement et un bon rendement.

Les pales sont caractérisées par leurs longueurs, leurs largeurs, leurs profils, leurs nombres et leurs matériaux de construction. Elles doivent allier plusieurs qualités : aérodynamisme, légèreté et équilibre.

II.3.1.1 Taille d'une pale d'éolienne

La taille des pales varie d'une éolienne à l'autre. Elles mesurent généralement entre 2 et 10 mètres de diamètre. Les pales varient aussi selon que l'éolienne est verticale ou horizontale.

La taille des pales dépend du type d'éolienne choisie : éoliennes horizontales ou verticales. La puissance des éoliennes et des générateurs doit également être considérée

Plus la pale est longue, plus la vitesse maximale est faible. Cette limitation est due à cette limite est due à des phénomènes qui se passent en bout de pale et est due à la force centrifuge. La longueur des pales détermine la puissance de façon exponentielle. Il faudra prendre en considération la fatigue et risque de vibration, surtout avec de longue pale.

II.3.1.2 Le nombre de pale

Les éoliennes à 3 pales (ou plus) tournent plus régulièrement que les éoliennes à 1 ou 2 pales, et nous avons un meilleur équilibre du rotor. Les effets de battement visuel sont plus importants pour les éoliennes à moins de 3 pales.

L'efficacité aérodynamique, la capacité à convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique (et donc en énergie électrique), est équivalent de 2 à 4 pales. Le seul avantage d'avoir une éolienne à deux pales au lieu d'une éolienne à trois pales est qu'elle coutera moins chère, mais elle tournera de manière moins régulière, ce qui signifie une durée de vie plus courte. Du fait de la diminution de la tenue mécanique, on ne monte pas plus de 4 pales : en effet, la "corde" des pales diminue à mesure que le nombre de pales augmente. Sur la figure II.1 sont présentées des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales [30].

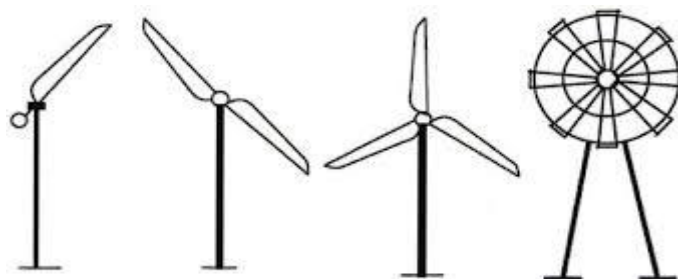


Figure II.1 : Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

II.3.1.4 Matériaux de construction des pales

Il existe 3 principaux matériaux pour les pales d'éolienne :

- **La fibre de verre** : La fibre de verre est le matériau le plus efficace. En effet, il est résistant léger avec un prix compétitif. Cette composante a définitivement trouvé sa place dans l'univers de la construction, puisqu'elle

sert désormais à fabriquer divers matériaux composites renforcés. Construire une pale en fibre de verre implique une certaine technicité, à commencer par la création d'un moule dans lequel elle sera coulée, mais le moulage de la pale est une opération difficile à réaliser soi-même. Trois types de fibre de verre sont présentés dans la figure II.2.



Figure II.2 : Fibre de verre.

- **Le bois :** Le bois a l'avantage d'être léger, mais sa résistance est moyenne, et sa durée de vie limitée en raison de sa réaction à l'humidité. Pour fabriquer des pales, il vous faut regarder des pièces de bois sans nœud, le plus léger possible, et qui possède une bonne résistance aux intempéries.
- **L'aluminium :** L'aluminium en tôles fines est léger, très résistant mais la réalisation de la pale est technique et nécessite du matériel adapté.

II.3.2 Géométrie du profil

La pale est une partie très importante dans une éolienne, à axe horizontal elles ont une forme aérodynamique plus complexe. Chaque partie à une forme de profil. La géométrie du profil est présentée dans la figure II.3 [31]

La forme des profils des ailes ou des pales déterminent leurs performances aérodynamiques ou hydrodynamiques, mais déterminent également leurs résistances. Le compromis entre performance et résistance mécanique est au cœur de la problématique de définition et d'optimisation de la géométrie de l'aile ou de la pale. Du point de vue de l'aérodynamique ou de la dynamique des fluides, plus le profil est fin, moins il produit de résistance en avançant. Une légère courbure pour la portance et notre feuille s'envole sans effort.

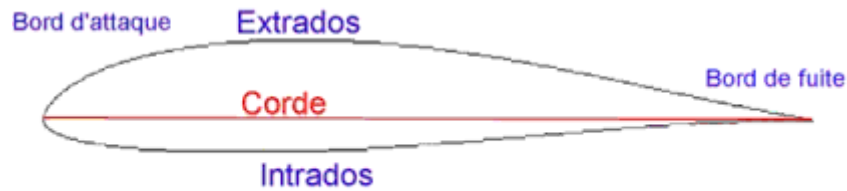


Figure II.3 : Géométrie du profil.

II.3.2.1 Caractéristiques géométriques d'un profil

- **Bord d'attaque (1) :** Le bord d'attaque est l'avant du profil aérodynamique (aile d'avion, hélice, etc.) ; il fait face au fluide. Selon la situation, le bord d'attaque peut être équipé ou non d'une tête fixe ou mobile. Le flux d'air atteignant le bord d'attaque est divisé en deux sections de part et d'autre du point d'arrêt et est évacuée respectivement de l'intrados et de l'extrados afin d'augmenter la portance maximale en augmentant l'angle d'attaque et un décrochage se produira.
- **Extrados (2) :** L'extrados est la face du même côté que la cambrure, quel que soit le sens de la portance. C'est dans cette partie que se situe la dépression [32].
- **Bord de fuite (3) :** C'est la partie caractéristique de toute section transversale (telle que l'aile, le gouvernail, la quille ou l'étambot d'un avion) qui est soumise à des flux de fluides (air, eau, etc.) de part et d'autre. Il s'agit de la partie opposée au sens de traction, c'est-à-dire la partie arrière considérée dans le sens de l'écoulement. Le bord de fuite a pour but de diminuer la traînée aérodynamique qui fait effet de frein.
- **Intrados (4) :** L'intrados est la face opposée à la cambrure, quel que soit le sens de la portance.
- **Corde (5) :** La corde est la ligne droite qui connecte le bord d'attaque avec le bord de fuite (Segment AB).

II.3.3 Définition des angles autour du profil de la pale

$$U = \omega.R \quad (\text{II.1})$$

U = Vitesse de rotation des pales.

V = Vitesse du vent.

$$W = \text{Vitesse relative. Sachant que } W = V - U \quad (\text{II.2})$$

- **Angle d'incidence (i)** : L'angle formé par la corde et la vitesse relative **W**.
- **Angle de calage (α)** : L'angle formé par la corde et le plan de rotation des pales.
- **Angle d'inclinaison (I)** : L'angle formé par la vitesse relative **W** et le plan de rotation des pales.

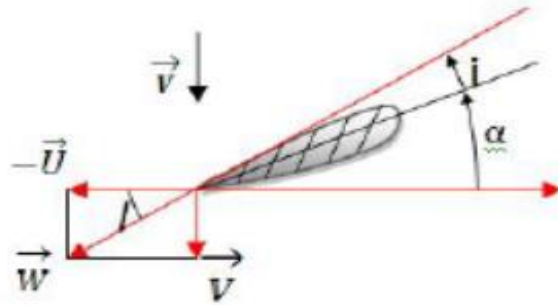


Figure II.4 : Champs de vitesse du vent.

II.3.4 Types de profil utilisé dans une pale d'éolienne

Il existe de très nombreuses familles de profil qui sont classés selon la forme respective de l'intrados et de l'extrados et on peut d'une manière générale toutes les représenter :

Le profil plan convexe s'agit d'un profil ayant un intrados relativement plat et un extrados cambé (convexe). La ligne moyenne est à simple courbure. Ce profil a une très forte portance dès les faibles incidences et une traînée moyenne. Cependant, le centre de gravité de ce profil a tendance à se déplacer. Il est très utilisé en modélisme car il est facile à construire et offre de bons résultats. Ce profil est présenté dans la figure II.4.

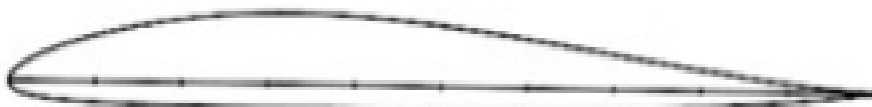


Figure II.5 : Profil plan convexe.

Le Profil à double, dit "AUTOSTABLES", présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une forte traînée. Ce profil est présenté dans la figure II.5.



Figure II.6: Profil double courbure (auto stable).

Le profil supercritique est très épais comparé à un profil classique, qui permet la construction d'aile plus rigide. La ligne moyenne est à double courbure extrados est légèrement convexe et intrados plat, creusé dans la partie arrière de l'intrados. Ce profil donne de bonne performance aérodynamique, et prévu pour des vols à vitesse élevée, il est utilisé sur les avions de ligne tel que les Airbus. Ce profil est présenté dans la figure II.6.



Figure II.7 : Profil supercritique.

Le profil biconvexe possède deux types, symétriques et dissymétriques :

D'abord en premier le profil biconvexe symétrique a pour particularité d'avoir sa ligne moyenne et sa corde confondue, l'extrados et l'intrados sont symétriques par rapport à la corde. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige, sa construction nécessite beaucoup de précision car la moindre dissymétrie ferait varier les résultats souhaités. Ce profil est présenté dans la figure II.7.



Figure II.8 : Profil biconvexe symétrique.

Et en deuxième le profil biconvexe dissymétrique est porteur même à des incidences négatives, son extrados est plus courbe que son intrados. Ce type de profil est favorable à une vitesse de vol relativement lente. Il est très utilisé dans l'aviation de loisir. Ce profil est présenté dans la figure II.8.



Figure II.9 : Profil biconvexe dissymétrique.

Le profil creux (cambré) possède deux types, classique et Jedelsky :

Le profil classique : Son extrados est plus grand que son intrados car elle a une très forte courbure. Ce profil est très dynamique, mais très instable. Son principal avantage est qu'il produit une bonne portance à basse vitesse. Il est largement utilisé pour le vol indoor (discipline consistant à réaliser des modèles réduits dans un espace clos) car il n'a pas besoin d'être transporté à grande vitesse. De plus, la résistance l'empêche d'aller trop vite, permettant des virages très serrés. Ce profil est présenté dans la figure II.9.



Figure II.10 : Profil creux classique.

Le profil creux Jedelsky : Est inventé par JEDELSKY, qui porte aujourd'hui son nom et qui consiste à transformer les deux tiers du profil en une simple planche ce qui rend sa construction beaucoup plus facile. Ce profil est présenté dans la figure II.10.



Figure II.11: Profil creux Jedelsky.

II.4 Profil NACA

II.4.1 Désignation du profil NACA

Le profil NACA s'agit de la série de profils la plus connue et utilisée dans la construction aéronautique. NACA est un profil d'aile d'avion développé par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA). Cette forme de profils est décrite à l'aide d'une série de chiffres qui suit le mot "NACA". Elle s'agit de la série de profils la plus connue et utilisée dans la construction moderne. [28].

II.4.2 La famille des profils NACA

Il y'a plusieurs classifications des profils NACA. Les plus utilisés sont des désignations à quatre et à cinq chiffres.

II.4.2.1 Profil NACA à quatre chiffres

Dans cette famille, un profil est représenté par un numéro à quatre chiffres qui suit le mot NACA. Le premier représente la courbure relative maximale exprimée en pourcentage de la corde ; le second représente la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximal en pourcentage de la corde. Par exemple, dans le cas du profil NACA 6409 :

- Le 6 indique la cambrure maximale (c_m) : 6%.
- Le 4 indique la position de la cambrure maximale (P_i) : 40%
- Le 09 indique l'épaisseur relative maximale (t_i) : 09%

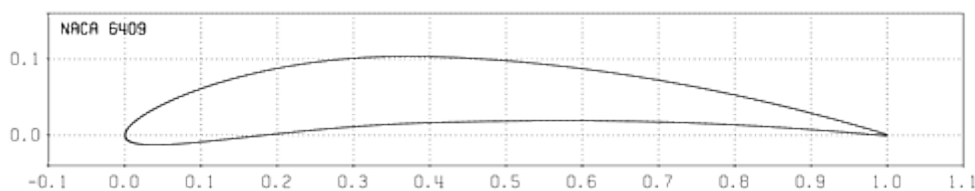


Figure II.12 : NACA 6409.

Traçage du profil NACA à quatre chiffres :

- 1) Nous allons d'abord tracer la ligne moyenne (Camber) par les équations suivantes [33].

$$y_c = \frac{c_m}{p^2} [2(P_i)x - x^2] \text{ Pour } 0 < x < P_i \quad (\text{II.3})$$

$$y_c = \frac{c_m}{(1-p)^2} [(1 - 2P_i) + 2(P_i)x - x^2] \text{ Pour } P_i < x \quad (\text{II.4})$$

Où x est l'abscisse de la corde de 0 à C

c_m : Cambrure max.

P_i : Position du camber max.

- 2) Calculons la distribution d'épaisseur au-dessus et au-dessous du camber, par l'introduction de la valeur de t dans l'équation suivante :

$$\frac{y_t}{c} = \left(\frac{t}{c}\right) \left[a_0 \sqrt{\frac{x}{c}} - a_1 \left(\frac{x}{c}\right) - a_2 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - a_4 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Donc } y_t = t \left[\frac{a_0 c^4 \sqrt{x}}{\sqrt{c}} - a_1 C^3 x - a_2 C^2 x^2 + a_3 C x^3 - a_4 x^4 \right] \frac{1}{c^4} \quad (\text{II.6})$$

Les constantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 1.4845 \\ a_1 = 0.6300 \\ a_2 = 1.7580 \\ a_3 = 1.4215 \\ a_4 = 0.5075 \end{array} \right.$$

Traçons les courbes de la surface supérieure (extrados) (X_u, Y_u) et la surface inférieure (intrados) (X_i, Y_i) par l'utilisation des équations suivantes : [33]

- Pour l'extrados :

$$x_u = x - yt \sin \gamma \quad (\text{II.7})$$

$$y_u = y_c + yt \cos \gamma \quad (\text{II.8})$$

- Pour l'intrados :

$$x_i = x + yt \sin \gamma \quad (\text{II.9})$$

$$y_i = y_c - yt \cos \gamma \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Ou } \gamma = \arctan \left(\frac{dy_c}{dx_c} \right) \quad (\text{II.11})$$

II.4.2.2 Profil NACA à cinq chiffres

La série NACA à 5 chiffres est utilisée pour décrire des surfaces porteuses plus complexes. Elles sont définies par le code NACA suivi de cinq chiffres.

Le premier chiffre définit le coefficient de portance optimale, multiplié par 0.15, le second définit le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde, le troisième chiffre indique si le profil est à cambrure simple (0) ou double (1). Comme le profil à 4 chiffres, le quatrième et cinquième chiffre donne l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde.

Par exemple, le profil aérodynamique NACA 12018 donnerait un profil aérodynamique ayant :

- Une épaisseur maximale de 18 %.
- La cambrure maximale située à 10 % de la corde.
- Coefficient de portance espéré de 0,15.

II.5 Choix de profil

Le choix du profil de l'aile dépend principalement du type de performances attendues du planeur, c'est une étape importante dans la conception aérodynamique, car il influe sur la forme et la taille de l'aile et du stabilisateur, ce qui à son tour affecte la taille de l'ensemble de l'avion.

Le Profil mince, offre une bonne portance et peu de trainée, c'est évidemment un bon choix. Cependant étant donné que la majeure partie des sollicitations subies par La direction où les pales sont hors du plan du rotor (c'est-à-dire la direction à faible inertie), il sera mieux de choisir un profil plus épais pour augmenter l'inertie de section dans la direction de battement. Par conséquent, il est préférable d'utiliser plusieurs profils différents pour bénéficier d'une épaisseur plus importante vers la racine de la pale et d'une épaisseur réduite vers le bout [34].

II.6 caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne

II.6.1 Action de l'air sur la pale

On considère une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la figure II.12, par rapport au vecteur V , il y a une surpression sur l'intrados et une dépression à l'extrados. [35, 36, 14].

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profil ; on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profil et à des longueurs proportionnelles aux pressions locales comme illustré sur la figure suivante :

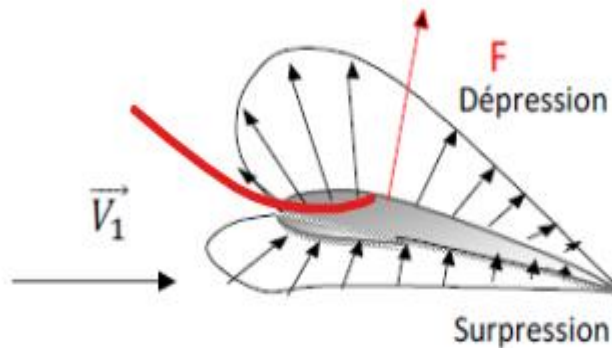


Figure II.13 : Pressions générées par le mouvement du vent autour d'une section de la pale.

$$K_p = \frac{p-p_0}{\rho_0 V_0^2} \quad (\text{II.12})$$

p : La pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.

$p_0 \rho_0$: Les conditions à l'infini.

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante F généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative V . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air. [35, 14].

Elle a pour expression :

$$F = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_r^2 S C_r \quad (\text{II.13})$$

F : La force totale (en N).

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1.225 kg/m³ à 15° C de dessus du niveau de la mer).

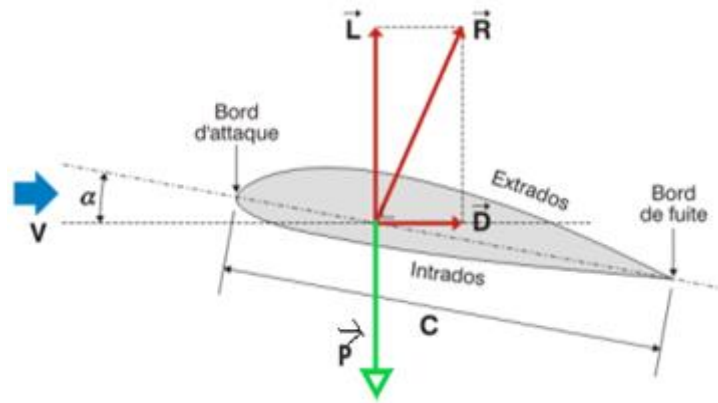


Figure II.14 : Les composantes de la force aérodynamique.

$R = F^*$: La force aérodynamique totale.

$L = F_z$: La force de portance.

$D = F_x$: La Force de trainée.

Nous distinguons plusieurs forces qui agissent sur l'aile :

II.6.1.1 Le Poids

C'est une force verticale qui entraîne notre pale de haut vers le bas, dont la formule est:

$$P = mg \quad (\text{II.14})$$

P : Le poids.

m : La masse de l'air.

g : La force de Gravité (9.80665 N/kg).

II.6.1.2 La force de portance

La portance aérodynamique est la composante de la force subit par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement. La portance est la combinaison d'une surpression (sur l'intrados) et d'une dépression (l'extrados) [37].

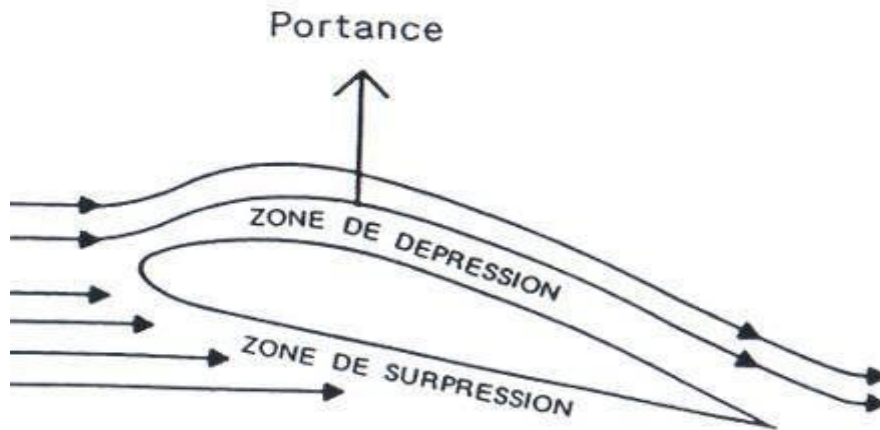


Figure II.15: Portance sur le profil d'une pale.

La portance est définie par :

$$L = F_z = q \cdot S \cdot C_z = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v_r^2 S C_z \quad (\text{II.15})$$

L: La portance (en N).

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer).

v_r : La vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pale (en m/s).

S : La surface de la pale (surface projetée, surface mouillée, maître couple) (en m²).

C_z : Le coefficient de portance, il est déterminé en soufflerie et est propre pour chaque profil de pale.

II.6.1.3 La trainée

La trainée est la force de résistance qu'exerce un profil lorsque le fluide ou l'objet est en mouvement l'un par rapport à l'autre, cette force est parallèle à la trajectoire du fluide, elle est dirigée dans le sens du mouvement du fluide et elle s'oppose à l'avancement de l'objet [33, 36].

Cette trainée est composée de trois trainées différentes :

- La trainée de profil.
- La trainée induite.
- La trainée de forme.

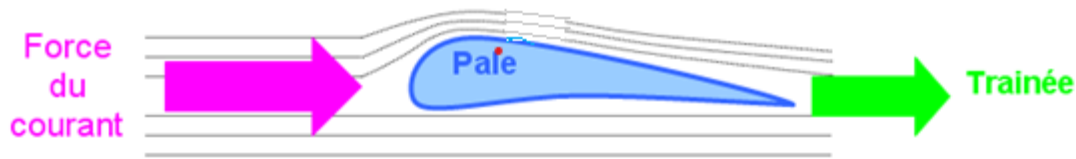


Figure II.16 : Trainée sur le profil d'une pale.

La traînée est calculée de la façon suivante :

$$D = F_X = q S C_X = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v_r^2 S C_X \quad (\text{II.16})$$

D : La trainée en (N).

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer).

v_r^2 : La vitesse de déplacement (en m/s).

S : La surface de référence (surface projetée, surface mouillée, maître couple).

C_X : Le coefficient de traînée.

II.6.1.4 Action aérodynamique

L'action aérodynamique appelée la résultante des forces aérodynamiques « F^* » ou plus simplement la résistance de l'air. Elle se décompose en deux actions, la portance qui est perpendiculaire à l'écoulement et la trainée qui est parallèle à l'écoulement.

L'action aérodynamique est déterminée par la formule suivante :

$$R = F^* = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v_r^2 S C \quad (\text{II.17})$$

Avec :

F^* : La force totale (en N).

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1.225Kg m³ à 15° C au niveau de la mer).

v_r^2 : La vitesse de déplacement (en m/s).

S : Surface de référence (en m²).

C: Le coefficient aérodynamique total.

On définit aussi le moment aérodynamique résultant par [33] :

$$\mathbf{M} = F^* d_x = \frac{1}{2} \rho_{air} S C d_x \quad (\text{II.18})$$

Avec :

M : Le moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque.

d_x : La largeur du profil.

II.6.2 L'influence d'une variation de l'angle d'incidence sur le Cz et le Cx

La variation de l'angle d'incidence influe sur le Cz et le Cx. En effet, l'angle d'incidence va alors exercer une influence sur la valeur de la pression statique et sur la pression dynamique, Par conséquent, l'incidence conditionnera donc la valeur des coefficients unitaires Cz et Cx.

Ainsi, on constate en général que :

- Cz a une valeur positive pour une incidence nulle ($i = 0$).
- La portance nulle est atteinte pour une incidence négative.
- Le Cz max est atteint pour une incidence voisine de 18° car, au-delà, un phénomène de décollement des couches d'air s'établit et le profil décroche.
- Le Cx minimum est atteint pour une incidence négative de -3° et qu'après cette valeur, que l'incidence croisse ou décroisse, le Cx augmente.

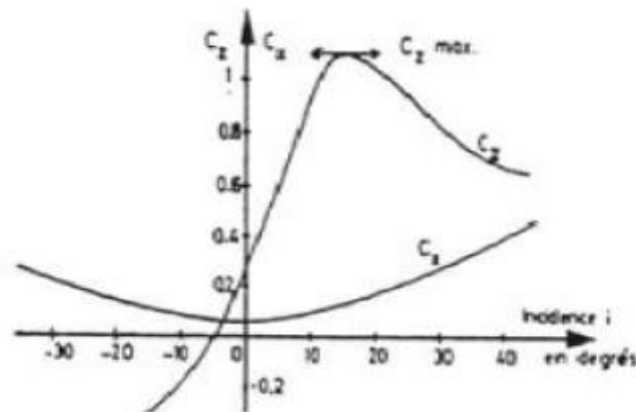


Figure II.17 : Variation des coefficients aérodynamiques.

II.6.3 La finesse

La finesse du profil joue un rôle important. Elle doit être assez grande pour que la traînée n'absorbe pas une partie trop élevée du couple moteur. Elle caractérise le rapport portance sur traînée : C_z/C_x .

Elle est définie par la relation suivante :

$$S = \frac{C_z}{C_x} \quad (\text{II.19})$$

S : La finesse du profil (sans unité).

C_z : Le coefficient de portance (sans unité).

C_x : Le coefficient de traînée (sans unité).

Afin de maximiser le rendement d'une éolienne, il faut que la finesse soit maximale, autrement dit que la traînée soit minimale et la portance maximale. Généralement, l'utilisation de 3 pales minces tournant à une vitesse bien supérieure à la vitesse du vent permet de maximiser l'utilisation de la portance tout en générant la traînée la plus faible possible.

La finesse d'un profil dépend de plusieurs paramètres :

- L'angle d'attaque de la pale (c'est à dire l'angle de la pale par rapport au vent apparent).
- La forme de la pale.
- Son facteur de forme.

II.6.4 La polaire

La polaire est une courbe qui fait correspondre les coefficients de trainée et de portance, afin de pouvoir déterminer aisément les caractéristiques d'un profil et choisir sans surprise le plus adapté entre plusieurs modèles, ou afin de déterminer les dimensions que l'on donnera à une aile (pale) [33] :

En pratique, on utilise deux types :

II.6.4.1 La polaire d'Eiffel

La polaire d'Eiffel a pour un objet placé dans un flux d'air est un outil de modélisation indispensable à l'aérodynamisme. Elle permet de déterminer différents points caractéristiques.

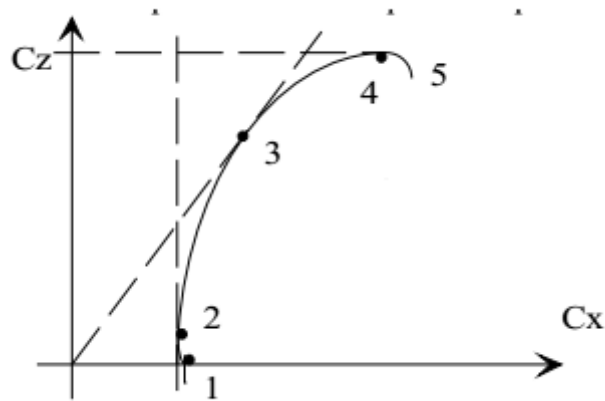


Figure II.18 : Polaire Eiffel.

- 1 : Le point de portance nulle (à faible incidence)
- 2 : Le point de C_x mini (trainé minale du profil ; incidence faible)
- 3 : Le point de finesse max (incidence assez faible)
- 4 : Le point de C_z max (portance maximale ; trainée importante)
- 5 : Zone de décrochage du profil, C_z chute.

II.6.4.2 La polaire Lilienthal

La polaire Lilienthal est une courbe représentant la vitesse verticale (ou le coefficient aérodynamique de traînée) en fonction de la vitesse horizontale (ou le coefficient aérodynamique de portance). Elle donne un bon aperçu des performances du profil. Cette polaire est surtout utile pour la conception des ailes de planeurs ou parapentes. [33, 34]

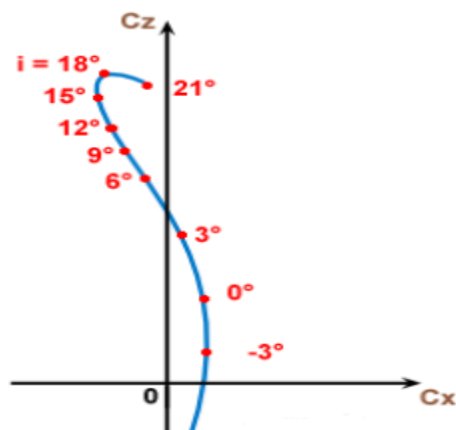


Figure II.19 : La polaire Lilienthal.

II.6.5 Les vitesses

II.6.5.1 La vitesse angulaire du rotor

La vitesse angulaire ω , aussi appelée fréquence angulaire ou pulsation, est une mesure de la vitesse de rotation. C'est-à-dire un angle par seconde.

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (\text{II.20})$$

ω : La vitesse angulaire (en rad/s).

f : La fréquence de rotation du rotor (en s^{-1} ou Hz).

II.6.5.2 La vitesse tangentielle

Soit une hélice immobile dont l'axe de rotation est parallèle au vent pour chaque pale on peut tracer la résultante perpendiculaire au profil appliquée au centre de la poussée aérodynamique.

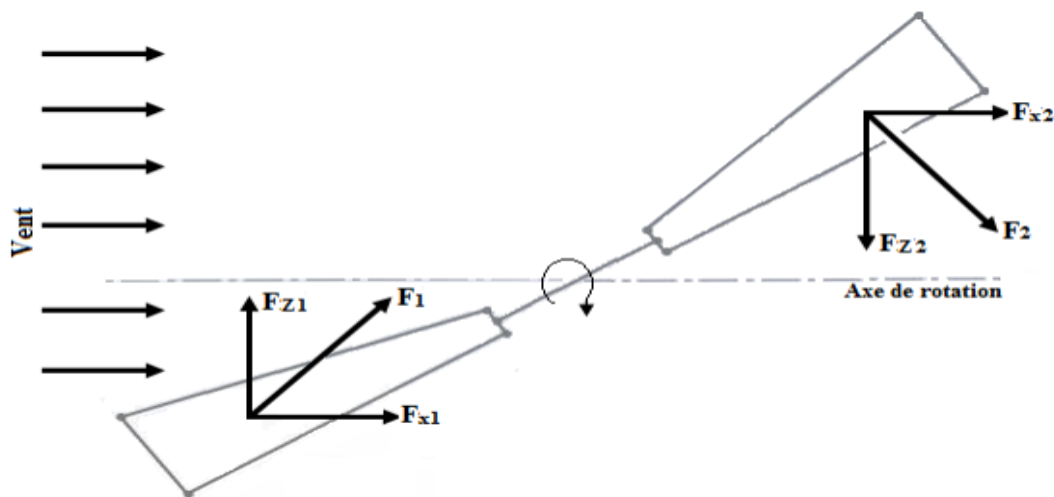


Figure II.20 : La résultante des forces appliquée sur une pale [38].

L'hélice commence à tourner (le vent dû au déplacement de l'hélice est nul).

On obtient donc :

- 2 forces F_{x1} et F_{x2} parallèles et de même sens, qui ont tendance à déplacer l'hélice dans un mouvement de translation dans la direction du vent.
- 2 forces F_{z1} et F_{z2} parallèles et de sens opposé, perpendiculaires à la direction du vent.

Ces deux forces créent un couple moteur qui a tendance à faire tourner l'hélice dans un plan perpendiculaire à la direction du vent [39].

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r} = 2\pi \cdot f \cdot \mathbf{r} = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \mathbf{r} \quad (\text{II.21})$$

\mathbf{U} : La vitesse du vent dû au déplacement de la pale ou vitesse tangentielle (en m/s).

$\boldsymbol{\omega}$: La vitesse angulaire du rotor (en rad/s).

\mathbf{r} : La distance du point considéré à l'axe de rotation (en m).

f : La fréquence de rotation du rotor (en hertz, *en* s^{-1} ou en tour/seconde).

n : La fréquence de rotation du rotor (en tour/min).

II.6.5.3 La vitesse relative

Le vent vu par la pale est en fait une combinaison du vent réel et du vent généré par le déplacement de la pale (varie proportionnellement au rayon sur toute la longueur de la pale). Ce vent généré est appelé vent apparent ou relatif La vitesse du vent par rapport à la pale est supérieure à la vitesse de la pale elle-même.

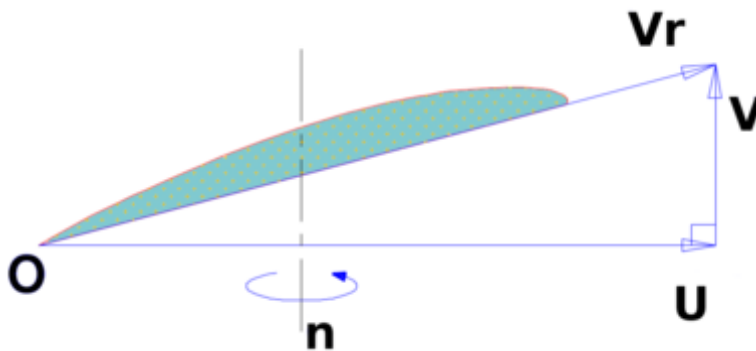


Figure II.21: Vitesse relative.

D'après le théorème de Pythagore, la vitesse relative au carré est donnée par la somme des carrés de la vitesse du vent et la vitesse tangentielle de la pale.

$$\vec{v}_r = \vec{v} + \vec{u} \quad (\text{II.22})$$

$$v_r = \sqrt{v^2 + U^2} \quad (\text{II.23})$$

v_r : La vitesse relative de la pale (en m/s).

v : La vitesse du vent (en m/s)

U : La vitesse tangentielle du point considéré (en m/s).

II.6.5.4 La vitesse spécifique

La vitesse spécifique ou le paramètre de vitesse marqué λ (Lambda) est le rapport entre la vitesse de la pointe de la pale et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre.

- Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.
- Si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

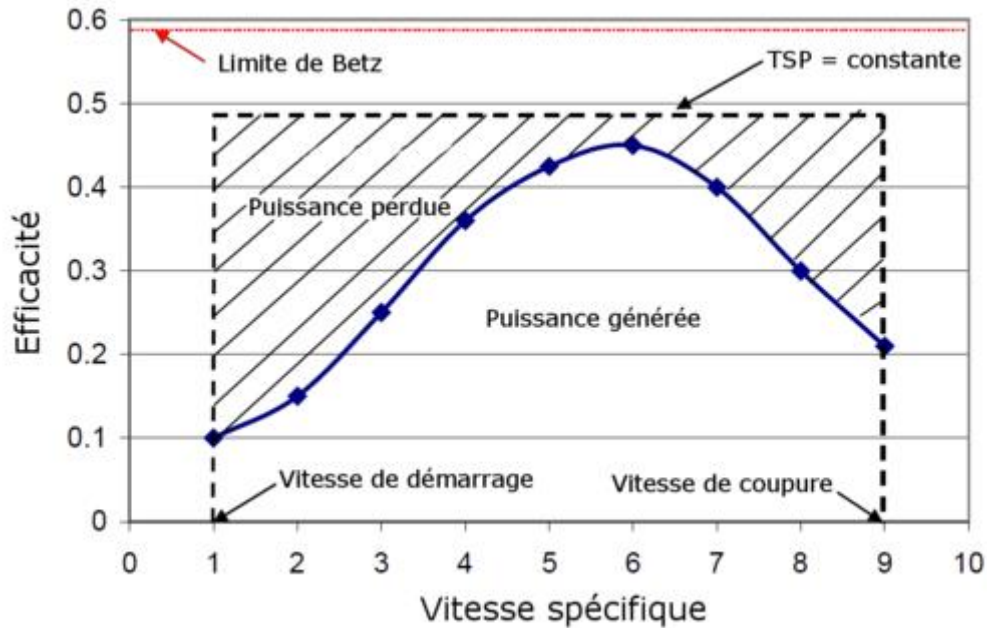


Figure II.22 : Vitesse spécifique.

Elle est définie par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (\text{II.24})$$

λ : La vitesse spécifique (sans unité).

U : La vitesse de l'extrémité des pales (en m/s).

v : La vitesse du vent (en m/s).

R : La longueur des pales ou rayon de la turbine (en m).

I.7 Théorie de Betz

La théorie BETZ est une méthode simplifiée découverte par Albert Betz en 1919, peut être utilisée pour déterminer la puissance idéale du rotor de la turbine, et cela par le calcul de la poussée du vent sur le rotor et de l'effet du rotor sur le champ

du vent, cette loi s'applique à tout type d'éolienne qu'on désignera d'ailleurs par le nom générique de capteur éolien. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique que l'on peut extraire d'un flux d'air dans un domaine ouvert, indépendamment de l'éolienne utilisée. La production d'énergie éolienne se fait par prélèvement d'énergie cinétique du vent par les pales.

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse V_1 et en aval d'une vitesse V_2 . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface "S" est ralenti et lui fournit de l'énergie, on a donc : $V_1 > V > V_2$ [40].

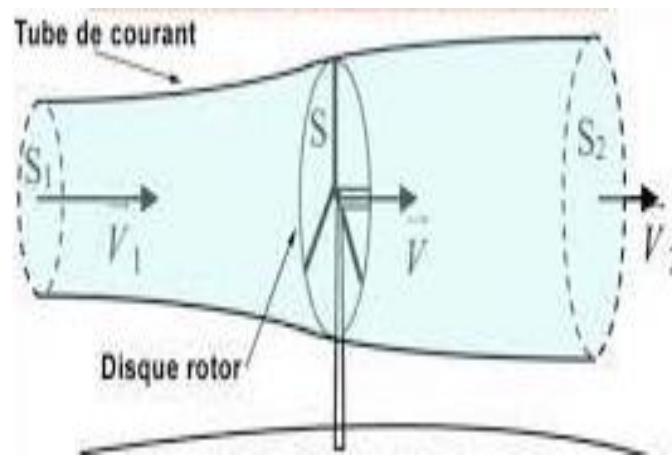


Figure II.23 : Courbe de C_x en fonction de l'incidence [41].

V_1 : La vitesse axiale initiale du vent avant l'éolienne.

V_2 : La vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par l'éolienne.

S : La surface du rotor.

S_1 : La surface en amont.

S_2 : La surface en aval.

En supposant que l'air est incompressible, cela permet d'écrire une équation de continuité, qui nous ramènera à la relation suivante :

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = S V \quad (\text{II.25})$$

La loi de Betz est: $P_V = \rho S V^3$ (II.26)

II.7.1 Définition de l'action du moteur éolien sur l'air

D'après le théorème d'Euler la force exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement F est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à la variation de la quantité de mouvement (Loi de variation de la quantité de mouvement) [10].

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta Q_m}{\Delta t} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

ΔQ_m : La variation de quantité de mouvement.

Ainsi que :

$$\Delta Q_m = mV_1 - mV_2 \quad (\text{II.28})$$

$$F = \Delta Q_m = \dot{m}V_1 - \dot{m}V_2 \quad (\text{II.29})$$

$$F = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (\text{II.30})$$

$$F = \rho SV(V_1 - V_2) \quad (\text{II.31})$$

Évaluons la puissance absorbée par l'éolienne, c'est-à-dire dû à la force :

$$P = FV = \rho SV(V_1 - V_2)V \quad (\text{II.32})$$

$$P = FV = \rho SV^2(V_1 - V_2) \quad (\text{II.33})$$

II.7.2 Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien

Selon la loi de conservation de l'énergie, la variation de l'énergie cinétique de la masse autour du système est : [10]

$$Ec_1 = Ec + Ec_2 \quad (\text{II.34})$$

Ec_1 : L'énergie cinétique à l'amant.

Ec : La puissance du moteur éolien ou l'énergie cinétique transformée.

Ec_2 : L'énergie cinétique à l'aval.

$$P = Ec_1 - Ec_2 = \frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_2^2 \quad (\text{II.35})$$

$$m = \rho SV \quad (\text{II.36})$$

$$P = \frac{1}{2}\rho SV(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.37})$$

Par égalisation de (II.32) et (II.37) on obtient :

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.38})$$

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) \quad (\text{II.39})$$

$$V = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (\text{II.40})$$

Remplaçant l'équation trouvée dans les équations (II.31) et (II.32) :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.41})$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 - V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.42})$$

II.7.3 La puissance maximale absorbée par le moteur éolien

Étudions l'évolution de la puissance absorbée par le moteur éolien (équation II.42), on suppose que la vitesse V_1 du vent en amont est constante, et on dérive par rapport à V_2 :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S [V_1^2 - 2V_1 V_2 - 3V_2^2] \quad (\text{II.43})$$

Le maximum de la fonction P correspond à la condition suivante :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1^2 - 2V_1 V_2 - 3V_2^2 = 0 \quad (\text{II.44})$$

Équation de 2^{ème} degrés admettant deux solutions qui sont : $V_2 = -V_1$

Qui n'a aucun sens physique, donc la solution acceptable est : $V_2 = \frac{V_1}{3}$

Rapportant cette valeur dans l'équation (II.42), on obtient :

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho S \left(V_1 + \frac{V_1}{3} \right) \left(V^2 - \left(\frac{V_1}{3} \right)^2 \right) \quad (\text{II.45})$$

Ou
$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (\text{II.46})$$

$$V_{\max} = \frac{V_1 + \frac{V_1}{3}}{2} = \frac{4V_1}{3 \cdot 2} = \frac{2V_1}{3} \quad (\text{II.47})$$

De l'équation (II.25) on a :

$$V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (\text{II.48})$$

$$SV_{\max} = S \frac{2V_1}{3} = S_1 V_1 \Rightarrow S_1 = \frac{2}{3} S \text{ et } S = \frac{3}{2} S_1 \quad (\text{II.49})$$

Injectant l'équation (II.49) dans l'équation (II.46), la puissance maximale devient :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho \frac{3}{2} S_1 V_1^2 \right) \quad (\text{II.50})$$

$$P_{\max} = \frac{8}{9} \left(\frac{1}{2} \rho S_1 V_1^2 \right) \quad (\text{II.51})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale qu'un moteur éolien peut collecter ne dépassera jamais 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

En réalité, la puissance des aéromoteurs les plus avancés ne dépasse généralement pas 60 à 70% de la puissance maximale calculée par la formule de Betz (II.42) [10, 33].

La variation de pression de l'ensemble du disque est donnée par la formule suivante :

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2)}{S} \quad (\text{II.52})$$

$$\Delta p = \frac{\rho V (V_1^2 - V_2^2)}{2S} \quad (\text{II.53})$$

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation générale d'une pale d'éolienne, de son aérodynamique, ces différents profils, ces principaux composants et ces matériaux de construction.

Nous avons pu éclaircir l'action de l'air sur la pale et sa vitesse, ainsi que les caractéristiques de l'aérodynamique du profil en simplifiant les équations exprimant l'effet aérodynamique.

On contrepartie, on a cité différents types de profils utilisés dans une pale d'éolienne, comme on a discuté sur le choix de profile et définit le profil NACA.

Enfin on a illustré une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaires pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor éolien. Il est commencé par la présentation d'une théorie générale de la mécanique (théorie de Betz), cette démarche se caractérise par sa simplicité mais surtout par sa puissance dans la modélisation du fonctionnement d'une turbine éolienne. Cette démarche est associée aux équations exprimant l'effet aérodynamique du vent sur les pales d'éoliennes. L'effet aérodynamique peut être idéalisé, c.-à-d. sans la considération de perte, ce qui donne une première approche dans l'établissement des paramètres aérodynamiques de l'éolienne.

CHAPITRE III

Calculs et réalisation

Introduction

Notre projet visant en premier lieu l'étude du profil que nous choisirons pour la réalisation de notre micro éolienne horizontale.

Dans ce chapitre nous présenterons aussi la méthode et les différents calculs que nous utiliserons pour le dimensionnement des formes de profils.

Cette partie, permettra notamment la présentation des étapes à suivre pour la réalisation du projet et tous les matériaux que nous utiliserons.

II.1 Choix du profil

Les pales sont une partie très importante de l'aéromoteur, elles sont caractérisées par plusieurs critères. Le rendement d'une éolienne dépend du nombre de pales, matériaux de construction, leurs longueurs mais aussi du profil choisi.

Le profil classique est très dynamique, il produit une bonne portance à basse vitesse, son extrados est plus grand que son intrados car elle a une très forte courbure.

Pour une conception de profil simple, efficace, très performant, présentant des trainées réduites et permettant de ce fait d'obtenir de bons rendements aérodynamiques. Nous choisissons le profil NACA creux classique à quatre chiffres ; **NACA 6409**.

III.2 Réalisation des pales

III.2.1 Calcul des différents points de profil de la pale

La longueur de la pale : $L = 120$ cm

En connaissant :

- La largeur du profil 1 (P_1) : $h_{p1} = 22$ cm
- La largeur du profil 15' (P'_{15}) : $h_{p15'} = 6$ cm

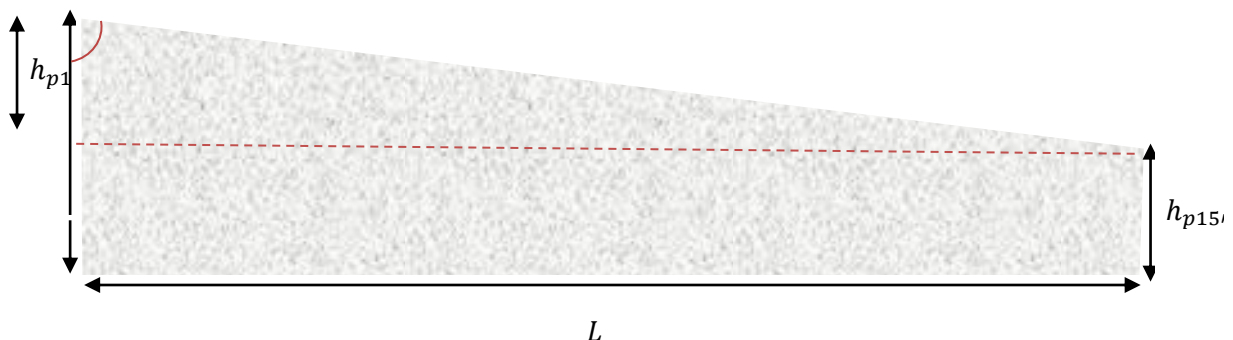


Figure III.1: La Dimension de la pale

a) Calcul de l'angle α :

$$\tan \alpha = \frac{L}{A} \quad (\text{III.1})$$

Avec $A = h_p - h_{p15'} = 22 - 6 = 16 \text{ cm}$ (III.2)

$$\tan \alpha = \frac{120}{16} = 7.5$$

Donc: $\alpha = 82.4^\circ$

b) Calcul de la corde des différents profils :

$$C = h_p - \frac{h_x}{\tan \alpha} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

h_x : Entre-profil ($h_x = 4 \text{ cm}$)

Les résultats obtenus sur **MATLAB** :

Profils	Corde (Cm)	Profils	Corde (Cm)
P_1	22.0000	P'_1	21.4667
P_2	21.9333	P'_2	20.4000
P_3	19.8667	P'_3	19.3333
P_4	18.8000	P'_4	18.2667
P_5	17.7333	P'_5	17.2000
P_6	16.6667	P'_6	16.1333
P_7	15.6000	P'_7	15.0667
P_8	14.5333	P'_8	14.0000
P_9	13.4667	P'_9	12.9333
P_{10}	12.4000	P'_{10}	11.8667
P_{11}	11.3333	P'_{11}	10.8000
P_{12}	10.2667	P'_{12}	09.7333
P_{13}	09.2000	P'_{13}	08.6667
P_{14}	09.1333	P'_{14}	07.6000
P_{15}	07.0667	P'_{15}	06.0000

Tableau III.1 : Les cordes des profils.

III.2.2 Construction des profils

Pour le calcul des coordonnées de nos profils, nous avons utilisé le site AIRFOIL TOOLS (outils de profil aérodynamique) qui sert à rechercher des profils aérodynamiques disponibles sur le Web ou dans des bases de données en ligne.

D'abord, nous avons utilisé l'application « Traceur de profil aérodynamique » pour afficher et tracer un plan grandeur nature du profil aérodynamique NACA 6409 à notre largeur de corde. Nous avons ensuite ajusté l'épaisseur et réglé le pas pour tenir compte de l'angle des pales de l'éolienne.

Nous présentons ci-dessous trois des trente formes et coordonnées de profil : la plus grande, la centrale puis la plus petite.

III.2.2.1 Profil P_1

1- Les coordonnées (x ; y)

x_i	220	219.4104	217.6460	214.7266	210.6720	205.5306	199.3530	192.1854
	184.1180	175.2234	165.5984	155.3376	144.5620	133.3794	121.9086	110.2904
	98.6480	87.0980	75.6074	64.4930	53.9044	43.9736	34.8262	26.5760
	19.3160	13.1296	8.0894	4.2240	1.5840	0.1760	0.0000	1.0274
	3.2274	6.5406	10.9340	16.3416	22.6974	29.9354	37.9654	46.7170
	56.0956	66.0264	76.4060	87.1596	98.3554	109.7096	121.0880	132.3674
	143.4246	154.1430	164.4016	174.0860	183.0906	191.3054	198.6336	204.9960
	210.3046	214.5066	217.5426	219.3884	220			
y_i	0.0000	0.1848	0.7326	1.6214	2.8248	4.2988	5.9928	7.8562
	9.8208	11.8316	13.8226	15.7366	17.5142	19.1048	20.4644	21.5512
	22.3344	22.7920	22.7744	22.1892	21.0848	19.5228	17.5824	15.3604
	12.9558	10.4764	8.0212	5.6782	3.5266	1.6214	0.0000	-1.2606
	-2.1032	-2.5454	-2.6224	-2.3760	-1.8568	-1.1286	-0.2618	0.67540
	1.6038	2.4464	3.1350	3.6058	3.8984	4.1162	4.2350	4.2438
	4.1360	3.9160	3.5948	3.1922	2.7302	2.2374	1.7402	1.2672
	0.8426	0.4862	0.2222	0.0550	0.0000			

Tableau III.2: Les coordonnées du profil P_1 .

2- La forme du profil P_1

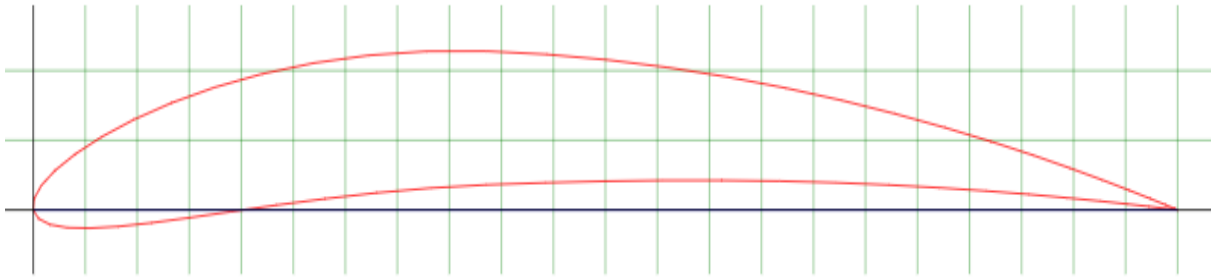


Figure III.2: Profil P_1 NACA 6409 (220mm).

III.2.2.2 Profil P'_8

1- Les coordonnées (x ; y)

x_i	140.0000	139.6248	138.5020	136.6442	134.0640	130.7922	126.8610	122.2998
	117.1660	111.5058	105.3808	98.8512	91.9940	84.8778	77.5782	70.1848
	62.7760	55.4260	48.1138	41.0410	34.3028	27.9832	22.1620	16.9120
	12.2920	8.3552	5.1478	2.6880	1.0080	0.1120	0.0000	0.6538
	2.0538	4.1622	6.9580	10.3992	14.4438	19.0498	24.1598	29.7290
	35.6972	42.0168	48.6220	55.4652	62.5898	69.8152	77.0560	84.2338
	91.2702	98.0910	104.6192	110.7820	116.5122	121.7398	126.4032	130.4520
	133.8302	136.5042	138.4362	139.6108	140.0000			
y_i	0.0000	0.1176	0.4662	1.0318	1.7976	2.7356	3.8136	4.9994
	6.2496	7.5292	8.7962	10.0142	11.1454	12.1576	13.0228	13.7144
	14.2128	14.5040	14.4928	14.1204	13.4176	12.4236	11.1888	9.7748
	8.2446	6.6668	5.1044	3.6134	2.2442	1.0318	0.0000	-0.8022
	-1.3384	-1.6198	-1.6688	-1.5120	-1.1816	-0.7182	-0.1666	0.4298
	1.0206	1.5568	1.9950	2.2946	2.4808	2.6194	2.6950	2.7006
	2.6320	2.4920	2.2876	2.0314	1.7374	1.4238	1.1074	0.8064
	0.5362	0.3094	0.1414	0.0350	0.0000			

Tableau III.3: Les coordonnées du profil P'_8 .

2- La forme du profil P'_g

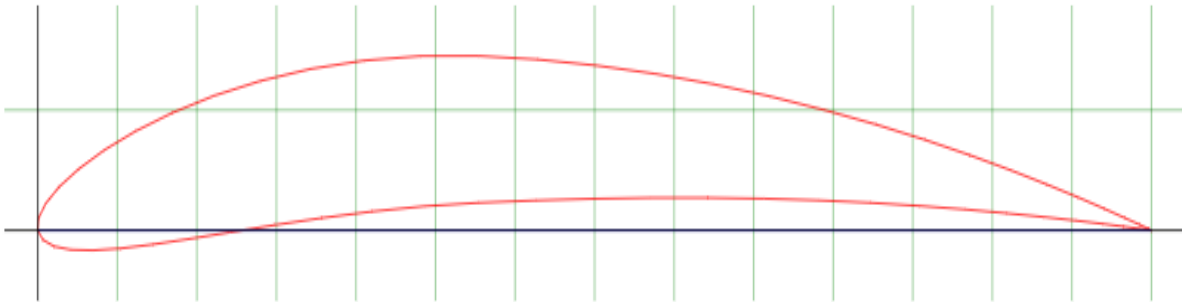


Figure III.3: Profil P'_g NACA 6409 (140 mm).

III.2.2.3 Profil P'_{15}

1- Les coordonnées (x ; y)

x_i	60.0000	59.8392	59.3580	58.5618	57.4560	56.0538	54.3690	52.4142
	50.2140	47.7882	45.1632	42.3648	39.4260	36.3762	33.2478	30.0792
	26.9040	23.7540	20.6202	17.5890	14.7012	11.9928	9.4980	7.2480
	5.2680	3.5808	2.2062	1.1520	0.4320	0.0480	0.0000	0.2802
	0.8802	1.7838	2.9820	4.4568	6.1902	8.1642	10.3542	12.7410
	15.2988	18.0072	20.8380	23.7708	26.8242	29.9208	33.0240	36.1002
	39.1158	42.0390	44.8368	47.4780	49.9338	52.1742	54.1728	55.9080
	57.3558	58.5018	59.3298	59.8332	60.0000			
y_i	0.0000	0.0504	0.1998	0.4422	0.7704	1.1724	1.6344	2.1426
	2.6784	3.2268	3.7698	4.2918	4.7766	5.2104	5.5812	5.8776
	6.0912	6.2160	6.2112	6.0516	5.7504	5.3244	4.7952	4.1892
	3.5334	2.8572	2.1876	1.5486	0.9618	0.4422	0.0000	-0.3438
	-0.5736	-0.6942	-0.7152	-0.6480	-0.5064	-0.3078	-0.0714	0.1842
	0.4374	0.6672	0.8550	0.9834	1.0632	1.1226	1.1550	1.1574
	1.1280	1.0680	0.9804	0.8706	0.7446	0.6102	0.4746	0.3456
	0.2298	0.1326	0.0606	0.0150	0.0000			

Tableau III.4: Les coordonnées du profil P'_{15} .

2- La forme de profil

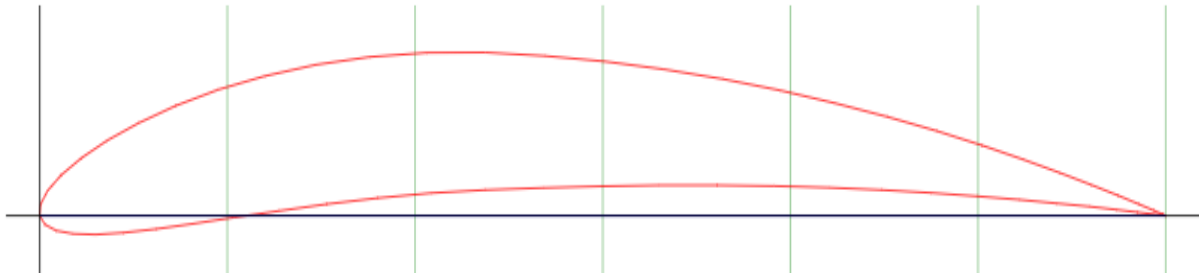


Figure III.4: Profil P'15 NACA 6409 (60 mm).

III.2.3 Matériaux nécessaire pour la construction des pales

La plupart des pales d'éoliennes sont fabriquées à partir de matériaux composites alliant légèreté et solidité, ces deux mots suffisent pour qualifier les matériaux nécessaires pour la construction des pales. Plus une pale est longue plus les matériaux nécessaires à sa fabrication doivent être résistants [42].

Nous avons eu besoin de ces éléments pour la réalisation de notre micro aérogénérateur :

N°	Eléments	N°	Eléments
1	Papier	10	Enduit
2	Scotch	11	Plâtre synthétique (médical)
3	Cutteur	12	Papier verre
4	Carton épais	13	Cellophane
5	Penceuse électrique	14	Fibre de verre
6	Polystyrène	15	Pinceau plat / rouleau
7	Fil de nichrome	16	Résine
8	Colle	17	Balance
9	Contre-plaqué	18	Autocollant

Tableau III.5 : Les éléments utilisés pour la réalisation.

III.3 Réalisation

III.3.1 Réalisation des pales

Après avoir fait nos calculs et dessiner les formes NACA 6409 sur SolidWorks.

- D'abord nous avons tracé les formes NACA 6409 sur du carton épais, ensuite nous les avons coupés avec un bon cutteur et poncer pour avoir une forme approximative à l'aide d'un touret à meuler qui se présente sur la figure III.5.

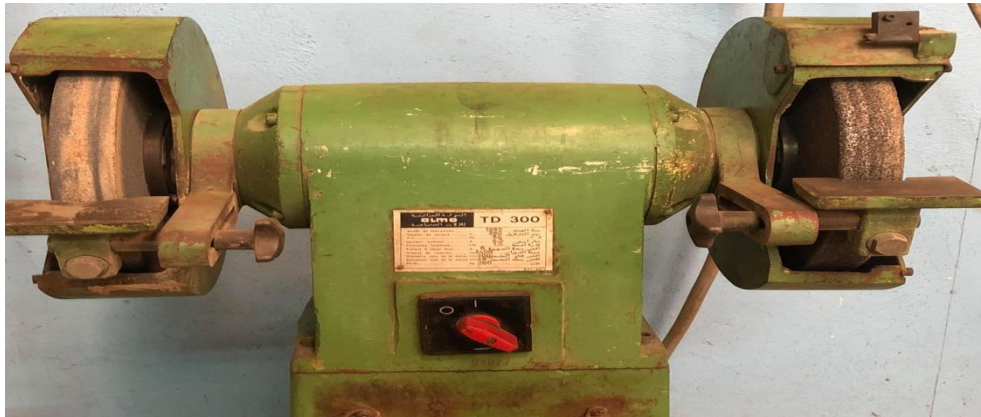


Figure III.5 : Touret à meuler.

- Nous avons obtenu les formes présentées sur la figure III.6.



Figure III.6 : NACA 6409 en carton épais.

- Ensuite, nous avons collé nos profils en carton épais sur du polystyrène pour avoir la forme souhaitée et nous les avons découpés avec du fil de nichrome présenté sur la figure III.7.



Figure III.7 : Coupe polystyrène à fil chaud.

- Après, nous avons posé nos profils en polystyrène sur du contre-plaqué que nous avons par la suite collé l'un après l'autre pour obtenir ces formes de pale représentées sur la figure III.8.



Figure III.8 : Pales en polystyrène.

- Une fois que les pales ont pris forme, nous les avons recouvertes d'une fine couche d'enduit que nous avons poncé une fois sèche et nous avons ajouté une deuxième couche de plâtre médical que nous avons laissé sécher pendant 24h, pour ensuite les poncer à l'aide de papier verre.



Figure III.9 : Pale recouverte d'enduit et de plâtre.

- Une fois que nos pales ont séchés nous les avons poncés puis nous les avons recouvertes d'un film plastique (cellophane), par la suite nous avons préparé de la fibre de verre aux dimensions adéquates pour épouser la forme de la pale. Et à côté nous avons préparé un mélange de résine et de durcisseur (nous avons utilisé des protections pour les mains et le visage).



Figure III.10 : Pale et fibre de verre.

- Une fois le mélange prêt, nous avons appliqué une première couche de résine à l'aide d'un pinceau plat sur toutes les surfaces de nos pales, puis nous avons posé délicatement notre fibre de verre préalablement découpée.

Enfin, nous avons appliqué une deuxième couche plus épaisse sur la totalité de la fibre de verre à l'aide d'un petit rouleau en tissu de manière homogène.



Figure III.11 : Pale en résine et fibre de verre.

- Pour en finir, après que la résine ait bien séché et a durcie nous l'avons poncé avec du papier verre puis nettoyée la poussière à l'aide d'une brosse, pour enfin venir y coller un film autocollant que nous avons préalablement découpé aux dimensions de la pale. Et nous y avons aussi inséré des plaques métalliques que nous avons colmaté à l'aide de fibre de verre et de la résine puis riveté, qui serviront de fixation.



Figure III.12 : Pale prête.

III.3.2 Le mat

En premier lieu à l'aide d'une scie nous avons découpé un tube en acier à la longueur de 2.5 mètres et de diamètre $d=65\text{mm}$.

Puis nous avons fabriqué une première pièce que nous avons réalisé nous-même à l'aide d'un tour en passant par plusieurs étapes ; dressage, chariotage, perçage et alésage. Et nous y avons fixé un roulement conique de diamètre 43mm, ensuite nous avons inséré notre pièce dans le tube grâce à une presse hydraulique.

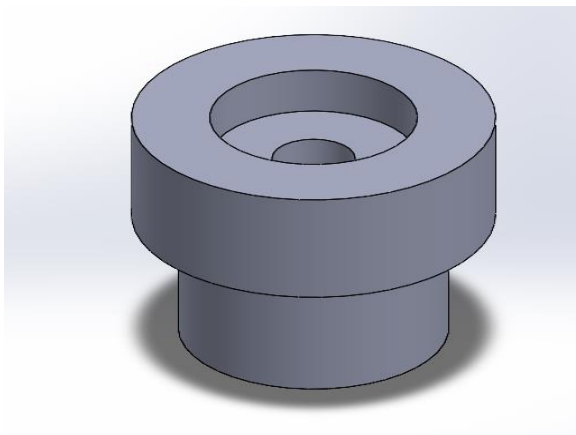


Figure III.13 : Pièce1 (SolidWorks).



Figure III.14 : Photo réelle de la pièce 1.

Ensuite nous avons fabriqué une deuxième pièce brute qui est présentée sur la figure III.16 en photo réelle.

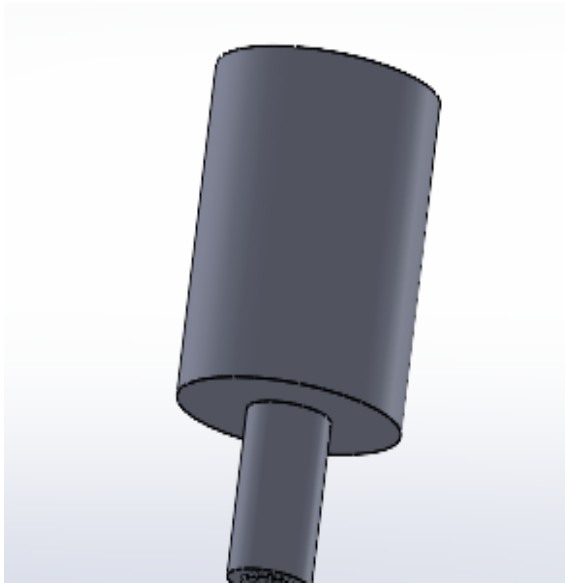


Figure III.15: Pièce 2 (SolidWorks).

Figure III.16 : Photo réel de la pièce 2.

Nous avons par la suite soudé cette pièce au centre d'une plaque métallique de 20cm sur 15 cm qui servira de support pour la nacelle.

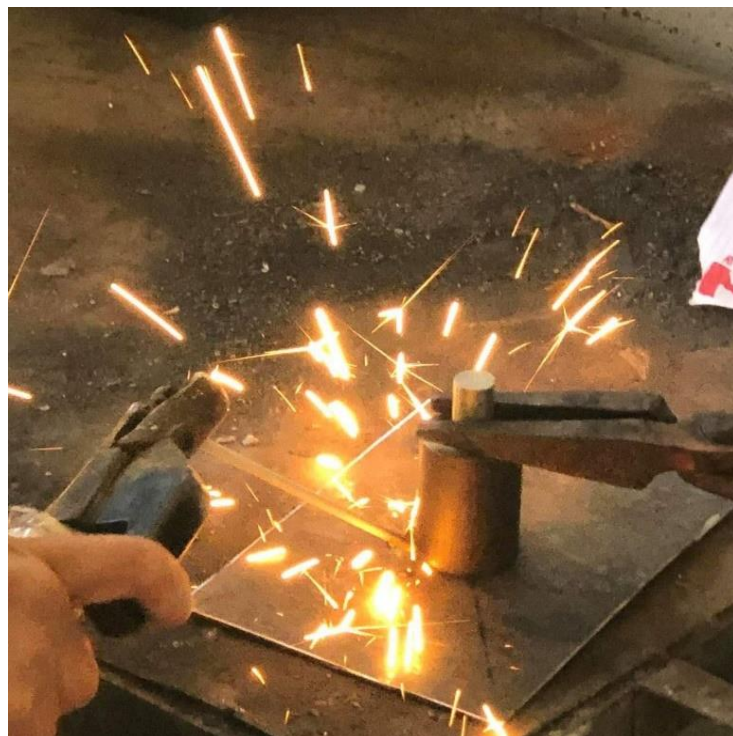


Figure III.17 : Soudage de la pièce 1 sur la plaque métallique.

De l'autre extrémité de notre pièce nous avons soudé une tige filetée de longueur $L=5\text{cm}$. Et pour finir nous avons inséré notre pièce 2 dans la pièce 1.

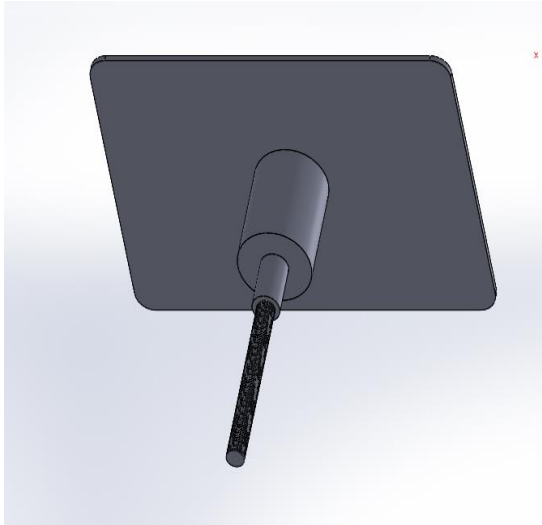


Figure III.18 : Support de la nacelle (SolidWorks).



Figure III.19 : Photo réelle du support de la nacelle.

III.3.3 Support

Pour la réalisation de notre support nous nous sommes servies de cornière en fer que nous avons découpé à la longueur d'un mètre puis les avons soudées entre elles et formé un carré d'un mètre sur 1 mètre, nous l'avons aussi renforcé par des traverses diagonales et horizontales pour une rigidité maximale

Enfin nous avons percé des trous qui serviront à accueillir les boulons de fixation du mat.

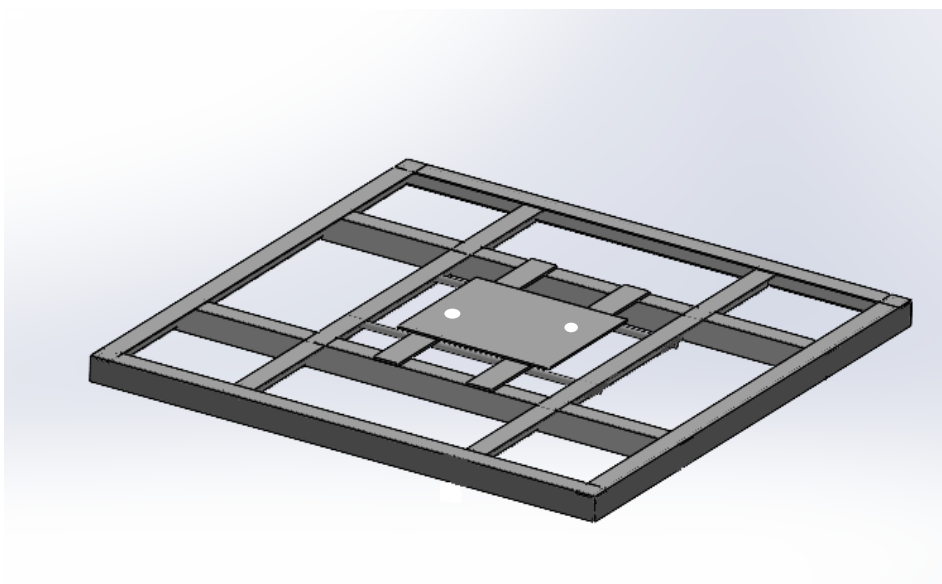


Figure III.20 : Support (SolidWorks).

Le mat et le support de notre éolienne sont présentés sur la figure III.21 :

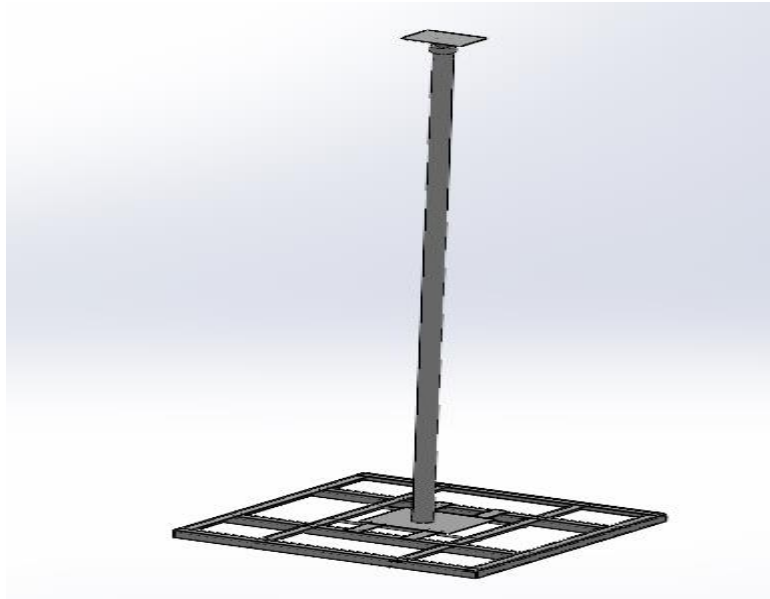


Figure III.21 : Mat et support (SolidWorks)

III.4 Nacelle

III.4.1 Multiplicateur

Le multiplicateur capte la puissance faible et le couple élevé que produit le rotor de l'éolienne pour le transformer en une puissance élevée et à un couple faible dont la génératrice ou l'alternateur a besoin pour venir le transformer en courant électrique.

Dans le cadre de notre projet nous avons utilisé un système de poulie-courroie. Le système poulie-courroie permet de transférer une force d'une poulie à une autre à l'aide d'une courroie et ce système permet de découpler cette force

Et dans ce système de poulie-courroie, le rapport de transmission dépend du diamètre (d) de la poulie motrice et de la poulie réceptrice, si l'alternateur tourne à une vitesse de $w_2 = 157 \text{ rad/s}$ en appliquant la loi ci-dessous nous calculons la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne w_1 [38] :

$$\text{Nous avons : } \frac{w_2}{w_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad (\text{III.4})$$

$$w_1 = \frac{d_2}{d_1} w_2$$

$$w_1 = 46.159 \text{ rad/s}$$

Avec : d_1 : Diamètre de la poulie motrice ($d_1 = 163 \text{ mm}$).

d_2 : Diamètre de la poulie réceptrice ($d_2 = 50 \text{ mm}$).

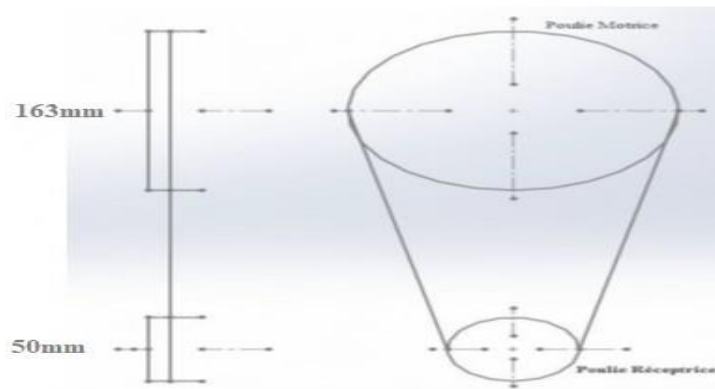


Figure III.22 : Schéma cinématique Polie-courroie.

III.4.2 Alternateur

L'alternateur d'une éolienne est tel qu'une centrale électrique, alimentée par la rotation des pales sert de générateur qui convertit un mouvement mécanique en courant électrique. A cet effet, l'alternateur comporte un arbre qui fait tourner l'ensemble rotor/stator, entre les deux, l'alternance du champ magnétique génère de l'électricité.

Dans notre travail, nous avons utilisé un alternateur à griffe pour produire de l'électricité en transformant une puissance mécanique en une puissance électrique.

III.4.2.1 Alternateur à griffes

L'alternateur à griffe est classé dans la famille des alternateurs une machine synchrone triphasée à pôles saillants. Sa particularité provient de la structure du rotor, qui comporte une bobine excitatrice alimentée à travers deux bagues, et enserrée entre deux roues polaires munies deux griffes axiales [43].

L'alternateur que nous avons utilisé est celui que le binôme de la promo 2019 électromécanique a identifié, tous les résultats se trouvent sur notre annexe (annexe C). Après remplacement des anciens fils par de nouveaux plus résistants et isoler à l'aide de gaine thermo rétractable facile d'emploi et qui offre une isolation maximale pour éviter tout contact. Nous avons enfin vérifié que l'alternateur fonctionnait correctement avec un multimètre.

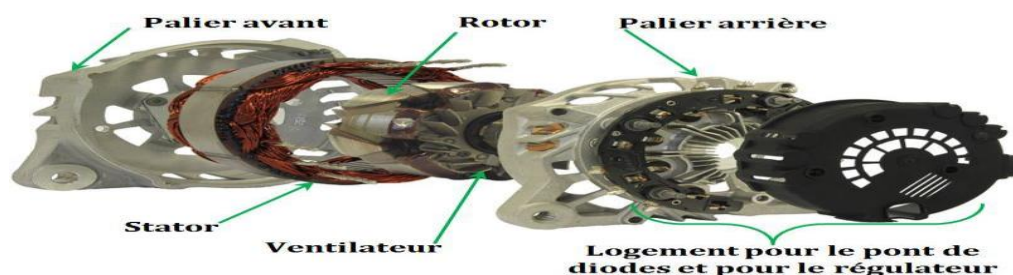


Figure III.23 : Alternateur à griffe [38].

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes parties de l'alternateur, qui sont :

- **Le rotor** : Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Il est constitué d'une seule bobine, alimentée par deux bagues. Cette bobine est placée entre des plateaux à griffes, permettant de créer les pôles. Dans un moteur électrique, le courant passant dans les enroulements du rotor provoque un champ magnétique qui réagit avec celui permanent du stator pour faire tourner l'axe central.

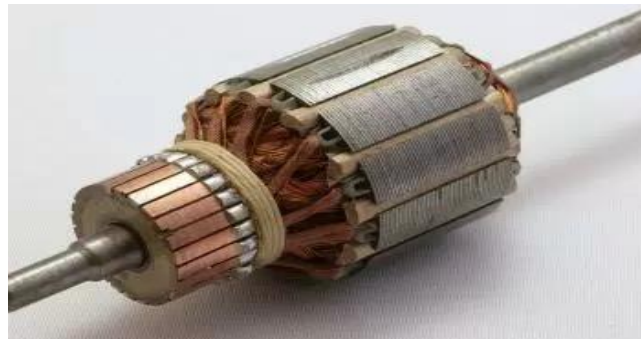


Figure III.24: Rotor [44].

- **Le stator** : Le stator est la partie fixe d'une machine rotative. Selon la configuration de la machine le stator peut créer un champ magnétique qui par interaction avec le champ magnétique rotorique produit le couple électromécanique. Le stator peut être constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants.



Figure III.25 : Un stator [45].

- **Le redresseur** : La plupart des alternateurs ont un redresseur qui possède six diodes de puissance pour redresser le courant triphasé.



Figure III.26 : Redresseur [43].

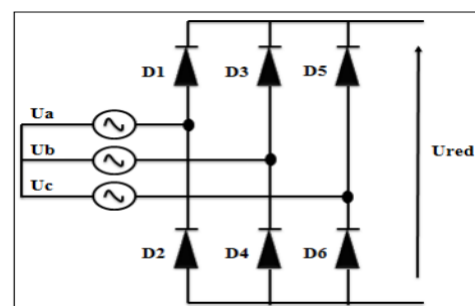


Figure III.27: Schéma électrique d'un redresseur [43].

- **Le régulateur :** Le régulateur électronique permet de réguler la tension du réseau de bord en fonction de la charge de la batterie. Cet organe contrôle donc le courant d'excitation de l'alternateur afin que le débit de l'alternateur, quelle que soit sa vitesse de rotation, s'adapte à la charge de la batterie. En général, le régulateur est couplé avec les balais de l'excitation.



Figure III.28: Régulateur de l'alternateur [43].

- **Le Refroidisseur :** Les alternateurs nécessitent d'être refroidis à cause des pertes induites ; selon les technologies employées, ils peuvent être refroidis par deux ventilateurs internes entraînés par le rotor (ils sont placés aux deux extrémités du rotor, l'un pour faire entrer l'air et l'autre pour le faire sortir).



Figure III.29 : Refroidissement par ventilations [43].

Ou alors par eau (circulation d'eau autour de la carcasse de l'alternateur).

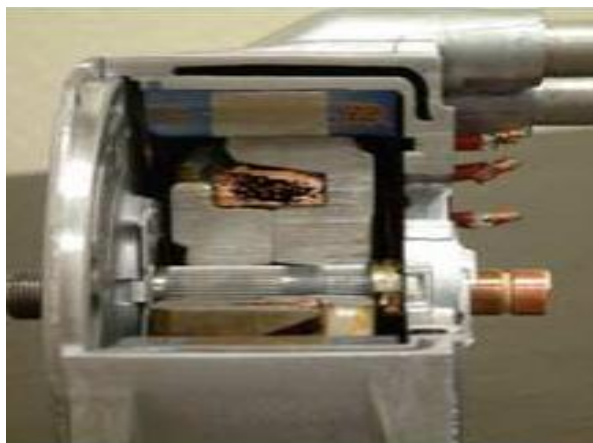


Figure III.30 : Refroidissement par circulation d'eau [43].

- **Les paliers :** Nous désignons par paliers, les flasques et les paliers proprement dit munis de roulements à billes. Ils comportent des ouvertures entre les quelles il ya des ailettes optimisées pour améliorer le refroidissement de la machine. Les paliers supportent l'arbre qui assure la liaison de l'alternateur avec le moteur thermique [46].



Figure III.30: Palier aval [43].



Figure III.31: Palier arrière [43].

III.4.3 Type d'implantation de l'alternateur sur l'éolienne

On distingue aussi deux types d'implantation sur l'éolienne :

- Sur les éoliennes horizontales, telles que nous les rencontrons en général où les pales verticales entraînent en rotation l'axe horizontal, l'alternateur est placé derrière les pales tout en haut du mât support. Cette disposition oblige à élever un opérateur jusqu'au niveau de l'axe des pales pour toute intervention sur l'alternateur.

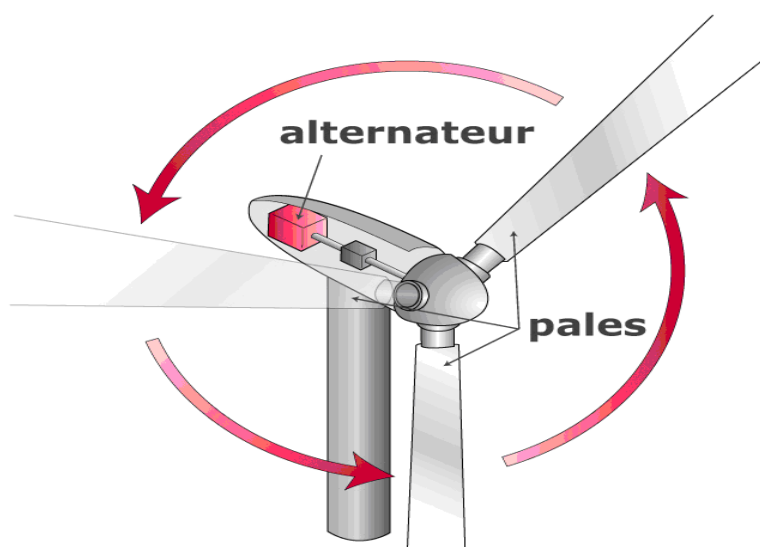


Figure III.32 : Alternateur sur une pale horizontale.

- Sur les éoliennes verticales, (VAWT), l'alternateur est placé bien plus bas, soit juste sous les pales verticales, soit au niveau du sol au pied de l'éolienne, ce qui facilite la maintenance de l'alternateur.

III.5 Principe de fonctionnement

Pour finalement arriver à générer un courant continue, notre système passe par plusieurs étapes tout d'abord le rotor est actionné par la rotation des pales qui ensuite transfère sa force à l'alternateur en utilisant le système de poulie-courroie

Grâce au courant d'excitation généré par la force motrice, le rotor de l'alternateur va se mettre en rotation ce qui va créer un champ magnétique qui par la suite se converti en courant alternatif et puis grâce au pont de diode, ce courant-là va être transformer en courant continue qui nous permettra enfin de charger une batterie. Mais aussi nous avons un régulateur connecté au balais de l'excitation qui modifie celle-ci en cas de hausse ou de baisse de tension.

III.6 Eolienne réalisée



Figure III.31 : Vue de face de notre éolienne à axe horizontal.

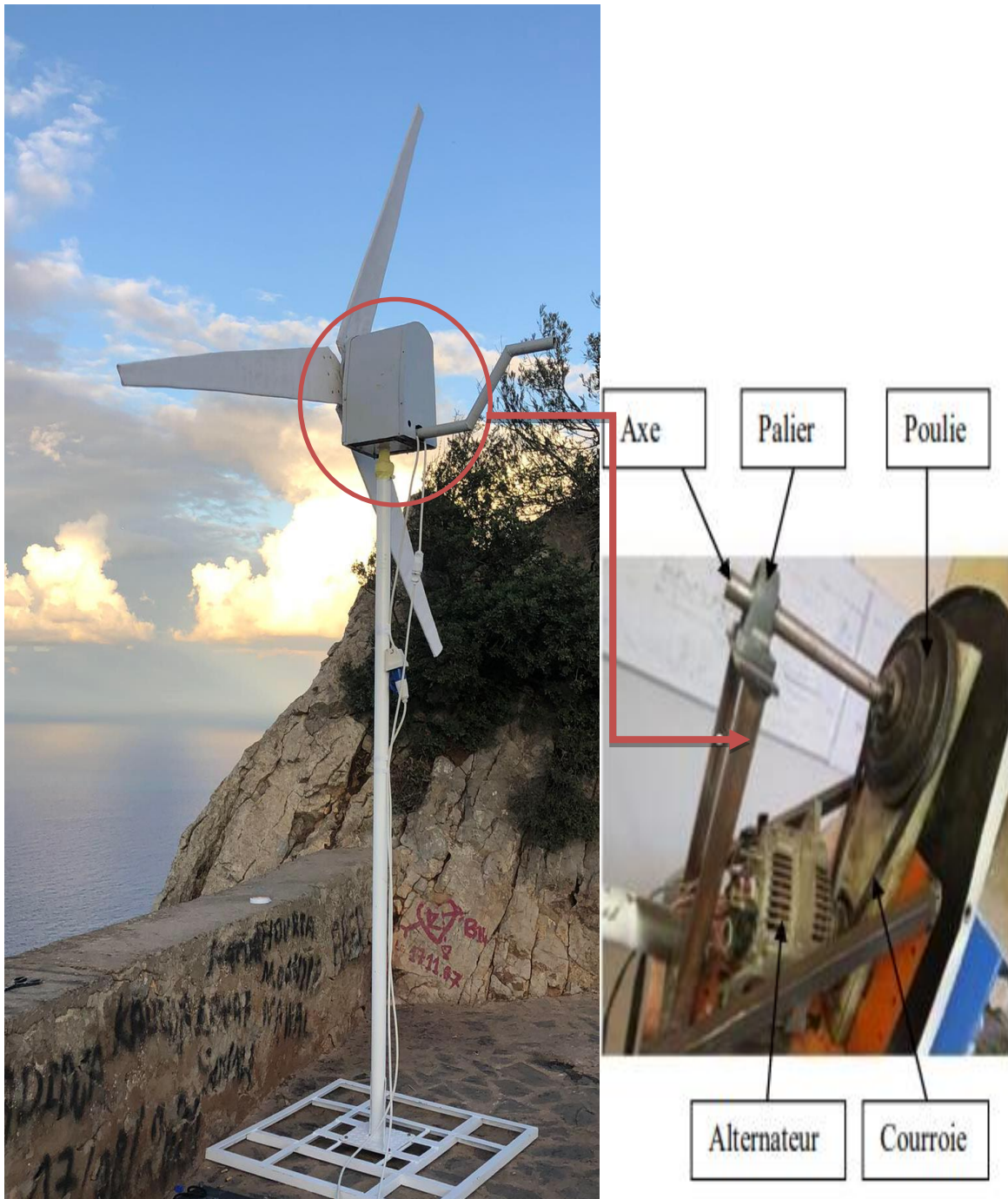


Figure III.32 : Vue de coté de notre éolienne réalisée

Conclusion

En conclusion, durant ce troisième chapitre, Nous avons présenté tout d'abord les étapes de l'étude et de la réalisation des profils de nos pales, leurs assemblages et les matériaux utilisés. Nous avons aussi présenté le système poulie-courroie ainsi que l'alternateur à griffe que nous avons choisi comme génératrice, tout en passant par la réalisation du mat et du support.

Cette réalisation a nécessité beaucoup de patience, de coalitions, de ferveurs et de maîtrise de divers outils et procès tels que le tournage, fraisage, soudage. Nous sommes satisfaites du résultat.

CHAPITRE IV

Equilibrages et essais expérimentaux

Introduction

Dans ce chapitre nous allons développer des procédures d'équilibrages statiques et dynamiques afin de garantir le même effort en rotation pour toutes les pales, ensuite nous allons effectuer une petite étude expérimentale de notre éolienne.

IV.1 Équilibrage de l'éolienne

L'équilibrage est une technique pour stabiliser une pièce qui dispose d'un axe de rotation. C'est une opération qui consiste à contrôler et corriger la répartition des masses sur un mobile pour s'assurer que le balourd résiduel se situe dans les limites acceptables. En effet un mauvais équilibrage peut créer des vibrations supplémentaires. Il est donc nécessaire de réaliser un équilibrage le plus précis possible.

Il existe deux types d'équilibrage : l'équilibrage statique (en l'absence de rotation) et l'équilibrage dynamique (lorsque le mobile tourne sur son axe principal).

IV.1.1 Équilibrage statique

L'équilibrage statique s'agit d'ajouter une petite masse à l'extrémité de la pale pour que l'hélice puisse s'arrêter dans n'importe quelle position. Le fait que les masses de chaque pale soient égales, ne change rien, car c'est la répartition de la matière qui équilibre l'ensemble.

Nous avons pesé les 3 pales éoliennes :

{ La première pale : 1646 g
La deuxième pale : 1614 g
La troisième pale : 1610 g

D'après les résultats trouvés, nous avons ajouté de petites masses pour la deuxième pale (32 g) et la troisième pale (36 g) pour avoir la même masse que la première pale.

IV.1.2 Équilibrage dynamique

Après essai de notre éolienne, nous avons constaté un déséquilibre et des vibrations lorsque les pales tournent à vitesse élevée, ce qui fait qu'elle nécessite un équilibrage dynamique, mais malheureusement nous n'avons pas les moyens nécessaires pour faire cet équilibrage.

IV.2 Caractérisation dynamique

Un aérogénérateur permet d'extraire l'énergie cinétique contenue dans le vent et de la convertir en énergie mécanique ou électrique. Les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion. La puissance théorique de l'énergie éolienne est définie par :

$$P_V = \rho S V^3$$

ρ : La masse volumique de l'air au niveau de la mer (1,25 kg/m³ aux conditions T=20°C et p=1atm).

S : La section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor (m²).

V : vitesse du vent (m/s).

La puissance du vent en fonction de sa vitesse est présentée dans le tableau VI.1 :

Vitesse (km/h)	Puissance(W)
0	0
6	13.09
11	80.66
14	166.2911
17	297.7362
23	737.341

Tableau IV.1 : La puissance du vent en fonction de la vitesse.

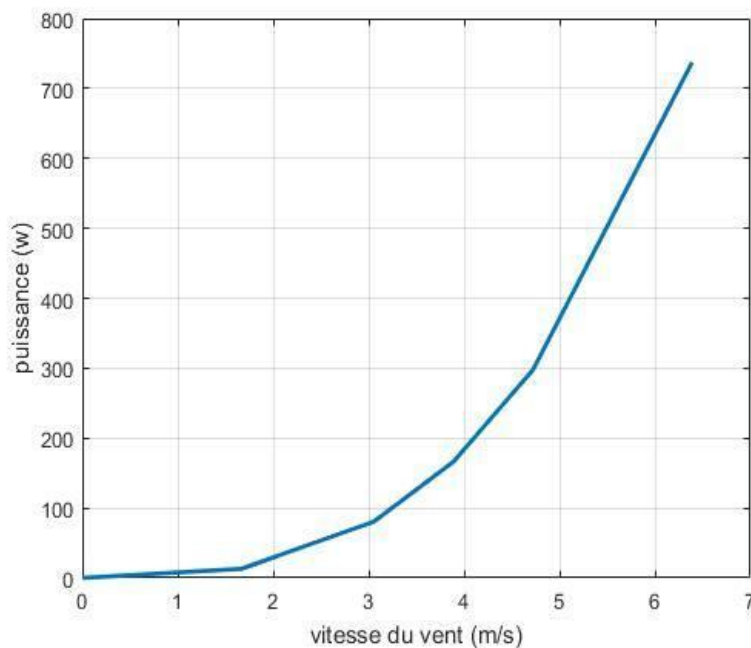


Figure IV.1 : La puissance en fonction de la vitesse du vent.

Commentaire :

D'après la courbe on remarque que la puissance du vent augmente de 0 à 737.34W quand la vitesse augmente de 0 à 23 km/h.

IV.3. Tension obtenue à partir du vent en fonction de La vitesse

Les essais ont été réalisés à une altitude de 430m, la vitesse du vent maximal atteinte en cette journée est de 23 km/h.

on a prélevé la valeur de la tension produite par l'éolienne pour chaque $t=5s$. Les valeurs de la tension données dans le tableau suivant:

t(s)	U(v)
0	13
5	19
10	14
15	11
20	18
25	20
30	23
35	21
40	19
45	23
50	17
55	13
60	11
65	18
70	22
75	19
80	17
85	23
90	15

Tableau IV.2 : Tension obtenue à la sortie de l'alternateur.

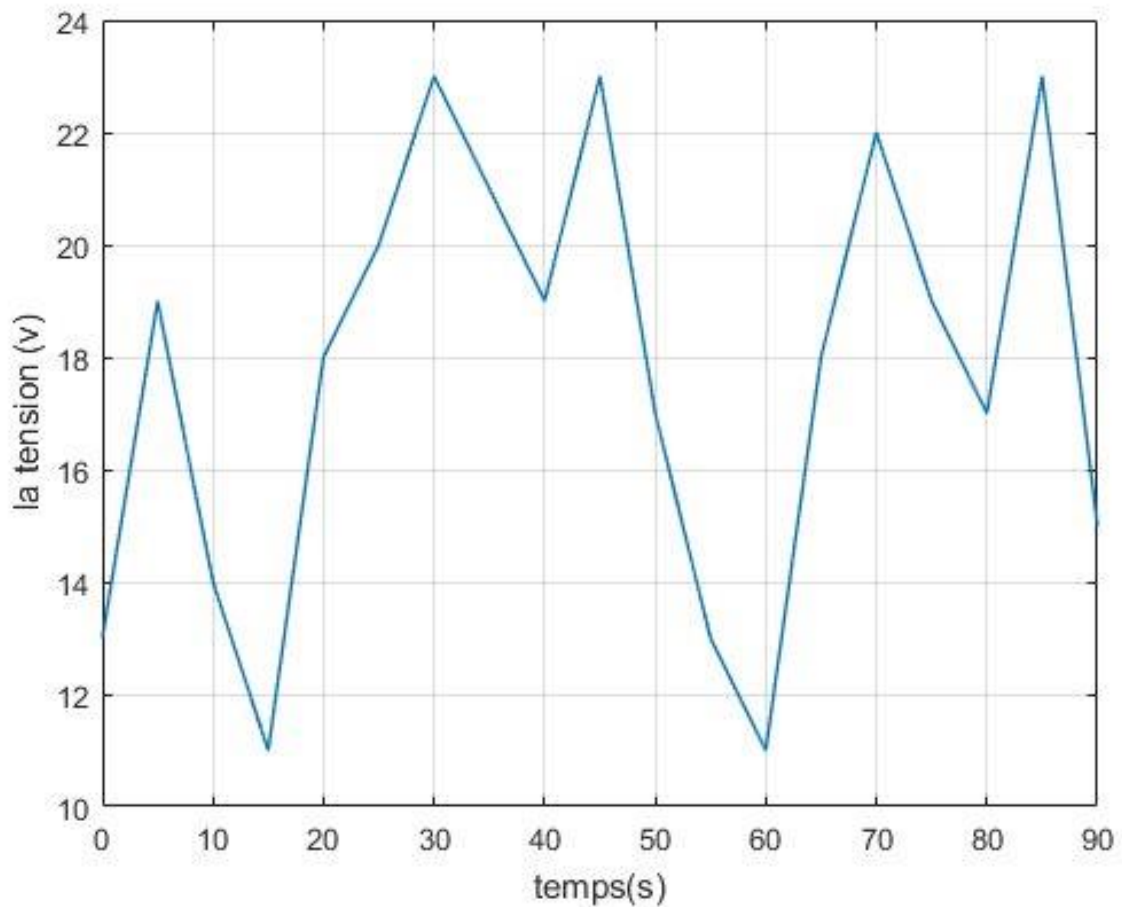


Figure IV.2 : Tension obtenue.

Remarque :

D'après la courbe on remarque que la tension varie en fonction de la vitesse du vent et atteint une valeur maximale de 23 V et une valeur minimale de 11 V.

Conclusion

L'essai expérimental de notre éolienne a été plutôt convaincant, notre éolienne fonctionne enfin et génère du courant électrique.

Dans ce chapitre nous avons expliqué comment nous avons effectué l'équilibrage statique de nos pales ce qui a été essentiel au bon fonctionnement de l'éolienne même si nous n'avons pas pu effectuer un équilibrage dynamique le résultat a été concluant.

*Conclusion Générale
et Perspectives*

Conclusion générale et perspectives

La production de l'électricité exige un processus complexe et extrêmement néfaste vis-à-vis de notre planète, en l'occurrence à cause de l'énorme pollution que dégagent les centrales électriques. C'est pour cela qu'aujourd'hui nous sommes honorés de vous présenter notre projet de fin d'étude qui n'est autre que la réalisation d'une micro éolienne à axe horizontal qui permet de créer aussi de l'électricité mais de manière totalement propre et sans danger pour la terre en utilisant des énergies renouvelables et naturelles.

Nous sortons de cette étude avec la certitude que les éoliennes, de par leurs fiabilités et leurs faibles coûts d'entretien doivent remplacer les centrales électriques, d'autant plus que les terres utilisées pour l'installation d'éolienne ne se détériorent pas et reste en outre disponibles à but agricole par exemple, mais malheureusement les hautes autorités ne sont pas encore décidées à adopter cette nouvelle technologie pourtant bénéfique dans tous les points.

Notre mémoire a été réalisé au sein du Hall de technologie de l'université de Bejaïa, ainsi qu'au bureau de l'Association scientifique Lefnar d'El-Kseur. L'objet de ce projet est l'étude et la réalisation d'une micro éolienne à axe horizontale.

Durant la réalisation du projet, nous sommes passés par plusieurs étapes théoriques et pratiques que nous avons résumées en quatre chapitres. En premier nous avons présenté des généralités sur les éoliennes, quelques notions élémentaires et des technologies nécessaires pour capter la fameuse énergie du vent et ce qui nous a permis de comprendre leurs fonctionnements.

Le deuxième chapitre, s'est porté sur la présentation générale d'une pale d'éolienne, la définition des différents types de profils utilisés pour la réalisation des pales tout en étudiant les différentes théories aérodynamiques qui permettent un écoulement optimal de l'air autour de la pale. Nous avons aussi parlé du profil aérodynamique NACA qui se présente comme étant l'un des plus connu et utilisé dans les constructions modernes. Et cela nous a permis la déduction, que pour un bon fonctionnement de notre éolienne, le choix du profil doit se tourner vers un

modèle ergonomique et aérodynamique. Nous avons aussi étudié la théorie générale de Betz qui nous a aidé à déterminer la puissance idéale du rotor.

Le troisième chapitre est la partie la plus perplexe de notre travail, concerne la réalisation de notre éolienne à axe horizontal, d'abord nous avons fait une étude et calculs qui nous ont emmené à déterminer les cordes, épaisseurs enfin toutes les dimensions des profils aérodynamiques **NACA 6409** utilisés. En second lieu, nous avons fait une recherche sur les types de matériaux nécessaires qui ont répondu aux critères suivants : rigidité, solidité, légèreté tout en étant malléable, et nous avons pu définir les caractéristiques des différents matériaux existant et apprendre à s'en servir.

Durant notre conception, nous sommes passés par plusieurs étapes toutes différentes les unes des autres pour arriver à réaliser nos pales, ensuite nous avons entamé la fabrication de notre structure porteuse qui se compose d'un mât rigide et de son support. Et enfin nous avons fixé nos trois pales sur un moyeu qui entraîne un axe à l'aide d'un roulement conique.

Enfin, la partie expérimentale a été réalisée avec succès les résultats de nos essais expérimentaux ont été très convaincants.

Ce projet nous a permis essentiellement de comprendre que sans vertu tel que la patience, l'esprit d'équipe et la précision rien n'aurait pu être fait même en suivant les étapes à la lettre.

En perspectives :

- Simuler numériquement l'éolienne depuis les pales, nacelle jusqu'à la batterie.
- L'usage d'une vraie génératrice au lieu d'un alternateur de voiture.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] H. Camblong – « Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [2] F. Poitiers - « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France 2003.
- [3] Site web: [https://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/- 2583 invention- du-moulin-a-vent.html](https://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/-2583-invention-du-moulin-a-vent.html). Esteban Moulinesard, 22 juin 2020, consulté le 26 juillet 2021.
- [4] RATIARISON Tsiry Vahatriniaina, – « Stockage inertiel de l’énergie éolienne par un système de volant d’inertie », Mémoire de fin d’études en vue de l’obtention du Diplôme de MASTER d’ingénierie, Université d’Antananarivo, 25 février 2015.
- [5] Site web : <https://sites.uclouvain.be/lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/-Generalites/GeneralitesEolienhistorique.htm>, consulté le 26 juillet 2021.
- [6] Site web : <https://www.lavionnaire.fr/MeteoCirculation.php>. Copyright 2010-2020, consulté le 26 juillet 2021.
- [7] Site web : <https://www.lavionnaire.fr/SiteImgMeteo/CirculTerreEnsoleil.png> Matthias Loster 2006, consulté le 26 juillet 2021.
- [8] Site web : Organisation météorologique mondiale, « Calmes équatoriaux » [archive], Glossaire météorologique, Eumetcal, consulté le 26 juillet 2021.
- [9] Site web : <https://www.aquaportail.com/definition-8161-climat-tempere.html>, consulté le 26 juillet 2021.
- [10] Le Gourières (G), Livre énergie éolienne, théorie conception et calcul pratique des Installations, édition EYROLLES, 1980 et 2008.

- [11] Brochures l'énergie éolienne Bibliothèque, Université de Lille Page [147] à [159].
- [12] A. Belguidoum, – «Les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides », Mémoire de Magister en génie Mécanique, Université de Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [13] Z. Boudries – « Etude d'une génératrice asynchrone commandée », Thèse de doctorat, Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, 2013.
- [14] Mr Drihem Amine, – « Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres », Mémoire de fin cycle en Energétique et environnement, Université badji mokhtar , Annaba, 2017.
- [15] A. Bouhedda – « Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne », Mémoire de magister, Université de M. Mammeri, Tizi-Ouzou Algérie, été 2011
- [16] Mr BENALI Tarek, Mr BENOUARET Saâdi, – «Contribution à l'étude d'un Système Eolien Basé sur une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de fin d'études en électrotechnique, Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, 2014.
- [17] Site web :
<https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/352953/puissance-eolienne>, consulté le 28 juillet 2021.
- [18] Site web :
<http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-fonctionnement-d-une-eolienne/>, consulté le 28 juillet 2021.
- [19] Meddour abderrazak, Moussaoui yougourta, – «Étude et mise en œuvre d'une éolienne à axe horizontale (essais expérimentaux et équilibrage) », Mémoire de fin de cycle en Electromécanique, Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, 2020.
- [20] « Global Wind Report 2021 » [archive] [PDF], Global Wind Energy Council (GWEC), 12 avril 2021 P.53.

- [21] GWEC 2019 (Global Wind Energy Council), p. 44.
- [22] « Global Wind Report 2018 » [archive] [PDF], Global Wind Energy Council (GWEC), avril 2019.
- [23] « Global Wind Statistics 2017 » [archive] [PDF], Global Wind Energy Council (GWEC), 14 février 2018.
- [24] Data and statistics - World : Electricity 2018 [archive], Agence internationale de l'énergie, 12 septembre 2020.
- [25] BP Statistical Review of World Energy 2020 - 69th , Edition [archive], BP (voir pages 55 et 61), juin 2020 [PDF].
- [26] Site web :
<https://www.agenceecofin.com/dossier/3004-87778-2020-annee-record-pour-l-eolien-dans-le-monde>, consulté 29 juillet 2021.
- [27] Site web :
<https://www.cder.dz/spip.php?article1442&fbclid=IwAR20PP0-CnuaEWyoif5kE6FPLz-KAxtYdnU9foZWihjKZDkd7bZXQoGdxjE>, consulté le 29 juillet 2021.
- [28] Site web : « A History of the Langley Aeronautical Laboratory, 1917-1958 Chapter 4 With a View to Practical Solutions » [archive], sur history.nasa.gov, consulté le 25 aout 2021.
- [29] « A Short History of Airfoils » [archive], sur www.flyingmag.com.
- [30] M. Sathyajith , – « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006.
- [31] F l a n k e r — Mc Cormick, Aerodynamics of V/STOL flight, Dover Publications, ISBN 0486404609. 17.
- [32] [AILE, PORTANCE, TRAINEE, SILLAGE ?](#) [archive], sur le site air-et-terre.info, consulté 11 avril 2013.
- [33] Mr Mohammed Debbache – « De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites », Thèse de Magister en Construction mécanique, Université Mohamed Khider , Biskra, 2012.

- [34] Mr .Louis-Charles Forcier, – «Conception d'une pale d'éolienne de Grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale », Mémoire de fin d'étude en Génie Mécanique, Université du Québec, 2010.
- [35] T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, et J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6ème ed.:Cepadues, Collection Fact, 2010.
- [36] C. N. EBÉY – « Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet », Université Kinshasa, 2005.
- [37] LADJEDEL Omar, – « Aérodynamique » , Faculté de Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf , Algérie, 2018.
- [38] A.Kati, Y.Idiri , – «Réalisation et caractérisation d'une petite éolienne à axe horizontale », Mémoire de fin de cycle en Electromécanique, Université A. MIRA, Bejaia, Algérie, 2019.
- [39] Site web : [site : mberder.free.fr/fonctionnement.html](http://mberder.free.fr/fonctionnement.html) sujet [Description et fonctionnement d'une éolienne](#), consulté le 24 aout 2021.
- [40] Marc- RAPIN, jean.Marc Noel- « énergie éolienne » CHIRAT mars 2010, Site web : https://bu.univouargla.dz/master/pdf/KADRI_Mohammed_Ayoub.pdf?idmemoire=198, livre , consulté le 20 aout 2021.
- [41] Mr A. Belamri – « Simulation d'une turbine éolienne à axe horizontale », Mémoire de fin cycle en Electromécanique, Université de Badji mokhtar, Annaba, 2018.
- [42] Site web : <https://lenergeek.com/2013/02//04/avec-queles-materiaux-sont-fabriquees-les-pales-des-eoliennes/>, consulté le 20 septembre 2021.
- [43] Zerfa youcef, Reghmit sadek , – « modélisation numérique d'un Alternateur a griffe », Mémoire de master en électrotechnique, Université Saad Dahlab de Blida , Algérie, 2018

- [44] Site web :
<https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/composants-d-un-moteur-electrique/rotor>, consulté en 20 septembre 2021.
Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité Mécanique, 13 novembre 2017.
- [45] Site web :
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Stator#/media/Fichier:Various-Electronic_Components_\(14292852079\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Stator#/media/Fichier:Various-Electronic_Components_(14292852079).jpg), consulté en 2021
Mercado Viagens from brasil – various electronic components, 30 avril 2011.
- [46] Mr Kachebi Youcef, Mr Hatem Said, – « Etude énergétique et Réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance »; Mémoire de fin cycle en électromécanique; Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2013.

Annexes

Annexe A

- **Programme de calculs de la corde des différents profils sur MATLAB :**

```
clc
clear all
close all
c(1)=22;
hx=4;
tn=120/16;
hp(1)=c(1);
for i=1:30
c(i+1)=hp(i)-hx/tn;
hp(i+1)=c(i+1);
i=i+1;
end
c
hp
```

Annexe B

- *Caractéristiques de L'alternateur à griffes « Volvo 20466316 »:*

Voltage [V]: 24

Diamètre [mm]: 73

Courant [A]: 90

Nombre de rainures: 8

Rotation: sens des aiguilles d'une montre (CW)

Résumé

Pour résumer, notre projet a nécessité une étude approfondie du fonctionnement de l'énergie du vent, nous sommes persuadé que cette énergie est la meilleure à utiliser comme remplaçante des énergies fossiles dans la production d'électricité, parce-que tout d'abord, cette énergie est inépuisable mais aussi respectueuse de l'environnement et elle ne nécessite pas grand-chose pour être exploitée, des éoliennes suffisent à générer de l'électricité grâce à leur technologie qui transforme la force du vent en force motrice qui à son tour est transformée en électricité, pour ce faire, l'éolienne requière néanmoins une étude météorologique et topographique avant son installation. Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un aérogénérateur.

Avant de commencer la réalisation de notre éolienne à axe horizontale nous avons étudié les différents types de profils de pales disponibles et nous en sommes arrivé à choisir le profil NACA 6409.

Une autre étude a été nécessaire, celle des matériaux adéquats pour la réalisation des pales qui répondent aux critères suivants : rigidité, légèreté, malléabilité, faible coût. Ce qui nous a mené à choisir des matériaux composites tels que de la fibre de verre et du polystyrène qui se sont montrés parfaitement adéquats à la réalisation des pales.

Mots-clés : Eolienne – Energie – Electricité – NACA 6409 – Pales.

Abstract

In summary, our project required an in-depth study of the operation of wind energy, we are convinced that this energy is the best to use as a replacement for fossil fuels in the production of electricity, because, first of all this energy is inexhaustible and also respectful of the environment and it does not require much to be operated, wind turbines are sufficient to generate electricity thanks to their technology which transforms the force of the wind into driving force which in turn is transformed into electricity, However to do this the wind turbine require a meteorological and topographic study before its installation. The work presented in this thesis relates to the study and construction of a wind turbine.

Before starting to build our horizontal axis wind turbine, we studied the different types of blade profile available and we ended up choosing the NACA 6409 profile.

Another study was necessary that of suitable materials for the realization of the blades which meet the following criteria: rigidity, lightness, malleability, low cost. This led us to choose composite materials such as fiberglass and polystyrene which proved to be perfectly adequate for the production of the blades.

Key words : Wind turbine – Energy – Electricity – Naca 6409 – Blade