N° d'ordre : ……FS / UMBB / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès

Faculté des Sciences et de l'ingénieur
Département de génie mécanique

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de

MASTER

En Modélisation et Simulation en Mécanique

Présenté et soutenu par

BENYAHIA OUAHIBA

Thème

Analyse des performances d'éoliennes sur un Banc d'essai ; Simulation sous ANSYS et SolidWorks.

KARI Djamel Eddine	MA	
BOUZIANE Abdelkader	MA	Président
BOUDIEB Djamel	MA	Promoteur
MOHAMMDI Kamal	PR	
CHALA Moussa	MA	

DEDICACE

Je dédie ce travail

A mon père Rachid que dieu ait son âme dans son vaste paradis

A ma chère mère qui m'a tout donnée

A mon mari Mennad

A ma sœur Hania

A mes frères Saadi et Feth -Eldin

A mon amie yasmine

A toute ma famille

A toutes mes amies

Ouahiba

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu pour tout le courage et la force qu'il m'a donné pour achever ce travail.

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire de modélisation et simulation en mécanique du département de génie mécanique de faculté des sciences et de l'ingénieur sous la direction de Mr BOUDIEB Djamel.

Je le remercié vraiment d'avoir proposé et rédigé ce travail. Je lui suis reconnaissante pour ces conseils judicieux, pour sa patience et sa disponibilité, veuillez monsieur, accepter l'expression de mon profond respect.

Merci à toute ma famille et surtout ma mère, je la remercie pour son soutien permanent

Je remercie le directeur de laboratoire le professeur MOHAMMEDI.K pour ses agréables conseils et aides.

Je remercie Mr BOUZIANE. A pour m'avoir fait l'honneur de présider notre jury.

Mes remerciements vont également à l'égard Mr KARRI.D et CHALA.M d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes reconnaissances et mes vives remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de cette expérimentale on site :

Mr MOHAMMEDI et toute L'équipe de laboratoire de modélisation et simulation en mécanique

Mr FERHAT IBRAHIM Mr YAMANNI et Mr ZEBOUDJ pour leurs encouragements et conseils.

Je n'oublierai jamais l'aide offerte par Mr KARI, en mettant à ma disposition tout le matériel nécessaire.

Nombreuses sont les personnes qui m'ont soutenu, ma famille, mes amies, je ne peux tous les citer, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Table de matières

Chapitre I :Etat de l'art.

Introduction 1
I.1. Historique 2
I.2. Définition 3
I.3. Classification des éoliennes 3
I.3.1. Eoliennes a axe horizontale 3
I.3.1.1. Les éoliennes lentes 4
I.3.1.2. Les éoliennes rapides 4
I.3.1.3. Éoliennes à axe horizontal Amont 5
I.3.1.4. Éoliennes à axe horizontale aval 5
I.3.2. Eoliennes à axe vertical 7
I.4. le principe de fonctionnement d'une éolienne 8
I.5. Choix d'une éolienne 10
I.6. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde 15
1.6.1 En Europe 15
1.6.2. En Amérique 16
1.6.3 En Afrique 17
I.7.Conclusion 19

Chapitre II : L'énergie éolienne en Algérie

II.1. Aperçu 20
La puissance éolienne 21
II.2.Le programme algérien de développement des énergies renouvelables 22
II.3.L'énergie éolienne dans le sud algérien 22
II.3.1 Rendement électrique 23
II.3.2 Potentiel éolien du grand Sud 23
II.3.3 La quantité d'électricité générée 25
II.4. Gisement du vent en Algérie 25
Qu'est-ce que Météonome? 28

II.5.Résultats et discutions 29
II.6.Conclusion 31

Chapitre III: Cadre théorique et élaboration des hypothèses

Introduction 32
III.1.Les performances d'une éolienne 32
III.1.1.Distribution du vent 32
III.1.2 Théorie de Betz et coefficient de puissance 32
III.1.3 Puissances générées par une turbine éolienne 34
III.1.4. Courbes de performances 34
III.1.5. Zones de fonctionnement 35
III.2. Paramètres, caractéristiques et géométriques des pales 36
III.2.1.Géométrique 36
III.2.2.Désignation d'un profil 36
III.2.3. Quelque types de profils NACA 38
III.2.4. Corde 38
III.2.5. Angle d'attaque et de calage et vrillage 38
III.2.6. Coefficients de portance et de trainée 39
III.2.7. Rapports des paramètres caractéristiques 40
III.2.8. Distribution de la corde 40
III.3. Equation gouvernantes : 41
III.3.1. Equation de continuité 42
II.3.2.Equation de quantité de mouvement suivant x 42
III.4. Le modèle de turbulence 42
III.4.1. Modèle (k-$\mathcal{E}$) 42
III.4.1.1. Equation modélisée de K 42
III.4.1.2. Equation modélisée de $\mathcal{E}$ 43
III.4.2. Modèles des constantes 44
III.4.3. Nombre de Mach : 44
III.4.4. Nombre de Reynolds 44
III.5.Conclusion 45

Chapitre IV : Etude et conception sous logiciels « Solide Works ; Ansys

Introduction 46
IV.1.Composition de BANC d'essai 46
IV.1.1 .Ventilateur 47
IV.1.2. Eolienne 48
IV. 1.3. Multiplicateur de vitesse 50
IV.1.4. Génératrice de courant à aimant permanant 51
IV.2. Équipement de mesure 51
IV.3.Simulation et résultat 53
IV.3.1. Description 53
IV.3.2.Profil NACA-4412 53
IV.4.Simulation sous ANSYS 54
IV.4.1. Construction de la géométrie 54
IV.4.2. Génération de maillage 55
IV.4.3. Manipulation sur CFX 57
IV.5.Résultat et interprétation 58
IV.6.Manipulation 60
IV.6.1. Caractéristiques géométriques des pales 61
IV.6.2 .Nombres et le matériau des pales 61
IV.7. Résultat et comparaison 65
IV.8. Conclusion Générale……...68

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale…….. 6

Tableau I-2 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical…….. 8

Tableau I.3. Les avantages et les inconvénients des Alternateurs à aimants permanents…… 13

Tableau I.4. Les avantages et les inconvénients des Alternateurs à inducteur bobiné……. 14

Tableau I.5. : Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh)…… 17

Tableau II-1 : Le Classement des vitesses moyennes annuelles du vent……. 26

Tableau II-2 : Carte des Vents de l'Algérie (Caractéristiques des sites et stations) Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M……. 27

Tableau II-3 : La vitesse du vent dans quelques zones en Algérie …… 30

Tableau III-1 : Coefficients du modèle K-$\mathcal{E}$ standard……. 44

Tableau IV-1 : Caractéristiques du profil NACA 4412…….. 44

Tableau IV-2 : Paramètres de la simulation.……. 49

Tableau IV.3.La fréquence en fonction de la vitesse ……. 61

Tableau IV.4.Six «6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°…… 62

Tableau IV.5.Six«6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 45 °…… 62

Tableau IV.6.Six «6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 65°…… 62

Tableau IV.7.La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse…… 62

Tableau IV.8. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°…… 63

Tableau IV.9. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 45°…….. 63

Tableau IV.10. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 65°…… 63

Tableau IV.11.La puissance des déférents angles d'attaques…… 64

Tableau IV.12. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°…… 65

Tableau IV.13. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 45°…… 65

Tableau IV.14. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 65°…… 65

Tableau IV.15.La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse…… 65

Tableau IV.16. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°…….. 66

Tableau IV.17. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 45°……. 66

Tableau IV.18. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 65°…… 66

Tableau IV.19.La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse…… 67

Liste des figures

Figure I.1. Classification des éoliennes.....3

Figure I.2. Eolienne à axe horizontal.....4

Figure I.3. Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont.....5

Figure I.4. Schéma d'une éolienne a axe horizontal en aval.....6

Figure I.5. Eolienne de Darrieus.....7

Figure I.6. Principaux organes d'une éolienne.....9

Figure I.7. Puissance éolienne installée annuelle mondiale……..…….16

Figure II.1. Eolienne de100kWdeGrandVent.....20

Figure II.2. Eolienne a axe horizontal (Adrar). 21

Figure II.3. Moyennes mensuelles des vitesses du vent du site d'Adrar……. …….24

Figure II.4. Tracé de la carte des vents à10 mètres d'altitude.....26

Figure II.5. Interface de logiciel Méteonome.....29

Figure II.6. Graphe de variation de vitesse de vent dans les déférentes locations (m/s).....30

Figure III.1.Variation de la puissance en fonction de la vitesse vent.....32

Figure III.2. Variation de l'écoulement autour de la turbine.....33

Figure III.3. Coefficient de puissance des différents types d'éolienne.....34

Figure III.4. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....35

Figure III.5. Profil d'une pale à partir d'une vue en coupe……..……..... 36

Figure III.6. Les sortes de profils.....37

Figure III.7. Quelque type de profils NACA ……..…. 38

Figure III.8. Angles définis à partir de la corde du profil.....39

Figure III.9. Portance et trainée appliquée au centre aérodynamique. 40

Figure III.10. Triangle de vitesses.....45

Figure IV.1. Le banc d'essai de notre éolienne. 46

Figure IV.2. Banc d'essai sur logiciel SW 47

Figure IV.4. Image de ventilateur sur logiciel SW..... 48

Figure IV.6. Une hélice sous le logiciel Solide Works 49
Figure IV.7. La pale de l'éolienne..... 49
Figure IV.8. La pale de l'éolienne sur logiciel SW 50
Figure IV. 9. multiplicateur de vitesse 50
Figure IV.10. Multiplicateur de vitesse sur logiciel SW 51
Figure IV.11. Une génératrice 51
Figure IV.12. Un anémométrie..... 52
Figure IV.13. Multimètre 52
Figure IV.14. Profil NACA 4412. 54
Figure IV.15. Interface de logiciel ANSYS 54
Figure IV.16. Interface de la géométrie de logiciel ANSYS 55
Figure IV.18. Maillage du profil NACA4412 dans le volume de contrôle 56
Figure IV.19. Vue élargie du maillage du profil NACA4412 dans le volume de contrôle 56
Figure IV.20. L'étape maillage ver l'étape CFX..... 57
Figure IV.21. Les Paramètres de la simulation 58
Figure IV.23. Distribution de pressions sur le profil NACA 4412 pour un vent de 6m/s 59
Figure IV.24. Écoulement du vent sur le profil NACA 4412..... 59
Figure IV.25. Graphe de fréquence en fonction de la vitesse..... 61
Figure IV.26. Graphe de trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65° 62
Figure IV.27. Graphe de trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65° 63
Figure IV.28. Graphe de trois «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°..... 64
Figure IV.29. Graphe de trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°..... 65

Liste des Symboles et Abréviation

Symbole	Unité	Désignation
C_P	-	Coefficient de puissance
F_a	N	Force axiale exercée sur le rotor
F_{um}	N	Force tangentielle exercée sur le rotor
c	m	Corde du profil de pale
C_L	-	Coefficient de portance
C_D	-	Coefficient de trainée
λ	-	Vitesse spécifique
α	°	Angle d'attaque
V	m/s	Vitesse axiale du vent dans l'éolienne
U	m/s	Vitesse tangentielle du déplacement de l'aubage
W	m/s	Vitesse relative du déplacement de l'aubage
R	m	Rayon d'une pale (du centre du rotor à l'extrémité de la pale)
A	m^2	Surface balayée par les pales
ρ	kg/m^3	Masse volumique de l'air
R_h	m	Rayon du moyeu
R_t	m	Rayon au sommet de la pale
N	RPM	Vitesse de rotation
Z_b	-	Nombre de pales
ω	rad/s	Vitesse angulaire de rotation de la pale du rotor
P_s	Watt	Puissance à l'arbre du rotor
η_m	-	Rendement mécanique
η_A	-	Rendement à l'alternateur

INTRODUCTION GENERALE :

Les énergies renouvelables sont des énergies exploitées par l'homme, de telle manière que leurs réserves ne s'épuisent pas, en d'autres termes sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. [1]

Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et biomasse. [2]

Ceci, nous incite à porter un intérêt particulier à l'exploitation de ce type d'énergie renouvelable notamment l'énergie éolienne.

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté, de tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité. [3]

Dans ce contexte on a divisé notre manuscrit en quatre (04) chapitres

En premier chapitre on a résumé la synthèse bibliographique qui traite des généralités sur l'énergie et le système éolien, un petit tour sur l'historique des éoliennes et le chois d'un éolienne.

En deuxième chapitre on a parlée sur l'énergie éolienne avec un gisement de vent pour quelque zone en Algérie sur logiciel Méteonome.

En troisième chapitre en a cité quelques notion aérodynamiques, en second chapitre nous nous somme intéresser a la description des éoliennes ainsi qu'à leurs performances et la situation algériens.

Et le dernier chapitre partie expérimentale englobe à son tour qui sera résumé pour les calculs des pales éoliennes ainsi que la simulation et la manipulation.

Le document est finalisé par une conclusion générale.

Chapitre I : Etat de l'art.

Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes a pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur a axe vertical ou à axe horizontale) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes, outres les caractéristiques mécaniques de l'éolienne.

L'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones, les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion aux réseaux doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible. [4]

I.1. Historique

Les premiers exemples machines permettant l'extraction de la puissance contenue dans le vent ont été trouvés en Perse vers 200 av. JC et ont été introduites dans l'empire romain vers 250 AP.JC. Les premiers moulins à vent ont été construits à Sistan en Afghanistan au7éme siècles. Ils possédaient un axe de rotation verticale et entre 6et12 pales rectangulaires .ils étaient principalement utilisés pour moudre le grain et dans l'industrie de la canne à sucre.

Vers 1180, le développement de l'agriculture entraina une utilisation massive des moulins à vent en Europe de l'ouest.

Aux États-Unis, le développement de l'éolienne pour pomper l'eau a été un facteur déterminant permettant l'exploitation de larges étendues ne possédant pas d'accès facile à l'eau nécessaire aux locomotives à vapeur dans les puits.

L'éolienne multi-pale placée au sommet d'une tour en treillis bois ou acier fut pendant de nombreuses années, un trait majeur du paysage de l'Amérique rurale.

L'éolienne moderne commença à être développée au début des années 1980.

Depuis la technologie n'a cessé de s'améliorer.de nombreuses recherches sont actuellement en cours pour permettre à l'énergie éolienne de pouvoir jouer le rôle qui l'attend dans les prochaines années. [5]

I.2. Définition

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice.il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies .premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moudre le grain ou à pomper l'eau.

Il est aussi possible de rattacher l'hélice a un générateur transforment l'énergie mécanique en une énergie électrique .La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée les pales et de la densité de l'aire.

Il faut pour produire de l'électricité an apport minimal du vent d'environ 12-14Km /h et des vents de 50-60 Km/h pour produire à pleine puissance.

Afin d'éviter d'abimer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90Km/h.

Eolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en :

Energie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.

Energie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage. [6]

I.3. Classification des éoliennes

On classe les éoliennes, en général, selon l'axe de rotation:[6]

Figure. I.1.: Classification des éoliennes. [6]

I.3.1. Eoliennes a axe horizontale

La plupart des éoliennes modernes utilisent ce principe avec un nombre de pales variant.

On les distingue par le nombre de leurs pales : quadri pale, tripale, bipale,……etc, il existe même des mono pales, on distingue :

I.3.1.1. Les éoliennes lentes

Ce type d'éolienne possède un grand nombre de pales, cela facilite évidemment le démarrage grâce à son couple élevé. Mais cela constitue un inconvénient lorsque la vitesse s'accroit à cause des vibrations.

Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées.

Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage.

I.3.1.2. Les éoliennes rapides

À l'inverse de l'éolienne lente, les éoliennes rapides doivent parfois être lancées par un moteur électrique ; cependant, une fois lancées elles rendent l'énergie consommée au démarrage.

Si la vitesse du vent est élevée les vibrations, sont trop importantes et risque briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêter a une vitesse de l'ordre de 20 a25m/s.

Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité.

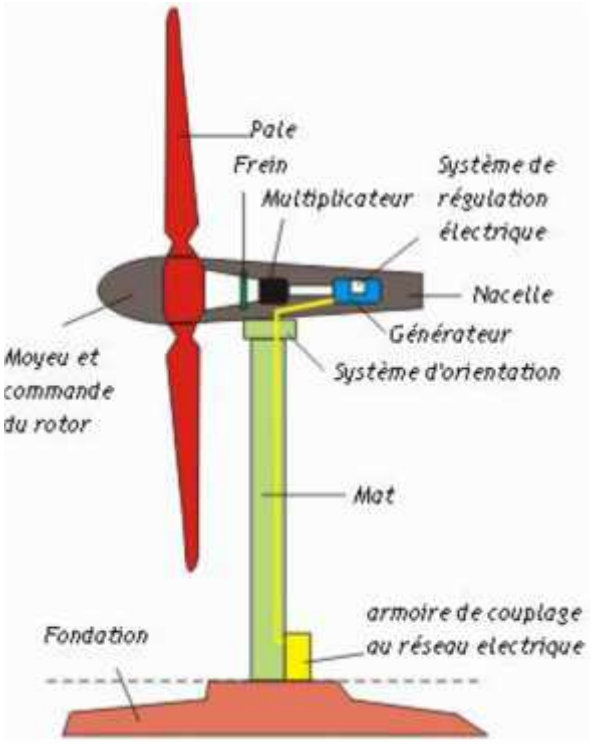

Figure I.2. Eolienne à axe horizontal. [6]

I.3.1.3. Éoliennes à axe horizontal Amont

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle.

Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.

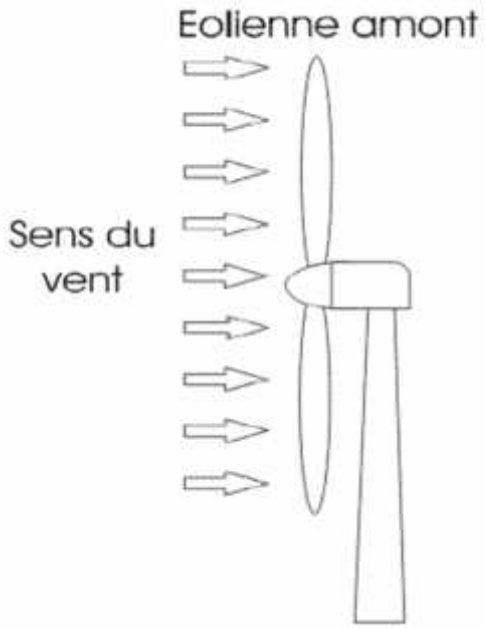

Figure. I.2. Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont. [6]

I.3.1.4. Éoliennes à axe horizontale aval

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle .Le rotor est flexible auto orientable .La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les forts puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontale doivent toujours être orientées selon la direction du vent, pour cela il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

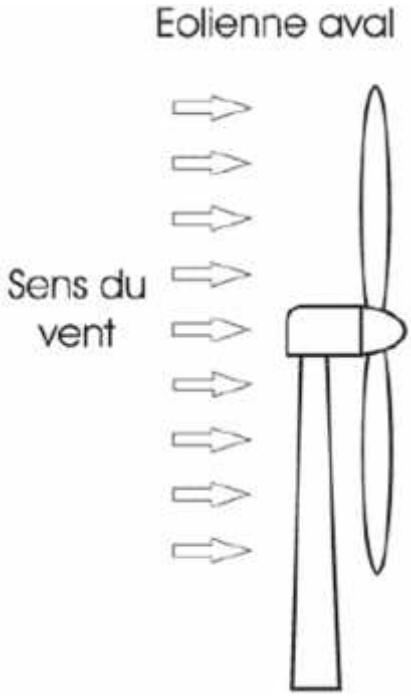

Figure I.4. : Schéma d'une éolienne a axe horizontal en aval. *[6]*

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale sont présentés dans le tableau ci –dessous :

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale. [7]

Avantages	Inconvénients
• une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes a axe vertical. • Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. • Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.	• Cout de construction très élevé. • L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gène l'intervention en cas d'incident.

I.3.2. Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical .il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent sans besoin de mécanisme d'orientation.

Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type a axe horizontal. Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieuset de Savonius.

Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité.

Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind, les éoliennes à axe vertical ne sont pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leurs simplicité est attrayante.

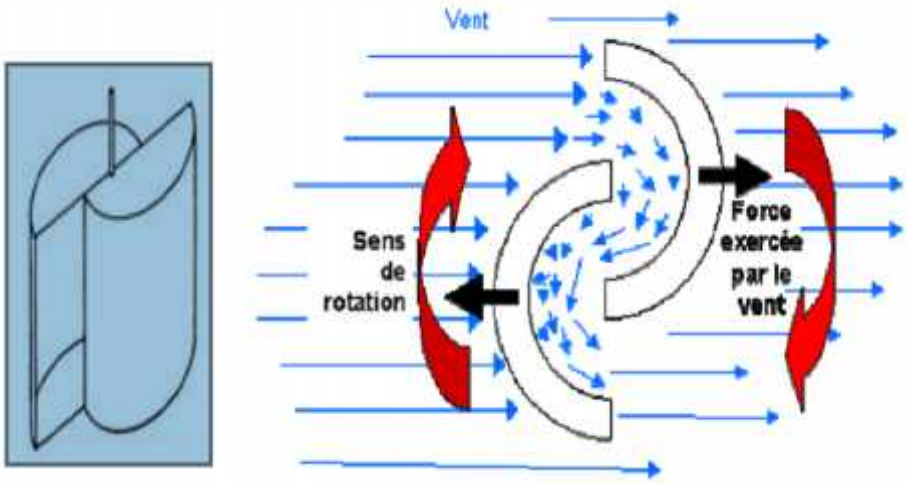

Figure I.5. Eolienne de Darrieus. [6]

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical sont présentés dans le tableau ci –dessous :

Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical. [7]

Avantages	Inconvénients
• La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. • Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor. • Sa conception est simple, robuste et nécessaire peu d'entretien.	• Elles sont moins performances que celles à axe horizontal. • La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief. • Leurs implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au –dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne a tour.

I.4. le principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne .Dans la nacelle, l'arbre principal entraine un alternateur qui produit l'électricité.

La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500tours/min, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissances ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 a1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat, jusqu'à un niveau de 20ou30KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public .La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15MW de capacité, le niveau de tension

de raccordement est, en France généralement de 20 K V. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 a90 KV voire même 225KV.

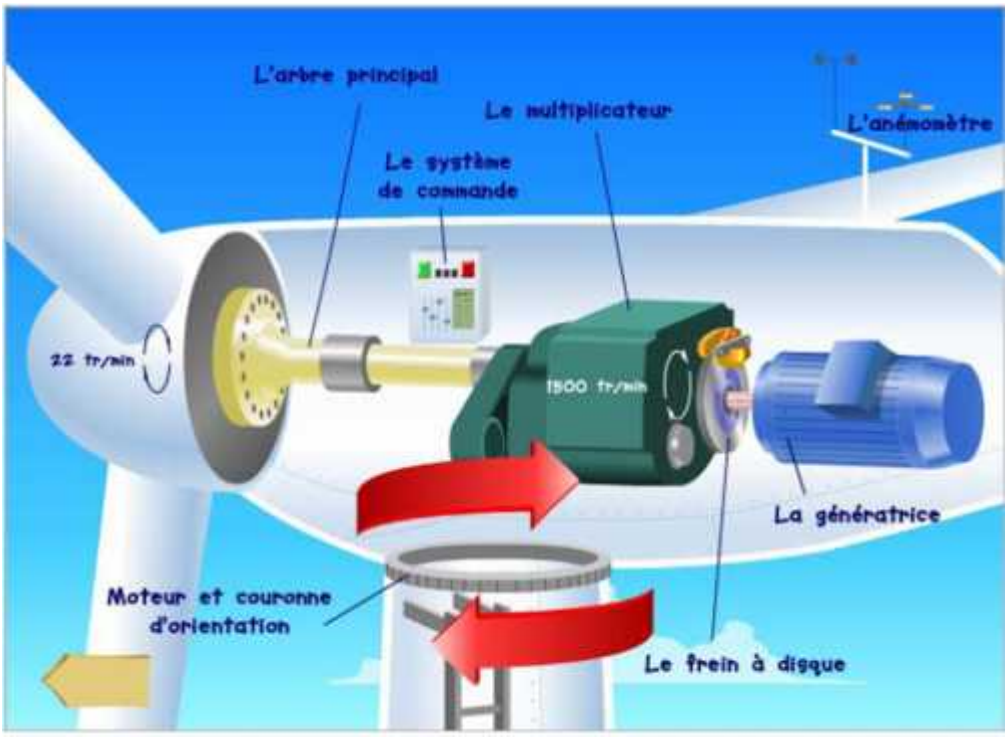

Figure I.6. Principaux organes d'une éolienne. [6]

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de de10 a15 Km/h. Et au-delà de 90Km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90Km/h est généralement faible. Et si les éoliennes fonctionnent dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraineraient une usure prématurée de leurs équipements.

Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour des vents, plus modérés.

Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 Km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants .la puissance d'une éolienne classique est de 1 a1, 5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 a3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà tester par les constructeurs. [6]

I.5. Choix d'une éolienne

1. Puissance nominale

Une éolienne produit une quantité de courant variable, fonction de la vitesse du vent. Elle atteint son maximum de performance à une vitesse de vent appelée puissance nominale Cette vitesse est exprimée en watts (W). La puissance disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. . [4]

2. Vitesse nominale du vent

C'est la vitesse du vent (exprimée en m/s, km/h ou mi/h), à laquelle l'éolienne atteint sa puissance nominale. Bien que la plupart des fabricants fixent la vitesse nominale de vent autour de 40 à 50km/h (25 à 30 mi/h), il n'y a pas de standard établi. Certaines éoliennes atteignent leur puissance nominale à des vitesses de vent très élevées.

3. Vitesse nominale de rotation

Nombre de tours par minute (tr/min) effectué par le rotor à sa puissance nominale. Plus le rotor est petit, plus il tourne vite.

4. Vitesse d'amorçage

Vitesse du vent à laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie. Il n'y a pratiquement pas de puissance utilisable pour des vents soufflant à moins de 10 km/h.

5. Diamètre du rotor

Le rotor sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. La puissance fournie par une éolienne est toujours proportionnelle à la surface balayée par les pales.

6. Nombre de pales

Le nombre de pales influence directement l'efficacité du rotor.

- Plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor est grand, l'éolienne tourne avec un vent plus faible.
- Mais, pour des raisons aérodynamiques, plus le nombre de pales est réduit plus grande est l'efficacité de conversion du rotor.

7. Profil aérodynamique de la pale

Les fabricants utilisent deux types de profils :

- Un profil traditionnel ressemble à celui d'une aile d'avion vue en coupe : courbé sur un côté et plus ou moins plat sur l'autre.
- Le profil cambré se caractérise par le fait que ses deux côtés suivent une ligne plus ou moins parallèle, il est facilement formé par extrusion.

8. Poussée latérale

Poussée horizontale maximale exercée au sommet de la structure par l'effet du vent sur le rotor. Elle s'exprime en livres (lb) ou en Newtons (N).

Cette donnée sera précieuse au moment de choisir la structure, le système de haubanage et la conception des ancrages de la tour.

9. Disposition de régulation

Ce sont les dispositifs qui protègent l'éolienne contre les vents forts et la survitesse du rotor. Ces dispositifs s'avèrent nécessaires pour deux raisons : d'abord pour protéger le générateur contre la surproduction et la surchauffe, ensuite pour éviter que l'éolienne ne vole en pièces par vents forts.

Ces mécanismes de régulation sont classés en trois catégories :

- Décrochage aérodynamique
- Réduction de la surface effective balayée par le rotor ;
- Modification de l'angle de calage des pales.

Le décrochage aérodynamique est, en fait, une caractéristique inhérente à tout profil aérodynamique. Pour une vitesse de rotation donnée, quand le vent augmente, l'angle d'attaque du vent "vu" par la pale en rotation augmente aussi et amène éventuellement la pale à "décrocher".

La réduction de surface

Pour réduire la surface balayée par le rotor, il s'agit d'augmenter l'angle d'attaque des pales par rapport à la direction du vent soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en le faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est effacé ainsi vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement.

Modifier l'angle de calage des pales

Au moment des variations de vitesse, on utilise la force centrifuge produite par la rotation du rotor pour changer l'angle de calage des pales. Plus les pales tournent vite, plus leur angle de calage augmente et elles entrent éventuellement en décrochage.

10. Vitesse de régulation

C'est la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé.

11. Mécanismes d'arrêt

Dispositif permettant d'immobiliser le rotor. Il est très pratique dans les cas où l'on veut effectuer des réparations. Il existe plusieurs méthodes :

- Actionner un treuil, situé au bas de la structure, pour ramener le safran perpendiculairement au rotor.
- Dans le cas de l'alternateur à aimants permanents, le dispositif de freinage consiste à court-circuiter par un interrupteur les phases, ce qui a pour effet de ralentir puis d'arrêter le rotor.

12. Masse nette au sommet de la tour de support

Masse totale (en kg) supportée par la tour : il s'agit donc de la masse de la nacelle complète qui comprend alors le rotor, le générateur, le safran, l'arbre de transmission et les mécanismes de régulation.

13. Option maritime

Option que le fabricant offre pour certains modèles et qui permet de protéger l'éolienne contre les effets d'un climat marin. L'utilisation de matériaux et de traitements spéciaux protège l'équipement contre l'air salin, source d'une corrosion rapide des pièces.

14. Types de machine électroniques

Peut retrouver trois types de machines électriques sur une éolienne : l'alternateur à aimants permanents, la génératrice à courant continu (c.c.) et l'alternateur sans balai.

- **Alternateurs à aimants permanents**, les aimants en tournant (rotor) créent une variation de champs dans la bobine (stator) ce qui induit un courant, récupérable à la sortie de la bobine.

- **Le champ magnétique est au centre de la bobine.**

Ce courant est un courant alternatif qu'il faut redresser et réguler.

Tableau I.3. Les avantages et les inconvénients des Alternateurs à aimants permanents. [4]

Avantages	**Inconvénients**
• Coût faible, les aimants sont moins chers que les bobinages de cuivre • Entretien réduit • Freinage dynamique possible par interrupteur • Poids faible	• Les alternateurs à aimants permanents développent un flux magnétique constant quelle que soit la vitesse de rotation du rotor. • l'alternateur n'est performant qu'à un seul point de la courbe de puissance, lorsque le vent a atteint sa vitesse de régulation. • Couple de démarrage nécessaire important.

- **La génératrice à courant continu (c.c.)** Le rotor composé d'enroulements de cuivre autour d'un noyau en fer qui en tournant au centre d'un champs magnétique induit un courant dans la bobine du rotor. Des balais en graphite frottent sur le rotor pour « capter » le courant induit.

- **Le champ magnétique est autour de la bobine.**

Le champ magnétique autour du rotor peut être constitué d'une bobine auto alimentée

Afin de résoudre ce problème, les fabricants qui utilisent des alternateurs à aimants permanents ont conçu leurs pales de façon à obtenir plus de couple au démarrage pour que le rotor puisse démarrer par vents faibles.

Tableau I.4. Les avantages et les inconvénients des Alternateurs à inducteur bobiné. [4]

Avantage	**Inconvénients**
• Facilité de démarrage par vents faibles. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a presque pas de flux magnétique développé par l'inducteur, donc une très faible résistance au mouvement pour l'armature en rotation. • Le flux magnétique augmente au fur et à mesure que les vents augmentent et ce jusqu'à ce que le rotor atteigne sa vitesse nominale	• Le coût • L'entretien • Le poids

- **Alternateurs sans balais**

Ils possèdent les avantages des deux autres types de machines. Ils ont un inducteur bobiné et n'ont pas de balais. Leur courbe de puissance est similaire à celle d'une génératrice c.c. Cependant, comparativement aux génératrices c.c. et aux alternateurs à aimants permanents, les alternateurs sans balais sont plus compliqués.

- **Coût de l'éolienne**

C'est le prix de vente de la machine éolienne proprement dite, sans la tour.

Attention, dans la plupart des cas, le coût des contrôleurs n'est pas compris, à moins d'indication contraire. Chaque application éolienne requiert un système de commande approprié.

- **Bruit**

L'intensité du bruit acoustique causé par une éolienne suscite souvent beaucoup d'inquiétudes.

Lorsque le vent souffle, le rotor émet une sorte de sifflement, un peu comme le fait le vent à travers les arbres et les bâtiments.

Le bruit émis par l'éolienne peut être d'origine mécanique ou aérodynamique.

- **Quelques valeurs**

- Moyenne sur l'année en mouillage venté:12 volts*24 heures*2 ampères = de l'ordre de 500 Wh.
- Consommation d'une ampoule d'éclairage du carré :10w.
- Consommation d'un pc portable (150w environ)

▪ **Remarques**

Les modèles les moins performants sont ceux qui tournent le plus vite.
La tripale vibre moins, a un rendement acceptable et les technologies actuelles en font un très bon choix.

I.6. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde peut être récapitulée comme suit : [6]

1.6.1 En Europe

- **L'Allemagne**, est le premier pays au monde dans ce domaine et qui possède la plus grande capacité installée (18.400 MW), et obtient maintenant 6 pour cent de son électricité de l'énergie du vent. Ce chiffre devrait passer à 20% d'ici 2020.

Selon l'Union fédérale de l'énergie éolienne (BWE), les exportations allemandes de turbines éoliennes ont augmenté de 55% en 2005 par rapport à 2004.

En Allemagne, l'éolien a permis de réduire les émissions de CO2 de 24,6 millions de tonnes.

La R&D dans le domaine de l'énergie éolienne est particulièrement développée, l'Allemagne dispose actuellement de plusieurs Centres de recherche spécialisés.

- **L'Espagne**, occupe la deuxième place avec plus de 10.000 mégawatts de capacité, elle obtient 8 % de son électricité du vent. Au courant des dernières années, l'industrie éolienne espagnole a connu une croissance remarquable, en combinant des efforts dans le domaine de transfert technologique et achat de licence avec la recherche et développement locale.

Les entreprises espagnoles Gamesa et Ecotecnia développent actuellement un grand projet de recherche industriel subventionné par le Gouvernement et dont l'objectif principal est de maintenir l'Espagne à l'avant-garde de la technologie éolienne.

Windlider 2015 est un grand projet de fabrication de nouvelles machines de grande puissance pour dominer le marché éolien à partir de 2015.

- **Le Danemark** est classé cinquième dans le monde en matière de puissance installée (3.100 mégawatts), mais occupe la première place mondiale dans un classement relatif par rapport à sa production en énergie électrique, car 20% son besoin d'électricité est assuré par les aérogénérateurs. Le Danemark est aussi le leader mondial dans installations éoliennes offshore, avec 400 mégawatts de capacité existante.

Mondialement, plus de 900 mégawatts de puissance éolienne offshore seraient installée vers la fin de 2006, entièrement en Europe. Grâce à une stratégie claire et efficace, le Danemark ce petit pays scandinave, est devenu aujourd'hui le géant mondial de l'industrie éolienne, occupant 60% du marché mondial

Le chiffre d'affaire global danois, concernant l'industrie éolienne, est de 3 Milliards d'Euros par année. Cinq des dix plus grandes firmes mondiales, productrices de turbines éoliennes, sont danoise.

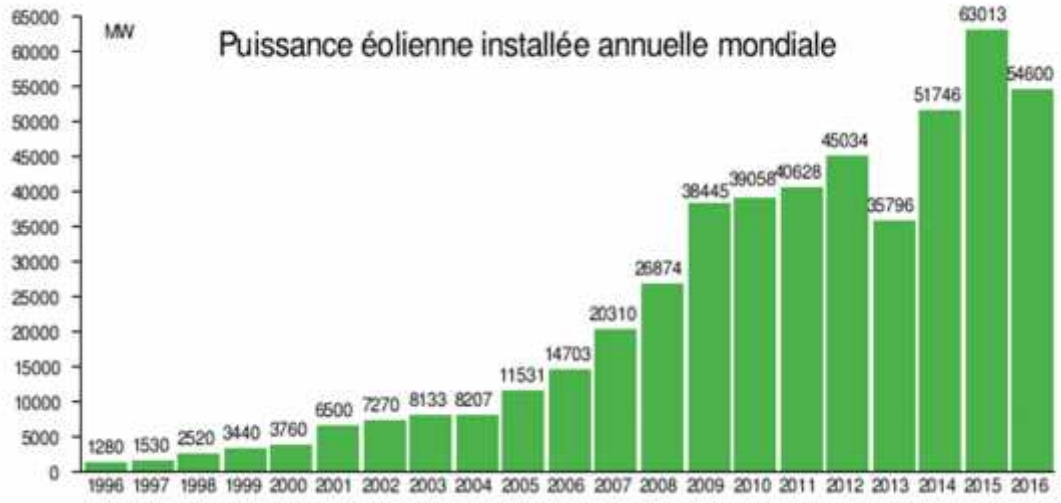

Figure I.7. Puissance éolienne installée annuelle mondiale. [6]

1.6.2. En Amérique

- **Les Etats-Unis** a installé une puissance éolienne d'une capacité de 9.100 mégawatts. L'industrie éolienne américaine a battu un record en installant en 2005 une puissance éolienne de 2.400 mégawatts comparée à 370 mégawatts installée en 2004 et 1.700 mégawatts en 2003. Cette augmentation inattendue est due principalement à des mesures fiscales incitatives.

- **Au Canada** la capacité éolienne installée est de 680 mégawatts à la fin de 2005, elle est supposée augmenter à 1.200 mégawatts vers la fin de 2006. Le gouvernement fédéral de Canada vise l'installation de 4000 mégawatts d'énergie du vent vers 2010.

Les pays asiatiques ont installé une puissance éolienne d'environ 7000 mégawatts pour produire de l'électricité. L'Inde avec 4400 mégawatts de capacité, est classé quatrièmes après l'Allemagne, les États-Unis, et l'Espagne. En Chine, la puissance installée actuellement est de 1260 mégawatts, et commence à se développer grâce à sa nouvelle loi sur les énergies renouvelables. Cette loi offre des incitations fiscales et des subventions à l'industrie éolienne et cible le développement de 30.000 mégawatts de puissance éolienne vers l'année 2010.

Tableau I.5. : Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh)**. [6]**

Pays	1990	2000	2010	2011	2012	2013	2014	*% 2014**	2015p**
États-Unis	3,1	5,6	95,1	120,9	141,9	169,7	183,9	25,6	190,9
Chine	0,002	0,6	44,6	70,3	96,0	141,2	156,1	21,8	185,1
Allemagne	0,07	9,4	37,8	48,9	50,7	51,7	57,4	8,0	88,0
Espagne	0,014	4,7	44,3	42,9	49,5	55,6	52,0	7,3	48,4
Inde	0,03	1,7	19,7	24,5	30,1	33,6	37,2	5,2	41,4
Royaume-Uni	0,01	0,9	10,2	15,5	19,7	28,4	32,0	4,5	38,0
Canada	-	0,3	8,7	10,2	11,3	18,0	22,5	3,1	24,6
France	-	0,08	9,9	12,2	15,0	16,0	17,2	2,4	21,1
Italie	0,002	0,6	9,1	9,9	13,4	14,9	15,2	2,1	14,6
Danemark	0,6	4,2	7,8	9,8	10,3	11,1	13,1	1,8	14,1
Brésil	-	0,002	2,2	2,7	5,1	6,6	12,2	1,7	21,7
Portugal	0,001	0,17	9,2	9,2	10,3	12,0	12,1	1,7	11,9
Total mondial	**3,9**	**31,4**	**341,3**	**435,3**	**522,7**	**636,8**	**717,3**	**100**	**841,2**

1.6.3 En Afrique

Le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, l'Égypte, le Sénégal et la Mauritanie, étudient de près ou réalisent déjà des projets éoliens.

- **L'Algérie**

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau

Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres. Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4 MW en diesel). Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays. Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG).

L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon 2010-2015. Ce chiffre parait ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins.

Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année.

La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande. Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sure et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays.

- **Le Maroc**

Pour réduire sa dépendance énergétique, le Maroc s'est orienté entre autres vers le développement des sources d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne. En effet, le Maroc, par sa situation géographique favorable, dispose d'un potentiel éolien important estimé à environ 6 000 MW

Le Maroc a réalisé en collaboration avec des entreprises européennes plusieurs projets éoliens. Parmi eux le parc éolien de A .Torres près de Tétouan qui contient 84 éoliennes avec

une puissance totale de 50,4 MW destinées à couvrir la consommation de 400.000 habitants et le projet de Cap Sim Essaouira, dont la production est de 60 MW, qui est opérationnel depuis le début 2006.

Un autre projet à Tanger sera achevé, au courant de l'année 2007, et permettrait la production de 140 MW.ONE (l'office national de l'électricité marocain) et l'entreprise espagnole Iberdrola ont signé un accord pour développer de nouvelles fermes éoliennes au Maroc.

Pour l'heure actuelle, c'est le Maroc qui assure la production la plus importante d'énergie éolienne en Afrique.

- **La Tunisie**

Le premier site d'éolien a été réalisé en 2000 à Sidi Daoud, au Cap Bon, avec une capacité de 8,7 mégawatts (MW). Une extension de ce site permettra selon les spécialistes d'atteindre, en 2007, la puissance de 34 MW.

La réalisation de trois nouvelles fermes éoliennes est prévue entre 2008 et 2009. Ce projet aura une capacité totale de 120 MW et permettra une économie de 134.000 Tep (tonnes équivalent pétrole), épargnant par la même, l'émission de 330.000 tonnes de gaz polluants. Suite à cette réalisation la Tunisie occupera le deuxième rang en Afrique avec une puissance totale installée de180 MW.

I.7.Conclusion

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les énergies éoliennes. Nous avons fait la classification des éoliennes avec les avantages et les inconvénients de chaque type. En plus nous avons sites que ment l'éolienne se fonction (principe de fonctionnement).

Enfin nous avons donné un aperçu sur la situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde.

Chapitre II : L'énergie éolienne en Algérie

II.1. Aperçu

La première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique en Algérie, date de 1957 (figure. II-1), avec l'installation d'un aérogénérateur de 100kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. [8]

Figure II. 1. Eolienne de100kWdeGrandVent. [8]

De nombreux autres aérogénérateurs sont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80.

Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performante set, de plus en plus

grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50kW avec un diamètre de 15m en 1989 est aujourd'hui de 7.5MW, avec un diamètre de 127m environ (ENERCON). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6GW en 1996, est passée à 215GW en juin 2011[9].

La puissance éolienne

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Ce pendant, une première ferme éolienne de 10MW de puissance sera implanté à Adrar. Cette ferme de vrai être fonctionnelle en 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260MW à moyen terme [10], pour atteindre 1700MW [11] à l'horizon 2030.Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales. Ce ci étant pour la production d'électricité, qu'en est-il de l'une des premières applications de l'énergie éolienne, à sa voir le pompage d'eau.

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [12]. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.

Figure II. 2. Eolienne a axe horizontal (Adrar). [12]

Plus récemment, le Haut-commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux [13].

Les éoliennes de pompage de l'eau sont-elles mécaniques ou électriques? On peut trouver les deux types. Mais suite aux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, le système aérogénérateur couplé à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4m/s.

Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes mesurées à 10 mètres d'altitude, doivent être supérieures à 6m/s. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être régulière. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant les quelles la vitesse du vent est élevée doit être important, sur l'année.

II.2.Le programme algérien de développement des énergies renouvelables

Le programme national de développement des énergies renouvelables, adopté en 2011 puis révisé en 2015, ambitionne d'atteindre, à l'horizon 2030, une puissance totale de 22000 (MW) dédiés à la seule consommation locale. Il prévoit, pour cela, de mettre en œuvre un large éventail de filières technologiques où le photovoltaïque (PV) et l'éolien se taillent la part du lion avec respectivement 13575 MW et 5010 MW, le reste étant réparti entre le thermo-solaire (CSP), la biomasse, la cogénération et la géothermie. [14]

II.3.L'énergie éolienne dans le sud algérien

Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh) qui sont, après ceux de la géothermie, les plus bas du renouvelable. L'énergie Information Administration (EIA), organisme du Département US de l'Energie, prévoit qu'en 2022 les coûts moyens (en $ de 2015) seront comme suit : [14]

- kWh conventionnel : $0,0726
- kWh géothermique $0,0423
- kWh éolien : $0,0736
- kWh photovoltaïque : $0,1253
- kWh thermo-solaire CSP: $0,239

Ceci dit, il ne faut pas perdre de vue que ces coûts ont été obtenus à l'étranger dans des pays qui maitrisent parfaitement la technologie et où les vents atteignent de grandes vitesses avec des moyennes annuelles dépassant souvent les 9 mètres/seconde (m/s). Le coût de l'éolien sera donc autrement plus élevé en Algérie où les vents sont plutôt modérés avec un maximum annuel moyen ne dépassant pas environ 6 m/s sur l'essentiel du territoire national. Sans compter le manque d'expérience malgré la réalisation récente d'un pilote éolien de 10 MW dans la région d'Adrar.

II.3.1 Rendement électrique

Pour bien comprendre l'importance de la vitesse des vents, il faut savoir que le rendement électrique des éoliennes varie en fonction du cube de la vitesse. Ainsi, lorsque la vitesse double, par exemple de 5 m/s à 10 m/s, la quantité d'électricité produite est multipliée par 8 et non pas par deux. Les coûts du kWh présentés plus haut correspondant à des vents d'environ 9 m/s, il faudrait les multiplier par environ 3,8 pour avoir une idée approximative de ce qu'ils pourraient devenir si les vitesses baissaient au niveau des 6 m/s prévalent dans certaines zones du Sud. A cela pourraient s'ajouter des investissements et des coûts opératoires plus élevés ainsi qu'une durée de vie plus courte dans l'environnement agressif du Sahara. Il faut donc s'attendre, dans cette région, à des coûts du kWh éolien bien plus élevés que ceux du photovoltaïque.

II.3.2 Potentiel éolien du grand Sud

Le potentiel éolien du grand Sud algérien est non seulement modéré mais il se situe à l'intérieur d'un des plus importants, sinon le plus important, gisement solaire de la planète. L'énergie solaire et l'énergie éolienne générant le même produit, en l'occurrence de l'électricité, elles vont se retrouver en compétition et l'une d'entre-elles seulement pourra survivre : celle qui produira le kWh au moindre coût. Le Sud étant le domaine de prédilection du solaire et non pas de l'éolien, celui-ci ne pourra pas normalement s'y implanter. Le seul

argument pouvant être avancé en faveur de l'éolien est que les vents peuvent souffler également la nuit mais il s'agit là d'un phénomène trop aléatoire pour être pris en considération.

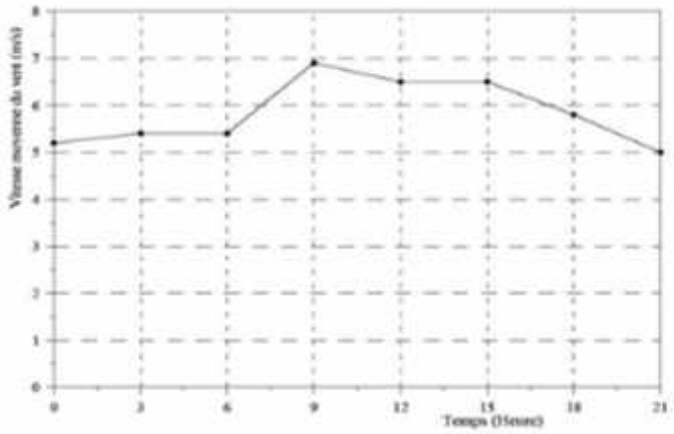

Figure II. 3. Moyennes mensuelles des vitesses du vent du site d'Adrar. [8]

Bien sûr, d'aucuns émettrons des objections en arguant que dans de nombreux pays l'éolien et le solaire coexistent en parfaite harmonie comme en Allemagne par exemple. Effectivement, dans ce pays pionnier qui produit près de 33% de son électricité à partir des énergies renouvelables, l'éolien et le solaire coexistent parfaitement avec respectivement 13,9% et 8,7% du total en 2014. Et pour cause, les domaines de prédilection de ces deux sources d'énergie ne se superposent pas. Celui de l'éolien se situe dans la partie nord bien plus venté mais bien moins ensoleillé que le Sud. C'est donc au nord que se trouve concentrée la quasi – totalité des éoliennes. Par contre, celui du solaire (photovoltaïque) se situe dans le sud du pays beaucoup plus ensoleillé mais beaucoup moins venté. Il s'agit donc de deux activités qui se complètent au lieu d'entrer en compétition car elles couvrent des régions à vocations différentes. C'est ainsi que l'électricité éolienne produite au nord est acheminée vers le sud industriel et gros consommateur pour s'ajouter à la production solaire locale.

En Algérie, la situation est tout autre car les deux domaines se superposent pratiquement partout, ce qui signifie que l'une des deux filières, l'éolien sans doute, y est de trop. Actuellement il existe, depuis juin 2014, un pilote éolien de 10 MW dans la région d'Adrar et un pilote photovoltaïque de 1.1 MW à Ghardaïa ainsi que plusieurs centrales PV plus récentes dans la région d'Adrar et ailleurs.. L'évaluation de leurs performances ne manquera pas d'apporter une confirmation définitive à ce sujet.

II.3.3 La quantité d'électricité générée

Dans cette contribution, la quantité d'électricité générée par l'éolien avait été estimée à 16,19 TWh/an par analogie avec les centrales éoliennes de Tarfaya au Maroc et d'El Ayoune au Sahara occidental mais sans tenir compte de la différence de vitesse des vents qui dépassent les 8 m/s dans ces deux localités comparés à un maximum généralement inférieur à 6 m/s en Algérie.

Il est donc nécessaire de corriger à la baisse les valeurs surestimées de la partie éolienne du programme. Sachant que le rendement électrique varie principalement en fonction du cube de la vitesse du vent, le passage de 8 m/s à 6 m/s réduit le rendement à 42% de la valeur précédemment calculée. Dans ces conditions, le rendement des 5010 MW du programme ne sera plus que de 6,83 TWh/an environ et non pas de 16,19 TWh/an. Cela se répercute sur le rendement électrique total des 220000 MW du programme qui diminue de 46,84 TWh/an à 34,47 TWh/an.

Cette quantité réduite d'électricité ne représentera plus alors que 20,3% de la consommation nationale d'électricité et non pas 27% comme calculé précédemment. Il en résulte que la quantité totale de gaz pouvant être économisée par le projet pendant une durée la vie de 25 ans se réduit de 300 à 210 milliards de m3 environ, soit à peine 3% du futur mix énergétique algérien au lieu de 4%. S'il n'est réalisé qu'à 50%, ce pourcentage ne sera plus que d'environ 1,5% c'est-à-dire un appoint dérisoire. Il serait donc plus correct de parler de transition électrique plutôt que de transition énergétique. Sachant que le projet est prévu dépasser les 100 milliards de $ et que les 210 milliards de m3 de gaz économisés ne rapporteront pas plus de 40 à 50 milliards de $ au prix actuel du million de BTU.

II.4. Gisement du vent en Algérie

En figure 2, est présentée la carte des vitesses moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres au-dessus du sol. Les vitesses obtenues à l'aide de l'interpolation varient de 1 à 6 m/s.

Si on veut définir des classes, suivant leur importance dans la figure, on distingue quatre classes, à savoir:

Tableau II. 1. le Classement des vitesses moyennes annuelles du vent. [15]

V<3.0m/s	classe1
3.0<V< 4.0 m/s	classe2
4.0<V< 5.0 m/s	classe3
5.0<V	classe4

On remarque (voir la figure ci-dessous) que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3à 4m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune).

On distingue plusieurs micros climats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Amenas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s.

Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni Abbés présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (<3 m/s)

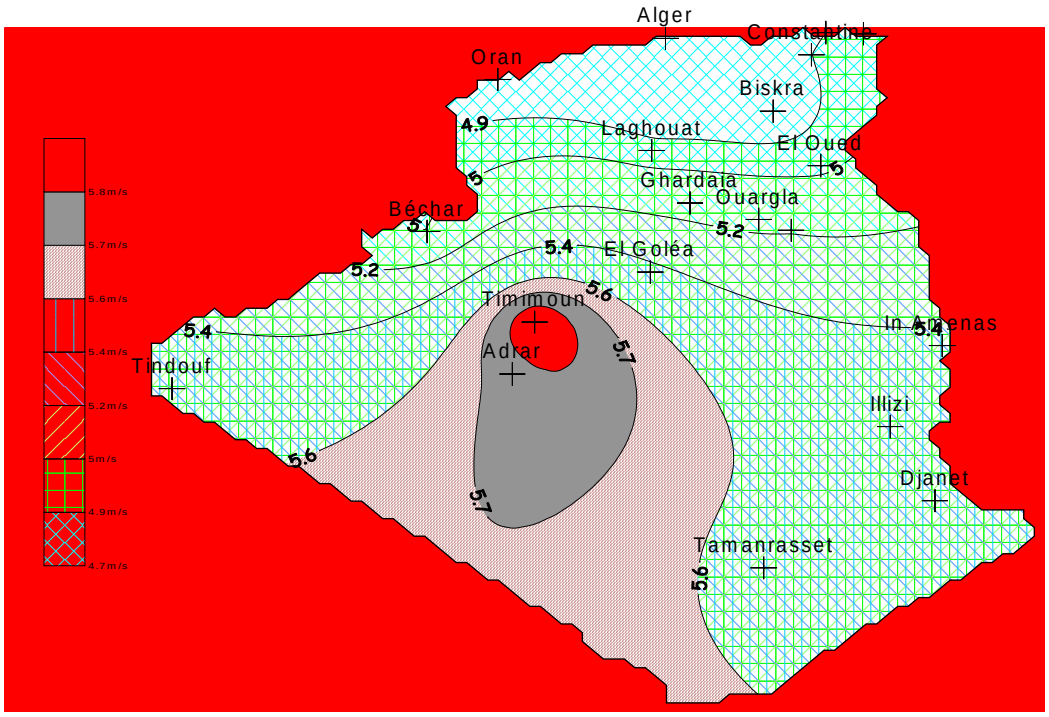

Figure II. 4. Tracé de la carte des vents à10 mètres d'altitude. [15]

Tableau II. 2. Carte des Vents de l'Algérie (Caractéristiques des sites et stations) Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M.

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V(m/s)
1	Adrar *	0,28	27,82	0,01	5,9
2	Alger	3,25	36,72	0,01	3,2
3	Annaba*	7,92	36,82	0,01	2,4
4	Batna*	6,18	35,55	0,01	4,2
5	Béchar*	-2,23	31,62	0,03	3,6
6	Bejaia*	5,6	36,72	0,03	4,2
7	Beni Abbés	-2,1	30,08	/	1,7
8	Beni Saf	-1,35	35,3	0,02	2,8
9	Biskra*	5,73	34,8	0,02	4,1
10	Bordj bou Arreridj	4,67	36,07	0,01	3,4
11	Chlef	1,33	36,1	0,01	2,8
12	Constantine	6,62	36,1	0,01	2,8
13	Djanet	9,28	24,33	/	2,3
14	Djelfa	3,25	34,68	0,08	2,7
15	Elbayadh	1,00	33,67	0,01	3,9
16	El-Goléa	2,87	30,57	/	3
17	EL-kheiter*	4,70	34,15	0,08	4,6
18	El- Oued	6,78	33,50	0,01	3,7
19	Ghardaïa	3,80	32,40	0,03	4,6
20	Guelma	7,43	36,47	/	1,8
21	Hassi Messaoud*	6,15	31,67	0,00	4,1
22	In -Amenas	9,63	28,05	/	4,3

23	In-oussera	2,52	35,55	0,08	3
24	In-Salah	2,47	27,2	/	4,4
25	In-Safra	-0,60	32,75	/	3
26	Ksar Elchellala	2,32	35,17	0,08	3,4
27	Maghnia*	-1,78	34,82	0,01	2,7
28	Mascara	0,15	35,22	0,05	2,4
29	Miliana	2,23	36,3	0,5	2,6
30	Mostaganem*	0,12	35,83	0,01	1
31	M sila*	4,50	35,67	0,03	4,1
32	Oran	-0,62	35,63	0,01	4,1
33	Oum-Elbouaghi	7,11	35,87	/	2,1
34	Saida*	0,15	34,87	0,01	2,6
35	Sétif*	5,25	36,18	0,01	3,1
36	Skikda	6,90	36,88	0,01	2,9
37	Tamanrasset*	5,52	22,78	0,1	2,9
38	Tébessa	8,12	35,42	0,03	2,8
39	Tiaret	1,47	35,37	0,02	4,7
40	Timimoune	0,28	29,25	0,01	5,1
41	Tindouf	-8,1	27,67	0	4,6
42	Tlemcen	-1,28	34,95	0,01	2,3
43	Touggourt *	6,13	33,12	0,04	3,3

Qu'est-ce que Météonome?

Météonome est une base de données climatologique complète pour les applications d'énergie:

- Météonome est une base de données météorologique contenant des données climatologiques pour les applications d'ingénierie à tous les endroits du monde.

Les résultats sont des années typiques générées par des moyens mensuels à long terme interpolés. Ils représentent une année moyenne de la période de temps climatologique sélectionnée en fonction des paramètres de l'utilisateur. En tant que tel, les résultats ne représentent pas un véritable historique mais une année hypothétique qui représente statistiquement une année typique à l'endroit choisi.

- Métronome est un programme informatique pour les calculs climatologiques.
- Météonome est une source de données pour les programmes de simulation d'ingénierie dans l'application passive, active et photovoltaïque de l'énergie solaire avec des interfaces de données complètes.
- Météonome est un outil de normalisation permettant aux développeurs et aux utilisateurs de programmes de conception technique d'accéder à une base de données météorologique complète et uniforme.
- Météonome est une référence météorologique pour la recherche environnementale, l'agriculture, la foresterie et toute autre personne intéressée par la météorologie

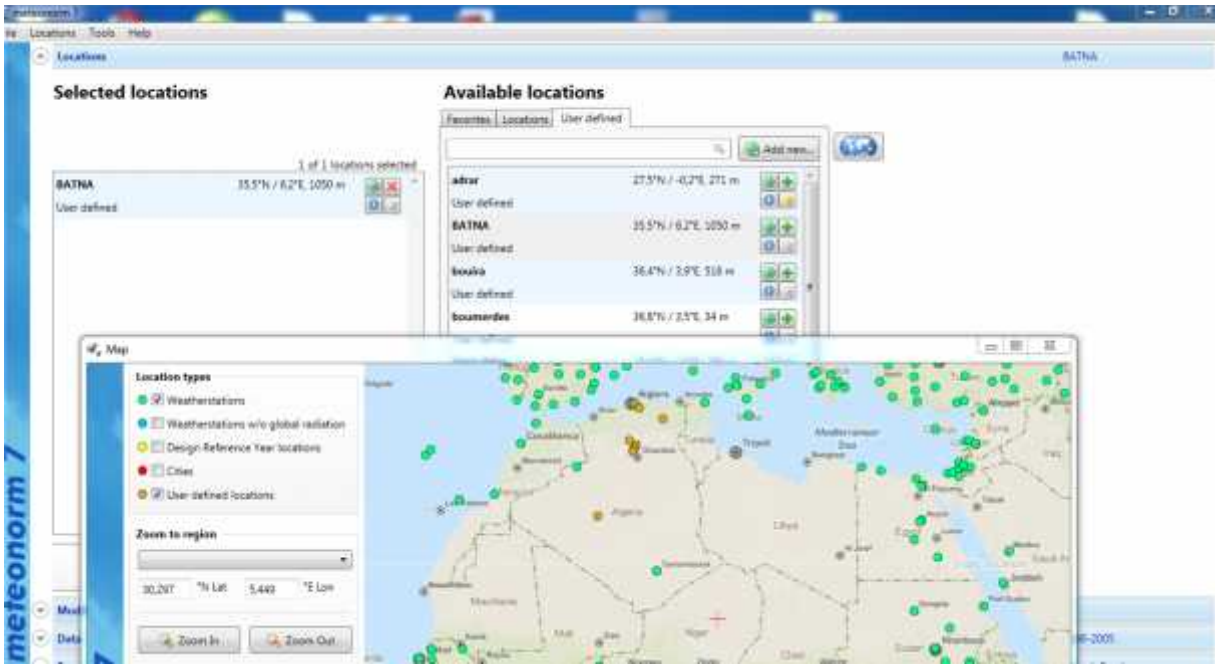

Figure II. 5. Interface de logiciel Météonome

II.5.Résultats et discutions

On remarque dans le graphe que la plus grande vitesse du vent est à Adrar, Il varie entre 5 et

6 m /s et le max en moi de mai, la plus faibles est à Boumerdes moine de 3 m/s et la moyenne et à Batna et Tamanrasset

Tableau II. 3. La vitesse du vent dans quelques zones en Algérie

MOIS	Adrar	Batna	Boumerdes	Tamanrasset
Jan	5	3	2,4	3,1
Fév	5,2	3,5	2,5	3,4
Mar	5,2	3,9	2,7	3,9
Avr	5,8	4	3	4,2
Mai	6,1	3,8	3	4,4
Jui	5,8	3,7	3,1	4,1
Jui	5,7	3,8	3,1	4,4
Aou	5,4	3,9	2,9	3,8
Sep	4,9	3,4	2,8	3,6
Oct.	4,5	3,2	2,3	3,4
Nov	4,1	3,2	2,5	2,6
Déc	4	3,1	2,6	2,5
AN	5,1	3,5	2,7	3,6

Le Graphe ci-dessous montre la variation de vitesse de vent dans les différentes locations (m/s)

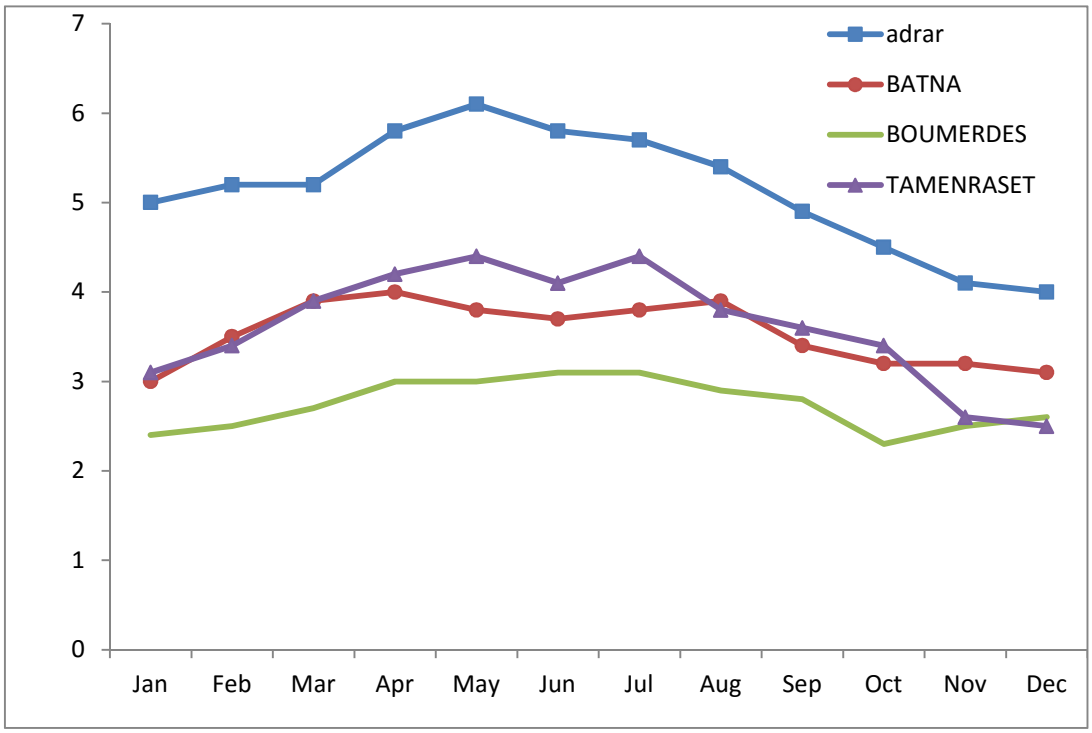

Figure II. 6. Graphe de variation de vitesse de vent dans les déférentes locations (m/s).

II.6.Conclusion

Les cartes de la vitesse du vent établies, permettent l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne. Pour qu'un site soit jugé exploitable avec une petite éolienne, il faut disposer au minimum d'une vitesse de l'ordrede6m/s.

En Algérie, il est clair que ceci devient possible, lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 25mètres. Toutefois, une fois les zones ventées identifiées, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Par ailleurs, étant donné que généralement les différentes mesures prélevées, se font à 10mètres du sol et que les formules empiriques d'extrapolations ont été établies pour des climats différents du notre, une étude expérimentale détaillée, doit être établie pour la correction de ces dernières.

Chapitre III: Cadre théorique et élaboration des hypothèses

Introduction

L'écoulement autour des profils des éoliennes sont modélisés par les équations de la mécanique des fluides Navier Stokes. En général, Les calculs et les simulations numériques sont essentiels et permettent d'avoir les prédictions des résultats ce qui est d'une grande utilité devant la complexité des phénomènes a étudié et le coût des réalisations expérimentales. Le but de ce travail est de simuler par logicielle ANSYS basé sur la méthode des volumes finis l'écoulement d'air incompressible turbulent in stationnaire bidimensionnel et sans transfert de chaleur à travers d'une coupe horizontale de l'éolienne de profil de NACA4412.

III.1.Les performances d'une éolienne

III.1.1.Distribution du vent

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent. Puisque la puissance est fonction de la vitesse du vent (figure II-1), les sites sont d'abord choisis en fonction de la constance de la vitesse et de la fréquence des vents présents. L'efficacité d'une éolienne dépend donc de son emplacement. [16]

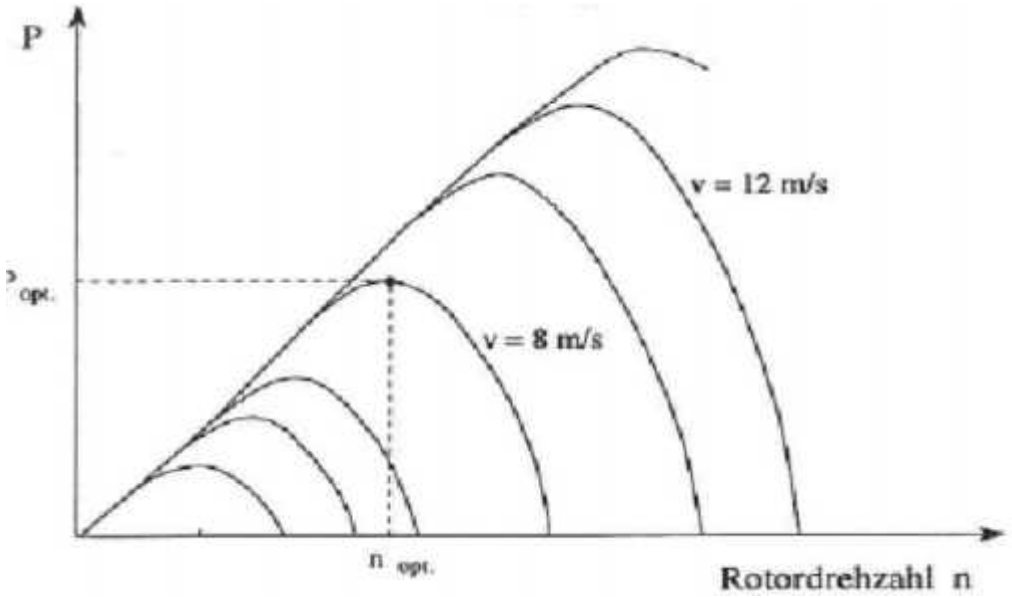

Figure III.1. Variation de la puissance en fonction de la vitesse vent.

III.1.2 Théorie de Betz et coefficient de puissance

La théorie de Betz indique la limite de puissance récupérable du vent. Elle introduit un coefficient de puissance Cp dans le calcul de la puissance.

Ce coefficient représente l'efficacité de l'éolienne à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il est fonction de la vitesse avant les pales V1 ainsi que la vitesse après les pales V2. La figure II-2 présente la variation de l'écoulement autour de la turbine.[16]

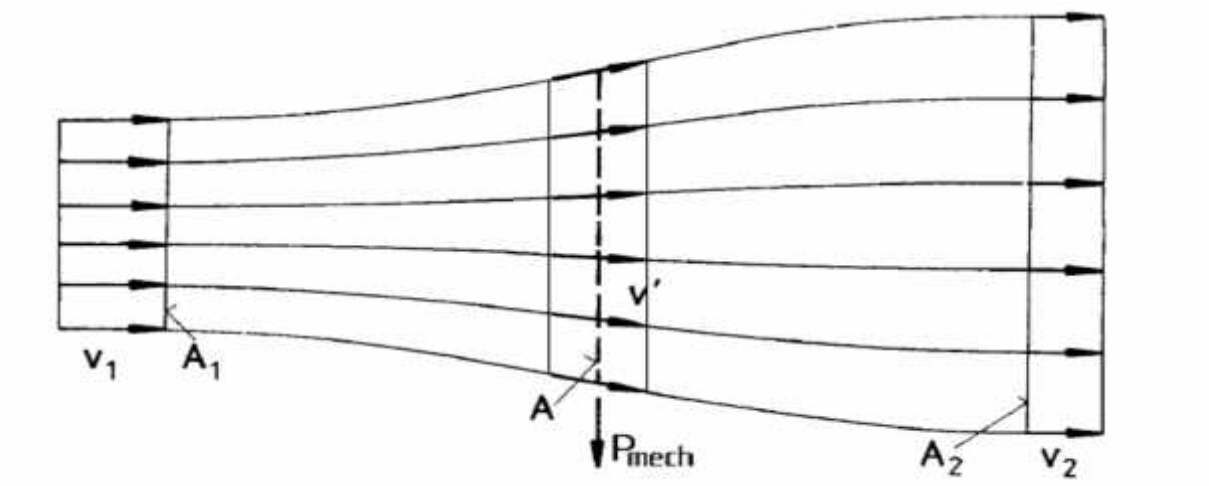

Figure III.2. Variation de l'écoulement autour de la turbine.

La puissance à l'entrée des pales est définie comme suite **:**

$$P_{entrée} = \frac{1}{2} Q v_1^3 A \quad (W) \qquad (3\text{-}1)$$

Tandis que la puissance à la sortie des pales est définie comme suite :

$$P_{sorties} = \frac{1}{4} QA\,(v_1^2 - v_2^2)\,(v_1 - v_2) \qquad (3\text{-}2)$$

Le coefficient de puissance de sortie Cp indique le ratio entre la puissance de sortie et l'entrée

$$Cp = P_{sortie} / P_{entrée} \qquad (3\text{-}3)$$

Le rapport de vitesse donnant le Cp maximal est le suivant **:** $v_2/v_1 = 1/3$ **(3-4)**

Finalement :

$$Cp, max = 0.5926 \qquad (3\text{-}5)$$

Autrement dit, d'après la théorie de Betz, le maximum d'énergie récupérable du vent est d'environ 59,30%. Dans le cas d'une éolienne tripale, il a été déterminé que le coefficient de puissance Cp devrait se situer entre 0,4 et 0,48 tel que le montre la figure III. 3.

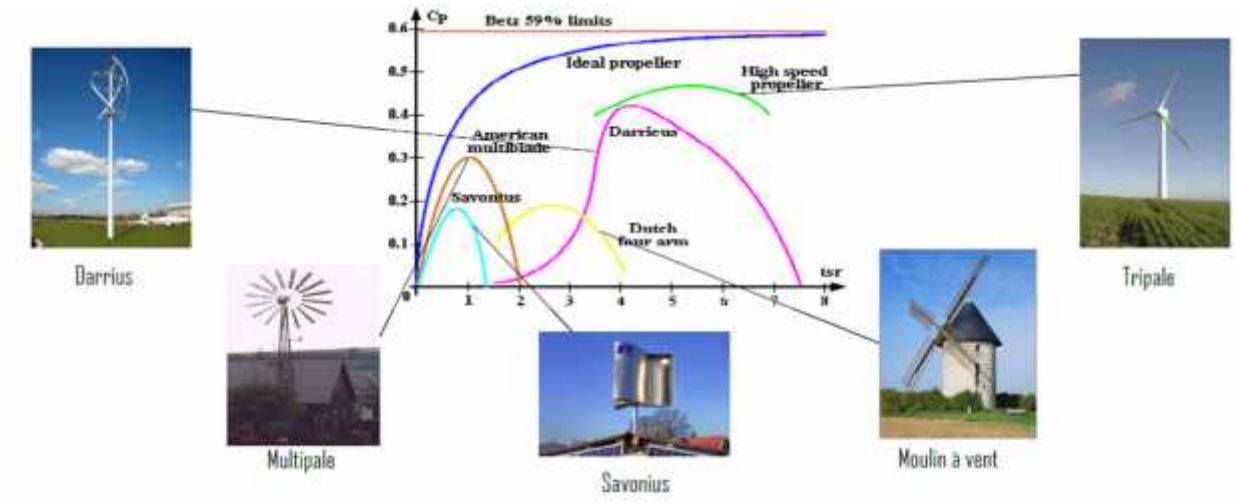

Figure III.3. Coefficient de puissance des différents types d'éolienne

Après avoir énoncé la théorie de Betz et présenté le coefficient de puissance, il convient de définir les différentes catégories de puissance dans une turbine éolienne

III.1.3 Puissances générées par une turbine éolienne

La puissance se divise en trois catégories pour une turbine éolienne, soit : la puissance récupérable directement du vent, la puissance mécanique et la puissance électrique.

Au niveau de la puissance du vent, elle peut être exprimée par la relation suivante :[16]

$$Ps = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 \qquad (3\text{-}6)$$

Où A est l'aire balayée par les pales du rotor.

En tenant compte du critère de Betz suivant l'équation (2.5) la puissance maximale à l'arbre s'exprime selon la relation

$$Ps,\ max = \frac{8}{27} \rho A V^3 \qquad (3\text{-}7)$$

Il faut aussi préciser que la puissance mécanique varie en fonction des rendements de tous les éléments mécaniques, qui sont généralement estimés à 95%. Finalement, l'énergie électrique est générée à partir de l'énergie mécanique par le biais d'un arbre en rotation qui entraine l'alternateur à haute vitesse.

III.1.4. Courbes de performances

Les courbes de performance peuvent être caractérisées par trois indicateurs qui sont :

- la puissance

- le couple
- les forces de poussée.

Dans le cas d'une éolienne tripale, la plage admissible de valeur peut se lire directement sur la figure III-3. La méthode consiste à identifier la plage de valeurs de coefficient de puissance ou de vitesse spécifique correspondante au type d'éolienne.[16]

III.1.5. Zones de fonctionnement

La courbe de puissance convertie d'une turbine présentée à la figure III-4 permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :[16]

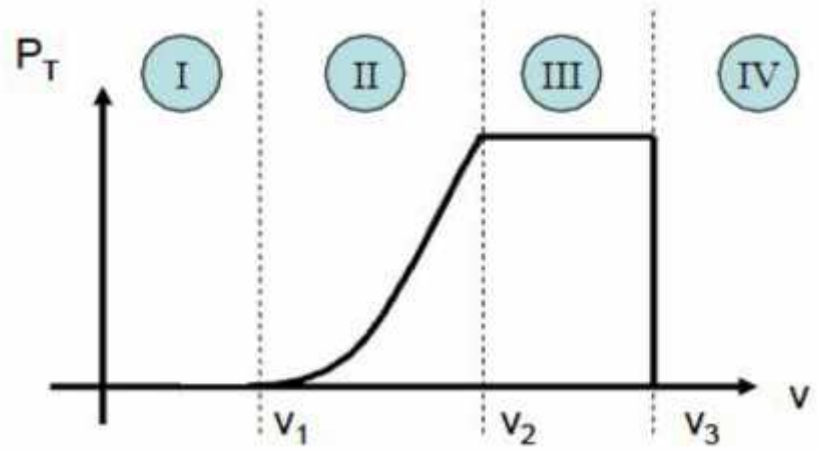

Figure III.4. Zone de fonctionnement d'une éolienne.

Où **V** (m/s) et **PT** (W)

La figure **III.4.** peut être interprétée de la façon suivante :

- V1 est la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine;

- V2 est la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice;

- V3 = 25m/s (vitesse de décrochage)

- zone I (V < V1) la turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible;

- zone II (V1 < V < V2) le maximum de puissance est capté pour chaque vitesse de vent;

- zone III (V2 < V < V3), la puissance disponible devient trop importante; cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge,

- zone IV (V > V3), la vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

III.2. Paramètres, caractéristiques et géométriques des pales

III.2.1.Géométrique

C'est la force générée par l'ensemble des surpressions à l'intrados et dépressions à l'extrados. L'action de l'air sur les pales d'une éolienne se traduit par deux forces aérodynamiques une force parallèle à la direction de l'écoulement dite de trainée, et une force normale à l'écoulement dit de portance. [16]

III.2.2.Désignation d'un profil

Le profil aérodynamique d'une pale correspond à la forme que possède la pale vue en coupe. Il existe plusieurs classes de profils. Elles sont définies en fonction de la forme du squelette, du pourcentage d'épaisseur par rapport à la longueur de la corde et de la symétrie.

Les plus utilisés de nos jours, sont les profils NACA (National Advisory Commitée for Aeronautics). Ils sont couramment utilisés, ce qui les rend pratiques dans la validation des méthodes numériques. Il y'a plusieurs classifications des profils NACA. Les plus utilisés sont ont des désignations à quatre et à cinq chiffres. Ces chiffres nous renvoient aux caractéristiques géométriques du profil, Comme exemple:[16]

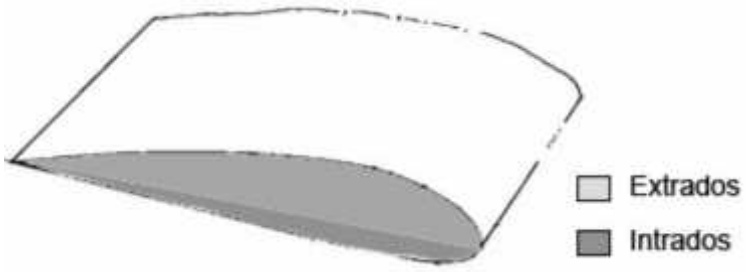

Figure III.5. Profil d'une pale à partir d'une vue en coupe.

On distingue 4 sortes de profils:

Les biconvexes, les plans convexes, les profils creux et les autos stables.

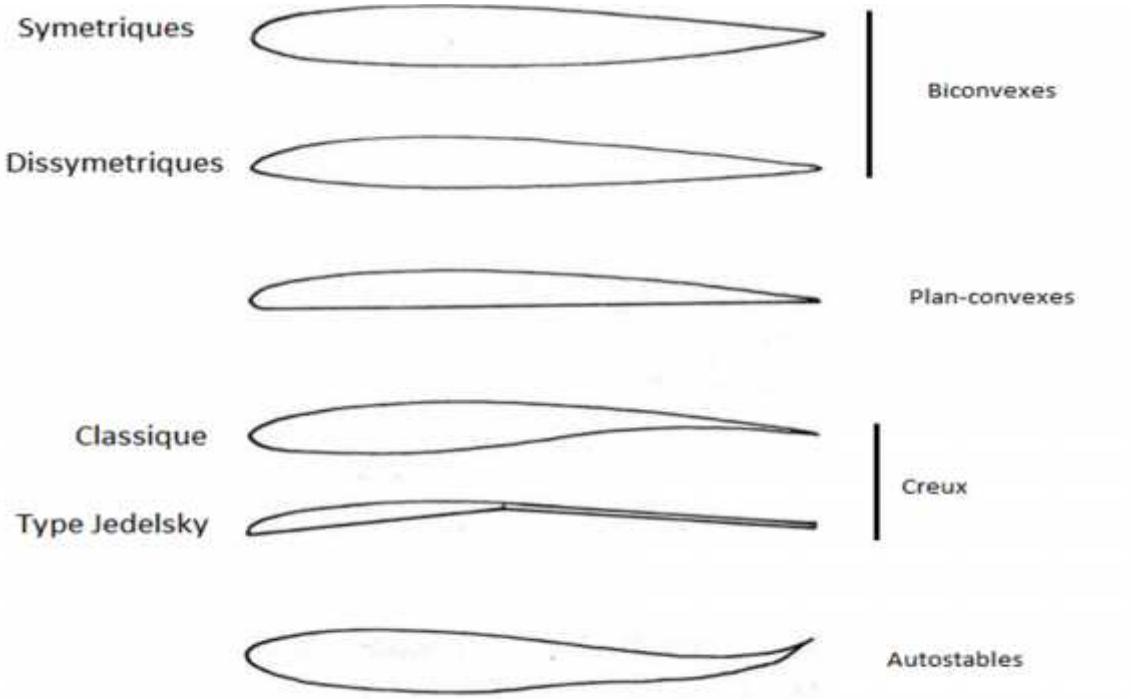

Figure III.6. Les sortes de profils.

Désignation: Voici ce que signifient les chiffres qui entrent dans la désignation des profils:

- **Ritz2.30.12**: 2 signifie creux (ou flèche de 2%), 30 signifie que l'épaisseur maxi se trouve à 30%de la corde à partir du bord d'attaque, 12 représente l'épaisseur relative en pourcentage de la corde.

- **FX62K13117**:FX signifie Wortmann, 62 est l'année de création du profil K signifie Klappen (volets en Allemand), c'est-à-dire que ce profil est étudié pour être équipé de volets de courbure. 131 est l'épaisseur relative: 13,1% de la corde 17 est, lorsqu'il y a K, la corde du volet de courbure en pourcentage de la corde de l'aile.

- **E 174**: E signifie Eppler, 174est un numéro d'ordre ne donnant aucune indication.

- **NACA 633618**: série à 6 chiffres, 6: numéro de la série, 3 est la position du point de pression minimal en dixièmes de la corde, 3: étendue en dixièmes de Cz de part et d'autre du Czi de la bosse laminaire, 6 : valeur du Cz maxi en dixièmes (0,6) et18 est

l'épaisseur relative exprimée en % de la corde.

- **NACA2412 à quatre chiffres** Le premier chiffre (2), indique la courbure relative ; F/c=2% Le deuxième chiffre (4) indique le nombre de dizaines de l'abscisse de la flèche maximale (d/c=40%). Les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur relative e=12% Les profils NACA commencent par 00 sont des profils symétriques, ayant une ligne moyenne qui se confond avec la corde.

- **NACA23012 à cinq chiffres :** Le chiffre (2) indique la courbure relative r=2%La deuxième et troisième chiffre (30) indiquent le double de la l'abscisse de la flèche Les deux derniers chiffres (12) indiquent l'épaisseur relative.

III.2.3. Quelque types de profils NACA

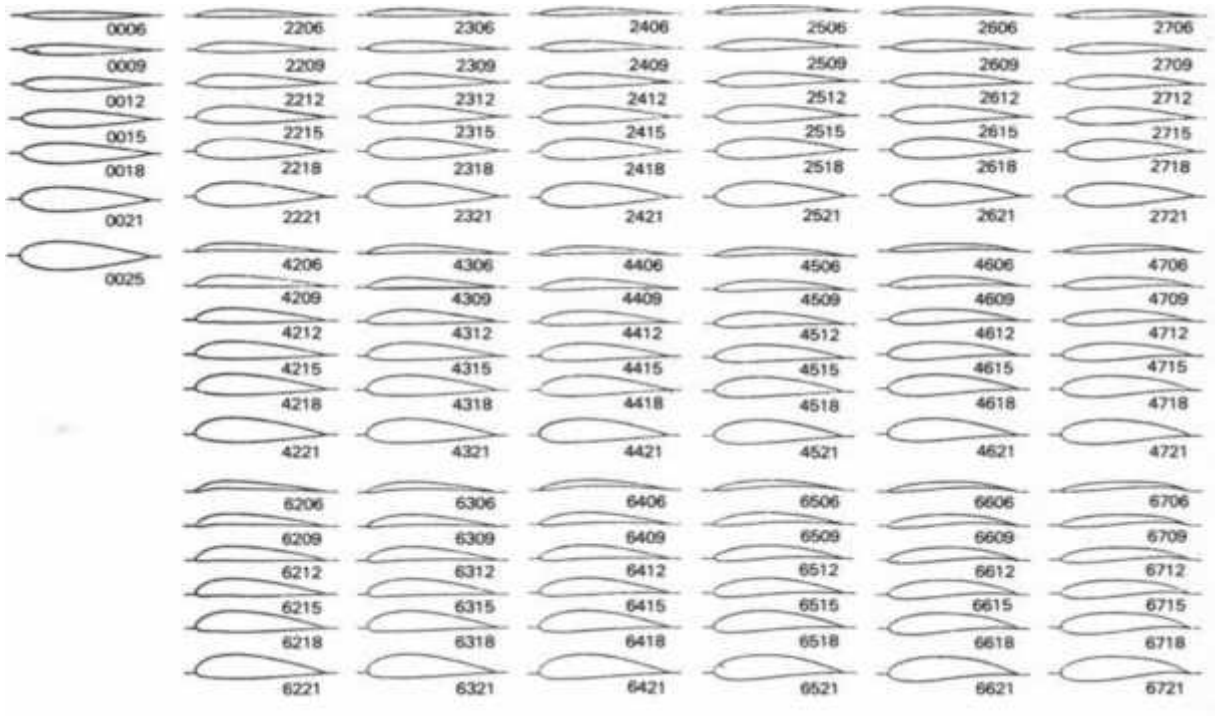

Figure III.7. Quelque type de profils NACA. [16]

III.2.4. Corde

Les profils d'ailes ont généralement un bord d'attaque arrondi en avant et un bord de fuite fin sur l'arrière. La distance du bord d'attaque au bord de fuite s'appelle la corde. [16]

III.2.5. Angle d'attaque et de calage et vrillage

La corde du profil sert aussi de référence afin de définir certains angles. Ainsi, l'angle qui existe entre la corde C et la vitesse de l'air en amont, V s'appelle l'angle d'attaque α.

Plus cet angle est important, plus les filets d'air « streamlines » sont déviés par le profil. De même, l'angle qui existe entre la corde et le plan de rotation s'appelle angle de calage θ.

La variation de la grandeur de l'angle de calage sert à définir le vrillage d'une pale lorsque l'angle d'attaque reste constant sur toute la longueur de la pale. La figure II-5 présente les angles d'attaque α et de calage θ. [16]

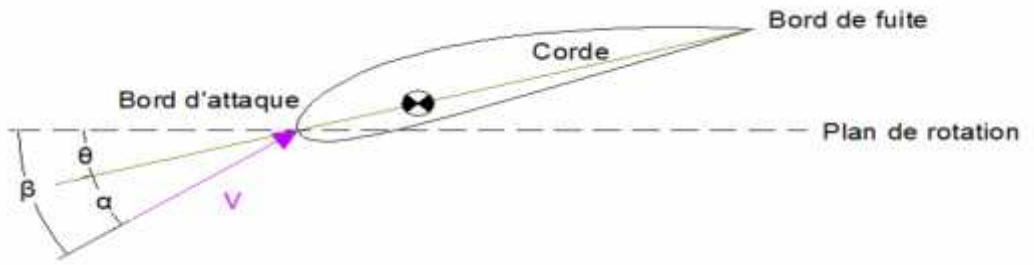

Figure III.8. Angles définis à partir de la corde du profil. [16]

III.2.6. Coefficients de portance et de trainée

Pour des angles d'attaques faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée une force qui aspire la pale vers le haut (l'avant). Cette force s'appelle la portance L pour «Lift» :[16]

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_1 \qquad \textbf{(3-8)}$$

Où Cl représente le coefficient de portance.

Lorsque la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, une force de résistance à l'air apparait. Cette force de résistance appelée trainée et notée D pour «Drag» s'exprime par la relation :

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_d \qquad \textbf{(3-9)}$$

Où Cd représente le coefficient de trainée.

La portance et la trainée s'appliquent au centre aérodynamique du profil, situé à approximativement 25% la corde. Les coefficients de portance Cl et de trainée Cd dépendent fortement de l'angle d'attaque α et du profil

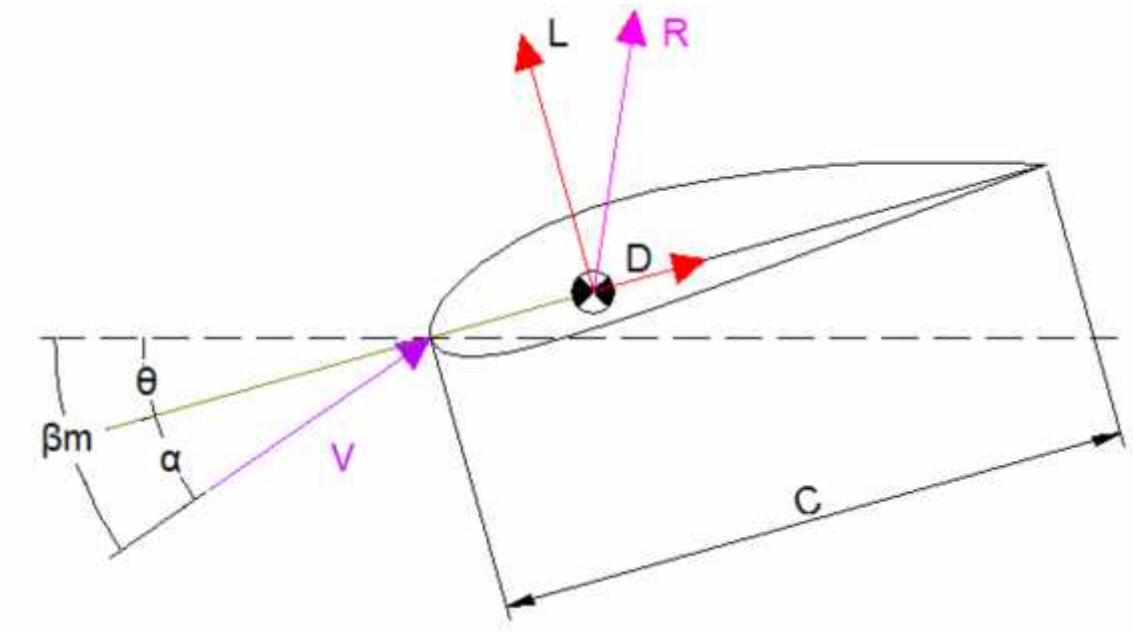

Figure III.9. Portance et trainée appliquée au centre aérodynamique.

III.2.7. Rapports des paramètres caractéristiques

Plusieurs rapports des paramètres cités précédemment sont souvent utilisés dans la sélection de profils de pale. Il s'agit notamment : [16]

De la finesse ou le rapport du coefficient de portance sur celui de la trainée

$$F = \frac{C_1}{C_d} \qquad \textbf{(3-10)}$$

Du rapport de l'épaisseur e du profil sur la corde C

$$\textbf{Epaisseur /corde =e/C} \qquad \textbf{(3-11)}$$

Du rapport μ du rayon local r, vis-à-vis du moyeu, sur le rayon balayé par les pales

$$\boldsymbol{\mu = r/R} \qquad \textbf{(3-12)}$$

III.2.8. Distribution de la corde

La distribution de la corde des profils définit la géométrie des pales de l'éolienne et est un facteur déterminant de leur performance. Les pertes en bout de pales sont d'autant importantes que l'allongement de la pale est faible.[16]

La distribution des cordes doit donc respecter un allongement suffisant pour éviter le gaspillage d'énergie suivant la relation :

$$C(\mu) = 1 \qquad /9C_1 Z_b \lambda^2 \mu \qquad \textbf{(3-13)}$$

Où Zb représente le nombre de pales

La répartition de la portance doit être faite de manière à ce que le maximum de portance soit concentré le plus loin possible des bouts de la pale

-Composante de la résultante aérodynamique : **(Ra)**

La portance (Fz) : est la composante d'aérodynamique perpendiculaire aux filets d'air du vent relatif. Exprimée :

$$F = \frac{1}{2}\rho V^2 C_z \quad \textbf{(3-14)}$$

Coefficient de portance :

$$C = 2F / \rho V^2 S \quad \textbf{(3-15)}$$

La trainée (Fx) : est la composante aérodynamique parallèle aux filets d'air du vent relatif. Exprimée :

$$F_X = \frac{1}{2}\rho V^2 C_X \quad \textbf{(3-16)}$$

Coefficient de trainée :

$$C = 2F / \rho V^2 S \quad \textbf{(3-17)}$$

Résultante aérodynamique (Ra) :

$$R = 1/2\,\rho S V^2 C \quad \textbf{(3-18)}$$

L'aération les performances d'un profil de pale éolienne revient à augmenter le rapport de la portance à la traînée. [16]

III.3. Equation gouvernantes :

Les équations régissant le problème sont les équations de continuité, qui expriment la Conservation de masse, et de quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, Nous allons supposer quelques hypothèses. [6]

Hypothèses simplificatrices

Nous supposons alors que :

- l'écoulement est in stationnaire - l'écoulement est bidimensionnel. - fluide est un incompressible - fluide est visqueux. - absence de transfert de chaleur. [6]

III.3.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial}{\partial} + \frac{\partial}{\partial} = 0 \qquad \textbf{(3-19)}$$

II.3.2.Equation de quantité de mouvement suivant x

$$u\frac{\partial(u)}{\partial} + v\frac{\partial(u)}{\partial} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial} + v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{\partial}{\partial}\overline{u_1' u_2'} \qquad \textbf{(3-20)}$$

III.3.3. Equation de quantité de mouvement suivant y :

$$u\frac{\partial(v)}{\partial} + v\frac{\partial(v)}{\partial} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \frac{\partial}{\partial}\overline{u_2'^2} \qquad \textbf{(3-21)}$$

III.4. Le modèle de turbulence

IL existe plusieurs modèles de fermeture .comme le modèle K-$\mathcal{E}$ (STANDARD et RNG) et le modèle de spalart-Allmaras, dans cette étude nous utilisons le module de turbulence k- $\mathcal{E}$ STANDARD. [6]

III.4.1. Modèle (k-$\mathcal{E}$)

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence proposé par **Jones et launder (1972)** qui se base sur le concept de **Boussinesq (1877)** utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds). L'idée du modèle k est que l'on peut construire à partir de ces quantités une « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante : [6]

$$V_t = \frac{C_u(K^2)}{\varepsilon} \qquad \textbf{(3-22)}$$

Avec :

$$\mu = V \qquad \textbf{(3-23)}$$

viscosité dynamique turbulence L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

$C\mu$: est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement

K : est l'énergie cinétique de turbulence défini par :

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\overline{\mathbf{u_1}'^{\mathbf{2}}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}(\overline{\mathbf{u_1}'^{\mathbf{2}}} + \overline{\mathbf{u_2}'^{\mathbf{2}}} + \overline{\mathbf{u_3}'^{\mathbf{2}}}) \quad \textbf{(3-24)}$$

$\mathcal{E}$: Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K donné par la suivante :

$$\boldsymbol{\mathcal{E}} = \boldsymbol{V}\overline{\left[\frac{\partial}{\partial}\right]^{2}} \quad \textbf{(3-25)}$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulence reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence **L** est déduite de : $\boldsymbol{\mathcal{E}} = \boldsymbol{K^{3/2}/L}$

III.4.1.1. Equation modélisée de K

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulence s'écrit sous forme semi-empirique suivante : [6]

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial} + \overline{\mathbf{U}}\frac{\partial}{\partial}}_{1} = \underbrace{\mathbf{V}\left(\frac{\partial\bar{\mathbf{U}}\mathbf{i}}{\partial} + \frac{\partial}{\partial}\right)\frac{\partial}{\partial}}_{2} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial}\left[\left(\frac{\mathbf{v}}{\sigma\ .1} + \frac{\mathbf{v}}{\sigma\ .t}\right)\frac{\partial}{\partial\ .j}\right]}_{3} - \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}}_{4} \quad \textbf{(3-26)}$$

1,2, 3, 4, Les termes de l'équation (3-26) sont dénommés comme suit :

1- Représente le taux de variation de l'énergie cinétique K

2- Représente le transport par diffusion de l'énergie cinétique

3- Représente la production par cisaillement de l'énergie cinétique turbulence

4- Représente la dissipation de l'énergie cinétique turbulence K

III.4.1.2. Equation modélisée de $\mathcal{E}$

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique s'exprime 1 2 3 4Les 1.2.3.4 de l'équation (3-26)) sont : [6]

1- Représente le taux de variation de $\mathcal{E}$.

2- Représente le taux production (source) de $\mathcal{E}$.

3- Représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie turbulence.

4- Représente la dissipation (puits) de $\mathcal{E}$.

III.4.2. Modèles des constantes

Pour rendre le système d'équations opérationnel, on adopté les constantes standards du modèle donné par Launder et Spalding (1974). Elles sont réunies dans le tableau suivant : [6]

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0

Tableau III.1. Coefficients du modèle **K-ε** standard.

III.4.3. Nombre de Mach :

Le nombre de Mach est un nombre sans dimension, noté « Ma », il mesure le rapport entre les forces liées au mouvement et la compressibilité du fluide. $Ma = Va$ Est vitesse de propagation ou célérité du son dans l'environnement considéré. Elle représente la vitesse de propagation de tout ébranlement produit dans le milieu.

La Vitesse du son dans l'air, considéré comme un gaz parfait, s'exprime par : $a = \gamma P \rho$ $\gamma = cp cv$

$cp \ et \ cv$ Étant les capacités thermiques massiques isobare et isochore. Ce nombre ne dépend que du nombre d'atomes dans la molécule et vaut 1,4 pour l'air.

L'équation d'état permet de la réécrire en fonction de la constante spécifique du gaz **R** (287/J/kg K pour l'air) et de la température T en kelvins : $a = \gamma RT$ On peut négliger la compressibilité de l'air pour les nombres de Mach inférieurs à 0,3 environ. Le cas sonique défini précédemment comme frontière entre le subsonique et le supersonique n'a pas de réalité physique : il est remplacé par une zone de transition assez large, dite transsonique, dans laquelle les phénomènes sont particulièrement compliqués. [6]

III.4.4. Nombre de Reynolds

Soit l'écoulement de vitesse caractéristique U, de dimension caractéristique L, d'un fluide de masse volumique μ et de viscosité η. Le nombre de Reynolds caractéristique de cet écoulement est le nombre sans dimension:[6]

$$\mathbf{R} = \frac{\mu}{\eta} = \frac{U}{\nu} \qquad \textbf{(3-27)}$$

Où ν = η/μ est la viscosité cinématique du fluide. La longueur caractéristique L est le diamètre d'une conduite, ou la dimension d'un obstacle.

Le nombre de Reynolds sert à identifier les courbes qui permettront de déterminer les coefficients de portance et de trainée ainsi que les angles d'attaque et de décrochage.

$$\mathbf{R\,e = WL / v} \qquad \textbf{(3-28)}$$

Avec :

W : vitesse relative du vent sur la pale (**figure II.7.**)

L : longueur caractéristique, dans notre cas la corde de la pale

N: viscosité cinématique de l'air, **ν ≈ 15,10-6 m²/s**

La vitesse du vent W est la résultante de la vitesse absolue V (vitesse apparente du vent) et de la vitesse d'entrainement U. La figure 2-4 présente le triangle de vitesses incluant le facteur d'interférence axial a et tangentiel a' qui sont liés respectivement aux vitesses U et V

□□Re< 2000 : écoulement laminaire

□□Re> 4000 : écoulement turbulent

□□Pour 2000 < Re < 4000, on observe un régime de transition

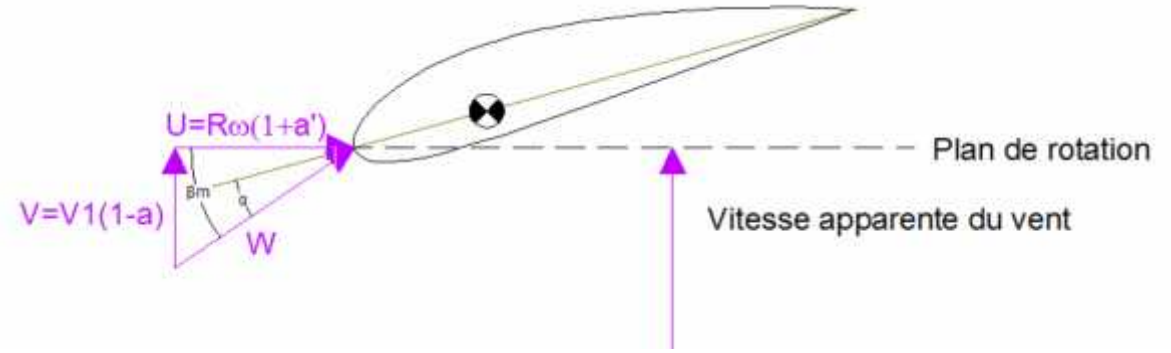

Figure III.10. Triangle de vitesses.

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé sur les termes conventionnels pour d'écrire les performances d'une éolienne et les Courbes de performances. Paramètres, caractéristiques et géométriques des pales.

Chapitre IV : Etude et conception sous logiciels « Solide Works ; Ansys

Introduction

Une éolienne est un capteur de vent dont la force actionne les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique.

L'éolienne se compose d'un mât (de 10 à 100 m de haut) sur lequel est installée une nacelle en fermant la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 ou 6 pales mesurant entre 5 et 80 m de diamètre. Une éolienne de forte puissance nécessite de solides fondations. Sa durée de vie est de 20 ans environ. Elle fonctionne uniquement lorsque la vitesse du vent est comprise entre 15 km/h et 90 Km/h maximum, pour des raisons de sécurité. La puissance d'une éolienne peut aller jusqu'à 5 MW (A titre de comparaison, la puissance d'une tranche de centrale nucléaire est de 1400 MW environ). L'électricité produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'au poste de raccordement. Au pied de chaque éolienne, un transformateur convertit la tension de 690 volts en 20000 volts, tension du réseau national d'Électricité de France sur le quel toute l'électricité produite est acheminée.

IV.1.Composition de BANC d'essai

Figure IV-1 montre le banc d'essai utilisé dans notre travaille il se compose initialement par une éolienne 2 a axe verticale attaché à un multiplicateur 3 de vitesse relier a une génératrice d'électricité 4, pour cella en a ajouté un ventilateur 1 comme une source de vent.

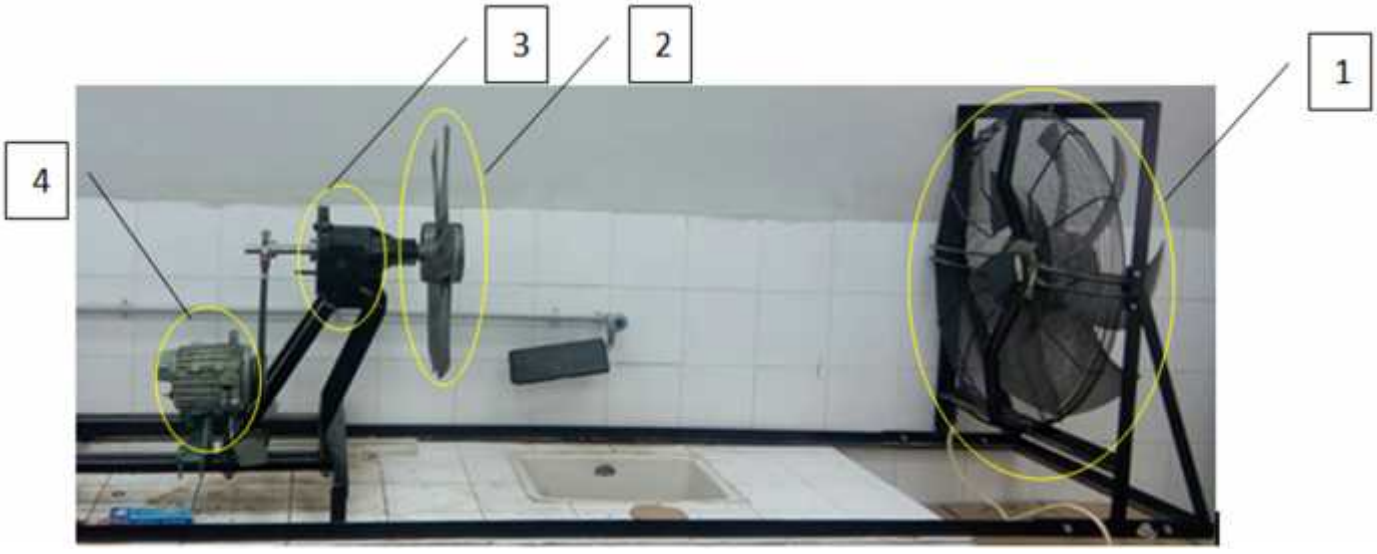

Figure IV.1. Le banc d'essai de notre éolienne.

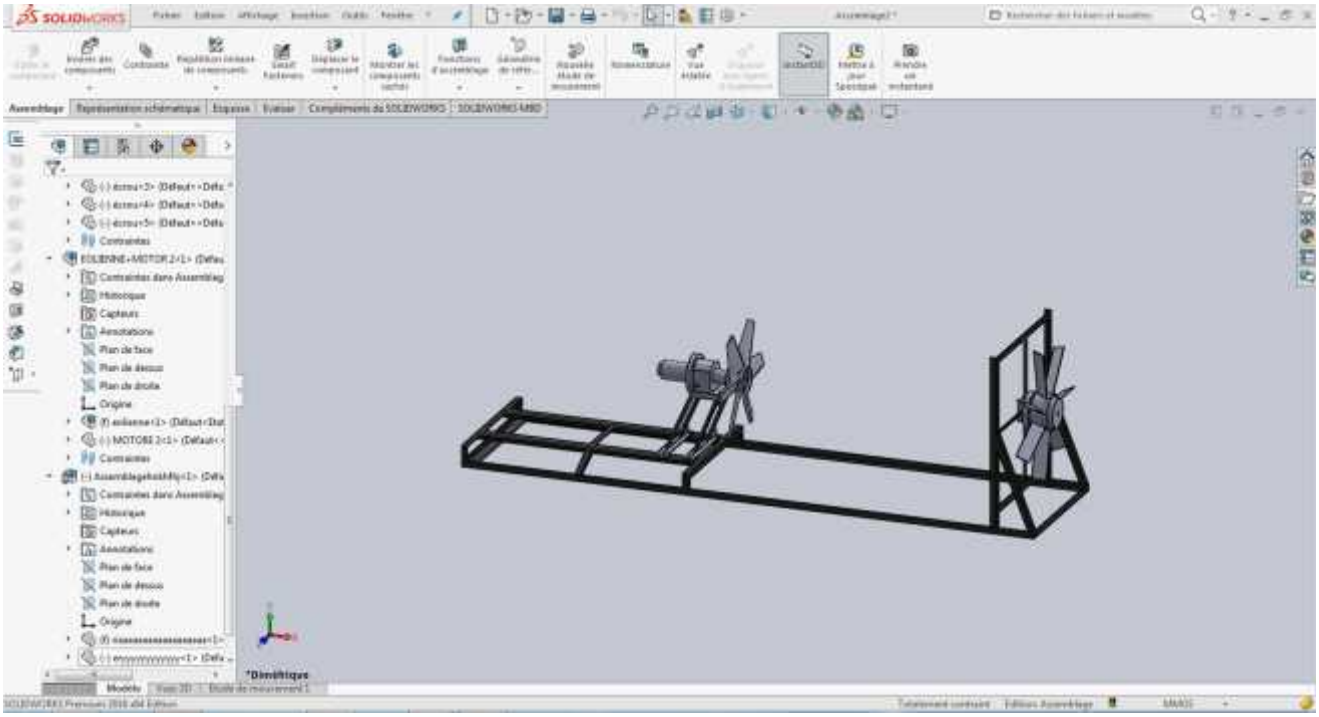

Figure IV.2. Banc d'essai sur logiciel SW

IV.1.1 .Ventilateur

C'est la source de vent de notre banc d'essai il s'agit d'un ventilateur avec les caractéristique suivantes :

- 400±10% Avec démarrage en y : 50 Hz 0,42kw
- 0,94 /0,58 A
- 680/510tr /min
- Cos y=0,65

Figure IV.3. Image réelle de ventilateur

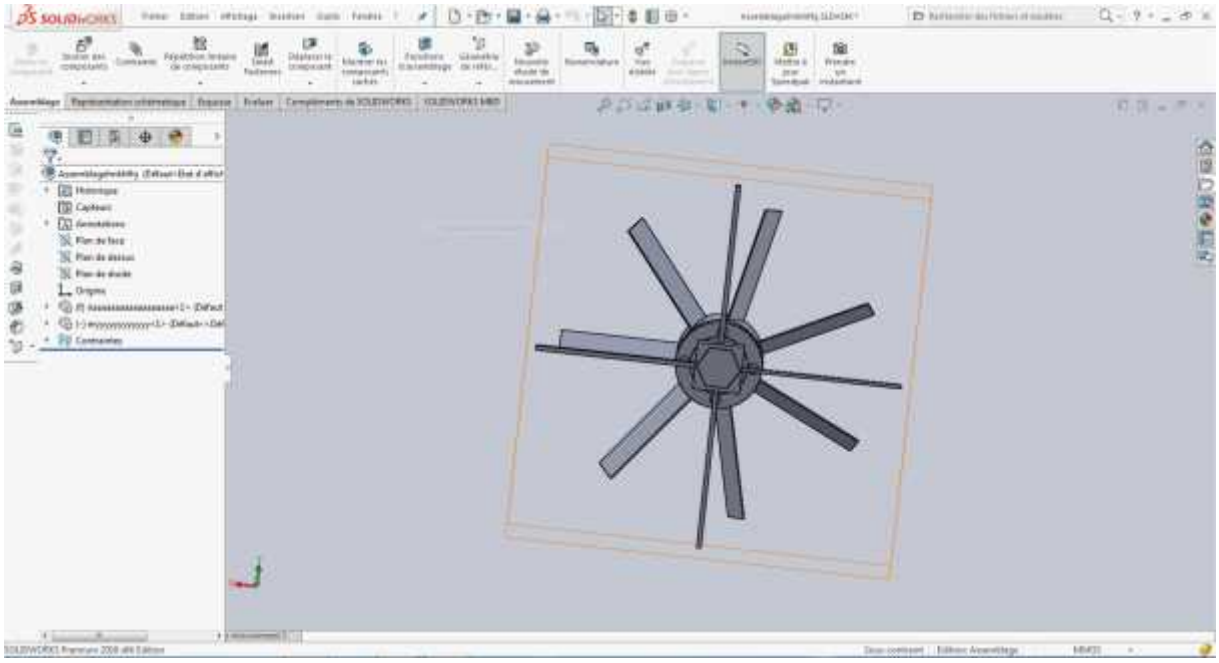

Figure IV.4. Image de ventilateur sur logiciel SW

IV.1.2. Eolienne

Avec 6 pales démontables et orientables :

- Langueur de la pale : 230 mm
- Diamètre de l'hélice : 610 mm

Figure IV.5. Une hélice image réelle

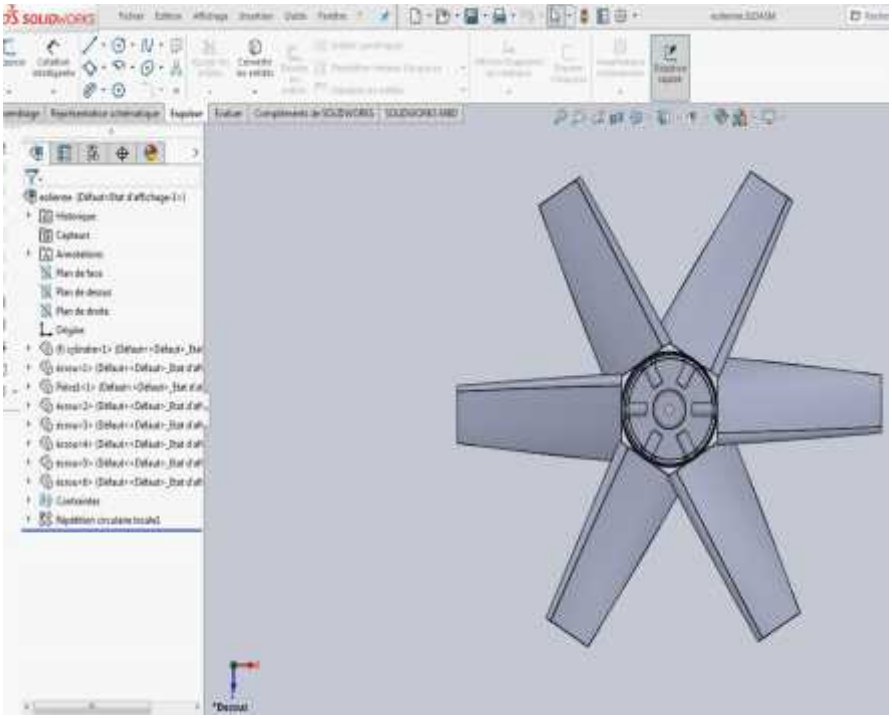

Figure IV.6. Une hélice sous le logiciel Solide Works

Figure IV.7. La pale de l'éolienne

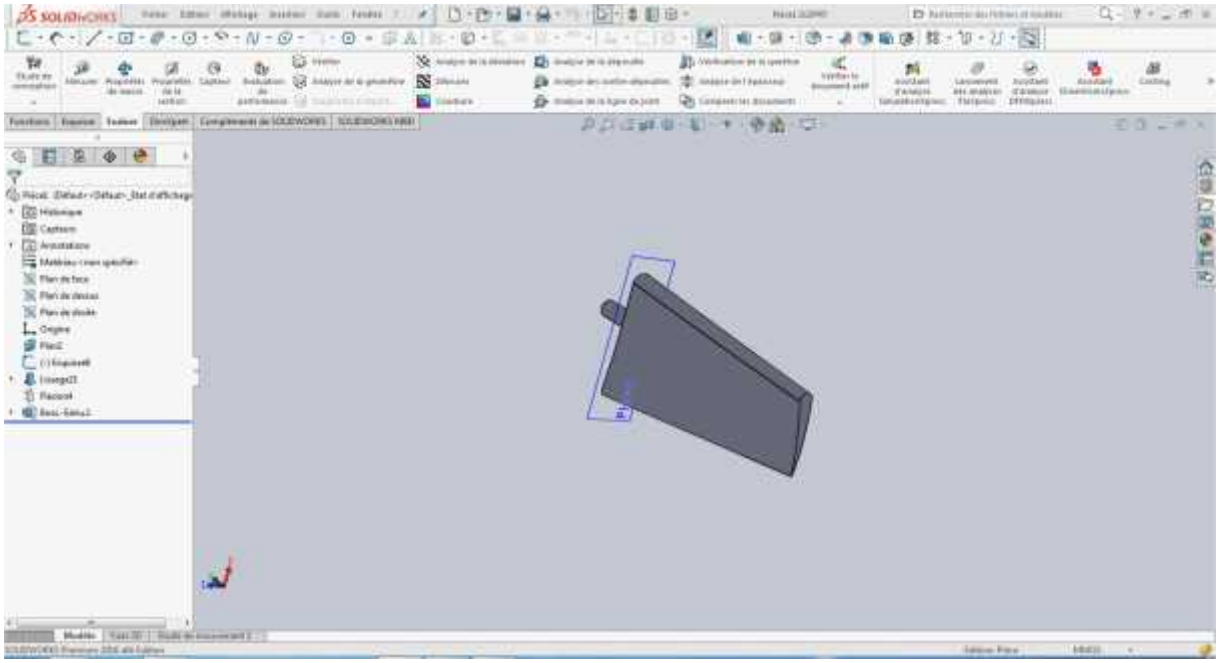

Figure IV.8. La pale de l'éolienne sur logiciel SW

IV. 1.3. Multiplicateur de vitesse

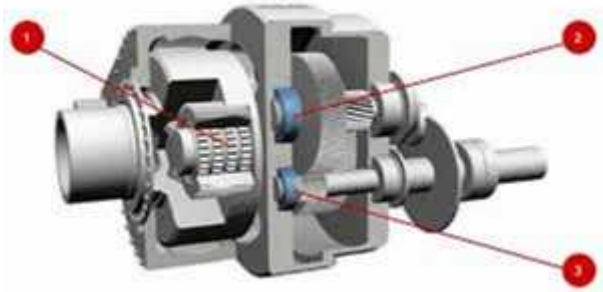

Figure IV. 9. multiplicateur de vitesse

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. L'arbre secondaire comporte généralement **un frein mécanique** qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine. Avec deux rapports 4 et 9, une position point mort. Raccordement de montage par bride.

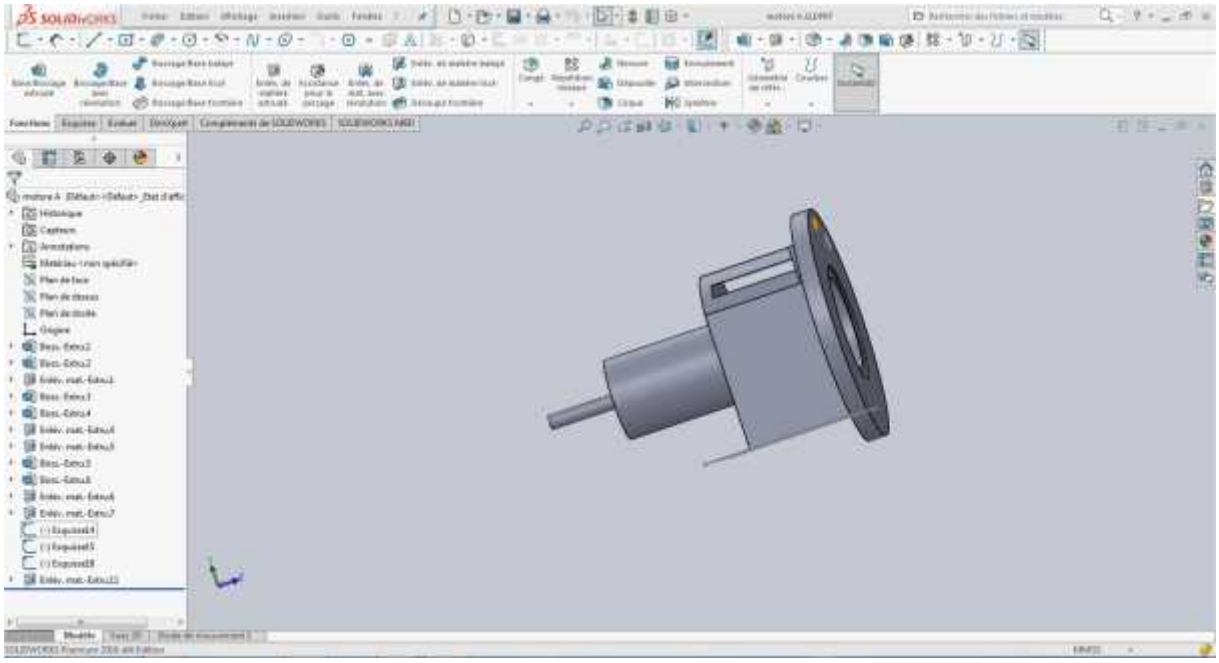

Figure IV.10. Multiplicateur de vitesse sur logiciel SW

IV.1.4. Génératrice de courant à aimant permanant

Figure IV.11. Une génératrice

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La rotation du rotor induit un champ électromagnétique qui entraîne la création du courant dans le stator de la génératrice. Avec un lecteur de tr /min.

IV.2. Équipement de mesure

1. Anémomètre

Pour la mesure de la vitesse du vent, avec les caractéristiques suivantes :

- Environnement opérationnel 0°c 60°c, <70% R.H.
- Environnement de stockage -20°c à 60°c, de 0 à 80% R .H.

- Les limites vitesse De 0.0 à 30 m /s avec une erreur 0.01
- Les températures De -20°c à 60°c avec une de 0.1°c

Figure IV.12. Un anémométrie

2. Multimètre :

- Pour la mesure électrique Un variateur de phase :
- Pour le fonctionnement du ventilateur en 220 v.

Figure IV.13. Multimètre

Apres plusieurs approches, on a réalisé notre montage sur un bâti en cornière, le dispositif (éolienne) est monté sur un siège glissant avec des bagues de guidage pour permettre la variation de la distance entre, le ventilateur (source de vent) et l'hélice.

IV.3.Simulation et résultat

IV.3.1. Description

Dans ce travail nous avons étudié numériquement l'écoulement d'air incompressible en 2D sur la gamme de régime subsonique autour un profil non symétrique de NACA4412 ; nous avons utilisé les équations de Navier-Stokes, ces équations sont déduites, des principes fondamentaux de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement. Nous avons résolu numériquement le système d'équations (Navier-Stockes) pour le régime turbulent de l'écoulement d'air à travers le profil NACA4412 en utilisant solveur « ANSYS » Car il est impossible de trouver une solution analytique et exacte pour un tel système en vue de complexité des équations et valider les résultats numériques obtenu le logiciel ANSYS est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements (équation de conservation de la masse, équation de quantité de mouvement). ANSYS est associé à l'aide duquel on va définir la géométrie, le maillage, et les conditions aux limites.

IV.3.2.Profil NACA-4412

Les tracés de profil sont obtenus à partir de calculs théoriques et de tests en soufflerie. La NACA a testé et publié des profils d'ailes destinés à l'aviation, cependant ces profils sont utilisés pour des pales en raison de leurs caractéristiques aérodynamiques.

Les noms des profils, ici composés d'une série de quatre chiffres, possèdent la signification suivante :

- Le premier chiffre exprime la cambrure en pourcentage de la corde
- Le second chiffre indique la position de la cambrure maximale en dixième de la corde
- Les deux derniers chiffres représentent l'épaisseur relative en pourcentage de la corde.

Ainsi, le profil NACA 4412 a une cambrure relative de 4 % dont la valeur maximale se situe à 4% de la corde et possède une épaisseur relative de 12 % de la corde.

Tableau IV.1. Caractéristiques du profil NACA 4412

NACA 4412	
Épaisseur (% de la corde)	12,0
Cambrure (% de la corde)	4,0
Angle du bord de fuite (degré)	14,4°
Épaisseur de l'intrados (%)	76,1
Portance maximale (CL)	1,507
Maximum (L/D)	57,209

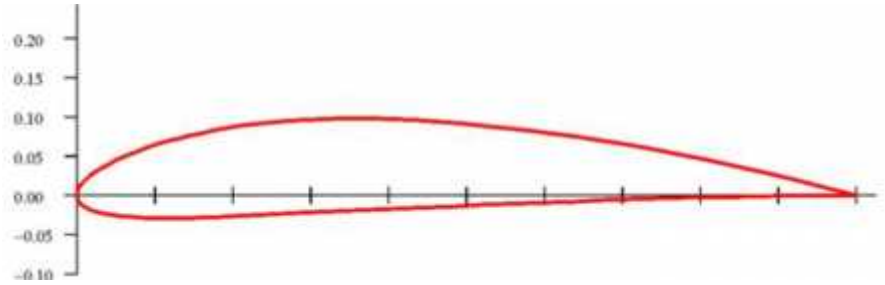

Figure IV.14. Profil NACA 4412.

IV.4.Simulation sur ANSYS

IV.4.1. Construction de la géométrie

La simulation a pour but d'appuyer nos fondements théoriques au niveau du choix du profil des pales. L'écoulement sur le profil NACA4412 a été simulé sous un vent incident de 6 m/s avec leurs angles d'attaque respectifs de 5,5 et 6,5 degrés. Les observations visaient à déceler la présence de turbulences au bord de fuite et la distribution de pression au niveau de l'extrados et de l'intrados.

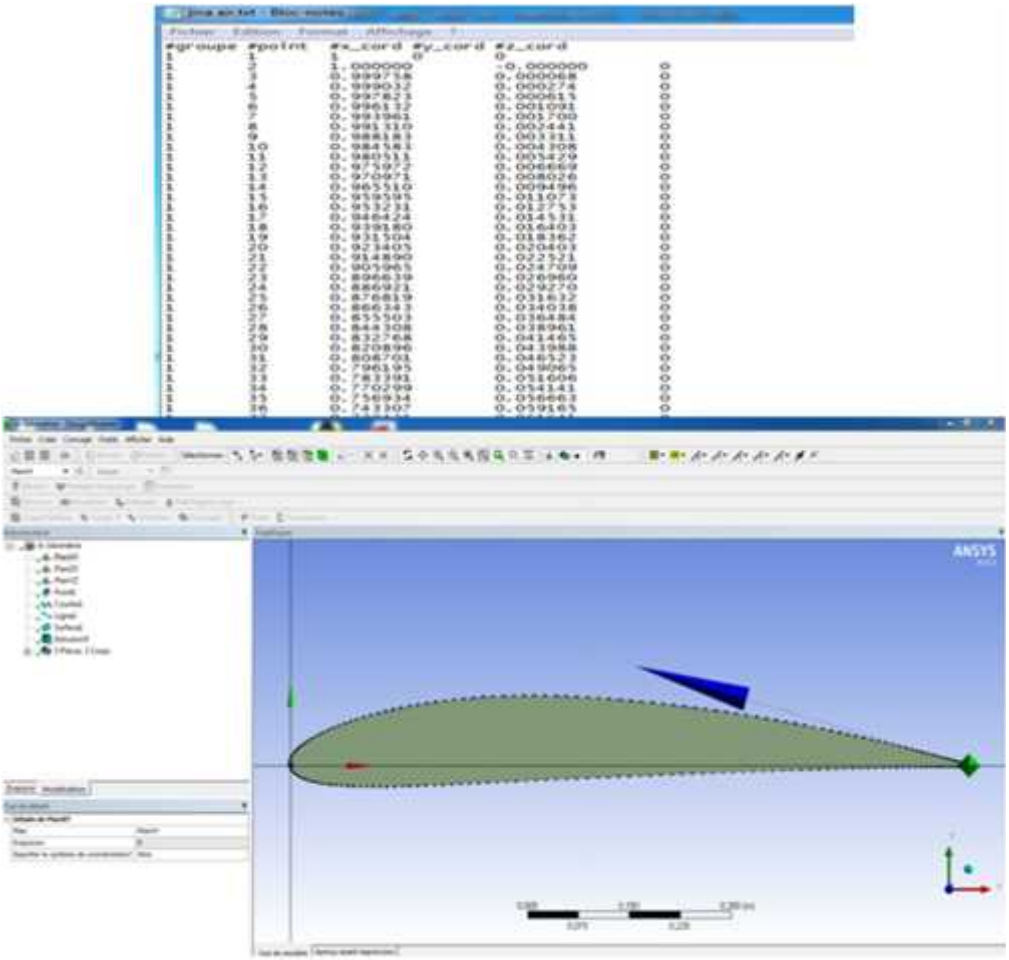

Figure IV.15. Interface de logiciel ANSYS

Les différentes étapes accomplies dans la réalisation de la simulation de chaque profil sont:

La préparation de la géométrie a consisté essentiellement à importer des points dans le but de tracer les profils.

Une fois la géométrie importée et le volume de contrôle créés, un maillage fut créé afin d'analyser l'écoulement autour du profil.

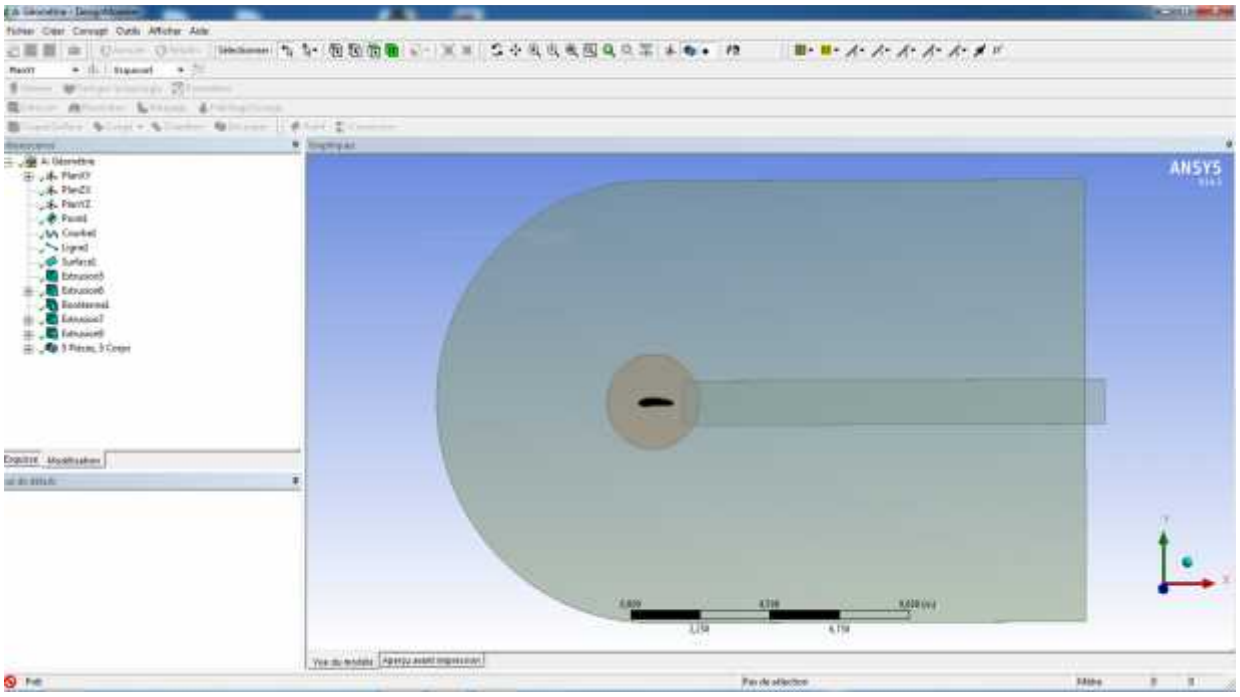

Figure IV.16. Interface de la géométrie de logiciel ANSYS

- **Génération de maillage**

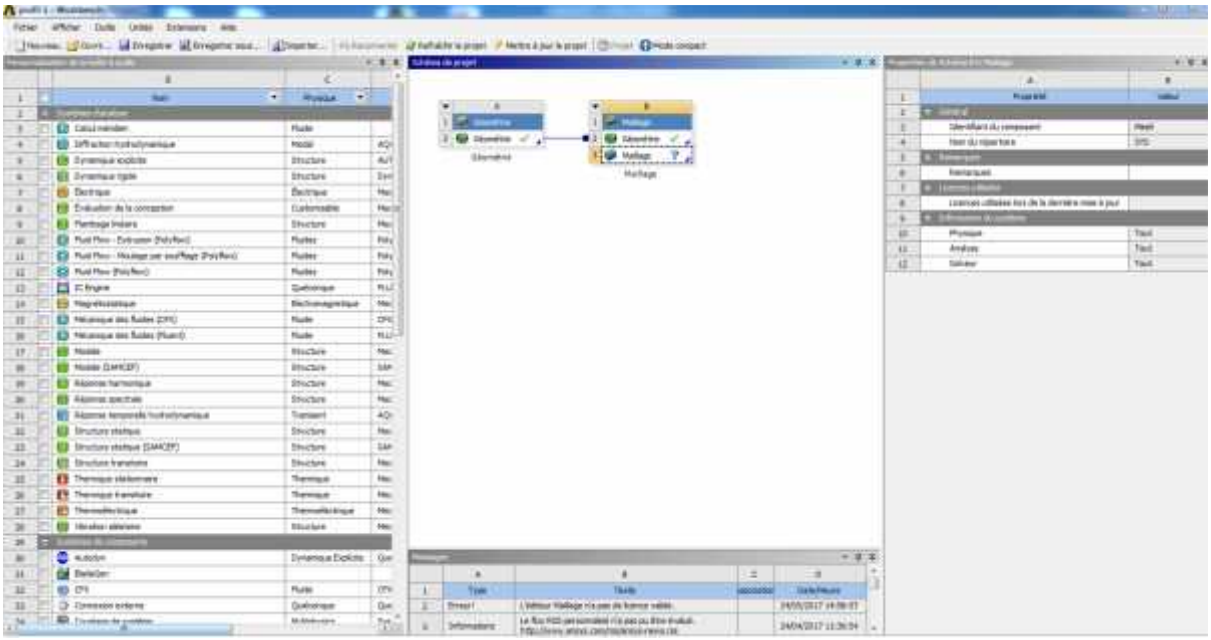

Figure IV.17. De la géométrie au maillage« c-mesh » de logiciel ANSYS

Généralement le maillage de type « *c-mesh* » est utilisé. Il est créé en divisant le volume de contrôle en 4 parties, soit 2 quarts de cercle et 2 rectangles. Une fois complétée, le volume à

l'allure générale d'un « C ». L'étape du maillage est cruciale dans la mesure où un mauvais maillage peut compromettre la validité des résultats.

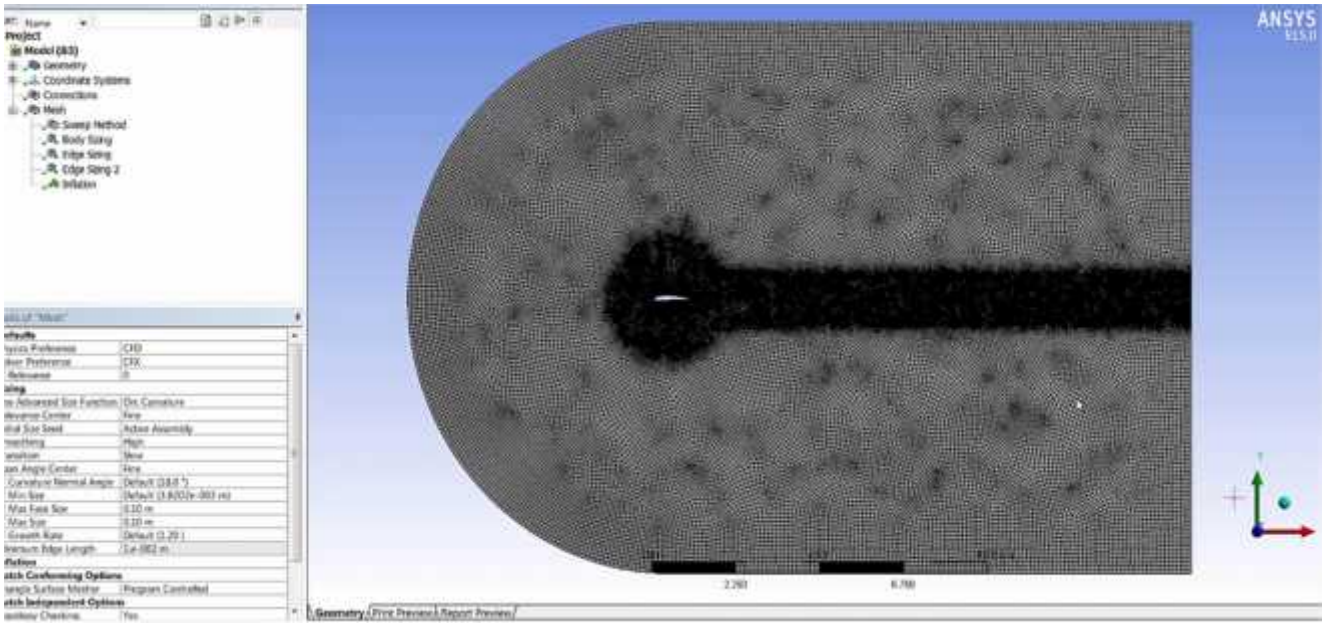

Figure IV.18. Maillage du profil NACA4412 dans le volume de contrôle

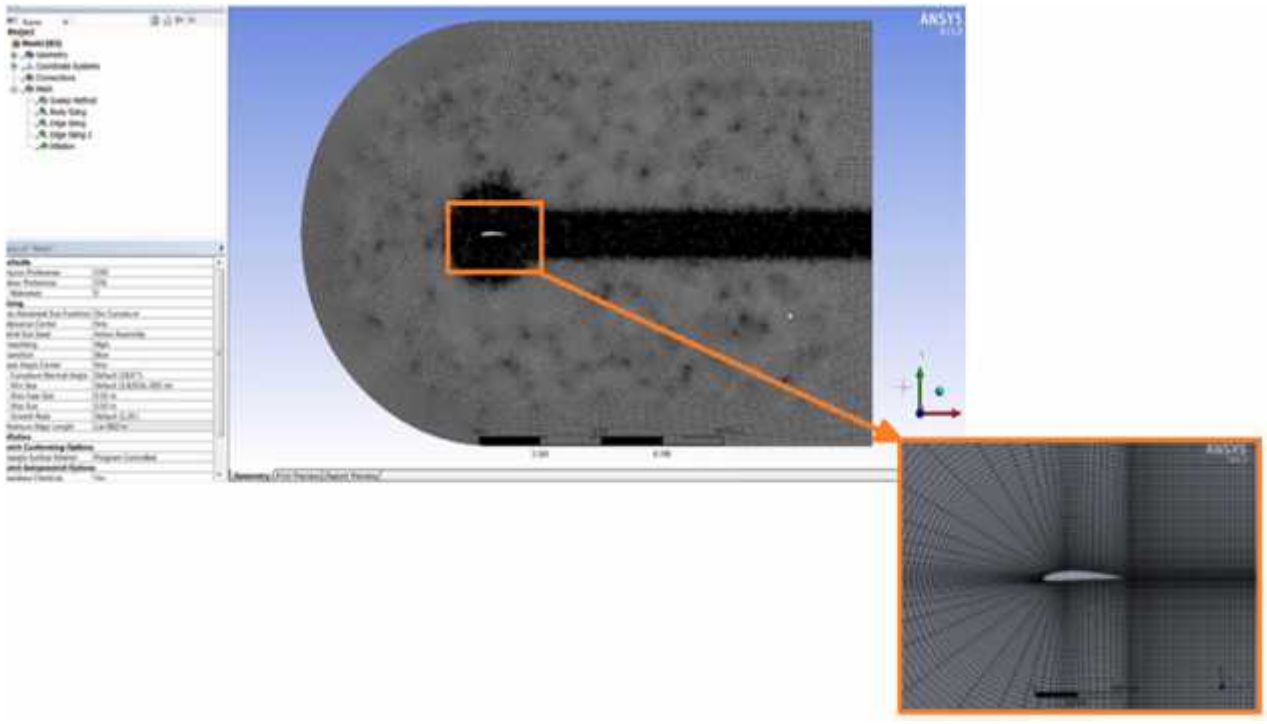

Figure IV.19. Vue élargie du maillage du profil NACA4412 dans le volume de contrôle

- **Manipulation sur CFX**

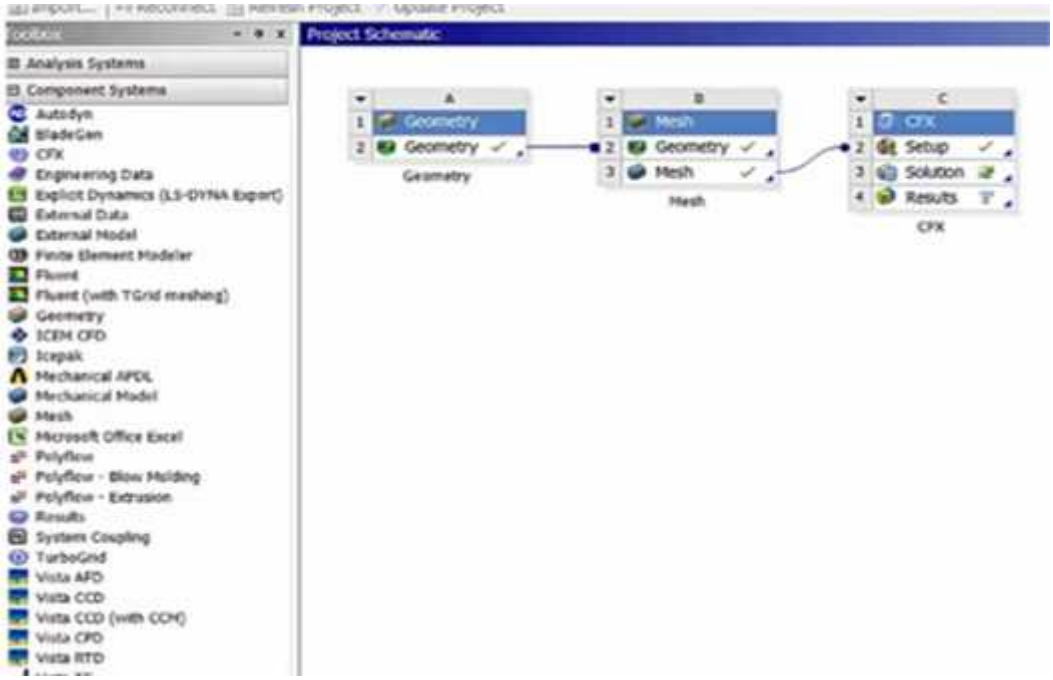

Figure IV.20. L'étape maillage ver l'étape CFX

Pour l'étape de CFX soit valable en va changer les paramètres suivent la nature du fluide le type d'écoulement et la vitesse d'entrée du l'écoulement tableau 4.2

Tableau IV.2. Paramètres de la simulation

Nature du fluide	Air
ρ = 1,225 kg/m³	
μ=1,7894e-05 kg/m*s	
Type d'écoulement	Laminaire
Vitesse d'entrée de l'écoulement	NACA4418 - 6 m/s à 65 degrés
NACA4412 - 6 m/s à 55 degrés	
Critère de convergence	0,000001

Paramètres de la simulation

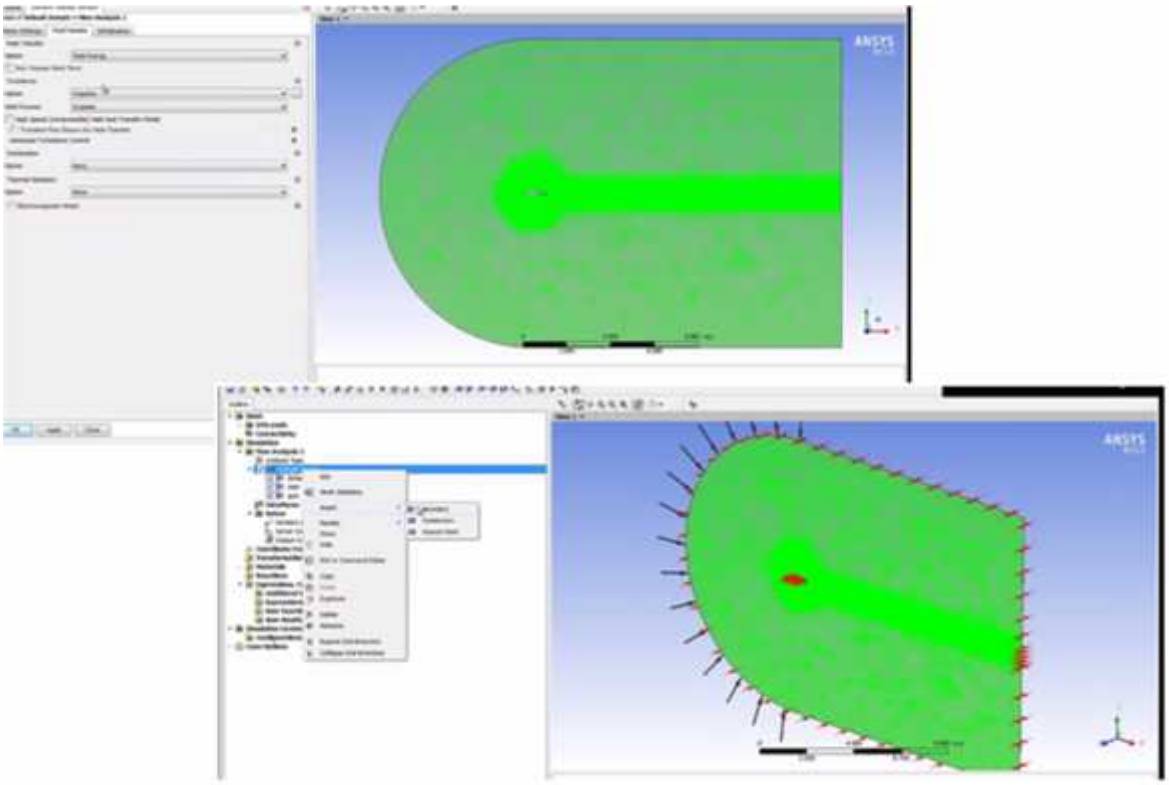

Figure IV.21. Les Paramètres de la simulation

IV.5.Résultat et interprétation

Les gradients de pression sur le profil NACA 4412 sont plus prononcés à l'extrados, ce qui aurait pu être un bon point puisque la dépression améliore la portance. Sauf qu'on voit que la pression à l'intrados vient l'équilibrer.

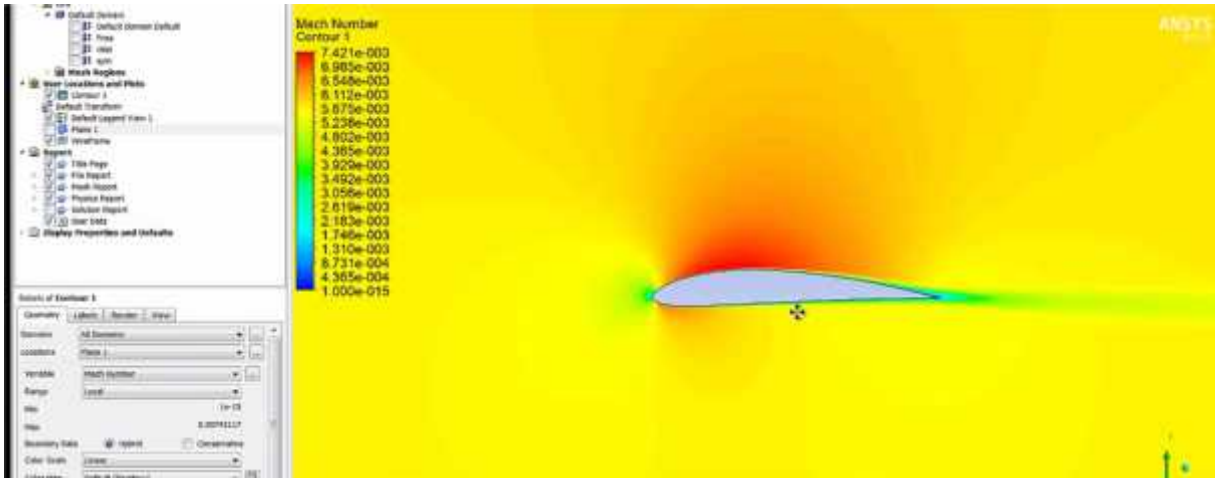

Figure IV.22. *La distribution du nombre de maillage.*

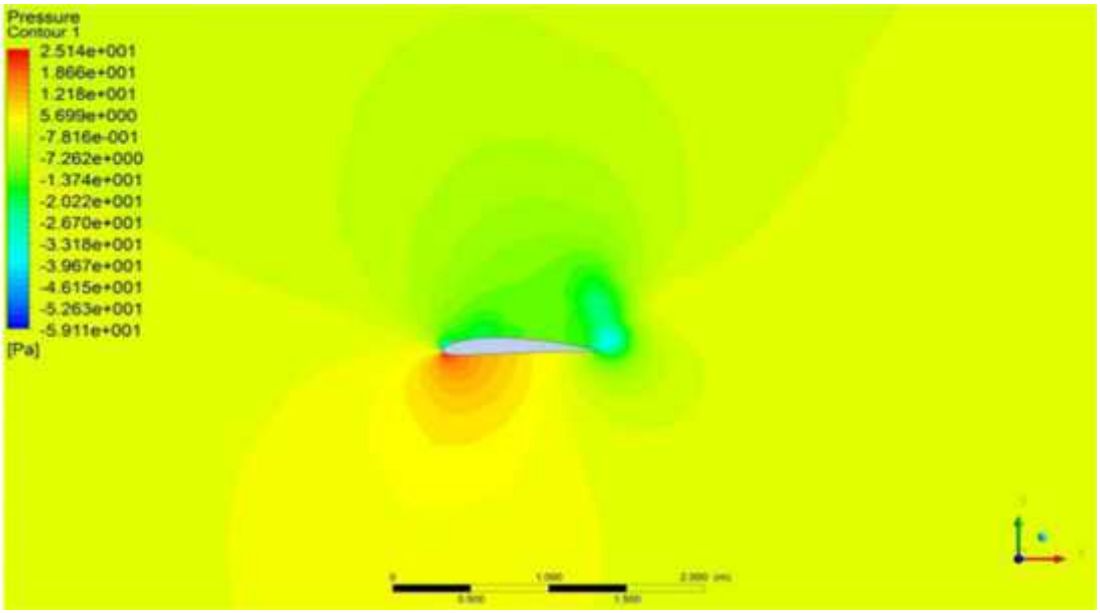

Figure IV.23. Distribution de pressions sur le profil NACA 4412 pour un vent de 6m/s

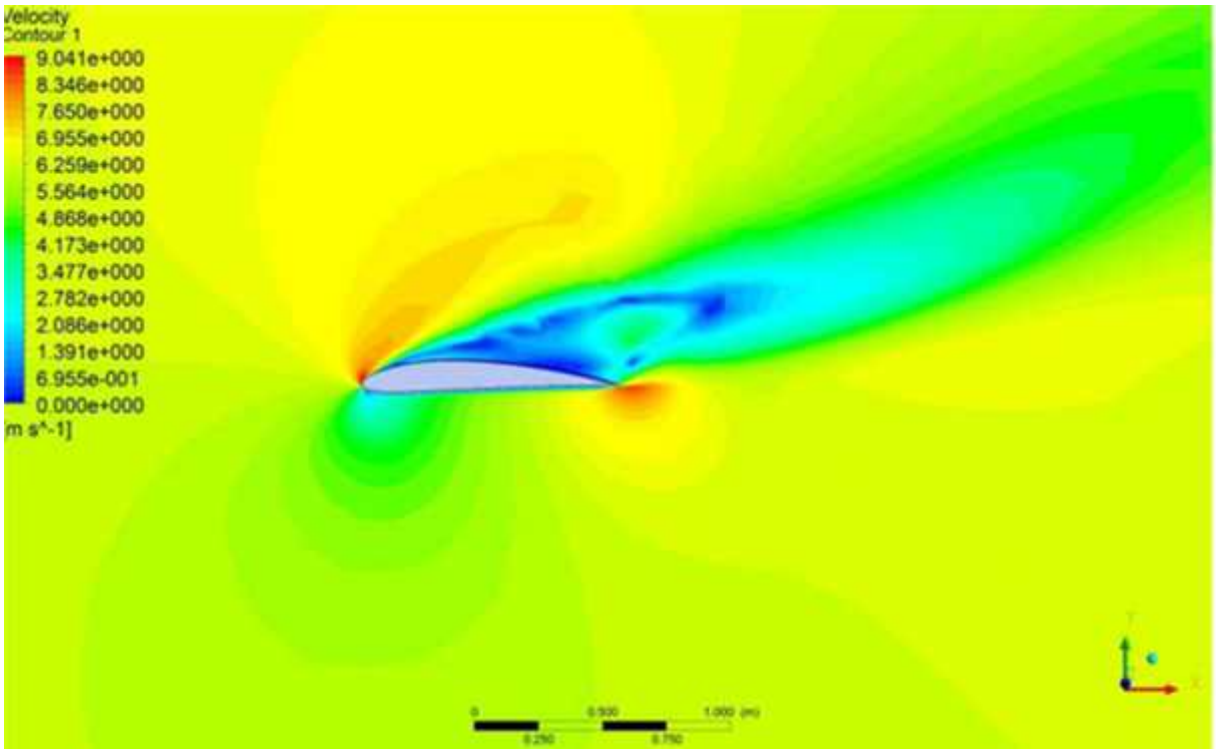

Figure IV.24. Écoulement du vent sur le profil NACA 4412

En ce qui concerne la convergence, quatre équations différentielles dans un courant laminaire incompressible à trois dimensions sont résolues simultanément, par itérations. Ces équations expriment la continuité et les vitesses d'écoulements suivant les 3 axes X, Y et Z.

Il faut préciser qu'initialement, la géométrie des profils fut préparée en leur imputant directement leurs angles de calages respectifs dans le volume de contrôle (pour tenir compte du vrillage). Cependant, plusieurs difficultés sont survenues notamment au niveau du maillage

et de la convergence. Finalement, après une vingtaine d'heures d'essais-erreur, la solution optée consistant à corriger l'angle d'incidence du vent de manière à compenser l'angle de calage des profils.

Les figures **IV.23.** et **IV.24.** Présentent respectivement les simulations au niveau de la distribution de pression et l'écoulement du vent sur les profils NACA 4412. Les paramètres utilisés sont présentés dans le tableau IV-2. Les simulations ont servi majoritaire à pondérer le critère « turbulence » de la matrice de décision.

IV.4.Manipulation

Après le branchement et le démarrage du ventilateur, nous avons eu les paramètres suivants :

Tableau IV.3. La fréquence en fonction de la vitesse

Fréquence (Hz)	20	30	40	50	60	65
Vitesse (m/s)	2,03	4	5	6,22	7	7,52

Le graphe montre que la vitesse du vent augment lorsque la fréquence de variateur de la vitesse augment (ventilateur) ; l'inverse et juste.

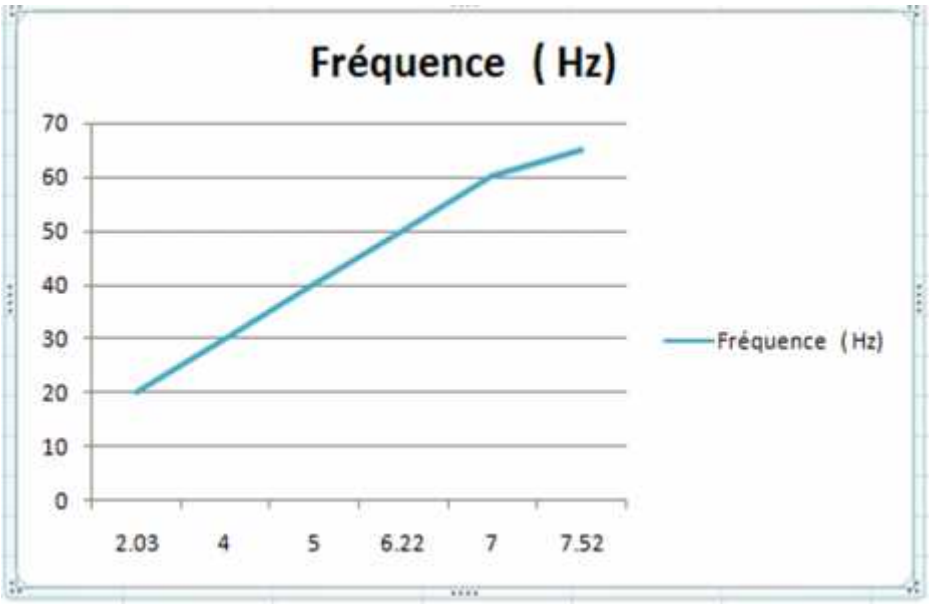

Figure IV.25. Graphe de fréquence en fonction de la vitesse

IV.4.1 .Caractéristiques géométriques des pales

Notre éolienne est composée de six pales, une génératrice, une tige de 12mm de diamètre pour fixer l'éolienne à la balance aérodynamique, Incidence des pales (angle de calage) est variable de (α=15°, puis 45° et 65°).

IV.4.2 .Nombres et les matériaux des pales

1 .Des pales en aluminiums

e = 0.6 cm, AB = 23 cm,

p=648 g, d= 61 cm

Profile NACA 4412

Le résulta pour six«6» pale

Tableau IV.4. Six «6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0.3	0.57	0.84	0.9
Intensité(A)	0	0	0.08	0.15	0.22	0.24
Puissance(w)	0	0	0.02	0.08	0.18	0.21

Tableau IV.5. Six«6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 45 °

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.24	0.4	0.71	0.92	1.14
Intensité(A)	0	0.06	0.10	0.18	0.24	0.30
Puissance(w)	0	0.01	0.04	0.12	0.22	0.34

Tableau IV.6. Six «6» pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 65°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.34	0.67	0.98	1.39	1.48
Intensité(A)	0	0.09	0.17	0.26	0.37	0.39
Puissance(w)	0	0.03	0.11	0.25	0.51	0.58

Tableau IV.7. La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Puissance(w) de 15°	0	0	0.02	0.08	0.18	0.21
Puissance(w) de 45°	0	0.01	0.04	0.12	0.22	0.34
Puissance(w) de 65°	0	0.03	0.11	0.25	0.51	0.58

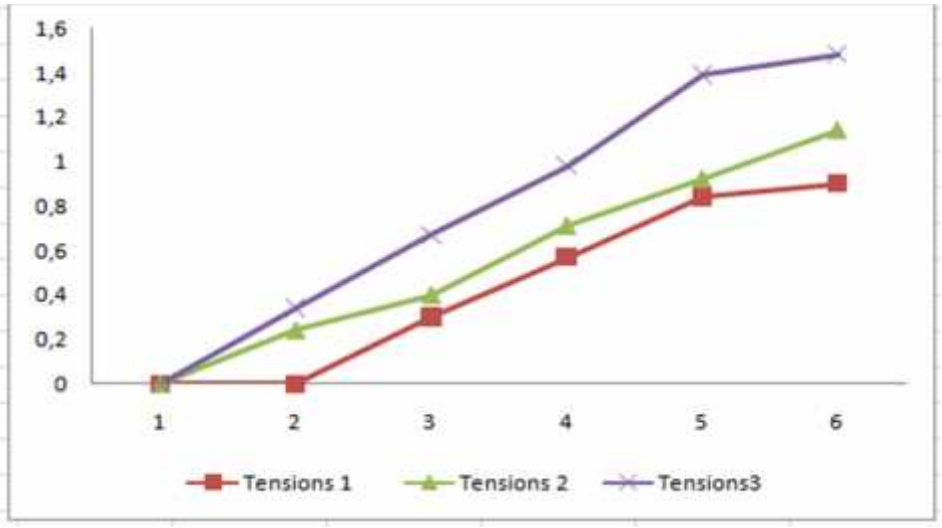

Figure IV.26. Graphe de trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°

Le résulta pour Trois« 3» pale

Tableau IV.8. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0	0.25	0.30	0.33
Intensité(A)	0	0	0	0.06	0.08	0.09
Puissance(w)	0	0	0	0.03	0.05	0.06

Tableau IV.9. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 45°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0	0.38	0.46	0.50
Intensité(A)	0	0	0	0.10	0.12	0.13
Puissance(w)	0	0	0	0.03	0.05	0.06

Tableau IV.10. Trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 65°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0	0.49	0.68	0.78
Intensité(A)	0	0	0	0.13	0.18	0.21
Puissance(w)	0	0	0	0.06	0.12	0.16

Tableau IV.11. La puissance des déférents angles d'attaques

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Puissance(w) de 15°	0	0	0	0.03	0.05	0.06
Puissance(w) de 45°	0	0	0	0.03	0.05	0.06
Puissance(w) de 65°	0	0	0	0.06	0.12	0.16

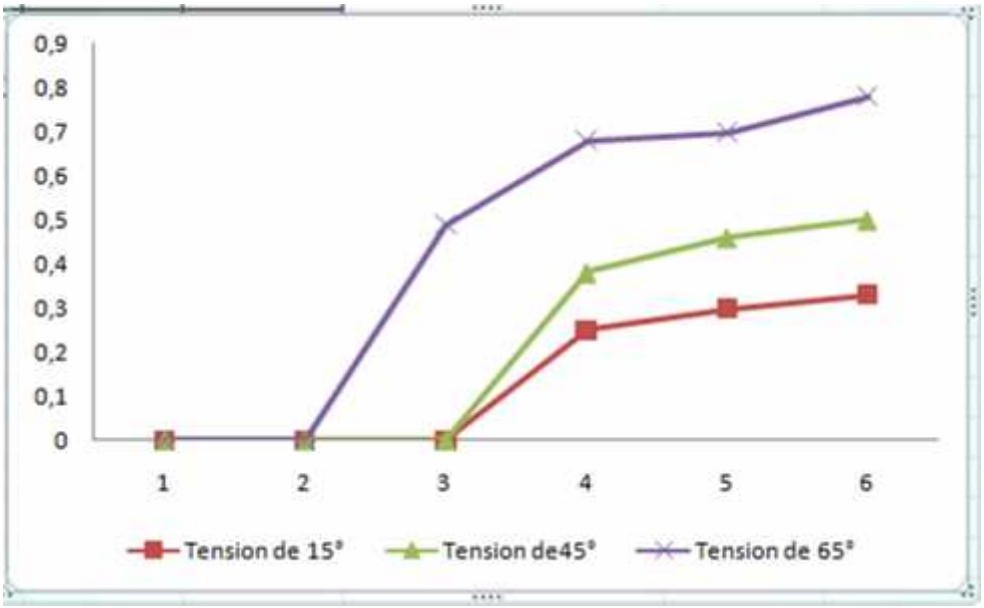

Figure IV.27. Graphe de trois «3 » pales en aluminium avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°

Les courbes des figures 26 et 27 donnent une idée sur l'évolution de la tension en fonction de la vitesse du vent. Il s'avère que celle-ci augmente avec la vitesse du vent jusqu'à 5V à partir de laquelle elle reste quasi-constante.

2. Des pales en bois

e = 1.6cm, AB = 30cm,

p=300g, d= 73 cm

Profil plan convexes,

Pour l'angle d'attaque 15°

Le résulta pour six«6» pale

Tableau IV.12. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0.2	0.47	0.91	1
Intensité(A)	0	0	0.05	0.12	0.24	0.26
Puissance(w)	0	0	0.01	0.05	0.21	0.26

Tableau IV.13. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 45°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.37	0.61	0.98	1.29	1.40
Intensité(A)	0	0.09	0.16	0.26	0.34	0.37
Puissance(w)	0	0.03	0.09	0.25	0.43	0.50

Tableau IV.14. Sise «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 65°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.6	0.75	0.97	1.60	1.70
Intensité(A)	0	0.16	0.2	0.25	0.42	0.45
Puissance(w)	0	0.1	0.15	0.24	0.7	0.8

Tableau IV.15. La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Puissance(w) de 15°	0	0	0.01	0.05	0.21	0.26
Puissance(w) de 45°	0	0.03	0.09	0.25	0.43	0.50
Puissance(w) de 65°	0	0.1	0.15	0.24	0.7	0.8

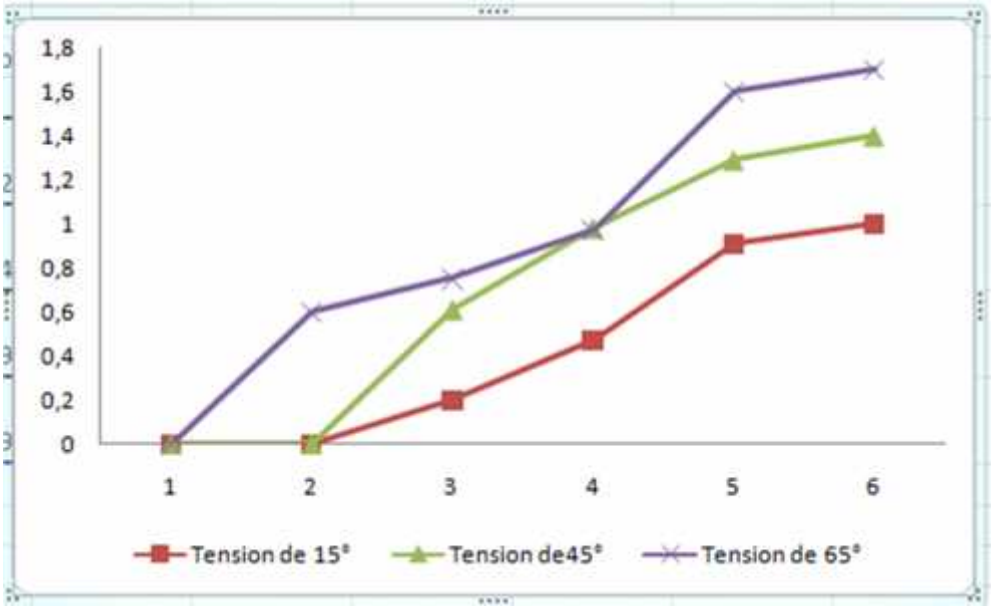

Figure IV.28. Graphe de trois «6» pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°

Le résulta pour Trois« 3» pale

Tableau IV.16. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0	0.40	0.85	1	1.28
Intensité(A)	0	0	0.10	0.23	0.27	0.34
Puissance(w)	0	0	0.04	0.19	0.27	0.43

Tableau IV.17. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 45°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.43	0.51	1.07	1.45	1.58
Intensité(A)	0	0.11	0.13	0.28	0.39	0.42
Puissance(w)	0	0.04	0.06	0.30	0.56	0.66

Tableau IV.18. De trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 65°

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Tension (V)	0	0.66	0.69	1.03	1.53	1.62
Intensité(A)	0	0.17	0.18	0.28	0.40	0.43
Puissance(w)	0	0.11	0.12	0.29	0.61	0.70

Tableau IV.19. La puissance des déférents angles d'attaques en fonction de la vitesse

Vitesse (m/s)	2.03	4	5	6.22	7	7.52
Puissance(w) de 15°	0	0	0.04	0.19	0.27	0.43
Puissance(w) de 45°	0	0.04	0.06	0.30	0.56	0.66
Puissance(w) de 65°	0	0.11	0.12	0.29	0.61	0.70

Tableau IV.20. De trois «3 » pales en bo !is avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°

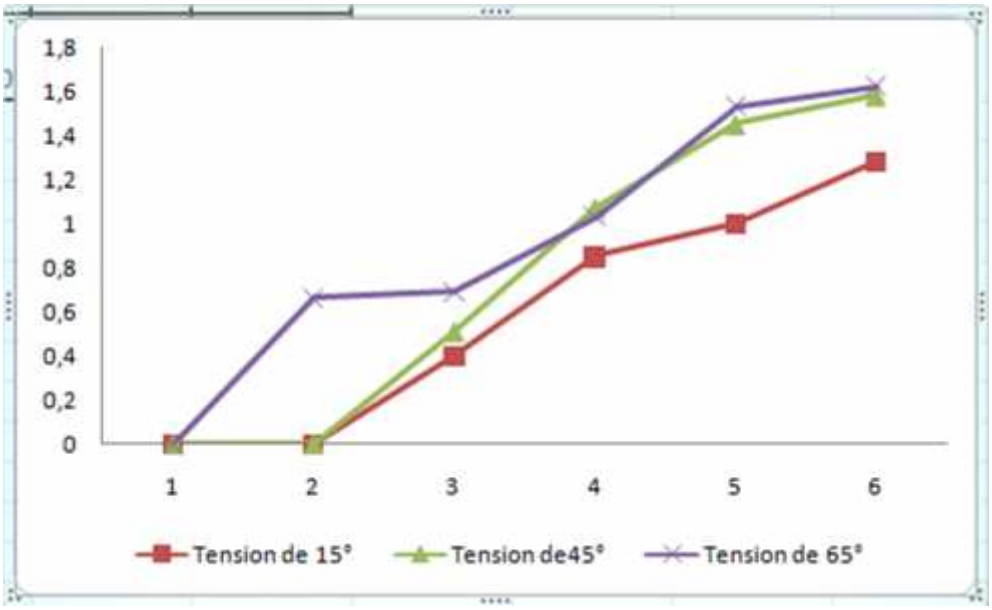

Figure IV.29. Graphe de trois «3 » pales en bois avec l'angle d'attaque de 15°, 45 °et 65°

Pour le bois nous remarquons que la pente de la courbe est importante à partir de l'angle de calage α=45°. On remarque aussi que l'angle de calage α= 65° nous donne la tension maximale à partir duquel même si on augmente la valeur de l'angle de calage la puissance diminue.

Remarque

Les tableaux et les graphes montrent que l'éolienne avec 6 et 3 pales Aluminium ou bien le Bois augment à chaque foi en augment l'angle de calage **α = 65°**, on atteint l'angle de calage de 70° la tension diminue brusquement.

3- Tous les résultats obtenus montrent que la puissance électrique générée est très affectée par l'angle de calage et les matériaux des pales de l'éolienne.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est basé essentiellement sur quatre parties. On premier lieu on représente les généralités sur l'énergie éolienne, ainsi que les différentes types d'éoliennes. En suite on a passé au principe de fonctionnement et choix d'éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, la filière éolienne occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

En Algérie les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. Aussi la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national est très faible par rapport aux pays voisins puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité.

Cette étude a permis d'identifier les différents paramètres aérodynamiques à prendre en compte dans la conception des pales d'une éolienne ainsi que les éléments de conception d'une turbomachine.

La conception optimale de la boite de vitesse d'une éolienne se démontre par la grandeur du son rapport multiplicateur de vitesse de rotation permettant l'utilisation d'un générateur de courant électrique plus performant.

Dans la partie de conception et simulation on s'est intéressé à étudier numériquement l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel a travers les trois et six pales NACA4412 d'une éolienne à axe horizontale. Pour la résolution numérique, on a fait appel à «ANSYS FLUENT » dans le but d'observer la distribution de pression et de vitesse. Cette simulation a surtout permis de sélectionner le profil ayant les meilleures performances aérodynamiques sous les conditions de fonctionnement réel de l'éolienne. Les résultats obtenus à l'issus des simulations devait présenter une dépression à l'extrados suffisamment importante pour obtenir le meilleur rapport de la portance sur la trainée.

Nous concluons que le choix de placement des éoliennes à axe horizontal dans les régions à petit vents ou dans les zones urbaines sont moins avantageux; contrairement aux éoliennes à axe vertical le placement se fait dans les endroits à petits vents comme les autoroutes leur démarrage est facile et avec un bon rendement.

La manipulation sur le banc d'essai a été faite de manière à pouvoir tirer suffisamment d'énergie du vent pour fournir la sortie de l'alternateur.

Finalement, l'éolienne avec 6 et 3 pales en Aluminium ou bien en Bois augment à chaque fois en augment l'angle de calage **α = 65°**, on atteint l'angle de calage de 70° la tension diminue brusquement.

Tous les résultats obtenus montrent que la puissance électrique générée est très affectée par l'angle de calage et les matériaux des pales de l'éolienne.

Références

[1] : ATMANIA .H « La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie cas de la photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université d'Oran-2-,2015 .

[2] : Global statuts report (Rapport mondial sur les énergies renouvelables ,2011.

[3] : Chapitre II : éoliennes

[4] :BENCHERIF.B «étude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone a aimants permanent » Thèse de Magister, université de Sétif ,2011.

[5] :CHAZALLON.C «Conception d'éoliennes» INSA de Strasbourg- RIZZO Danien, Mémoire d'ingénieur ,2008.

[6] : BENCHARIF .S« Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne »Mémoire de Master, université de Biskra, 2013.

[7] : KADRI .M.A «Etude numérique de l'écoulement d'aire à travers une éolienne Darriues de type H à pale NACA 4412»Mémoire de Master académique, université de Ouargla ,2015.

[8]:E.Hau, WindTurbines,Fundamentals, Technologies,Application, Economics, 2nd ed. Springer,2005

[9]:TheWorldWindEnergyAssociation, Half-yearReport 2011

[10] :Equilibres,Lalettre de la Commission Régulationdel'ElectricitéetduGaz,N12,Mars2011

[11] :Programmedesénergiesrenouvelablesetdel'ef- ficacitéénergétique,mars2011

[12] :A.Samil,BulletindesEnergiesRenouvelables, N°4, Décembre2003

[13] :K.Bendiff,L'expérienceduHCDS dansle développementdesEnergiesrenouvelables, 2008

[14]S.Krohn(editor),P.E.MorthorstandS.Awerbuch,TheEconomicsofWindEnergy,Arep ortbythe EuropeanWindEnergyAssociation,march2009

[15] : Guideméthodologique relatifàl'implantation des éoliennes en Seine-et-Marnemars 2007cle7613f1

[16]:M.Jean-Fabrice Kouakou et M. David la Roche-Carrier «Projet d'études en ingénierie dans le cadre du programme de baccalauréat en génie mécanique» université de Québec ,2011.

Catalogue des fabricants d'aérogénérateurs de petite et moyenne puissance

AMOS	Kestrel 600		
Amos Technology P.O. Box 3819 2125 Randburg – Johannesburg Républic of South Africa Tél. 011 475 0075 Fax. 011 475 0286 http://users.iafrica.com/a/am/amos/kestrel.htm amos@iafrica.com			
Performances :			
Puissance nominale	600 W		
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	16,5 m/s		
Vitesse de vent maximale de service	30 m/s		
Rotor :			
Diamètre	1,2 m		
Surface balayée	1,13 m²		
Nombre de pales	6		
Matériau	polypropylène + FV		
Fabricant des pales	-		
Vitesse de rotation	-		
Type	Face au vent		
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct		
Générateur :			
Type	aimants permanents		
Vitesse de rotation			
Tension	12/24/36/48Vdc		
Connexion au réseau	non		
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	décrochage passif		
Régulation survitesse	électronique		
Orientation	gouvernail aval		
Système de freinage	-		
Mâts :			
Accessoires pour mât tubulaire 76x3,2 mm			
Masses :			
Nacelle complète	21 kg		
Options :			

AMPAIR	Pacific 100		

Ampair Natural Energy The doughty building, Crow arch lane Ringwood, Hants BH24 1NZ England Tél. 44 1425 48 07 80 Fax. 44 1425 47 94 97 www.ampair.com sales@ampair.com			
Performances :			
Puissance nominale	70 W		
Vitesse de vent de démarrage	3,5 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	16 m/s		
Vitesse de vent maximale de service			
Rotor :			
Diamètre	0,915 m		
Surface balayée	0,66 m²		
Nombre de pales	6		
Matériau	Polypropylène + FV		
Fabricant des pales			
Vitesse de rotation			
Type	Face au vent		
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct		
Générateur :			
Type	aimants permanents		
Vitesse de rotation			
Tension	12/24Vdc		
Connexion au réseau	non		
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor			
Régulation survitesse			
Orientation	gouvernail aval		
Système de freinage	-		
Mâts :			
Mâts tubulaire 48 mm	1200 / 2400mm		
Masses :			
Nacelle complète	12,8 kg		
Options :			
Protection marine	standard		
Contacteur électrique tournant	standard		

ATLANTIC ORIENT CORPORATION	AOC Windlite	AOC 15-50	
Atlantic Orient Corporation Farrell Farm road P.O. Box 1097 Norwich, VT 05505 – USA Tél. 802-649-5446 Fax. 802-649-5404 aoc@vermontel.net http://www.aocwind.net			
Performances :			
Puissance nominale	10kW	50kW	
Vitesse de vent de démarrage	2,5 m/s	m/s	
Vitesse de vent de puissance nominale	11 m/s	12 m/s	
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	80 m/s	
Rotor :			
Diamètre	7 m	15m	
Surface balayée	38,5 m²	176,7 m²	
Nombre de pales	3	3	
Matériau	Composite	Composite	
Fabricant des pales	-	-	
Vitesse de rotation	230 tr/min	64 tr/min	
Type	Face au vent	Sous le vent	
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct	engrenages	
Rapport	-	28,2	
Générateur :			
Type	Aimants permanents	Asynchrone triphasé	
Vitesse de rotation	230 tr/min	1500 tr/min	
Tension	100-300 Veff	400V-50hz-tri	
Connexion au réseau	option	oui	
Régulation et système de sécurité			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor	décrochage	
Régulation survitesse	effacement rotor	aérofreins	
Orientation	Gouvernail aval	Rotor sous le vent	
Système de freinage	-	aérofreins cde. électr.	
Mâts			
Mât treillis	25 m	25 m	
Mâts haubanés basculant	25 m	-	
Masses			
Nacelle complète	475 kg	2420 kg	
Mât 25 m	950 kg	3210 kg	
Options			
Mât treillis 32m	-		
Version 50 Hz			

BERGEY	XL.1	Excel	
Bergey Windpower 2001 Priestley av. Norman, OK 73069 – USA Tel. 00 01 405 364 4212 Fax. 00 01 405 364 2078 www.bergey.com sales@bergey.com			
Performances :			
Puissance nominale	1 kW	7,5 kW	
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s	3,4 m/s	
Vitesse de vent de puissance nominale	11 m/s	13,8m/s	
Vitesse de vent maximale de service	54 m/s	54 m/s	
Rotor :			
Diamètre	2,5 m	7 m	
Surface balayée	4,9 m²	38,5 m²	
Nombre de pales	3	3	
Matériau	FV extrudé	FV extrudé	
Fabricant des pales	Bergey	Bergey	
Vitesse de rotation	690 tr/min	310 tr/min	
Type	face au vent	face au vent	
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	
Rapport	-	-	
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	
Vitesse de rotation max.	690 tr/min	310 tr/min	
Tension	-	-	
Connexion au réseau	non	option	
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	effacement	effacement	
Régulation survitesse	effacement	effacement	
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	
Système de freinage	-	-	
Mâts :			
Mâts tubulaires haubanés basculants	9-13-19-25-32m	18-24-30m	
Mâts treillis haubanés basculants	-	18-24-30-37m	
Mâts treillis autonomes	-	18-24-30-37m	
Masses :			
Nacelle complète	35 kg	500 kg	
Options :			
Protection marine			

BORNAY	INCLIN 250	INCLIN 600	INCLIN 1500
J. Bornay Aérogéneradores Paraje Ameradors, s/n 03420 Castalla (Allicante) Espagne Tél. +34 965 560 025 Fax +34 965 560 752 http://www.bornay.com bornay@bornay.com			
Performances :			
Puissance nominale	250 W	600 W	1500 W
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s	3,5 m/s	3,5 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	11 m/s	11 m/s	12 m/s
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	60 m/s	60 m/s
Rotor :			
Diamètre	1,35 m	2,0 m	2,86 m
Surface balayée	1,43 m²	3,14 m²	6,42 m²
Nombre de pales	2	2	2
Matériau	Polyamide	Fibre de carbone	Fibre de carbone
Fabricant des pales	-	-	-
Vitesse de rotation			
Type	Face au vent	Face au vent	Face au vent
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation			
Tension	12/24/48V	12/24/48V	24/48/120/220V
Connexion au réseau			
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Régulation survitesse	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	gouvernail aval
Système de freinage	-	-	-
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	7 / 12m	7 / 12m	7 / 12m
Masses :			
Nacelle complète	32 kg	38 kg	42 kg
Nacelle + mât 7 m	-	-	-
Nacelle + mât 12 m	-	-	-
Options :			
Protection marine	non	non	non
Contacteur électrique tournant	non	non	non
Amortissement rotation nacelle	non	non	non
Version 60 Hz	non	non	non

BORNAY	INCLIN 3000	INCLIN 6000	
J. Bornay Aérogénéradores Paraje Ameradors, s/n 03420 Castalla (Allicante) Espagne Tél. +34 965 560 025 Fax +34 965 560 752 http://www.bornay.com bornay@bornay.com			
Performances :			
Puissance nominale	3,0 kW	6,0 kW	
Vitesse de vent de démarrage	3,5 m/s	3,5 m/s	
Vitesse de vent de puissance nominale	12 m/s	12 m/s	
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	60 m/s	
Rotor :			
Diamètre	4 m	4 m	
Surface balayée	12,56 m²	12,56 m²	
Nombre de pales	2	3	
Matériau	Fibres de carbone	Fibres de carbone	
Fabricant des pales	-	-	
Vitesse de rotation			
Type	Face au vent	Face au vent	
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct	Entraînement direct	
Rapport	-	-	
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	
Vitesse de rotation			
Tension	24/48/120/220V	220V	
Connexion au réseau	non	non	
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor	effacement rotor	
Régulation survitesse	effacement rotor	effacement rotor	
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	
Système de freinage	Frein électrique	Frein électrique	
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	7 / 12 m	7 / 12 m	
Masses :			
Nacelle complète	125 kg	155 kg	
Nacelle + mât 7 m	-	-	
Nacelle + mât 12 m	-	-	
Options :			
Protection marine	non	non	
Contacteur électrique tournant	non	non	
Version 60 Hz	non	non	

CITA	CH CAPHORN 10POL	CH CAPHORN 12/5.3	
BP 45 – 35-71 rue Etienne Dolet 94141 Alfortville Cedex France Tél. 33 01 49 77 41 00 Fax. 33 01 49 77 41 06 http://www.cita-wind.com business@cita-wind.com			
Performances :			
Puissance nominale	12 kW	12 kW	
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s	3 m/s	
Vitesse de vent de puissance nominale	13 m/s	13 m/s	
Vitesse de vent maximale de service	30 m/s	30 m/s	
Vitesse de vent de survie	90 m/s	70 m/s	
Rotor :			
Diamètre rotor	4,4 m	4,4 m	
Diamètre carénage	5,3 m	5,3 m	
Surface balayée (rotor)	15,2 m²	15,2 m²	
Surface balayée (carénage)	22,0 m²	22,0 m²	
Nombre de pales	3	3	
Matériau	Composite	Composite	
Fabricant des pales	-	-	
Vitesse de rotation	0-325 tr/min	0-325 tr/min	
Type	Caréné face au vent	Caréné face au vent	
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct	Entraînement direct	
Rapport	-	-	
Générateur :			
Type	synchrone	synchrone	
Vitesse de rotation	0-325 tr/min	0-325 tr/min	
Tension	400V	400V	
Connexion au réseau	Oui (convertisseur)	Oui (convertisseur)	
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	Effacement piloté	Effacement	
Régulation survitesse	Effacement piloté	Effacement	
Orientation	Active (moteurs)	passive	
Système de freinage	Frein à disque	Frein à disque	
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	Class I, II, Pol 12-20m	Class I, II 12-20m	
Mât autonome tubulaire ou géodésique	Class I, II, Pol 12-20m	Class I, II 12-20m	
Masses :			
Nacelle complète (avec carénage, rotor et pales)	1220 kg	600 kg	
Options :			
Configurations spéciales		Conditions cycloniques	
Configuration site isolé	AC/DC/AC	Site isolé AC/DC	
Configuration connexion réseau	AC 240-400V 50-60Hz	AC 240-400V 50-60Hz	
Couplage transparent	Eoliennes en parallèle Groupes électrogènes Panneaux solaires	Eoliennes en parallèle Groupes électrogènes Panneaux solaires	

ECOTOOLS	TWR_0.18	TWR_2	WR7
Ecotools sustainables SA Suisse www.ecotools.net **Ecotools France SARL** place R. Cassin 81500 LAVAUR Tél 05 63 83 15 83 Fax 05 63 83 15 94			
Performances :			
Puissance nominale	55 W	1,5 kW	4,5 kW
Vitesse de vent de démarrage	4,5 m/s	3,5 m/s	2,5 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	20 m/s	20 m/s	20 m/s
Vitesse de vent maximale de service	40 m/s	30 m/s	30 m/s
Rotor :			
Diamètre	300 x h600mm	1000 x h2000mm	2000 x h3500mm
Surface balayée	0,18 m²	2 m²	7 m²
Nombre de pales	3	3	3 x biplan
Matériau	composite	composite	composite
Fabricant des pales	Borghini-CH	Aeromar-BR	Aeromar-BR
Vitesse de rotation	350 t/min.	300 t/min.	200 t/min.
Type	Savonius modifié	Savonius modifié	Savonius modifié
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation maximale	350 t/min.	300 t/min.	200 t/min.
Tension	50 Vac	150 Vac	150 Vac
Connexion au réseau	non	option	option
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	-	-	-
Régulation survitesse	saturation profil	saturation profil	saturation profil
Orientation	-	-	-
Système de freinage	-	-	frein centrifuge
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	-	-	-
Masses :			
Voilure + Générateur	5 kg	85 kg	150 kg
Options :			
Protection marine			
Contacteur électrique tournant	-	-	-
Amortissement rotation nacelle	-	-	-
Version 60 Hz	-	-	-

FORTIS	ESPADA	PASSAAT	MONTANA
Botanicuslaan 14 9751 AC HAREN Netherlands Tél. +31 50 5340 104 Fax +31 50 5340 104 http://www.fortiswindenergy.com fortis-windenergy@wxs.nl			
Performances :			
Puissance nominale	600 W	1300 W	4 kW
Vitesse de vent de démarrage	3,5 m/s	3,7 m/s	3 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	12 m/s	14 m/s	13,5 m/s
Vitesse de vent maximale de service	50 m/s	50 m/s	50 m/s
Rotor :			
Diamètre	2,2 m	3,12 m	5 m
Surface balayée	3,8 m²	7,65m²	19,63 m²
Nombre de pales	2	3	3
Matériau	Composite	Composite	Composite
Fabricant des pales	-	-	
Vitesse de rotation	240-900 tr/min	180-775 tr/min	120-420 tr/min
Type	Face au vent	Face au vent	Face au vent
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation	240-900 tr/min	180-775 tr/min	120-420 tr/min
Tension	12 ou 24 Vac	12/24/120/240 Vac	24 ou 120 Vac
Connexion au réseau	option	option	option
Régulation et système de sécurité			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Régulation survitesse	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	gouvernail aval
Système de freinage	non	non	non
Mâts			
Mât haubané basculant	6 – 13m	12 – 18 – 24m	12 – 18 – 24m
Masses			
Nacelle complète	52 kg	75 kg	200 kg
Options			
Collecteur électrique tournant	option	option	option

FORTIS	ALIZE		
Botanicuslaan 14 9751 AC HAREN Netherlands Tél. +31 50 5340 104 Fax +31 50 5340 104 http://www.fortiswindenergy.com fortis-windenergy@wxs.nl			
Performances :			
Puissance nominale	10 kW		
Vitesse de vent de démarrage	3,2 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	12,5 m/s		
Vitesse de vent maximale de service	50 m/s		
Rotor :			
Diamètre	7 m		
Surface balayée	38,5 m²		
Nombre de pales	3		
Matériau	Composite		
Fabricant des pales	-		
Vitesse de rotation	25-350 tr/min		
Type	Face au vent		
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct		
Rapport	-		
Générateur :			
Type	aimants permanents		
Vitesse de rotation	1500 tr/min		
Tension	120 Vac		
Connexion au réseau	option		
Régulation et système de sécurité			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor		
Régulation survitesse	effacement rotor		
Orientation	gouvernail aval		
Système de freinage	non		
Mâts			
Mâts haubanés basculant	24 – 36 m		
Masses			
Nacelle complète	540 kg		
Options			
Collecteur électrique tournant	standard		

FUTURE TECHNOLOGIES	TWINPOWER 1.5		
Future Technologies AG Gewerbestrasse 12-14 86707 Westendorf - Allemagne Tél. 0049 (0) 8273-99593-0 Fax. 0049 (0) 8273-99593-99 http://www.ft-ag.de jtg@ft-ag.de			
Performances :			
Puissance nominale	1 kW		
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	13 m/s		
Vitesse de vent maximale de service	45 m/s		
Rotor :			
Diamètre rotor	1,5 m		
Surface balayée (rotor)	1,80 m²		
Nombre de pales	2		
Matériau	Composite		
Fabricant des pales	FT-AG		
Vitesse de rotation	850 tr/min		
Type	Axe horizontal		
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct		
Rapport	-		
Générateur :			
Type	Discoïde		
Vitesse de rotation	0-850 tr/min		
Tension	0-47V		
Connexion au réseau	NC		
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	électronique		
Régulation survitesse	électronique		
Orientation	Active (électronique)		
Système de freinage	électronique		
Mâts :			
Mât	2,5 à 8m - 76 mm		
Masses :			
Nacelle complète	51 kg		
Options :			

MARLEC	RUTLAND 913	RUTLAND 910-3	RUTLAND 1803
MARLEC ENGINEERING Rutland House -Trevithick Rd - Corby Northants -NN17 5XY United Kingdom www.marlec.co.uk sales@marlec.co.uk Tel : +44 (0) 1536 201588 Fax: +44 (0) 1536 400211			
Performances :			
Puissance nominale	300 W	150 W	600 W
Vitesse de vent de démarrage	3,0 m/s	3,0 m/s	3,0 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	16 m/s	14 m/s	14,0 m/s
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	60 m/s	60 m/s
Rotor :			
Diamètre	0,91 m	0,91 m	1,87 m
Surface balayée	0,65 m²	0,65 m²	2,75 m²
Nombre de pales	6	6	2
Matériau	composite	composite	composite
Fabricant des pales	-	-	-
Vitesse de rotation	-	-	-
Type	face au vent	face au vent	face au vent
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation max.	-	-	-
Tension	-	-	-
Connexion au réseau	non	non	non
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	électronique	effacement rotor	effacement rotor
Régulation survitesse	électronique	effacement rotor	effacement rotor
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	gouvernail aval
Système de freinage	-	-	-
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	-	-	-
Masses :			
Nacelle complète	10,5 kg	16,0 kg	38,5 kg
Options :			

SOUTHWEST WINDPOWER	Whisper H40	Whisper H80	Whisper 175
Southwest Windpower Inc. 2131 N. first street Flagstaff, Arizona 86004 USA Tél. (928) 779-9463 Fax (928) 779-1485 http://www.windenergy.com info@windenergy.com			
Performances :			
Puissance nominale	900 W	1000 W	3200 W
Vitesse de vent de démarrage	3,4 m/s	3,1 m/s	3,1
Vitesse de vent de puissance nominale	12,5 m/s	10,5 m/s	12,1 m/s
Vitesse de vent maximale de service	25 m/s	25 m/s	25 m/s
Rotor :			
Diamètre	2,1 m	3,0 m	4,6 m
Surface balayée	3,6 m²	7,3 m²	16,4 m²
Nombre de pales	3	3	2
Matériau	Plastique + FV	Plastique + FV	FV + FC
Fabricant des pales	Southwest Windpower	Southwest Windpower	Southwest Windpower
Vitesse de rotation	-	-	-
Type	Face au vent	Face au vent	Face au vent
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct	Entraînement direct	Entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	Aimants permanents	Aimants permanents	Aimants permanents
Vitesse de rotation maxi.	900 tr/min	750 tr/min	600 tr/min
Tension	12/24/48V	12/24/48V	24/48V
Connexion au réseau	non	non	possible
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	Effacement	Effacement	Effacement
Régulation survitesse	Effacement	Effacement	Effacement
Orientation	Gouvernail aval	Gouvernail aval	Gouvernail aval
Système de freinage	non	non	non
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	8 à 20 m	8 à 20 m	8 à 20 m
Masses :			
Nacelle complète	21 kg	30 kg	70 kg
Options :			

SOUTHWEST WINDPOWER	AIR 403		
Southwest Windpower Inc. 2131 N. first street Flagstaff, Arizona 86004 USA Tél. (928) 779-9463 Fax (928) 779-1485 http://www.windenergy.com info@windenergy.com			
Performances :			
Puissance nominale	400W		
Vitesse de vent de démarrage	3,0 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	12,5 m/s		
Vitesse de vent maximale de service	50 m/s		
Rotor :			
Diamètre	1,14 m		
Surface balayée	1,02 m²		
Nombre de pales	3		
Matériau	Composite FC		
Fabricant des pales	Southwest Windpower		
Vitesse de rotation	2750 tr/min		
Type	Face au vent		
Multiplicateur :			
Type	Entraînement direct		
Rapport	-		
Générateur :			
Type	Aimants permanents		
Vitesse de rotation	2750 tr/min		
Tension	12/24/48 Vdc		
Connexion au réseau	non		
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	électronique		
Régulation survitesse	Décrochage/électronique		
Orientation	Gouvernail aval		
Système de freinage	électronique		
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	Non fournis		
Masses :			
Nacelle complète	6,2 kg		
Options :			
Version standard			
Version industrielle			
Version marine			

TRAVERE AEROGENERATEURS	TA 2.6-1200	TA 3.6-2000	TA 5.6-5000
Travère Aérogénérateurs 341 av. Sainte Marguerite 06200 NICE France www.travere.com contact@travere.com Tél. 04 93 83 78 97 Fax. 04 93 72 37 66			
Performances :			
Puissance nominale	1,2 kW	2 kW	5 kW
Vitesse de vent de démarrage	3,5 m/s	3,0 m/s	3,0 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	11,5 m/s	11 m/s	10,5 m/s
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	60 m/s	60 m/s
Rotor :			
Diamètre	2,65 m	3,6 m	5,6 m
Surface balayée	5,5 m²	10,2 m²	24,6 m²
Nombre de pales	2	2	2
Matériau	Bois + epoxy	composite	composite
Fabricant des pales	Halter	Helium	Helium
Vitesse de rotation	600 tr/min	420 tr/min	225 tr/min
Type	face au vent	face au vent	face au vent
Multiplicateur :			
Type	entraînement direct	entraînement direct	entraînement direct
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation max.	600 tr/min	420 tr/min	225 tr/min
Tension	110Vac	110Vac	110/380Vac
Connexion au réseau	option	option	option
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	centrifuge	centrifuge	centrifuge
Régulation survitesse	centrifuge	centrifuge	centrifuge
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	gouvernail aval
Système de freinage	-	-	-
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	6-12-18 m	6-12-18m	12-18-24m
Masses :			
Nacelle complète	55 kg	105 kg	350 kg
Options :			
Protection marine			
Contacteur électrique tournant			
Version 50/60 Hz pompage direct	-		

VERGNET SA	GEV 5/5	GEV 7/10	GEV 10/15
6 rue Henri Dunant 45140 INGRE France Tél. +33 (0) 238 52 35 60 Fax +33 (0) 238 52 35 83 http://www.vergnet.fr eole@vergnet.fr			
Performances :			
Puissance nominale	5kW	10kW	15kW
Vitesse de vent de démarrage	4,5 m/s	4 m/s	4,5 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	15 m/s	12 m/s	13 m/s
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	80 m/s	60 m/s
Rotor :			
Diamètre	5 m	7m	10 m
Surface balayée	19,63 m²	38,48 m²	78,54 m²
Nombre de pales	2	2	2
Matériau	Composite	Bois	Composite
Fabricant des pales			
Vitesse de rotation	259 tr/min	190 tr/min	139 tr/min
Type	Face au vent	Face au vent	Face au vent
Multiplicateur :			
Type	engrenages	engrenages	engrenages
Rapport	5,78	8,48	11,10
Générateur :			
Type	Asynchrone triphasé	Asynchrone triphasé	Asynchrone triphasé
Vitesse de rotation	1500 tr/min	1500 tr/min	1500 tr/min
Tension	400V-50hz-tri	400V-50hz-tri	400V-50hz-tri
Connexion au réseau	oui	oui	oui
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	Centrifuge/décrochage	Centrifuge/décrochage	Centrifuge/décrochage
Régulation survitesse	Centrifuge/décrochage	Centrifuge/décrochage	Centrifuge/décrochage
Orientation	Gouvernail aval	Gouvernail aval	Gouvernail aval
Système de freinage	Option	Oui, cde mécanique	Oui, cde mécanique
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	12 – 18m	18 – 24 – 30m	18 – 24 – 30m
Masses :			
Nacelle complète	390 kg	550 kg	570 kg
Nacelle + mât 12 m	980 kg	-	-
Nacelle + mât 18 m	1180 kg	2030 kg	2050 kg
Nacelle + mât 24 m	-	2430 kg	2450 kg
Nacelle + mât 30 m	-	2830 kg	2850 kg
Options :			
Protection marine			
Collecteur électrique tournant			
Version 60 Hz			

VERGNET SA	GEV 10/20	GEV 15/60	
6 rue Henri Dunant 45140 INGRE France Tél. +33 (0) 238 52 35 60 Fax +33 (0) 238 52 35 83 http://www.vergnet.fr eole@vergnet.fr			
Performances :			
Puissance nominale	20 kW	60 kW	
Vitesse de vent de démarrage	4,5 m/s	5 m/s	
Vitesse de vent de puissance nominale	16 m/s	15 m/s	
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	50 m/s	
Rotor :			
Diamètre	10 m	15 m	
Surface balayée	78,54 m²	176,7 m²	
Nombre de pales	2	2	
Matériau	Composite	Composite	
Fabricant des pales			
Vitesse de rotation	139 tr/min	92 tr/min	
Type	Face au vent	Sous le vent	
Multiplicateur :			
Type	engrenages	engrenages	
Rapport	11,10	16,75	
Générateur :			
Type	Asynchrone triphasé	Asynchrone triphasé	
Vitesse de rotation	1500 tr/min	1500 tr/min	
Tension	400/690V-50hz-tri	400/690V-50hz-tri	
Connexion au réseau	oui	oui	
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	Centrifuge/décrochage	Centrifuge/décrochage	
Régulation survitesse	Centrifuge/décrochage	Hydraulique	
Orientation	Gouvernail aval	Machine sous le vent	
Système de freinage	Oui, cde mécanique	Oui, cde mécanique	
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	18 – 24 – 30 m	24 – 30 – 40 m	
Masses :			
Nacelle complète	620 kg	2400 kg	
Nacelle + mât 18 m	2100 kg	-	
Nacelle + mât 24 m	2500 kg	5800 kg	
Nacelle + mât 30 m	2900 kg	6400 kg	
Options :			
Protection marine		-	
Collecteur électrique tournant			
Version 60 Hz			

WESTWIND	2,5kW	5kW	10kW
29 Owen Road Kelmscott Western Australia 6111 Australia Tél. 61 8 9399 526 Fax. 61 8 9497 1335 http://www.venwest.iinet.net.au venwest@iinet.net.au			
Performances :			
Puissance nominale	2,5kW	5,0kW	10kW
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s	3 m/s	3 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	14 m/s	14 m/s	13,5 m/s
Vitesse de vent maximale de service	60 m/s	60 m/s	60 m/s
Rotor :			
Diamètre	3,5 m	5,1 m	7,0 m
Surface balayée	9,62 m²	20,42 m²	38,48 m²
Nombre de pales	3	3	3
Matériau	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
Fabricant des pales	-	-	-
Vitesse de rotation	160-900 tr/min	160-900 tr/min	110-600 tr/min
Type	face au vent	face au vent	face au vent
Multiplicateur :			
Type	-	-	-
Rapport	-	-	-
Générateur :			
Type	aimants permanents	aimants permanents	aimants permanents
Vitesse de rotation	160-900 tr/min	160-900 tr/min	110-600 tr/min
Tension	24/48/96/120 Vdc	48/96/120 Vdc	110/120 Vdc
Connexion au réseau	non	non	non
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Régulation survitesse	effacement rotor	effacement rotor	effacement rotor
Orientation	gouvernail aval	gouvernail aval	gouvernail aval
Système de freinage	aucun	aucun	aucun
Mâts :			
Mâts haubanés basculant	18 – 24m	24 m	18 – 24 – 30 m
Masses :			
Nacelle complète	190 kg	250 kg	500 kg
Nacelle + mât 18 m	790 kg	-	-
Nacelle + mât 24 m	1140 kg	1200 kg	1600 kg
Nacelle + mât 30 m	-	-	2000 kg
Options :			

WTIC	JACOBS 20kW		
Wind Turbine Industries, Corp. 16801 Industrial Circle S.E. Prior Lake, Minnesota 55372 USA Phone 952-447-6064 Fax 952-447-6050 http://www.windturbine.net/ wtic@windturbine.net			
Performances :			
Puissance nominale	20 kW		
Vitesse de vent de démarrage	3,6 m/s		
Vitesse de vent de puissance nominale	12,0 m/s		
Vitesse de vent maximale de service	54 m/s		
Rotor :			
Diamètre	9,6 m		
Surface balayée	72,4 m²		
Nombre de pales	3		
Matériau	composite		
Fabricant des pales	-		
Vitesse de rotation	175 tr/min		
Type	face au vent		
Multiplicateur :			
Type	hypoïde		
Rapport	6,1		
Générateur :			
Type	synchrone + excitation		
Vitesse de rotation max.	1050 tr/min		
Tension	40-180 Vac		
Connexion au réseau	oui		
Régulation et système de sécurité :			
Régulation de vitesse rotor	centrifuge + effacement		
Régulation survitesse	effacement		
Orientation	gouvernail aval		
Système de freinage	frein à disque		
Mâts :			
Mâts treillis tubulaire	27-33-40 m		
Masses :			
Nacelle complète	1160 kg		
Options :			